

EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung

Dissertation zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von
Dipl.-Phys. Frank Niese
Saarbrücken
2010

Tag des Kolloquiums: 26. Mai 2010

Dekan: Prof. Dr. Stefan Diebels

Berichterstatter: Prof. Dr. Walter Arnold

Prof. Dr. Anton Erhard

Vorsitz: Prof. Dr. Ralf Busch

Akad. Mitarbeiter: Dr. Frank Aubertin

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken.

Großer Dank gilt den Herren Dr. G. Dobmann, Dr. G. Hübschen und Dr. H.-J. Salzburger für die wissenschaftliche Begleitung, den großen Erfahrungsschatz, besonders im Bereich der EMUS-Technik, den sie mir haben zukommen lassen und die vielen fachlichen und nicht-fachlichen Diskussionen. Ohne sie wäre ein Gelingen der Arbeit kaum möglich gewesen.

Auch aus den technischen Abteilungen habe ich mit Rat und Tat Unterstützung erhalten. Den vielen IZFP-Mitarbeitern danke ich für das kollegiale Arbeitsklima, die Hilfsbereitschaft und die Zusammenarbeit, insbesondere Frau C. Carabeti und Herrn M. Schuppmann für die tatkräftige Hilfe im Bereich Elektronik und Sensorfertigung sowie Herrn A. Yashan für Unterstützung und Anregungen zum Thema Wirbelstrom.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an die Fa. NDT Systems & Services AG, Stutensee, besonders an die Herren H. Willems, O.-A. Barbian und T. Sickinger, da sie in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZFP das Wagnis eingegangen sind, den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prototypsensor in ein praxistaugliches Messsystem zu überführen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse sind eine echte Bereicherung für diese Arbeit.

Dank schulde ich auch der Fraunhofer Gesellschaft für die finanzielle Unterstützung in Form einer Sonderinvestition „EMUS-Wanddicken-Molch“.

Abschließend möchte ich mich natürlich auch bei Herrn Prof. W. Arnold bedanken, der bereit war, die Betreuung der Dissertation zu übernehmen, und für unsere konstruktiven Diskussionen.

Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht [NIE2006, NIE2007A, WIL2009] und führten zu Patentanmeldungen [YAS2005, YAS2007].

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein elektromagnetischer Ultraschall (EMUS) Prüfkopf entwickelt, der in der Lage ist, linear polarisierte Scherwellen bei senkrechter Einschallung mit Hilfe einer horizontalen Vormagnetisierung des Prüfobjekts anzuregen und zu detektieren. Das Schallfeld ist zur Bestimmung der Wanddicke von Stahlblechen und Rohrwänden optimiert. Der Fokus wurde auf die Bestimmung der Restwanddicke bei korrosionsbedingtem Wandabtrag gelegt.

Ist eine Wanddickenreduktion auf der dem Sensor zugewandten Seite, kann es durch die Sensorabhebung vom Prüfobjekt zu einem kompletten Ausfall des Ultraschallsignals kommen. Deshalb wurde der EMUS-Prüfkopf so ausgestaltet, dass er gleichzeitig auch als Wirbelstrom- und Streuflusssensor genutzt werden kann. Mit der integrierten Wirbelstromprüfung, die das EMUS-Anregungssignal als Impulswirbelstromanregung nutzt, kann die Sensorabhebung bzw. eine mögliche Wanddickenreduktion an der dem Sensor zugewandten Oberfläche zeitgleich zur Ultraschallmessung detektiert werden. Parallel dazu nutzt man bei der integrierten Streuflussprüfung die horizontale Magnetisierung und die EMUS-Empfangsspule als Streufeldsensor. Da der Streufeldanteil sehr niederfrequent gegenüber dem Wirbelstrom- und Ultraschallanteil ist, können die Signalanteile durch Bandfilter voneinander getrennt und ausgewertet werden.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen, dass der neue Sensor die Anforderungen für eine hoch auflösende In-line-Inspektion von Gas-Pipelines erreicht.

Abstract

An electromagnetic acoustic transducer (EMAT) has been developed for excitation and detection of linear polarised shear waves at normal incidence with the use of a horizontal magnetisation of the specimen. The sound field is optimised for the measurement of the wall thickness of steel plates and pipe joints. Special focus is on determining the remaining wall thickness in case of metal loss.

If metal loss is present at the surface beneath the transducer, it is impossible to determine the remaining wall thickness because the lift-off of the EMAT caused by the wall thickness reduction may lead to a complete loss of the ultrasonic signal. In order to ensure reliable measurement for this case, the EMAT technique is combined with the eddy current technique (EC) and the magnetic flux leakage (MFL). The EC technique, that uses the EMAT excitation signal as a pulsed EC excitation, is able to detect metal loss at the transducer-near side by measuring the transducer lift off, simultaneously to the electromagnetic ultrasonic inspection. Additionally, a MFL signal is derived by making use of the horizontal magnetisation and the EMAT receiver coil as flux leakage sensor. The MFL signal can be separated and analysed by appropriate filtering because it contains mainly low-frequency components as compared to the high frequency EC signal respectively ultrasonic signal.

Results obtained so far show that the new probe meets the requirements for high-resolution in-line inspection of gas pipelines.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation.....	5
1.1	Technische Aufgabenstellung.....	5
1.2	Lösungsansatz	6
2	Pipeline-Prüfung	9
2.1	Pipelines	9
2.2	Fehlerarten	9
2.3	Prüfsysteme, Molche.....	12
2.4	Zustandsbewertung	17
3	Grundlagen der elektromagnetischen Ultraschallwandlung.....	19
3.1	Elastische Wellen	19
3.2	EMUS-Wandler	19
3.3	Die Wechselwirkungsmechanismen.....	21
3.3.1	Grundgleichungen	21
3.3.2	Anregung über Lorentzkräfte.....	25
3.3.3	Anregung über die magnetische Kraft.....	25
3.3.4	Magnetostriktive Anregung	25
3.3.5	Empfangsmechanismen	27
4	Entwicklung und Optimierung eines EMUS-Wanddickensensors für die Pipeline-Prüfung	28
4.1	Magnetostriktiver Arbeitspunkt	29
4.1.1	Magnetfeld und Ultraschallwandlung.....	29
4.1.2	Untersuchung der Wandlungseffizienz bei Variation der Horizontalfeldstärke.....	30
4.1.3	Auswahl des Arbeitspunktes	32
4.2	Schallfelduntersuchungen	35
4.2.1	Prinzipielle Schallfelduntersuchungen an verschiedenen Spulengeometrien	37
4.2.2	Modenreinheit	45
4.2.3	Schallfeld des optimierten EMUS-Spulensystems	49
4.2.4	Echosignalbreite an Testfehlern und Rückwandechoamplituden des optimierten EMUS-Spulensystems	54
4.2.5	Anschauliche Erklärung des Wechselwirkungsmechanismusses am Beispiel einer Rundspule.....	57
4.3	Optimierung des Empfangskreises zur Verkürzung der Totzone.....	60
4.4	Zusammenfassung der Entwicklung und Optimierung.....	63

5	Integration der Wirbelstromprüftechnik	64
5.1	Motivation für die Integration der Wirbelstromprüftechnik	64
5.2	Grundlagen des Wirbelstromprüfverfahrens	64
5.3	Erweiterung des EMUS-Wanddickensensors mit dem Wirbelstromverfahren	67
5.4	Wirbelstrommessungen mit dem optimierten EMUS-Spulensystem	68
6	Integration des Streuflussverfahrens	74
6.1	Grundlagen des Streuflussverfahrens	74
6.2	Erweiterung des EMUS-Wandlers mit dem Streuflussverfahren	75
6.3	Kalibrierung	78
7	Erprobung des Kombinationssensors	79
7.1	Wanddickenmessung an ebenen Testkörpern	80
7.2	Wanddickenmessung an Gasfernleitungen	94
7.3	Zusammenfassung der Messergebnisse	100
8	Ausblick	102
8.1	Umsetzung in ein Pipeline-Prüfsystem	102
8.2	Rissprüfung	107
9	Zusammenfassung	110
10	Literatur	112
11	Testkörper	119
11.1	Ebene Testkörper	119
11.2	Rohrförmige Testkörper	123
11.2.1	Rohrsegment mit kalottenförmigen Testfehlern	123
11.2.2	Testrohr für Zugversuche	128
11.2.3	Sonstige Testkörper	130
12	Anhang	134
12.1	Messergebnisse zur Bestimmung der magnetostriktiven Wandlungseffizienz	134
12.1.1	Werkstoff ST37	134
12.1.2	Werkstoff X60	134
12.1.3	Werkstoff X70	137
12.1.4	Werkstoff X80	139
12.2	Messergebnisse zur Bestimmung des magnetostriktiven Arbeitspunktes	143

1 Motivation

1.1 Technische Aufgabenstellung

Erdverlegte oder auf See verlegte Rohrleitungen zum Transport von Öl und/ oder Gas sind bedingt durch die Umgebungsbedingungen und die Beschaffenheit des transportierten Mediums auch Korrosion ausgesetzt. Die Gesetzgeber und Aufsichtsbehörden fordern deshalb von den Pipeline-Betreibern ab einem bestimmten Lebensalter der Leitung entweder eine Druckprüfung oder den Einsatz geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren mit sogenannten intelligenten Prüfmolchen (im Englischen: pipeline inspection gauge, PIG). Von den Pipeline-Betreibern werden die Untersuchungen mit Prüfmolchen bevorzugt, da die Druckprüfung mit einem nicht unerheblichen Risiko für ein Versagen der Pipeline versehen ist. Daher werden in bestimmten Zeitintervallen Prüfmolche eingesetzt, die sich mit dem Medium als autark arbeitende Messeinrichtungen in der Leitung fortbewegen und dabei mit Techniken der zerstörungsfreien Prüfung die Rohrwand auf Korrosion (flächiger Wandabtrag, Lochfraß, Spannungsrisskorrosion usw.) hin prüfen.

Für Öl-Pipelines ist dies eine klassische Ultraschallmessung mittels piezoelektrischer Prüfköpfe, die über das Fördermedium Öl den Ultraschallimpuls in die Rohrwand einkoppeln und aus der Laufzeit des Eintrittsechos von der Innenwand und des Rückwandechos von der Außenwand die lokale Wanddicke genau bestimmen. Flächige Korrosion an Innen- und/ oder Außenwand kann anhand einer Wanddickenreduktion erkannt und die Fehlertiefe bestimmen werden.

