

Hochauflösende Ultraschallprüfung zur Ermittlung mikroskopischer Einschlüsse in hochbelasteten Bauteilen

Dirk GOHLKE, Klaus MATTHIES
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachgruppe VIII.4, Akustische und Elektromagnetische Verfahren
Arbeitsgruppe VIII.43, Ultraschallsonderprüftechniken
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Tel.: +49 30 8104 4661
Fax.: +49 30 8104 1846
dirk.gohlke@bam.de

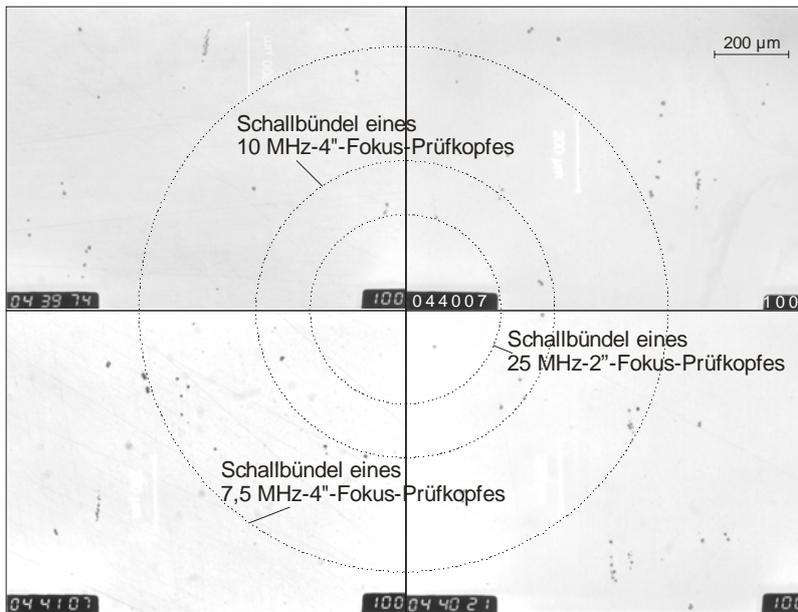
Kurzfassung. Die Ultraschallprüftechniken zur Bestimmung des Reinheitsgrades von Stählen gewinnen immer mehr an Bedeutung, erkennbar u.a. auch am Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1927 "Ultraschall-Tauchtechnik-Prüfung zur Bestimmung des makroskopischen Reinheitsgrades von gewalzten oder geschmiedeten Stäben aus Stahl". Muss aber der mikroskopische Reinheitsgrad bestimmt werden, so müssen die hier vorgeschlagenen Prüftechniken versagen, da die Ultraschallprüfung als integrales Verfahren alle Reflektoren, die sich innerhalb eines Schallbündels befinden, erfasst und diese als einen entsprechend großen Reflektor darstellt. Daher bietet sich als Lösung - wenn überhaupt - nur die Verwendung von stark fokussierten, hochfrequenten Prüfköpfen an.

Die durchgeführten Messungen haben dies bestätigt, so dass es durchaus möglich ist, mit einer geeigneten Ultraschall-Messtechnik den mikroskopischen Reinheitsgrad von Stählen zu bestimmen. Die erzielbare Genauigkeit hängt aber im Wesentlichen davon ab, wie hoch die Anzahl der Einschlüsse pro Volumenanteil ist, also letztendlich vom Schallbündeldurchmesser.

Einleitung

In dem Maße, in dem die Anforderungen an einzelne Komponenten immer höher werden, muss eigentlich auch das Interesse an der Reinheit des Ausgangsmaterials steigen, denn gerade oberflächennahe Einschlüsse können als Rissstarter wirken und somit der Ausgangspunkt für größere Schäden sein. Es reicht also nicht, in Regelwerken maximale Einschlussgrößen von 100 - 200 µm, die durch metallographische Methoden zu ermitteln sind, vorzuschreiben und dann die Komponente mit Ultraschall, z.B. nach der SEP 1927 und einer Registriergrenze von 1 - 2 mm KSR, zu prüfen, denn die geforderten Einschlussgrößen müssen ja für die gesamte Komponente gelten.

Muss also der mikroskopische Reinheitsgrad bestimmt werden, so müssen die im SEP 1927 vorgeschlagenen Prüftechniken - Verwenden von unfokussierten Prüfköpfen - versagen, da die Ultraschallprüfung als integrales Verfahren alle Reflektoren, die sich innerhalb eines Schallbündels befinden, erfasst und diese als einen entsprechend großen Reflektor darstellt



(Abbn. 1 u. 2). Daher bietet sich als Lösung - wenn überhaupt - nur die Verwendung von stark fokussierten, hochfrequenten Prüfköpfen an.