In Gas-Pipelines können die klassischen Techniken der Ultraschallprüfung wegen des notwendigen flüssigen Koppelmittels nicht eingesetzt werden. Aber auch Techniken bei denen Ultraschallschall über Luft eingekoppelt wird wie Luftultraschall und Laserultraschall, sind in dem hier betrachteten Anwendungsgebiet aus apparativen Gründen oder aufgrund der eingeschränkten Empfindlichkeit nicht einsetzbar. Es wird daher die trocken arbeitende magnetische Streuflusstechnik (Magnetic Flux Leakage, MFL) angewendet, bei der die Rohrwand an der Messstelle mittels eines von einem u-förmigen Magnetisierungsjoch erzeugten magnetischen Gleichfeldes in axialer Richtung aufmagnetisiert wird. An Stellen mit reduzierter Wanddicke oder bei Rissen senkrecht zu den Feldlinien erhöht sich die magnetische Flussdichte und an der Oberfläche treten Streufelder aus dem Prüfobjekt aus. Diese Streufelder können mit Hallsensoren oder Spulen detektiert werden. Die Messsignale können anhand einer vorher durchgeführten Kalibrierung ausgewertet und die Fehlertiefe bestimmt werden. Änderungen in den Materialeigenschaften, den magnetischen Eigenschaften sowie in den mechanischen Spannungszuständen wirken sich deutlich auf die Messung aus. Um zuverlässigere Ergebnisse zu erhalten, ist eine sorgfältige Kalibrierung notwendig und während der Messung dürfen sich die oben genannten Parameter nur marginal ändern. Dies ist jedoch nicht immer gegeben, sodass die Ergebnisse durchaus große Abweichungen aufweisen können. Außerdem steht insbesondere bei größeren Wanddicken nur eine beschränkte Nachweisempfindlichkeit zur Verfügung.

Die Alternative hierzu ist die trocken arbeitende elektromagnetische Ultraschalltechnik (EMUS-Technik) mit der in ähnlicher Weise wie bei der klassischen Ultraschallwanddickenmessung Ultraschallimpulse in der Rohrwand erzeugt und abgenommen werden können und anhand der Laufzeit der Rückwandechosignale die Korrosion tiefenmäßig erfasst wird. Mit dem heute vorhandenen Stand der Technik der trockenen Ultraschalleinkopplung und Abnahme mittels elektrodynamischer/ magnetischer Ultraschallprüfköpfen sind die Voraussetzungen gegeben, Ultraschallprüfmolche mit trockener Ankopplung zu erstellen.

Ein speziell für die Rissprüfung vom Fraunhofer IZFP entwickelter Prüfmolch ist seit mehreren Jahren in der betrieblichen Erprobung [KRÖ2003, TAP2008]. Dieser Prüfmolch ist neben den EMUS-Prüfköpfen für SH-Plattenwellen, die die gesamte Rohrwanddicke erfassen, und Rayleigh-Wellen-Prüfköpfen zur Erfassung der Rohrinnenoberfläche mit Prüfköpfen für die Wanddickenmessung ausgerüstet, die in wenigen um den Umfang verteilten Spuren die Wanddicke aus der Laufzeit senkrecht eingeschallter linear polarisierter Transversalwellen bestimmen.

EMUS-Prüfköpfe benötigen eine Magnetisierungseinrichtung und eine Sende-/ Empfangsspule, mit der im Sendefall Wirbelstromimpulse in der Rohrwand induziert werden; im Empfangsfall werden in dieser Spule elektrische Spannungsimpulse induziert, die der Amplitude des Ultraschallsignal proportional sind. Die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische erfolgt hauptsächlich über die Lorentzkräfte oder über magnetostruktive Kräfte/ Dehnungen, die in der Überlagerung der Wirbelströme mit dem am Ort der Spule vorhandenen Magnetfeld erzeugt werden.

Bei der erstgenannten Umwandlungsart über Lorentzkräfte wird ein am Ort der Sende-/ Empfangsspule in Richtung der Oberflächennormalen verlaufendes statisches Magnetfeld angewendet. Um eine ausreichende magnetische Induktionsdichte und ein kleines Prüfkopfvolumen zu erreichen, wird das Magnetfeld am Ort der Spule konzentriert und die Magnetisierungseinrichtung zusammen mit der Sende-/ Empfangsspule in ein Gehäuse integriert. An ferromagnetischen Materialien bewirkt das Magnetfeld des Prüfkopfes eine mechanische Anziehung der gesamten Einheit an die Rohrwand, sodass große Anstrengungen unternommen werden müssen, um die nahe an der Oberfläche des Prüfobjektes befindliche Spule vor Verschleiß und Beschädigung zu schützen. Besonders kritisch ist dabei die Kombination aus Reibverschleiß über mehrere hundert Kilometer und vielfachem Schlagverschleiß, wie er beim Überfahren von Schweißnähten und Ähnlichen auftritt.

Bei der zweit genannten Umwandlungsart über magnetostruktive Mechanismen wird ein in der Rohrwand horizontal (in axialer oder in Umfangsrichtung) verlaufendes, ebenfalls statisches Magnetfeld erzeugt und die Sende-/ Empfangsspule im homogenen Teil des Magnetfeldes angeordnet, ähnlich wie die Anordnung der Hallsonden bei der Streuflusstechnik.

1.2 Lösungsansatz

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nun ein neuartiger EMUS-Sensor zur Wanddickenmessung entwickelt und optimiert, der in einem horizontalen Magnetfeld betrieben werden kann und der somit erlaubt, die Verschleißproblematik zu umgehen. Außerdem können über die magnetostruktive Wechselwirkung Ultraschallwellen in ferromagnetischen Werkstücken sehr effektiv angeregt und empfangen werden. Bereits R. B. Thompson [THO1978A, THO1979] hat Ende der 1970er Jahre gezeigt, dass über die magnetostruktive Kopplung horizontal polarisierte transversale Plattenwellen angeregt werden können. Dabei wurden EMUS-Wandler mit mäanderförmigen Spulen benutzt. Später haben B. Igarashi und G. A. Alers [IGA1998] beschrieben, wie mit einer geänderten Spulenkonfiguration im horizontalen Magnetfeld Scherwellen über die magnetostruktive Wechselwirkung angeregt werden können, die sich senkrecht zur Probenoberfläche ausbreiten. Vor wenigen Jahren wurde dieser Ansatz am Fraunhofer IZFP erneut aufgegriffen und führte zu einer Patentanmeldung [KRÖ2004].

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Wanddickensensors für den Einsatz zur Pipeline-Inspektion wurde auf den Ansatz, die EMUS-Spule im horizontalen Magnetfeld zu betreiben, zurück gegriffen (Abbildung 1.1). Dabei wird ein u-förmig ausgebildetes Magnetjoch an eine Rohrwand (oder einen Testkörper) angelegt und erzeugt ein horizontal ausgerichtetes Magnetfeld im Testkörper ähnlich wie bei der klassischen Streuflussprüfung. Zwischen den Polschuhen ist die EMUS-Spulenordnung positioniert. Mit dieser Ausführung kann die Sende-/ Empfangsspule weitgehend mechanisch entkoppelt von der Magnetisierungseinheit angeordnet werden. Dadurch können die mechanischen Belastungen auf das empfindliche Spulensystem minimiert werden, da keine Kräfte ausgehend von der Magnetisierungseinheit auf das Spulensystem wirken. Lediglich eine durch einen Aufhängemechanismus ausgeübte geringe Andruckkraft ist notwendig, um das Spulensystem an die Rohrwand anschmiegen zu lassen. Die Andruckkraft muss dabei so eingestellt werden, dass das Spulensystem auch bei Bewegung an der Rohroberfläche anliegt und beim Überfahren von Unebenheiten, zum Beispiel Schweißnähten, die Abhebezeiten minimal sind.

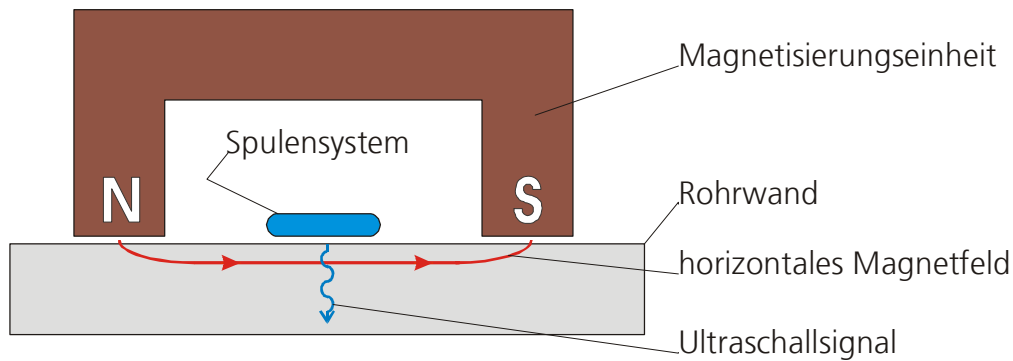


Abbildung 1.1 schematische Sensoranordnung

Da bei der EMUS-Technik die Ultraschallwellen direkt in der Prüfobjektoberfläche angeregt werden, gibt es kein Eintrittsecho, wie dies bei der klassischen Ultraschallprüfung der Fall wäre. Außerdem ist es wichtig, dass der EMUS-Prüfkopf stets dicht an der Werkstückoberfläche angeordnet ist, da bei zu großer Abhebung, auch als Lift-Off-Effekt bezeichnet, die EMUS-Signale zusammenbrechen und keine Ultraschallmessung mehr möglich ist. Zur Veranschaulichung sei hier der Wert für die Signalschwächung bei einer Sensorabhebung von der Prüfobjektoberfläche um eine Ultraschallwellenlänge genannt, sie beträgt größenordnungsmäßig 80 dB. Deshalb kann anhand der EMUS-Messung lediglich eine Aussage über die Restwanddicke getroffen werden, solange der EMUS-Prüfkopf der Prüfobjektoberfläche mechanisch mit geringer Abhebung folgen kann. Eine Unterscheidung, ob eine eventuell vorhandene Wanddickenreduktion auf der dem Sensor zugewandten oder der dem Sensor abgewandten Prüfkörperoberfläche stattgefunden hat, ist mit diesem Prüfverfahren zum gegenwärtigen Stand der Technik nicht möglich. Für viele Anwendungen ist gerade die Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehlern wichtig. Deshalb wurde in einem EMUS-Wandler zusätzlich die Wirbelstrom- und die Streuflussprüfung integriert. Mit der Wirbelstromprüfung, die das EMUS-Anregungssignal als Impulswirbelstromanregung nutzt, kann die Sensorabhebung, das heißt die Änderung des Spalts zwischen Prüfkopf und Prüfobjektoberfläche, bzw. eine mögliche Innenkorrosion detektiert werden und zwar gleichzeitig zur Ultraschallmessung, da das Wirbelstromverfahren sehr sensitiv auf den Abstand zwischen Sensor und Prüfobjekt reagiert. Parallel dazu nutzt man bei der Streuflussprüfung die horizontale Magnetisierung und eine EMUS-Spule als Streufeldsensor. Da der Streufeldanteil sehr niederfrequent gegenüber dem Wirbelstrom- und Ultraschallanteil ist, können die Signalanteile durch geeignete Filterung voneinander getrennt und separat ausgewertet werden.

Im Fall, dass lokal begrenzt, aufgrund zu großer Sensorabhebung keine Ultraschallmessung mehr möglich ist, kann mit dem Streuflussverfahren weiterhin die Wanddicke und mit dem Wirbelstromverfahren die Sensorabhebung bestimmt werden. Andererseits liegen über einen Großteil der Prüffahrt die Ergebnisse der drei Verfahren auswertbar vor und erzeugen damit Redundanz bei der Bewertung. Dadurch lassen sich vor allem die schon angesprochenen Ungenauigkeiten bei der Streuflussmessung aufgrund variierender Materialeigenschaften, Spannungszustände usw. durch eine Vielzahl von Wanddickenwerten, welche die Ultraschallmessung aus der Umgebung der aktuellen Streuflussmessung liefert, durch nahezu ortstgetreue Kalibrierung erheblich minimieren.

Durch die Kombination erhält man einen Sensor, der über verschiedene Verfahren die Wanddicke einer Komponente und die Lage potentieller Korrosionsstellen detektieren kann. Die Nachteile der Einzelverfahren werden ausgeglichen. Die essenziellen Komponenten (Magnetisierung, Spulensystem, Anregungselektronik) können und werden gemeinsam für die drei Verfahren genutzt. Dadurch ist eine sehr effiziente Nutzung der Hardware möglich.

Das wissenschaftlich technologische Fundament für eine solche Sensorneuentwicklung bildet die langjährige Erfahrung des Fraunhofer IZFP auf dem Gebiet der EMUS-Technik und deren Umsetzung in industriell nutzbare Systeme. Über mehrere Jahrzehnte wurde eine Vielzahl unterschiedlichster EMUS-Prüfköpfe entwickelt, erprobt und für den praktischen Einsatz ertüchtigt. Es sind Prüfköpfe für Volumenwellen und geführte Wellen entstanden, sowohl für ferromagnetische als auch für nicht ferromagnetische Werkstoffe. Eine Analyse des Anwendungspotentials der nur mit EMUS-Prüfköpfen anregbaren, horizontal polarisierten Scherwellen für die zerstörungsfreie Prüfung hat Mitte der 1980er Jahre G. Hübschen in seiner Dissertation zusammengestellt [HÜB1986]. Als ein Meilenstein für diese Technik ist sicherlich das EMUS-Phased-Arraysystem des Fraunhofer IZFP zu werten, da es weltweit einmalig ist. Dieses Gerät ermöglicht es, unter Anderem austenitische Schweißnähte dickwandiger Komponenten mit horizontal polarisierten Scherwellen zuverlässig zu untersuchen [HÜB1993, SAW2000]. Aber auch andere Systeme sind es wert, hier exemplarisch erwähnt zu werden.

Bei der Überwachung und Qualitätssicherung von Laserschweißnähten stumpf verschweißter Karosseriebleche der Automobilindustrie, so genannten Tailored Blanks, werden trocken arbeitende Ultraschallsysteme seit einigen Jahren in Fertigungslinien eingesetzt. Der Ultraschall erfasst mit seinem elastischen Verschiebungsfeld den gesamten Blechquerschnitt und erkennt innen liegende, das heißt verdeckte und an beiden Oberflächen vorhandene Fehlstellen wie Poren, ungenügende Durchschweißung und Bindefehler [SAL2002, SAL2005, BER2007].

Für den sicheren Betrieb von Schienenfahrzeugen wurde in den frühen 1980er Jahren ein System entwickelt und bis heute stetig optimiert, um die Laufflächen von Eisenbahnrädern auf oberflächennahe Risse im Überrollbetrieb zu prüfen. Dazu werden Ultraschalloberflächenwellen genutzt, die sich in und entgegen der Uhrzeigerrichtung entlang der Lauffläche ausbreiten. Für die Anregung und den Empfang der Ultraschallsignale sind EMUS-Prüfköpfe in einem speziellen Schienenstück integriert [SAL1983, SAL2009, DOB2006].

Daneben ist die Korrosionsprüfung von Anlagenteilen und Komponenten ein wichtiges Anwendungsgebiet für den Einsatz von elektromagnetischen Ultraschallprüfköpfen, da die Koppelmittelfreiheit und die anregbaren Ultraschallwellenmoden die Prüfung vereinfachen und die Prüfaussage zuverlässiger machen. Korrosionsbedingte Wanddickenverringerungen können damit in verdeckten und unzugänglichen Bereichen über eine größere Distanz zwischen Prüfkopf und Fehlstelle detektiert werden, da im Vergleich zu anderen Techniken eine modenreine Anregung geführter Ultraschallwellenmoden möglich ist [SAL1998]. Mit diesem Ansatz wurden zum einen Systeme zur Untersuchung der Standfestigkeit von Laternenmasten, Schilderpfosten usw. entwickelt, die in der Lage sind, vom Erdreich verdeckte Korrosionsstellen aufzuspüren und die Wanddickenreduktionen abzuschätzen [SÜS2000]. Zum anderen können mit Hilfe in der Rohrwand in Umfangsrichtung laufenden dispersiven Ultraschallwellenmoden die nicht zugänglichen Bereiche eines Rohres am Auflager untersucht werden [NIE2007B].

Im Bereich der Pipeline-Prüfung setzt das Fraunhofer IZFP für die Untersuchung von Gasfernleitungen wegen der schon erwähnten Vorteile seit Mitte der 1980er Jahre auf elektromagnetische Ultraschallwandler [HÖL1987]. Zehn Jahre später begann man in Kooperation mit der Firma PII Pipetronix, Stutensee, mit der Entwicklung und dem Aufbau des ersten EMUS-basierten Prüfmolchs. Die Prüfaufgabe des autark arbeitenden Systems liegt in der Detektion und Größenbestimmung von axial ausgerichteten Rissen in der Rohrwand und in der Längsschweißnaht [KÖH1997, KRÖ2003].

2 Pipeline-Prüfung

2.1 Pipelines

Rohrleitungen von mindestens einem Kilometer Länge werden als Pipelines bezeichnet. Der Begriff Pipeline ist nicht nur die englische Übersetzung für Rohrleitung oder Fernleitung sondern wird auch als eingedeutsches Synonym dafür gebraucht. Die Dimensionierungen dieser Rohrleitungen sind vielfältig und an die Art und Menge des Durchflussmediums gebunden und richten sich nach der technischen Notwendigkeit und dem effektiven Betrieb des Transportsystems [SKE2000]. Dabei stellen Pipelines das sicherste und wirtschaftlichste System für den Transport großer und größter Mengen von Gas und Flüssigkeiten, wie etwa Öl oder Ölprodukten, dar. Das liegt an zwei grundlegenden Voraussetzungen:

- Der Transport muss kontinuierlich erfolgen.
- Der geplante Durchsatz muss mit möglichst niedrigen Investitions- und Betriebskosten erreicht werden.

Die meisten Pipelines werden zwar nach den beiden Grundsätzen geplant und erstellt, trotzdem sind meist erhebliche Investitionen und Betriebskosten nötig, besonders für lange Distanzen und große Durchmesser. Dabei ist es nicht ausreichend eine Fernleitung so zu planen und zu gestalten, dass sie kontinuierlich betrieben werden kann und ein Optimum an Effizienz bietet, sondern dass es auch über die gesamte Lebensdauer dabei bleibt [COR1996].

Das weltweite Pipeline-Netz umfasst mittlerweile ca. 4 Millionen Kilometer. Von diesen Leitungen sind etwa zweidrittel für den Gastransport bestimmt. Außerdem kommen jährlich noch 30 bis 40 Tausend Kilometer neuer Leitungen hinzu, auch hier überwiegt deutlich der Anteil von Gasleitungen [IVE2005, BTS2005].

2.2 Fehlerarten

Öl- und Gasfernleitungen haben eine hohe Betriebssicherheit, das liegt an der großen Sorgfalt der Qualitätssicherung bei Planung, Bau und Betrieb. Dennoch können auch an Pipelines, wie bei jeder technischen Komponente, im Laufe der Zeit Fehler auftreten, da die verwendeten Werkstoffe einem Alterungsprozess unterliegen. Dabei kann es zum Auftreten von Korrosion, Rissen oder anderen Anomalien kommen, die die Sicherheit und Integrität der Pipeline gefährden können [SKE2000]. Fehler an der Rohrinneenseite werden als Innenfehler und Fehler an der Rohraußenseite als Außenfehler bezeichnet. Da Pipelines mit einem Molchsystem von innen geprüft werden, sind Innenfehler der Sensorik zugewandt. Mit dem Begriff Molch werden Geräte bezeichnet, die sich zusammen mit dem Fördermedium durch eine Rohrleitung bewegen und diese von innen prüfen, reinigen usw. Eine nähere Beschreibung solcher Molchsysteme wird im folgenden Kapitel 2.3 *Prüfsysteme, Molche* gegeben.

Eine umfangreiche Sammlung unterschiedlichster Fehlertypen an Rohrleitungen ist in ARG2003 zusammengestellt. Es folgt eine Aufzählung typische Fehler [SKE2000]. Dabei sind die ersten vier Fehlerarten durchaus als kritisch für den sicheren Betrieb zu werten, da durch sie der Rohrleitung die notwendige Festigkeit genommen werden kann, einem bestimmten Betriebsdruck standzuhalten.

- Geometrische Anomalie: Jede signifikante Änderung des in idealer Weise kreisrunden Querschnittes eines Rohres, zum Beispiel Beulen und Ovalitäten. Diese Fehler können zu ungünstigen Spannungsverteilungen in der Rohrwand führen, die eventuell Defekte hervorrufen können.
- Geometrische Abweichungen: Im Gegensatz zu den geometrischen Anomalien, die lokal begrenzte Fehler beschreiben, sind hierbei Lageänderungen der Pipeline gemeint, die wiederum zu ungünstigen Spannungsverteilungen in der Rohrwand führen.
- Materialverlust: Schwächung der Rohrwand, die zu einer Verminderung der tragenden Wanddicke führt. Der Materialverlust kann als Folge von Korrosion oder einer mechanischen Beanspruchung auftreten. Beispiele für diesen Fehlertyp sind Riefen, Flächenkorrosion, Pittings, usw.
- Risse und rissartige Fehler: Materialtrennungen, die zu Spannungssingularitäten führen. Hierzu zählen zum Beispiel Ermüdungsrisse, Risse in Schweißnaht oder Wärmeeinflusszone, Spannungsrisskorrosion und Wasserstoff induzierte Risse. Laminationen oder Dopplungen können als rissartige Fehler betrachtet werden, die in der Regel schon bei der Herstellung des Rohres bzw. des Bandmaterials vorliegen. Da Laminationen normalerweise keine Komponenten senkrecht zu den Hauptspannungen besitzen, gelten sie nicht als kritische Fehler.
- Leckagen: Durch die Wand gewachsener Fehler, der aber noch nicht zu einem Versagen des Rohres geführt hat

Die wichtigste, das heißt am häufigsten auftretende Fehlergruppe ist Korrosion. Obwohl die Rohrleitungen durch eine Beschichtung, in vergangenen Zeiten zum Beispiel mit Bitumenanstrich und heute weitgehend mit Polyethylen (PE) vor Korrosion geschützt werden, kann bei Beschädigungen des Schutzes ein korrosives Medium zwischen die Beschichtung und der Rohrwand eindringen. Bei On-Shore-Leitungen (auflandig verlegten Leitungen) in der Regel von außen, oft verbunden mit einer mechanischen Einwirkung durch Dritte zum Beispiel schon durch das Verlegewerkzeug, bei Off-Shore-Leitungen (unter Wasser verlegten Leitungen) tritt dagegen vorwiegend interne Korrosion auf. Wobei es hierbei besonders auf die Reinheit des Gases ankommt. Die Anwesenheit von Wasser, Salzen, Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff, zum Beispiel gebildet von Mikroorganismen, kann Korrosion an den Transportleitungen verursachen und auch beschleunigen. Abschätzungen der weltweiten durch Korrosion verursachten Kosten belaufen sich auf 20 Milliarden US\$. Andere Abschätzungen besagen, dass etwa 3-4% des Bruttoinlandsprodukts durch Korrosion verloren gehen [TIR2003, COS2004, COS2003].