Abb. 1: Metallographie-Befunde im Vergleich zu den Schallbündeldurchmessern einiger Fokus-Prüfköpfe

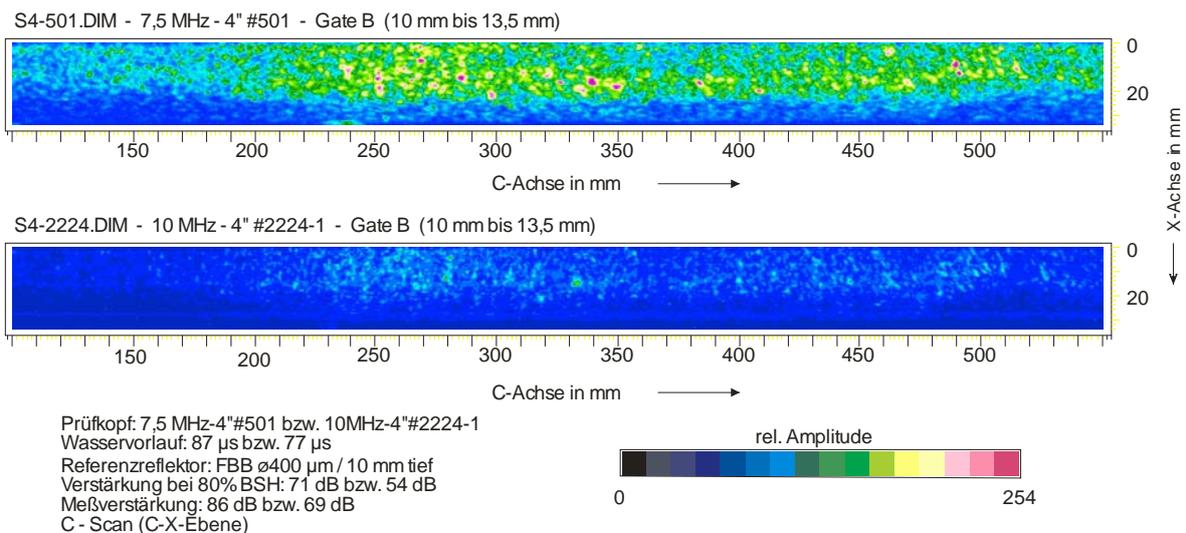


Abb. 2: Ergebnisvergleich zwischen einem 7,5 MHz-4" (Bündeldurchmesser 1,5 mm) und einem 10 MHz-4" (Bündeldurchmesser 0,75 mm)-Fokusprüfkopf

Tauchtechnik-Messung

Das wichtigste Maß für die Klassierung von Defektanzeigen ist in der Praxis die Amplitude dieser Anzeigen. Bei allem berechtigten Zweifel an dem Sinn und der Eindeutigkeit dieser Informationsquelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Amplitude immer der erste Hinweis ist, durch den sich eine irgendwie bemerkenswerte Reflexionsstelle auszeichnet.

Mit den auf die Amplitude bezogenen Verfahren (z.B. AVG- u. DAC-Methode) konkurrieren vor allem die Abtastverfahren, bei denen Halbwerts- oder Registrierausdehnungen ermittelt werden. Naturgemäß sind Abtastverfahren aber mit dem am Fehlerort vorliegenden Schallbündeldurchmesser verknüpft. Das bedeutet: Fehler, die kleiner als der

Schallbündeldurchmesser sind, werden durch diese Art der Fehlergrößenbestimmung immer viel zu groß angezeigt, da mit ihnen nur die Ausdehnung des Schallfeldes ausgemessen wird. Dies gilt auch für die Größenbestimmung aus den C-Bildern. Erst wenn ein Reflektor größer als das am Ort des Reflektors vorhandene Schallbündel ist, läßt sich auf diese Art seine Ausdehnung in etwa bestimmen.