Für den korrosiven Wandabtrag können die Fehler gemäß dem Pipeline Operators Forum (POF) in sieben Kategorien, basierend auf die axialen Ausdehnungen und Ausdehnungen in Umfangsrichtung, einklassiert werden. Die Fehlergrößenklassierung wird in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt [POR2006].

- Pinholes: Isolierte Fehler mit einer Breite und einer Länge kleiner als die Wanddicke.
- Pitting: Isolierter Fehler mit einer Breite und einer Länge größer als die Wanddicke aber kleiner als die sechsfache Wanddicke, außer für Fehler bei denen sowohl die Breite als auch die Länge größer als die dreifache Wanddicke ist.
- General: Isolierter Fehler mit einer Breite und einer Länge größer als die dreifache Wanddicke.
- Axial Slotting: Axial orientierter Fehler mit einer Breite kleiner als die Wanddicke und einer Länge größer als die Wanddicke.
- Circumferential Slotting: In Umfangsrichtung orientierter Fehler mit einer Länge kleiner als die Wanddicke und einer Breite größer als die Wanddicke.
- Axial Grooving: Axial orientierter Fehler mit einer Länge größer als die zweifache Wanddicke und einer Breite kleiner als die dreifache Wanddicke, außer Fehler, die als Pitting klassiert werden können.
- Circumferential Grooving: In Umfangsrichtung orientierter Fehler mit einer Länge kleiner als die dreifache Wanddicke und einer Breite größer als die zweifache Wanddicke, außer Fehler, die als Pitting klassiert werden können.

Daneben sind auch Risse und rissartige Fehler von großer Bedeutung. Mechanische und insbesondere schwingende Beanspruchungen können zu Ermüdungsrissen führen. Als Ursachen können Druckschwankungen im Transportmedium, thermische Ausdehnung in Regionen mit hohen Temperaturdifferenzen sowie Lageveränderungen durch Erdbewegungen und Gebirgsdruck und zusätzlich im Off-Shore-Bereich durch Strömungen und Wellenbewegungen angesehen werden. Diese Risse entstehen meist an Orten mit lokaler Spannungsüberhöhung, das heißt zum Beispiel bei Kraftflussumlenkungen im Bereich von Beulen oder Dellen oder an makroskopischen Veränderungen wie Fehlstellen im Material oder Zonen lokaler Aufhärtung in der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht [SKE2000].

Spannungsrissskorrosion beginnt meist mit kleinen Rissen an der Außenoberfläche eingegrabener Pipeline-Rohren. Dabei übersteigt der lokale Spannungsintensitätsfaktor den tatsächlich vorhandenen Werkstoffwiderstand gegen Rissausbreitung. Zusätzlich muss ein korrosives Medium vorhanden sein, eine werkstoffabhängige kritische Zugspannung anliegen und der Rohrwerkstoff empfindlich für Spannungsrissskorrosion sein. Durch den Betriebsdruck steht die Rohrwand in Umfangsrichtung unter Zugspannung. Ein korrosives Medium kann im geförderten Medium enthalten sein (zum Beispiel Nassgas) oder von außen durch eine schadhafte Beschichtung zum Beispiel in Form von Feuchtigkeit an die Pipeline gelangen. Anfänglich sind die Risse mit bloßem Auge nicht erkennbar. Meistens kommen sie in Kolonien vor, wobei alle Risse in die gleiche Richtung orientiert sind. Über mehrere Jahre hinweg können sich die einzelnen Risse verlängern und vertiefen oder auch innerhalb einer Kolonie sich zu längeren Rissen verbinden. Wenn sich die Spannungsrissskorrosion langsam entwickelt, muss sie für das betreffende Rohrstück für mehrere Jahre kein Problem darstellen. Aber wenn sich die Risse vereinigen und groß genug werden kann die Pipeline versagen und es kann zu Leckagen oder einem Gewaltbruch kommen [TIR2003].

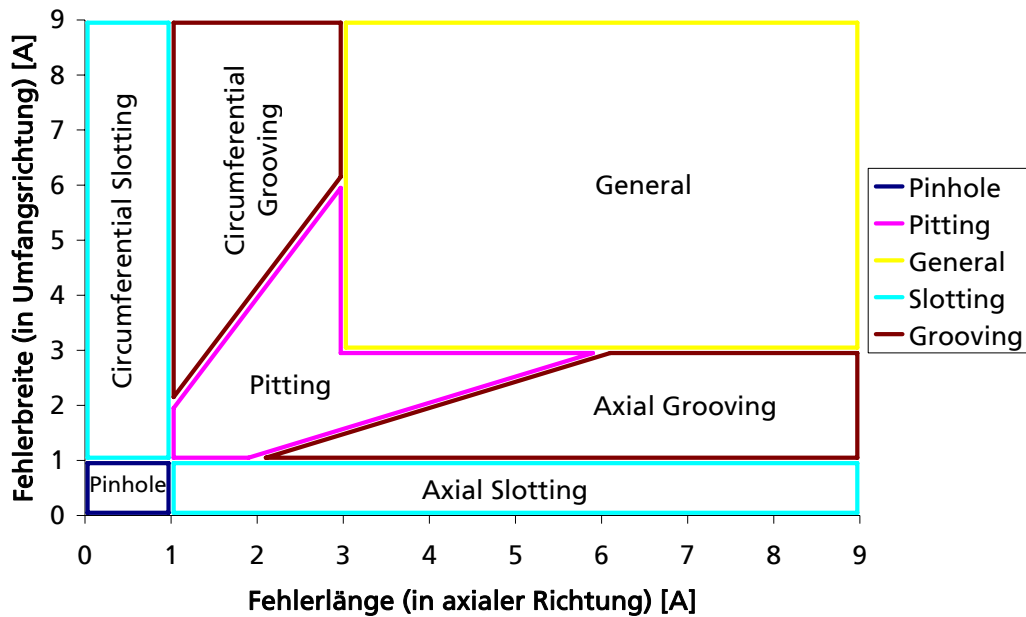


Abbildung 2.1 Fehlergrößenklassierung für korrosiven Wandabtrag mit $A = \max(\text{Wanddicke}, 10 \text{ mm})$

2.3 Prüfsysteme, Molche

Zunächst wurden bei Pipelines nur hydrostatische Tests und später so genannte „Stress Tests“ durchgeführt. Bei den hydrostatischen Tests werden die Rohrleitungen mit Wasser gefüllt und anschließend das System unter Druck gesetzt. Dabei wird nach dem Druck-Temperatur-Messverfahren eine gewährleistete Mindeststreckgrenze von 95% in Rohrumfangsrichtung geprüft. Dagegen sind Stress Tests Wasserdruckprüfungen, die unter Beachtung der zulässigen integralen plastischen Verformung Rohre und Rohrbögen bis an den Bereich der Streckgrenze, bei ausreichendem Abstand zur Bruchfestigkeit, beanspruchen. Aufgrund der plastischen Verformung während der Druckbelastung kommt es zu einer Verfestigung des Rohrwerkstoffes. Durch diese, auch Autofrettage genannte Behandlung, werden scharfe Risse abgestumpft und die Lebensdauer der Rohrleitung erhöht und bessere Aussagen über die Sicherheit der Rohrleitung werden ermöglicht [DEC1972].

Inzwischen haben sich Molchungen als gängiges Prüfverfahren für Pipelines durchgesetzt. Dabei kommen moderne Inspektionsgeräte, so genannte intelligente Molche, zum Einsatz, die als Bestandteil eines Gesamtüberwachungsprogramms helfen können, den Zustand von Pipelines zu überprüfen und Fehler in der Wand der Rohrleitung zu detektieren, zu lokalisieren und quantitativ zu vermessen. Die intelligenten Molche, die durch die zu kontrollierende Pipeline gepumpt werden und dabei die Rohrwand mit zerstörungsfreien Prüfverfahren untersuchen, liefern den Betreibern die benötigten Eingangsdaten für eine möglichst genaue Zustandsbewertung ihrer Leitungen. Die gewonnenen Informationen können dann für eine Optimierung der Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten genutzt werden. Besonders wichtig ist, dass Fehler in der Rohrwand detektiert werden bevor es zu einem Schadensfall kommen kann [SKE2000, COR1996].

Für die verschiedenen Prüfanforderungen kommen jeweils unterschiedliche Molche zum Einsatz, Tabelle 2.1 gibt einen Überblick unterschiedlicher Molchsysteme.

Prüfanforderung	Funktion	intelligenter Molchtyp	Messverfahren
Geometrieprüfung	Innendurchmesser; Beulen, Ovalitäten, Falten usw.	Kaliper-Molch	mechanisch, induktiv
Lagevermessung	Lageveränderungen (Bergsenkungen, Dauerfrost, Düker usw.), Bogenvermessung	Inertial-Molch	Kreiselkompass
Lecksuche	Detektion und Ortung von Leckagen	Leck-Molch	Druckdifferenzmethode, akustische Emission
Einbettungsprüfung	Einbettung von Off-Shore-Leitungen, Unterspülungen	Einbettungsmolch	Neutronenstrahlung, Sekundärstrahlung
Korrosionsprüfung	Detektion, Ortung und Vermessung von Korrosion, Überprüfung der Wanddicke	Korrosionsmolch	Ultraschall, Wirbelstrom, magnetischer Streufluss
Rissprüfung	Detektion, Ortung und Vermessung von Rissen und rissartigen Fehlern	Rissprüfmolch	Ultraschall, Wirbelstrom

Tabelle 2.1 Übersicht intelligenter Molchsysteme [SKE2000, COR1996]

Die Inspektion von Pipelines mit Hilfe intelligenter Molche wird seit 1965 durchgeführt. Der erste echte „intelligente“ Molch für die Korrosionsprüfung war ein magnetischer Streuflussmolch von Tuboscope Pipelines Services (Abbildung 2.2). Die nächste Entwicklungsstufe markieren die so genannten hochauflösenden Streuflussmolche von British Gas (On-Line Inspection Centre), die Anfang der 80er Jahre des vorherigen Jahrhunderts eingeführt wurden (Abbildung 2.3).

Der erste Rissprüfmolch wurde von der Firma Dr. Hans Goedecke am Markt eingeführt, einer gemeinsamen Entwicklung mit Institut Dr. Foerster, Reutlingen. Dieser Molch nutzte zur Pipeline-Prüfung das Wirbelstromverfahren [KIT1976].

Die ersten zuverlässigen Ultraschallmolche wurden 1985 von der Pipetronix GmbH am Markt unter dem Markennamen UltraScan WM etabliert. Hierbei handelte es sich um Systeme zur Korrosionsprüfung. Rissprüfmolche auf Ultraschallbasis folgten 1994. Die Abbildung 2.4 zeigt einen modernen Ultraschallmolch zur Riss- bzw. Korrosionsprüfung [BAR2006].