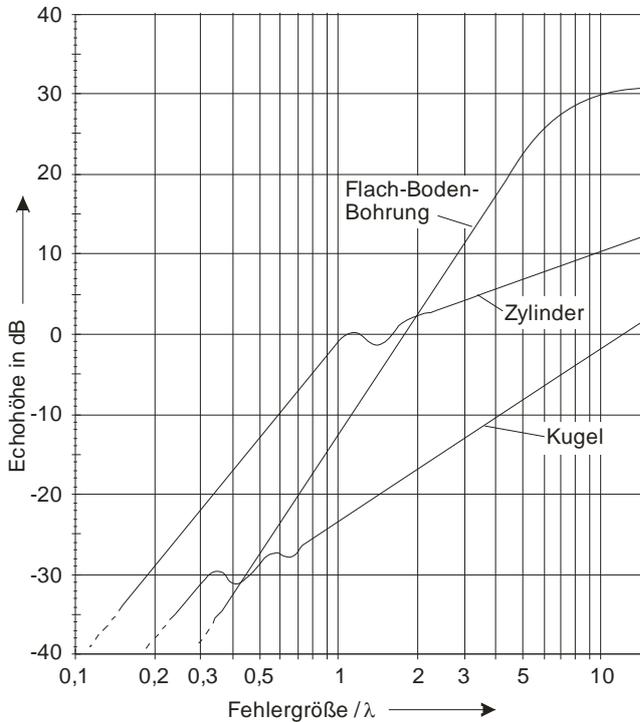


Abb. 3: Echohöhen-Abhängigkeit einfacher Reflektorformen

Bei den Amplituden-Auswerte-Verfahren muss beachtet werden, daß je nach Reflektorform eine unterschiedliche Abhängigkeit der Amplitude von der Fehlergröße zu erwarten ist. Die Abb. 3 zeigt eine Zusammenstellung der Echohöhen-Abhängigkeit von der Fehlergröße für verschiedene einfache Reflektorformen.

Deutlich erkennbar ist die herausragende Stellung von Kreisscheibenreflektoren (KSR) bzw. Flachbodenbohrungen (FBB), bei denen sowohl eine starke Abhängigkeit der Echohöhe von der Reflektorgröße als auch ein großer Dynamikbereich auftreten. Anders als bei den anderen Reflektortypen sind bis zu sehr kleinen Fehlergröße/ λ -Verhältnissen ($\approx 0,1 - 0,2$) keine Interferenzerscheinungen, wie sie bei den volumetrischen Reflektoren (Kugel und Zylinder) relativ früh auftreten, zu beobachten. Daher erfolgt, bis auf wenige Ausnahmen, die Ermittlung der Ersatzfehlergröße mit Bezug auf den Kreisscheibenreflektor.

Daher erfolgt, bis auf wenige Ausnahmen, die Ermittlung der Ersatzfehlergröße mit Bezug auf den Kreisscheibenreflektor.

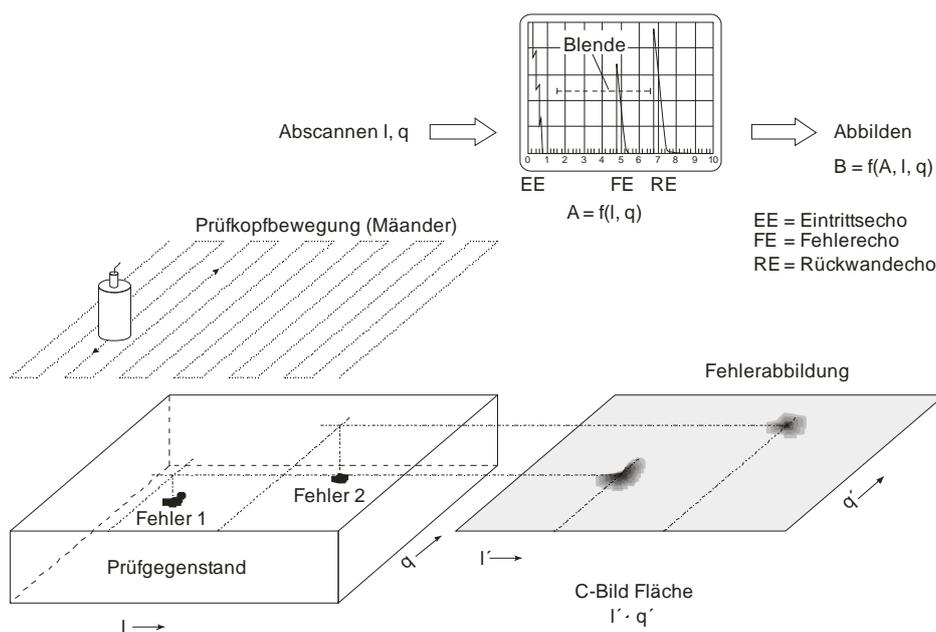


Abb. 4: Schemabild zum Abscannen eines Prüfgegenstandes und Abbilden der Messdaten als C-Bild

Für die Prüfung bedeutet dies, dass mit einer Prüffrequenz von z.B. 10 MHz die Grenze der einfachen Beschreibbarkeit von Einschlüssen bei ca. 100 μm liegt. Dies bedeutet nicht, dass kleinere Defekte nicht mehr detektierbar sind, sie reflektieren nur nach anderen Gesetzmäßigkeiten. Im vorliegenden Fall - nach einem Übergangsbereich - als Rayleigh-Streuer.

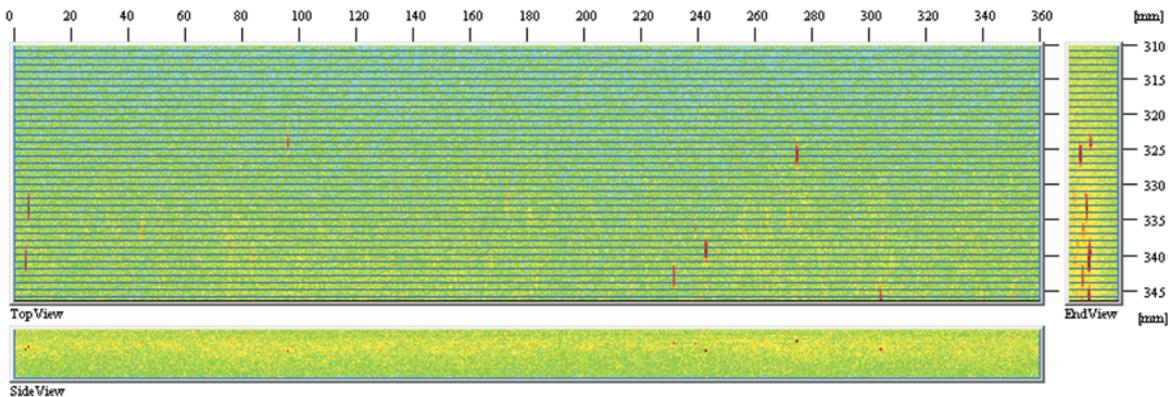


Abb. 5: P-Bild einer Ultraschall-Tauchtechnikprüfung eines Rollenlagerinnenringes

Die einfache Beschreibbarkeit von Einschlüssen nach der "Ersatzfehler-Methode" sollte allerdings niemanden dazu verleiten, anzunehmen, daß die ermittelte Ersatzfehler-Größe mit der tatsächlich vorhandenen Defekt-Größe identisch ist, die Reflexionseigenschaften sind nur identisch! Grund für diese Diskrepanz sind u.a. die Defekt-Geometrie, die Defekt-Oberfläche und die Defekt-Orientierung. Alle diese Eigenschaften bestimmen das Reflexionsverhalten und somit auch die ermittelte Ersatzfehler-Größe. Da aber die zu detektierenden Defekt-Größen im vorliegenden Fall immer kleiner sind als der Schallbündeldurchmesser der verwendeten Prüfköpfe, ist dies trotzdem die einzig sinnvolle Methode für das vorliegende Prüfproblem.