Ein Hauptanwendungsgebiet intelligenter Molche ist die Detektion von Korrosion. Zwei ZFP-Verfahren haben sich hierbei als zuverlässig erwiesen, die Ultraschalltechnik sowie das magnetische Streuflussverfahren. Ein immenser Vorteil der Ultraschalltechnik ist, dass eine exakte, direkte Wanddickenmessung vorgenommen werden kann. Ein erheblicher Nachteil, besonders bei der Inspektion von Gasleitungen, ist dagegen, dass ein flüssiges Koppelmedium benötigt wird. Molche, die das Streuflussverfahren einsetzen, benötigen kein Koppelmedium, können eine Pipeline-Wand jedoch nur qualitativ vermessen.

Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung



Abbildung 2.2 erster Streuflussmolch - Tuboscope Pipeline Services (Quelle: O.-A. Barbian)

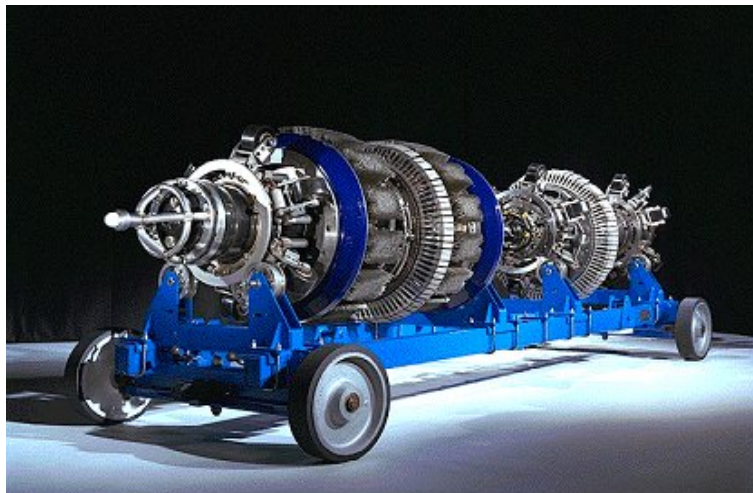


Abbildung 2.3 hochauflösender Streuflussmolch von British Gas (Quelle: O.-A. Barbian)



Abbildung 2.4 LineExplorer Molch von NDT Systems & Services AG, Stutensee (Quelle: O.-A. Barbian)

Bei den Streuflussmolchen wird über starke Permanentmagnete in die zu prüfende Rohrwand ein magnetisches Horizontalfeld induziert. Wichtig ist dabei, dass die Magnetisierungseinheit so ausgelegt ist, dass die Wand auf über 1 T vormagnetisiert werden kann, also bis in den magnetischen Sättigungsbereich der für den Werkstoff geltenden magnetischen Hystereseschleife gebracht werden kann. Dadurch wird erreicht, dass sowohl lokale Änderungen in den magnetischen Eigenschaften im Rohrwerkstoff als auch die Rohrvergangenheit in Bezug auf Aufmagnetisierungsprozesse aus früheren Streuflussprüfungen sich nur noch geringfügig im Streufeld bemerkbar machen und Fehlinterpretationen der Signale reduziert werden.

An Positionen mit reduzierter Wanddicke, zum Beispiel durch Korrosion, erhöht sich die Flussdichte, was zum Austreten von Streufluss aus der Rohrwand führt (Abbildung 2.5). Dieser Anteil kann mit geeigneten Sensoren detektiert werden. Üblicherweise werden heutzutage Hallensoren eingesetzt, aber auch Spulen als induktive Feldaufnehmer sind noch gebräuchlich. Über die Stärke und den Verlauf des Streufeldes können Rückschlüsse auf Art, Geometrie und Tiefe der Wandschwächung gezogen werden. Die Fehlergeometrie und die Materialeigenschaften haben einen starken Einfluss auf die Messgröße. Ist die Rohrwand nicht ausreichend magnetisiert, hat auch der Spannungszustand im Wandmaterial Auswirkungen auf die Messgröße [JAN1994]. Werden Spulen als Feldsensoren verwendet kommt zusätzlich eine starke Geschwindigkeitsabhängigkeit hinzu. Innen und außen liegende Fehler können mit Hilfe zusätzlicher Sensoren oder mit einem vom Institut Dr. Foerster, Reutlingen, eingeführten Ortsfilterungsalgorithmus [MIX2005] zuverlässig unterschieden werden. Insgesamt muss aber beachtet werden, dass das Streuflussverfahren eine indirekte Messmethode ist und damit quantitative Aussagen nur eingeschränkt nach sorgfältigen Kalibrierungen gemacht werden können.

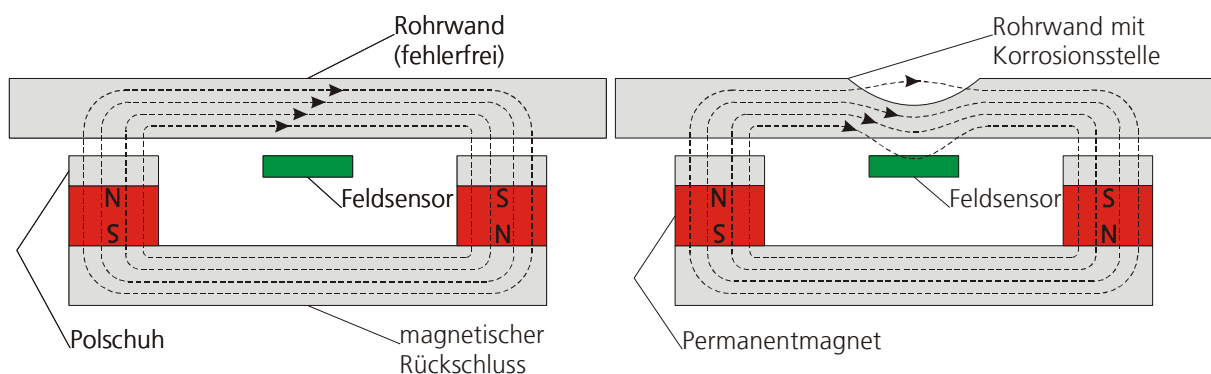


Abbildung 2.5 Prinzip der Streuflussprüfung

Im Gegensatz dazu können mit der kommerziellen Ultraschalltechnik die Wanddicken der geprüften Rohre quantitativ direkt über eine Laufzeitmessung bestimmt werden. Jedoch muss ein flüssiges Koppelmedium vorhanden sein, um die Ultraschallsignale in die Rohrwand einkoppeln zu können, da sie in Gas oder Luft zu stark gedämpft werden. Die Prüfung einer Gasleitung ist nur mit Hilfe eines so genannten „Batches“ möglich. Dabei wird ein „Flüssigkeitspfropfen“ zwischen zwei Trennmolchen gekammert, in dem sich der Ultraschallmolch befindet (Abbildung 2.6). Vom operativen Standpunkt ist dieses Vorgehen aber meist zu aufwendig [SKE2000]. Zumal für den Transport von Erdgas der Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Rohrleitung minimal gehalten werden muss, damit die Anlagerung von Wasser verhindert wird. In ungünstigen Fällen von Druck und Temperatur können sich sonst Eiskristalle bilden, die die Leitung blockieren können. Außerdem kann die Restfeuchtigkeit die Entstehung von Spannungsrisskorrosion begünstigen.

Zur Wanddickenmessung wird von einem piezoelektrischen Prüfkopf ein Ultraschallsignal abgestrahlt. Gelangt das Signal durch die Vorlaufstrecke auf die Rohrinneoberfläche wird ein Teil davon reflektiert und kann als Eintrittsecho vom Prüfkopf detektiert werden. Ein weiterer Teil des Signals koppelt in die Rohrwand ein, durchläuft sie und wird seinerseits an der Außenoberfläche reflektiert. Auch dieses Signal wird vom Prüfkopf detektiert und als Rückwandecho identifiziert. Aus den Laufzeiten der Echosignale lassen sich bei bekannten Schallgeschwindigkeiten von Koppelmedium und Rohrwerkstoff die Vorlaufdistanz und die Wanddicke direkt bestimmen. Ist eine Wanddickenschwächung vorhanden, kann somit quantitativ die Restwanddicke als auch die Lage, innen oder außen, leicht ermittelt werden (Abbildung 2.7).

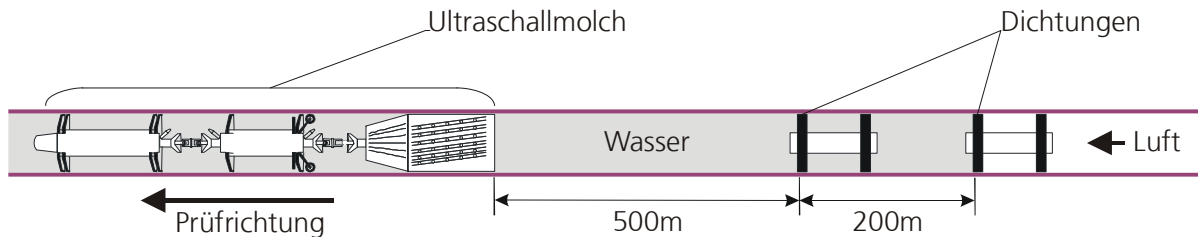


Abbildung 2.6 Wanddickenmessung mit einem piezoelektrischen Ultraschallmolph in einer Gasleitungen mit Ankopplung über ein Wasser-Batch

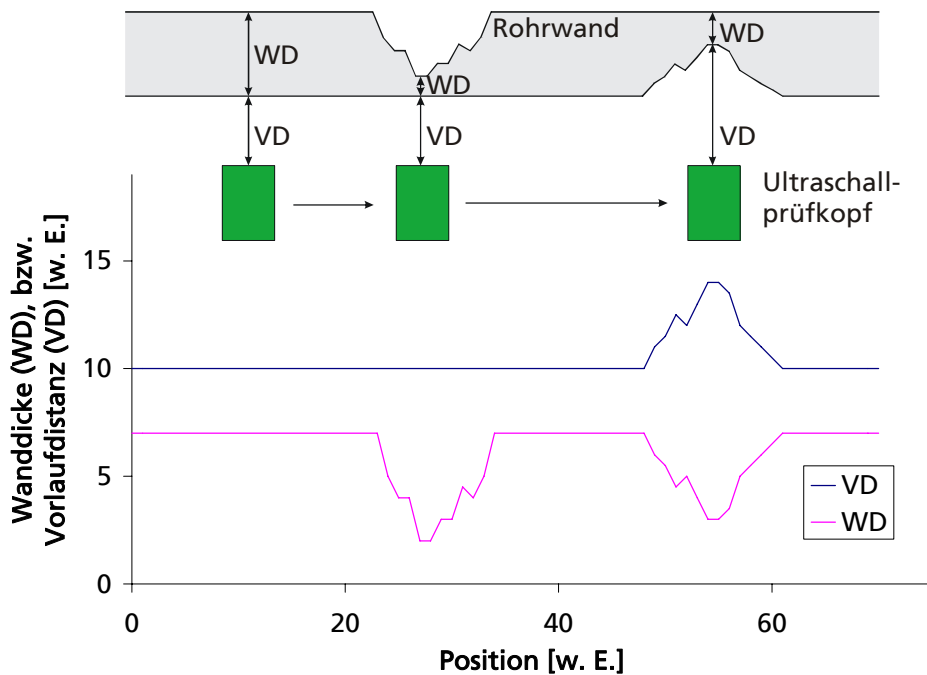


Abbildung 2.7 Prinzip der Ultraschallwanddickenmessung mit Innen- und Außenfehlerunterscheidung

Bei der Pipeline-Prüfung wird die Wirbelstromtechnik seit vielen Jahren bei der Geometrievermessung eingesetzt. Daneben gibt es auch Anwendungen zum Auffinden und Vermessung von Materialabtrag. Die Einfachheit des Verfahrens erlaubt es, sie in besonders kleinen und leichten Inspektionssystemen zu integrieren. Damit kann der wachsende Bedarf der Prüfung und Überwachung von kleinen, komplexen Leitungssystemen, wie es in Raffinerien und ähnlichen Anlagen anzutreffen ist, gedeckt werden.