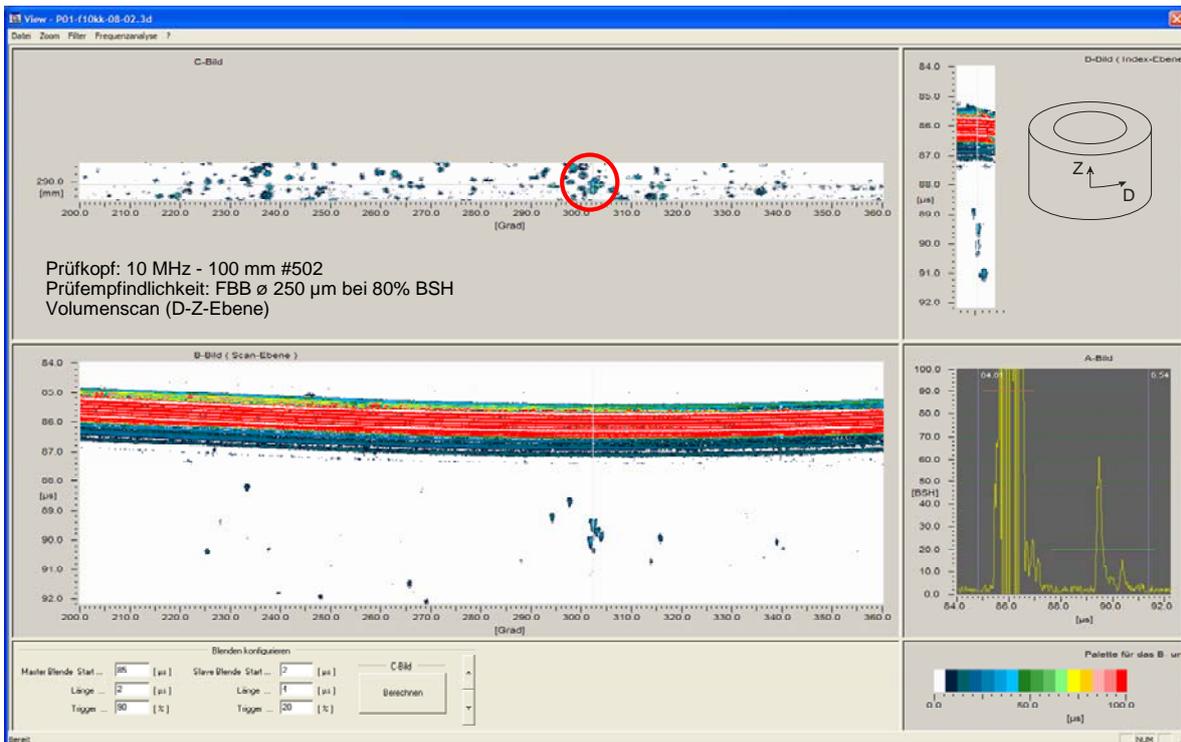


Abb. 6. Volumenscan (Screenshot) eines Teilstückes einer Radsatzwelle

Die Prüfung selber erfolgte nach dem Tauchtechnik-Prinzip unter Einbeziehung der C-Bild-Technik mit einem an die jeweilige Komponente angepassten Scannaster. Da bei dieser Technik die Amplituden über der Prüffläche dargestellt werden (Abb. 4), wobei nur die Informationen verwendet werden, die sich in einem sogenannten Gate - einer frei wählbaren Blende - befinden, gehen die Tiefeninformationen verloren. Verfügt das verwendete Ultraschallsystem über mehrere Gates, so lassen sich die auszuwertenden Tiefenbereiche entsprechend aufteilen. Eleganter, aber auch aufwändiger, ist ein so genannter Volumenscan, bei dem zu jedem Messpunkt das komplette A-Bild abgespeichert wird, so dass bei der Auswertung beliebige "Tiefenschnitte" gelegt werden können.

Außerdem werden beim C-Bild wie beim Volumenscan die jeweiligen Amplitudenhöhen farb-kodiert wiedergegeben.

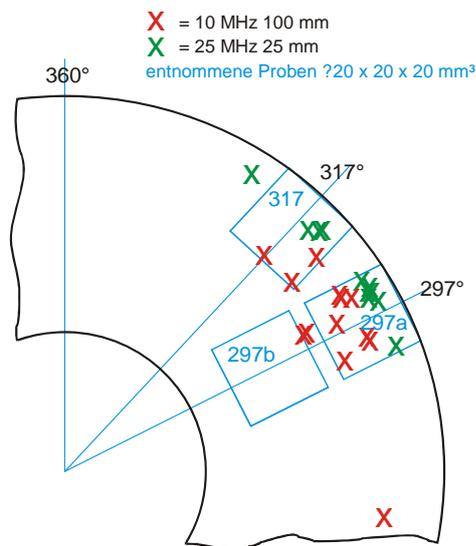


Abb. 7: Darstellung der Anzeigen aus den Ultraschallmessungen und Lage der ausgeschnittenen Proben

Die Abb. 5 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Prüfung eines Rollenlagerinnenringes. Die Registerschwelle lag hier bei 150 µm.

Die Abb. 6 zeigt einen Screenshot von einem Volumenscan einer Prüfung eines Teilstückes einer Radsatzwelle. Die Prüfempfindlichkeit bei 80% BSH lag bei 250 µm KSR. Erkennbar ist die sich bei dieser Empfindlichkeit ergebende „tote Zone“ im oberflächennahen Bereich von ca. 6,5 mm. Da hier ein rotationssymmetrisches Bauteil vorlag, wurde dieser Bereich immer bei der Drehung um 180° mitgeprüft. Platten müssten in diesem Fall von beiden Seiten geprüft werden.

Um eine Verifizierung der Messergebnisse zu erhalten, wurden aus der Radsatzwelle Proben (20x20x20 mm³) an den Stellen entnommen, an denen sich besonders viele Anzeigen ergaben (Abb. 7).

Diese Proben wurden einer nochmaligen Ultraschallprüfung, allerdings mit 25 MHz statt mit 10 MHz, unterzogen. Das Ergebnis der Probe P297a zeigt die Abb. 8.

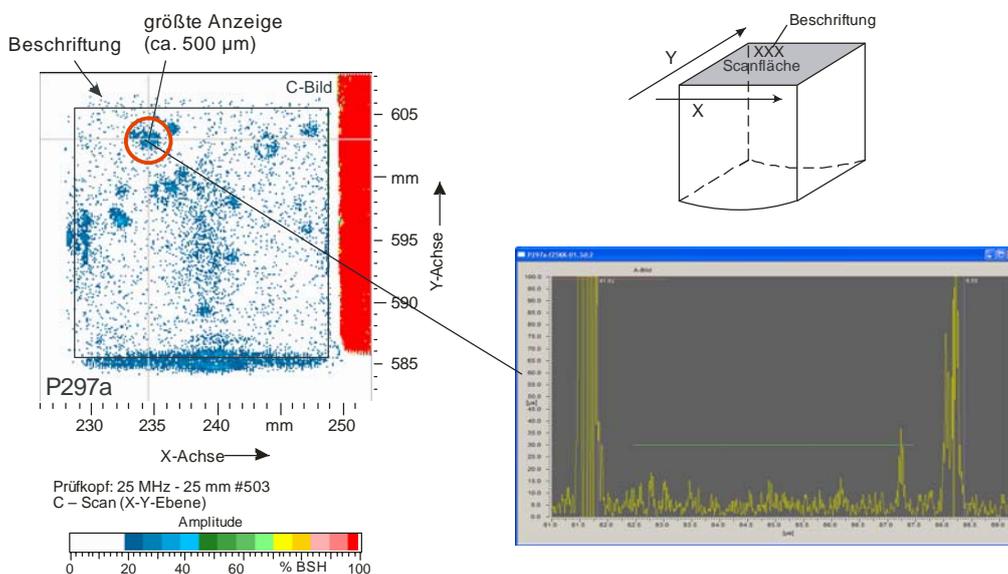


Abb. 8: C-Bild und A-Bild der Ultraschallmessung an der Probe P297a

Eine Computer-Tomographie der Probe P297a zeigt die Abb. 9. Sie bestätigt die Ultraschall-Ergebnisse.

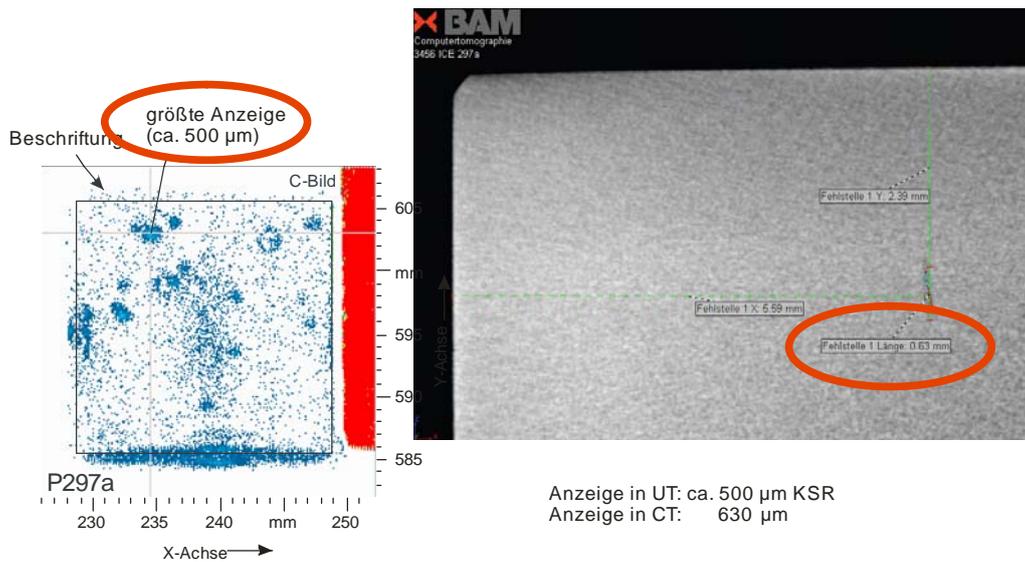


Abb. 9: Vergleich UT- und CT-Messung einer ausgewählten Anzeige aus der Probe P297a

Mit der vorgestellten Prüftechnik sind nicht nur mikroskopisch kleine Einschlüsse nachweisbar, sondern in Anlehnung an DIN 50 602 auch eine Klassierung der Einschlüsse möglich. Um dies zu verdeutlichen, wurden Stahlproben ($40 \times 40 \times 8,5 \text{ mm}^3$) mit einem 25 MHz 2"-Prüfkopf, der im Stahl einen Fokusbereich von 9 mm und einen Fokusschlauch-Durchmesser von 0,5 mm besitzt, untersucht. Die Empfindlichkeit des Ultraschallsystems,

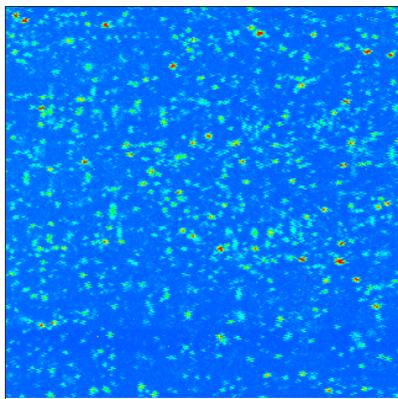


Abb. 10: C-Bild einer Stahlprobe (Volumen: $40 \times 40 \times 8,5 \text{ mm}^3$); Prüfkopf: 25 MHz 2"-Fokus

aufgenommen an einer 400 µm -Flachbodenbohrung, wurde so eingestellt, dass Ersatzreflektorgrößen bis 110 µm ausgemessen werden konnten. Ein Messergebnis zeigt die Abb. 10, bei der Anzeigen $>110 \text{ µm}$ rot erscheinen. Da im Rechner die Amplitudenwerte abgespeichert sind, lassen sich durch entsprechende Umrechnungen und Schwellensetzung bestimmte Ersatzreflektoren darstellen und durch eine spezielle Software ihre Anzahl ermitteln (Abb. 11).