Beim Wirbelstromverfahren werden mit Hilfe eines elektrischen Wechselfeldes in die Rohrwand elektrische Wirbelströme induziert. Die Wirbelströme werden von Änderungen in den physikalischen Materialeigenschaften σ , μ (elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität) und der Geometrie beeinflusst. Die Frequenz des Wechselfeldes bestimmt die Eindringtiefe des Verfahrens in das Prüfobjekt. Um die komplette Wanddicke einer typischen Pipeline prüfen zu können, müsste man aber zu so niedrigen Frequenzen übergehen, dass eine unakzeptable Molchgeschwindigkeit daraus resultieren würde. Mit ausreichend hohen Frequenzen kann das Verfahren jedoch zur Prüfung auf Oberflächenfehler (zum Beispiel Innenkorrosion) genutzt werden [COR1996].

2.4 Zustandsbewertung

Üblicherweise ist mit diesem Ausdruck ein Berechnungsverfahren gemeint, bei dem ermittelt wird, ob eine Leitung trotz der Anwesenheit von Fehlern im Material einen bestimmten Betriebsdruck noch erträgt. Im Englischen wird von MAOP (maximum allowable operating pressure) gesprochen. Das weltweit heute noch gebräuchlichste Verfahren ist im amerikanischen Regelwerk ASME B31G niedergelegt. Da dieses Verfahren als sehr konservativ angesehen wird, findet auch eine von Battelle erarbeitete Weiterentwicklung, RSTRENG, regen Gebrauch bei den Pipeline-Betreibern. Die europäischen Betreiber nutzen häufig ein neueres Bewertungsverfahren, das auf dem ursprünglich von British Gas durchgeführten Joint Industry Projekt beruht und in das technische Regelwerk von DNV Eingang gefunden hat [DNV2006, BSI2005, BAR2006].

In Deutschland wurden zwei Bewertungsverfahren entwickelt. Zum einen ein Bewertungsverfahren, das von Dr. Peter Jäger erarbeitet wurde und heute noch eingesetzt wird. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass auch dynamische Belastungen bewertet werden können [JAG1976]. Zum anderen ein Verfahren, das vom Ingenieurbüro Veenker, Hannover, entwickelt wurde und mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführte Berechnungen nutzt. Beide Verfahren sind jedoch nicht in technische Regelwerke aufgenommen worden [BRÜ2003]. Bezüglich der Bewertung von Rissen gibt es derzeit noch keine, speziell auf Pipelines ausgerichtete Bewertungsverfahren.

Da heute schon viele Pipelines mehrfach geprüft wurden, können in so genannten Wiederholungsprüfungen die Ergebnisse verschiedener Molchungen verglichen werden. Diese so genannten Laufvergleiche können für magnetische Streuflussmolche, als auch für Ultraschallmolche durchgeführt werden. Je genauer ein Molch dabei messen kann und je geringer die Messfehler sind, desto aussagekräftiger sind die Berechnungen. Dies gilt insbesondere auch für die Zustandsbewertung: Je genauer die ermittelten Daten sind, desto weniger konservativ, das heißt mit weniger Sicherheitsaufschläge, kann eine Bewertung durchgeführt werden [REB2002]. Der DNV-Code ist allerdings der Einzige, der Streufluss- und Ultraschallmolche hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit unterscheidet.

Da Ultraschallmolche ein flüssiges Koppelmedium benötigen, werden sie, trotz der unbestreitbar besseren Messgenauigkeit, von Gasleitungsbetreibern nicht bevorzugt eingesetzt. Es wird heute jedoch immer wichtiger, auch für Gasleitungen quantitativ die Wanddicke möglichst exakt vermessen zu können, denn erst hierdurch können moderne Bewertungsverfahren optimal eingesetzt werden. Durch Laufvergleiche hoher Qualität können exakte Bewertungen von Leitungen vorgenommen werden. Die gewonnen Informationen können dann für eine Optimierung der Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten genutzt werden. Zusätzlich können Restbetriebszeiten abgeschätzt werden. Die Genauigkeiten für die Wanddickenbestimmung mit

Molchsystemen sind für das Streufluss- und Ultraschallverfahren in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Es gibt Bestrebungen der Pipeline-Betreiber bei Gasleitungen eine Druckerhöhung vorzunehmen, um den Durchsatz vergrößern zu können. Der Betreiber muss dafür dokumentieren, dass seine Leitungen den höheren Belastungen standhalten. Hierzu sind genaueste Wanddickenmessungen mit maximalen Abweichungen im zehntel Millimeterbereich nötig, das bedeutet die Wanddicke muss mit einer relativen Genauigkeit von 1% oder besser bestimmt werden. Diese geforderten Genauigkeiten können nur mit ultraschallbasierten Systemen erreicht werden [ESS2004, WIS2004A, WIS2004B]. Wobei aber auch hier die Genauigkeitsgrenzen des Ultraschallverfahrens erreicht werden. Die Ultraschalllaufzeiten der Echosignale können zwar, bei entsprechend langer Messzeit, quasi exakt bestimmt werden aber die genaue lokale Schallgeschwindigkeit ist nicht bekannt, sodass auf Tabellenwerte oder Erfahrungswerte zurückgegriffen werden muss. Und diese Unbekannte bestimmt letztlich die Unsicherheit bei der Wanddickenbestimmung [NIE2008].

	niedrig-/ mittelauflösender Streuflussmolch	hochauflösender Streuflussmolch	hochauflösender Ultraschallmolch
Messverfahren	magnetischer Streufluss	magnetischer Streufluss	piezoelektrischer Ultraschall
verfügbare Größen (Rohrdurchmesser)	4" bis 48"	6" bis 56"	6" bis 56"
Ansprechschwelle flächige Korrosion	Durchmesser $\geq 3x$ WD Tiefe $\geq 20\%$ WD	$\geq 3x$ WD $\geq 10\%$ WD	≥ 20 mm ≥ 1 mm
Ansprechschwelle Pitting-Korrosion	Durchmesser $\geq 3x$ WD Tiefe $\geq 40\%$ WD	$\geq 2x$ WD $\geq 20\%$ WD	≥ 20 mm (≥ 10 mm, nur Detektion) ≥ 1 mm
Genauigkeit	flächige Korrosion $\pm 20\%$ WD Pitting- Korrosion keine genauen Angaben	$\pm 10\%$ WD $\pm 20\%$ WD	$\pm 0,5$ mm $\pm 0,5$ mm
Unterscheidung zwischen interner und externer Fehler	in der Regel nicht	ja	Ja

Tabelle 2.2 Vergleich der Spezifikationen von Ultraschall- und Streufluss-Korrosionsmessmolchen (WD = Wanddicke) [SKE2000, REB2002]

3 Grundlagen der elektromagnetischen Ultraschallwandlung

3.1 Elastische Wellen

In dreidimensional ausgedehnten Körpern können elastische Wellen mit drei ausgezeichneten Polarisierungen erzeugt werden. Abbildung 3.1 zeigt die unterschiedlichen Typen von Volumenwellen. Bei Longitudinalwellen ist die Teilchenauslenkung parallel zur Ausbreitungsrichtung. Auf dem Schallweg treten Teilchenverdichtungen auf, sodass man auch von Kompressionswellen spricht. Dagegen findet bei Transversalwellen, auch Scherwellen genannt, die Teilchenverschiebung senkrecht zur Ausbreitung statt. Je nachdem ob die Schwingung in der Einfallsebene oder orthogonal dazu orientiert ist, unterscheidet man SV-Wellen (shear vertical) und SH-Wellen (shear horizontal). Longitudinal und SV-Wellen können mit piezoelektrischen oder elektromagnetischen Ultraschallwandlern angeregt werden. Für praktische Anwendungen, bei denen die Schallwandler über ein Prüfobjekt bewegt werden müssen, können SH-Wellen nur mit elektromagnetischen Wandlern erzeugt werden.

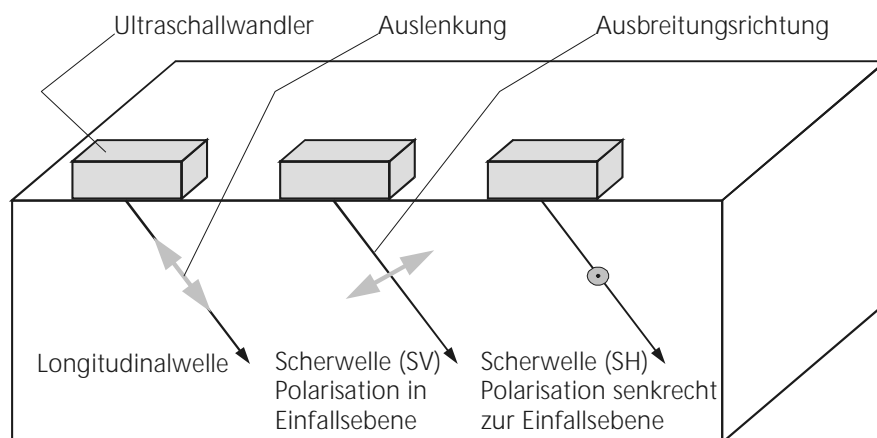


Abbildung 3.1 elastische Wellen in ausgedehnten Körpern

3.2 EMUS-Wandler

Mit Wandler ist hier ein technisches Gerät oder eine Apparatur gemeint, die es ermöglicht, ein elektrisches Signal in ein Signal einer anderen physikalischen Größe, zum Beispiel einer mechanischen Schwingung, umzusetzen oder anzuregen. Es kann aber auch der umgekehrte Fall vorliegen, dass eine physikalische Größe in ein elektrisches Signal übertragen wird.

Der Begriff Prüfkopf wird hauptsächlich in der zerstörungsfreien Prüfung im Bereich der Ultraschalltechnik gebraucht. Ein Prüfkopf besteht aus einem Wandler, der meist für eine spezielle Prüfaufgabe angepasst und optimiert wurde, um in der Regel auch quantitative Messungen durchführen zu können. Damit können belastbare Aussagen über das Prüfobjekt gemacht werden. Bei der Wirbelstromprüfung spricht man dagegen häufig von Sonden, bei der Streuflussprüfung von Feldaufnehmern oder Sensoren. Aber auch in anderen technischen Bereichen werden Wandler für Mess- und Prüfaufgaben allgemein als Sensoren bezeichnet. Für die Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit wird der allgemeine Begriff Sensor verwendet, da alle drei erwähnten Verfahren kombiniert werden.

Der Hauptvorteil für die Benutzung elektromagnetischer Ultraschallwandler liegt in der berührungsfreien Ankopplung des Ultraschalls. Daher kann ohne Koppelmittel, wie es für konventionelle piezoelektrische Wandler zwingend ist, gearbeitet werden. Dadurch lassen sich Oberflächeneinflüsse weitgehend minimieren und es können Ultraschallverfahren an Komponenten angewendet werden, die nicht mit einem Koppelmittel in Berührung kommen

sollen oder dürfen, zum Beispiel bei heißen oder empfindlichen Oberflächen. Außerdem sind elektromagnetische Wandler besonders geeignet zur Anregung modenreiner geführter Wellen und SH-Wellen.

Bei der klassischen piezoelektrischen Ultraschallanregung wird ein Kristall oder eine polarisierte Keramik im Prüfkopf über den piezoelektrischen Effekt in Schwingung versetzt, der als Ultraschallquelle dient [KRA1986]. Über eine akustisch an den Kristall angekoppelten Vorlaufkörper wird die im Prüfkopf erzeugte Ultraschallwelle durch den Prüfkopf und über eine Koppelmittelschicht in das Prüfobjekt eingekoppelt. Als Koppelmittel dient meist Wasser oder Öl (Abbildung 3.2).

Im Gegensatz dazu werden beim elektromagnetischen Ultraschall (EMUS) über elektromagnetische Wechselwirkungen in einem elektrisch leitenden Prüfobjekt Ultraschallquellen induziert, die als Ausgangspunkt von Ultraschallwellen in der Komponente wirken [HÜB1984]. Eine genauere Beschreibung der elektromagnetischen Ultraschallwandlung folgt in Kapitel 3.3 *Die Wechselwirkungsmechanismen*. Da die Ultraschallwelle im Prüfobjekt erzeugt wird, ist kein Koppelmittel notwendige und der EMUS-Wandler darf sogar mit einem schmalen Luftspalt zur Testkörperoberfläche beabstandet sein (Abbildung 3.3).

Die wesentlichen Bestandteile eines EMUS-Wandlers sind eine Magnetisierungseinrichtung, bestehend aus Permanentmagneten oder Elektromagneten, und eine oder mehrere speziell geformte HF-Spulen, die im Sendefall dynamische elektromagnetische Felder in der Oberflächenregion eines leitenden Prüfobjekts induzieren. Im Empfangsfall werden in der Spule elektrische Spannungsimpulse induziert, die der Ultraschallamplitude proportional sind (Abbildung 3.3). Die Auslegung und Ausgestaltung eines EMUS-Wandlers hängt von den anzuregenden und zu detektierenden elastischen Wellenmoden ab.

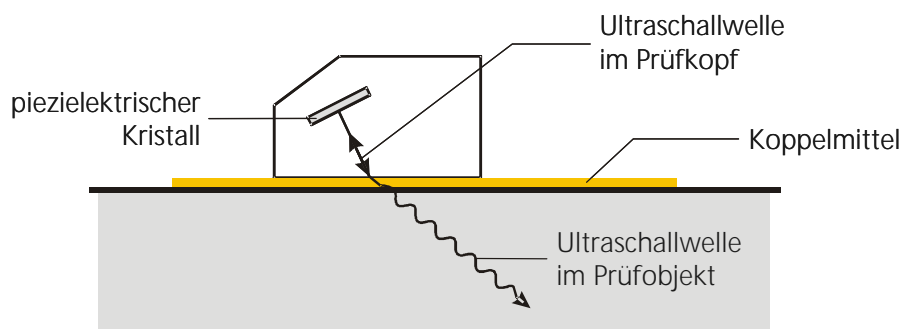


Abbildung 3.2 piezoelektrischer Ultraschallwandler

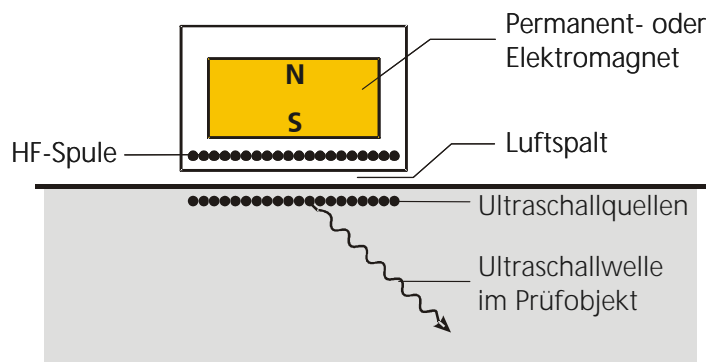


Abbildung 3.3 EMUS-Wandler

3.3 Die Wechselwirkungsmechanismen

Viele Studien beschäftigen sich mit dem Kopplungsmechanismus und dem Energietransfer von elektromagnetischen zu mechanischen Feldern und umgekehrt [THO1973, THO1978B, THO1990, ILI1980, WIL1983, WIL1984, WIL1987, WIL1990, HIR2003, OGI1997, DOB1973]. Der hier angegebene kurze Überblick folgt weitgehend den angegebenen Quellen. Dabei wird deutlich, dass drei Wechselwirkungen zur Kopplung beitragen:

- Die Lorentzkraft, hervorgerufen durch die Wechselwirkung zwischen induzierten Wirbelströmen und statischen oder quasistatischen Magnetfeldern.
- Die magnetische Kraft, verursacht durch die Wirkung oszillierender Magnetfelder auf den Magnetisierungszustand.
- Die Magnetostriktion, der piezomagnetische Effekt.

Während die Kopplung über die Lorentzkraft in allen elektrisch leitenden Materialien auftritt, sind die beiden anderen Wechselwirkungen nur in ferromagnetischen Werkstoffen anzutreffen. Für nicht magnetische Materialien haben bereits Gaertner et al. [GAE1969] Ende der 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts die EMUS-Anregung über die Lorentzkraft exakt beschrieben. Für ferromagnetische Werkstoffe ist der Kopplungsmechanismus deutlich komplizierter. Wilbrand stellte ein Modell mit allen drei Wechselwirkungsmechanismen auf und verifizierte es im Experiment an ferromagnetischen Testkörpern [WIL1983, WIL1984, WIL1987, WIL1990].

3.3.1 Grundgleichungen

Bei der elektromagnetischen Ultraschallwandlung wird in elektrisch leitenden oder ferromagnetischen Materialien durch die oben genannten Mechanismen elektromagnetische Feldenergie in elastische Energie einer Ultraschallwelle umgewandelt und umgekehrt. Auf der elektromagnetischen Seite wird die Wechselwirkung durch die Maxwellschen Gleichungen beschrieben (Gleichung 3.1). Für den Festkörper gilt die elastodynamische Wellengleichung (Gleichung 3.2).

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho_e \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

Gleichung 3.1 Die Maxwellschen Gleichungen mit \vec{H} magnetisches Feld, \vec{E} das elektrische Feld, \vec{B} die magnetische Flussdichte, \vec{D} elektrische Flussdichte, \vec{j} Stromdichte, ρ_e Ladungsdichte

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$

Gleichung 3.2 elastodynamische Wellengleichung mit ρ Massedichte, \vec{u} elastische Verschiebung, σ_{ij} Komponente des Spannungstensors, \vec{f} Kraftdichte, über doppelt auftretende Indices wird summiert (Einstein Konvention)

Die resultierende Kraft auf einen Gitterpunkt ist durch die Summe der einzelnen Kraftanteile aus Lorentzkraft, magnetische Kraft und Magnetostriktion gegeben. Ausgehend von der Beschreibung der elektromagnetischen und der elastischen Felder gemäß Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2 können mit Hilfe weiterer Annahmen über die elektromagnetischen Kräfte in magnetisierbaren elastischen Festkörpern und über die Elektrodynamik sich bewegender deformierbarer Medien sowie einer phänomenologischen Beschreibung der Magnetostriktion Ausdrücke für die verschiedenen Kraftanteile aufgestellt werden. In ferromagnetischen oder metallisch leitenden Werkstoffen können die Terme linearisiert und vereinfacht werden und man erhält Gleichung 3.3 [THO1990, WIL1987]. Anhand der Gleichung können neben den Krafrichtungen auch die physikalischen Abhängigkeiten von den Eingangsgrößen abgelesen werden, das heißt mit ihrer Hilfe können die momentan wirkenden Kräfte im Prüfobjekt abgeleitet werden, die ein Strom durchflossener Leiter bei gleichzeitig anliegenden magnetischen Feld erzeugt.

Bezüglich einer Prüfobjektoberfläche gibt es für die Stromrichtung in der HF-Spule und die Richtung der Vormagnetisierung drei ausgezeichnete Konfigurationen, alle übrigen können daraus als Mischform gebildet werden:

- Die horizontal, parallel zur Prüfobjektoberfläche ausgerichtete Magnetisierung liegt senkrecht zur Stromrichtung in der HF-Spule (Abbildung 3.4).
- Die horizontale Magnetisierung ist parallel zur Stromrichtung ausgerichtet (Abbildung 3.5).
- Die Prüfobjektoberfläche und die Magnetisierung stehen senkrecht zueinander (Abbildung 3.6).

In Abbildung 3.4 bis Abbildung 3.6 sind die Richtungen der einzelnen Kraftanteile bei horizontaler und senkrechter Vormagnetisierung für die verschiedenen HF-Stromrichtungen schematisch gemäß Gleichung 3.3 dargestellt. Die Krafrichtungen gelten für einen Arbeitspunkt mit positiver magnetostriktiver Dehnung.

$$\vec{F}_{ges} = \vec{F}_L + \vec{F}_M + \vec{F}_{MS} \quad \text{mit} \quad \vec{F}_L = \vec{j}_{WS} \times \vec{B}_0$$

$$\vec{F}_M = (\vec{\nabla} \vec{H}_{HF}) \cdot \vec{M}_0$$

$$\vec{F}_{MS} = \vec{\nabla} \cdot \vec{T}_{MS}$$

Gleichung 3.3 Wechselwirkungsanteile bei der elektromagnetischen Ultraschallwandlung:
 \vec{F}_L Lorentzkraft, \vec{F}_M magnetische Kraft und \vec{F}_{MS} magnetostriktive Kraft mit \vec{j}_{WS} induzierte Wirbelstromdichte, \vec{B}_0 magnetische Flussdichte zur Vormagnetisierung \vec{M}_0 , \vec{H}_{HF} zeitlichveränderlicher Anteil des magnetischen Feldes wobei $(\vec{\nabla} \vec{H}_{HF})$ das dyadische Produkt darstellt, \vec{T}_{MS} magnetostriktiver Spannungstensor mit $\vec{T}_{MS} = -\vec{e} \vec{H}$ wobei \vec{e} der Tensor der feldabhängigen magnetostriktiven Koeffizienten des Werkstoffes ist.