Da das Ultraschall-Verfahren ein volumetrisches Verfahren ist, erschien es sinnvoll, die vorhandenen Einschlüsse auf ein spezielles Volumen zu beziehen (s.a. SEP 1927). Denkbar ist aber auch eine Auswertung, die in Anlehnung an DIN 50 602 erfolgt, also bezogen auf eine spezielle Fläche, mit Angaben über Größe und Anzahl der jeweiligen Einschlüsse.

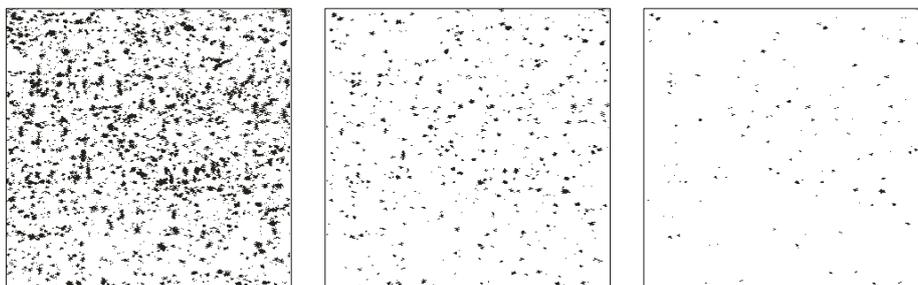


Abb. 11: Aus Amplitudenwerten und Schwellensetzung ermittelte Ersatzreflektorgrößen

Dies hätte den Vorteil, dass man in einem bekannten System bleibt, auch wenn man sich darüber im Klaren sein muss, dass die ermittelten Einschlussgrößen nicht exakt mit den tatsächlich vorhandenen übereinstimmen. Die Vorgehensweise einer derartigen Auswertung könnte dann folgendermaßen erfolgen:

Aus den in der Abb. 11 dargestellten Ergebnissen lassen sich, da in Abb. 11a alle Ersatzreflektorgrößen $> 53 \mu\text{m}$, in Abb. 11b alle Reflektoren $> 76 \mu\text{m}$ und in Abb. 11c alle Reflektoren $> 110 \mu\text{m}$ dargestellt sind, durch einfache Subtraktion die unterschiedlichen Ersatzreflektorgrößen-Bereiche entsprechend Bildtafel 1, Reihe 8, OG (DIN 50 602) ermitteln (Tab. 1).

Tab. 1: Anzahl der Reflektoren in den Ersatzfehlergrößen-Bereichen

Größenbereich (Kennwert)	Anzahl
$\emptyset 53 \mu\text{m} < x \leq \emptyset 76 \mu\text{m}$ (K5 _U *)	905
$\emptyset 76 \mu\text{m} < x \leq \emptyset 110 \mu\text{m}$ (K6 _U *)	363
$> \emptyset 110 \mu\text{m}$ (K7 _U *)	126

Tab. 2: Gemittelte Anzahl der Reflektoren auf eine Schichtdicke von $100 \mu\text{m}$ bezogen (Anzahl / 85)

Kennwert	Anzahl
K5 _U *	10,6
K6 _U *	4,3
K7 _U *	1,5

*) Kennwert mit Ultraschall ermittelt, in Anlehnung an DIN 50 602, Bildtafel 1, Reihe ((OG)

In DIN 50 602 wird gefordert, dass die Bestimmung des Reinheitsgrades im Allgemeinen an mindestens 6 Proben zu erfolgen hat. Hier besitzt gerade die Ultraschallprüfung einen weiteren großen Vorteil aufgrund der Erfassung eines größeren Tiefenbereiches mit einer Messung, über den gemittelt werden kann. Ausgewählt werden muss allerdings eine sinnvolle Schichtdicke mit der das Messergebnis gemittelt werden soll. Hier bietet sich z.B. die mittlere Einschlussgröße nach DIN 50 602, also $100 \mu\text{m}$, an. Wird diese Schichtdicke für die Mittelung auf die in der Tab. 1 angegebenen Werte angewendet, so müssen diese, bei einem Tiefenbereich von $8,5 \text{ mm}$, durch 85 dividiert werden (Tab. 2).

Eine weitere Umrechnung muss noch aufgrund der geforderten Standartfläche von 1000 mm^2 erfolgen. Somit ergeben sich die in Tab. 3 dargestellten, nach DIN 50 602 mit Ultraschall ermittelten Kennwerte und in Tab. 4 die Metallographisch ermittelten Kennwerte.

Tab. 3: Mit Ultraschall ermittelte Kennwerte

Kennwert	Anzahl
K5 _U *	6,6
K6 _U *	2,7
K7 _U *	0,9

Tab. 4: Metallographisch ermittelte Kennwerte

Kennwert	Anzahl
K0	27,5
K4	8

Erkennbar ist die relativ große Differenz zwischen den unterschiedlich ermittelten Kennwerten, die zum einen auf die bereits geschilderten Messprobleme (großes Schallbündel), zum anderen aber wohl auch darauf zurückzuführen sind, dass an unterschiedlichen Stellen gemessen wurde, denn bei der Ultraschallmessung zeigte sich, dass die Einschlüsse nicht gleichmäßig über den Tiefenbereich verteilt sind.

Zuvor durchgeführte Untersuchungen ergaben allerdings auch, dass ein direkter Vergleich sehr schwierig ist, da eine genaue Tiefenbestimmung der metallographisch auszuwertenden

Schliffebene mit Ultraschall nicht möglich ist. Dies mag im ersten Moment verblüffen, da doch mit den heutigen Messmethoden i.a. sehr genaue Dickenmessungen möglich sind.

Die Genauigkeit der Tiefenbestimmung ist, wenn die Schallgeschwindigkeit bekannt ist, abhängig vom Start und Stopp der Laufzeitmessung. Bei Bildschirmgeräten erfolgt dies durch die Justierung und ein möglichst exaktes Ablesen der Bildschirmposition des auszuwertenden Echos. Die erzielte Genauigkeit kann nicht größer werden als die Genauigkeit, mit der das Gerät die Echos auf dem Bildschirm abbilden kann, in der Regel $\pm 0,5 - 1\%$ vom Skalenendwert. Moderne Geräte verfügen zusätzlich über sehr genaue Zeitmesssysteme, mit denen über einstellbare Monitor-Blenden (Gates) genauere Laufzeitmessungen zwischen ausgewählten Echos erfolgen können. Aber auch diese Systeme benötigen exakte Start- und Stopp-Punkte, um innerhalb ihrer Toleranz genau messen zu können und genau hier liegen die Probleme.

Für die Wanddicken-Messung sind verschiedene Verfahren entwickelt worden, um diese Punkte möglichst genau zu bestimmen, aber auch dann kann man unter optimalen Bedingungen nur mit einer Genauigkeit von max. $\pm 0,01$ mm rechnen. Diese Bedingungen liegen aber beim vorliegenden Problem nicht vor. Im Gegenteil, die verwendeten Prüfköpfe sind, im Gegensatz zu denen bei der Dickenmessung, sehr schmalbandig und können dadurch schon zu Fehlmessungen führen. Hinzu kommt, dass die beteiligten Echos (Eintritts- und Fehlerecho) sehr stark in ihrer Amplitude differieren (bis zu 60 dB), wodurch es unmöglich ist, weder vom Menschen - durch Ablesen - noch durch die Elektronik, immer den Anfangs- oder einen anderen ausgezeichneten Punkt der Echos zu bestimmen. Das bedeutet aber, daß die gewünschte Genauigkeit unter keinen Umständen zu erreichen ist. An $\varnothing 200$ μm -Flachbodenbohrungen durchgeführte Versuche ergaben, dass die erzielbare Genauigkeit nicht besser als $\pm 0,2$ mm sein kann.

Bitte benutzen Sie immer das Papierformat A4. Der Inhalts-Bereich ist 15,6 cm breit und 25,2 cm lang. Dieser Bereich sollte maximal ausgenutzt und nicht überschritten werden. Die folgenden Ränder-Einstellungen in Microsoft Word liefern ein korrektes Ergebnis: Oben 2,5 cm; Unten 2 cm; Links und Rechts jeweils 2,7 cm.

Fazit

Die Messungen haben gezeigt, dass es durchaus möglich ist, mit einer geeigneten Ultraschall-Messtechnik den mikroskopischen Reinheitsgrad von Stählen zu bestimmen. Die erzielbare Genauigkeit hängt aber im Wesentlichen davon ab, wie hoch die Anzahl der Einschlüsse pro Volumenanteil ist, also letztendlich vom Schallbündeldurchmesser. Tendenziell wird man aber davon ausgehen müssen, dass die mit Ultraschall gemessenen Einschlussgrößen im Mittel größer sind, als die durch eine metallographische Auswertung erhaltenen Werte. Man darf bei der Betrachtung der Genauigkeit aber nicht außer acht lassen, dass auch die metallographische Auswertung mit sehr großen Fehlern behaftet sein kann, denn sowohl die Probenvorbereitung wie die Größenermittlung bzw. die Bestimmung der Anzahl der Einschlüsse sind nicht unproblematisch.

Wenn eine Auswertung in Anlehnung an DIN 50 602 vorgenommen wird, sind mit der "normalen" Ultraschall-Messtechnik wegen des begrenzten Dynamikumfanges mit einer Messung max. 3 Kennwerte zu ermitteln. Stehen logarithmische Verstärker mit z.B. 64 dB Dynamikumfang zur Verfügung, so lassen sich, wenn die Schallschwächung es zuläßt, alle Kennwerte mit einer Messung bestimmen.