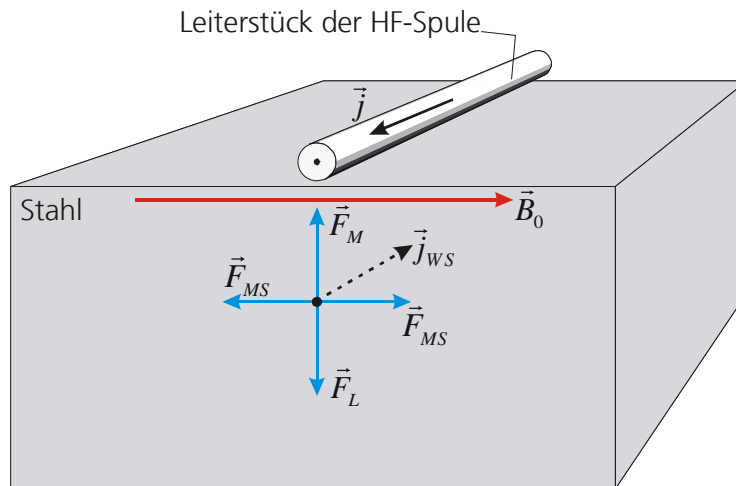


Abbildung 3.4 Wechselwirkungsanteile der elektromagnetischen Ultraschallwandlung bei horizontaler Magnetisierung senkrecht zur Stromrichtung, mit \vec{B}_0 magnetische Flussdichte zur Vormagnetisierung, \vec{j} Stromdichte in der HF-Spule, \vec{j}_{WS} induzierte Wirbelstromdichte, \vec{F}_L Lorentzkraft, \vec{F}_M magnetische Kraft, \vec{F}_{MS} magnetostriktive Kraft.

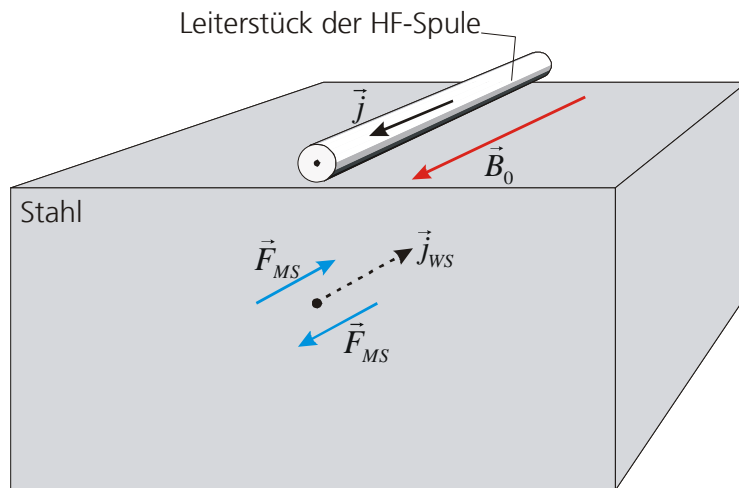


Abbildung 3.5 Wechselwirkungsanteile der elektromagnetischen Ultraschallwandlung bei horizontaler Magnetisierung parallel zur Stromrichtung, Bezeichnungen siehe Abbildung 3.4

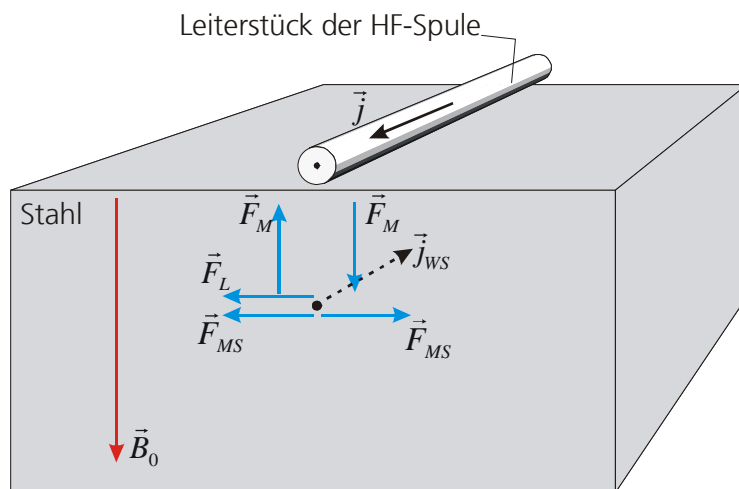


Abbildung 3.6 Wechselwirkungsanteile der elektromagnetischen Ultraschallwandlung bei senkrechter Magnetisierung, Bezeichnungen siehe Abbildung 3.4

3.3.2 Anregung über Lorentzkräfte

Über eine im Wandler angeordnete Spule, die im Sendefall mit einem HF-Burstsignal angeregt wird, werden in der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche Wirbelströme induziert. Wird den Wirbelströmen ein senkrecht, statisches oder quasistatisches Magnetfeld überlagert, wirkt senkrecht zu beiden Größen auf die bewegten Ladungsträger die Lorentzkraft und führt zu periodischen Gitterschwingungen aufgrund der oszillierenden Wirbelströme. Die Gitterschwingungen können als Quellen für Ultraschallwellen wirken. Dieser Mechanismus gilt für alle leitenden, metallischen Materialien. Die Anregung über Lorentzkräfte ist proportional zur statischen magnetischen Induktion und zum Spulenstrom.

3.3.3 Anregung über die magnetische Kraft

Wird ein ferromagnetisches Material einem magnetischen Feld ausgesetzt kommt es zur Magnetisierung des Festkörpers. Durch den Gradienten der Flussdichte an der Oberfläche und im Innern des Prüfobjekts treten magnetische Kräfte auf. Sowohl die Geometrie der HF-Spule als auch der Skineffekt rufen Gradienten der hochfrequenten magnetischen Flussdichte hervor. Die Gradienten bewirken Kräfte auf die dort lokalisierten magnetischen Momente. Die magnetische Kraft ist proportional der Magnetisierungsamplitude [HÜB1984].

Im horizontalen Magnetfeld wirken die magnetische Kraft und die Lorentzkraft antiparallel senkrecht zur (horizontalen) Oberfläche und heben sich damit ganz oder teilweise auf. Die Lorentzkraft und die magnetische Kraft sind deshalb ineffektiv zur Anregung von longitudinal polarisierten Wellenmoden in ferromagnetischen Materialien (Abbildung 3.4). Im senkrechten Magnetfeld wirken die Anteile der magnetischen Kraft rechts und links neben dem Leiter entgegengesetzt und heben sich deshalb im Fernfeld auf (Abbildung 3.6).

3.3.4 Magnetostriktive Anregung

Bei der magnetostriktiven Anregung werden die magnetostriktiven Eigenschaften ferromagnetischer Materialien zur Ultraschallanregung ausgenutzt. Unter Magnetostriktion versteht man die Änderung der geometrischen Abmessungen eines ferromagnetischen Festkörpers unter der Wirkung eines von außen angelegten Magnetfeldes. Hierbei kann zwischen einer Volumenänderung und einer Längenänderung unterschieden werden, wobei der Anteil der Volumenänderung nur einen Bruchteil der Formänderung des magnetostriktiv aktiven Materials darstellt. Der Effekt beruht darauf, dass es innerhalb eines ferromagnetischen, kubisch-raumzentrierten Einkristalls Richtungen gibt, in denen sich die spontane Magnetisierung bevorzugt ausbildet. Meist handelt es sich bei diesen Richtungen um niedrigindizierte Richtungen, wie zum Beispiel beim Eisen um die [100]-, [110]- oder [111]-Richtung. In einer bestimmten Richtung ist dann immer der Magnetisierungsvorgang mit geringstem Energieaufwand möglich. Jedes Herausdrehen der Magnetisierung aus diesen bevorzugten Richtungen durch ein äußeres Feld erfordert einen zusätzlichen Energieaufwand. Bei einer Magnetisierung in eine ungünstigere Richtung ordnen sich die Gitterbausteine etwas um, so dass die Gesamtenergie wieder minimiert wird. Die Folge sind kleine Längenänderungen des Festkörpers (Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8) [KLE1982, BER1998].

Es sei hier festgehalten, dass es im polykristallinen Festkörper zur statistischen Überlagerung der drei in Abbildung 3.7 dargestellten Kurven kommt. In anderen Worten: Polykristallines ferromagnetisches und eisenbasiertes Material ist unter Magnetfeldwirkung zunächst magnetostriktiv positiv (Längsdehnung) und zieht sich ab einer Grenzfeldstärke wieder zusammen (Abbildung 3.8). Die Lage dieser Grenzfeldstärke ist vom Mikrogefügezustand, vor allem aber, vom mechanischen Spannungszustand abhängig. Unter Druckspannungen verschiebt sich die Lage des Maximums zu höheren Feldstärken, unter Zugspannungen zu kleineren Feldstärkewerten. Es gibt eine Grenzzugspannung, ab der der Werkstoff unter

Magnetfeldwirkung sofort mit einer Kontraktion startet, also gänzlich magnetostruktiv negativ reagiert. Mikromagnetisch gesehen sind dann sämtliche leichtbeweglichen 90° Blochwandverschiebungen durch die mechanische Spannungseinwirkung abgelaufen. Für die Antwort auf eine Magnetisierung verbleiben allein die schwerbeweglichen $[111]$ - 90° -Wandbewegungen sowie Drehprozesse [CUL2009].

Wird nun ein ferromagnetisches Prüfobjekt über eine HF-Spule einem oszillierenden Magnetfeld ausgesetzt, kommt es im durchfluteten Bereich zu Gitterverschiebungen, die, da sie periodisch sind, als Ultraschallquellen wirken. Zur Einstellung eines günstigen magnetostruktiven Arbeitspunktes wird in der Praxis, der Testkörper mit einem statischen oder quasistatischen Magnetfeld vormagnetisiert. Um diesen Arbeitspunkt wird das statische Magnetfeld mit dem Wechselfeld der HF-Spule moduliert. Wird ohne Vormagnetisierung gearbeitet werden Gitterschwingungen mit der doppelten Frequenz des elektrischen Anregungssignals erzeugt.

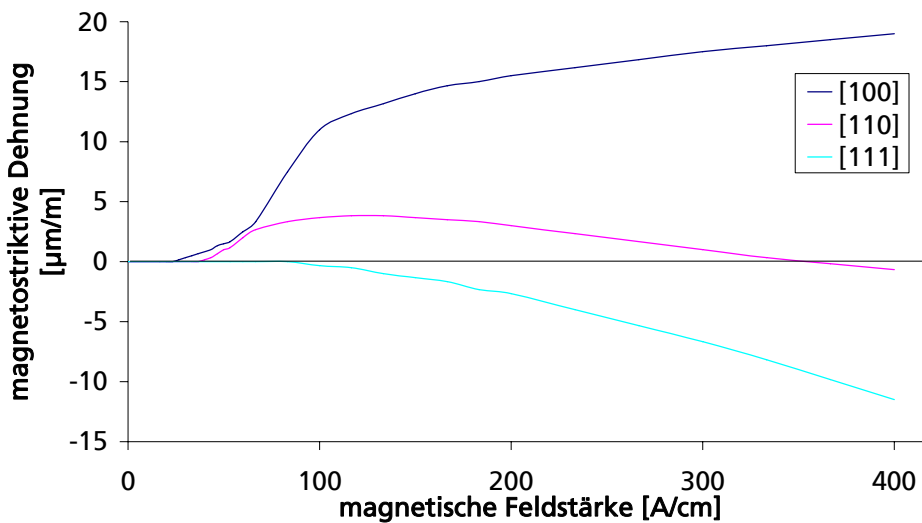


Abbildung 3.7 Längsmagnetostraktion eines Eiseneinkristalls für die drei Hauptrichtungen [KOC1990]

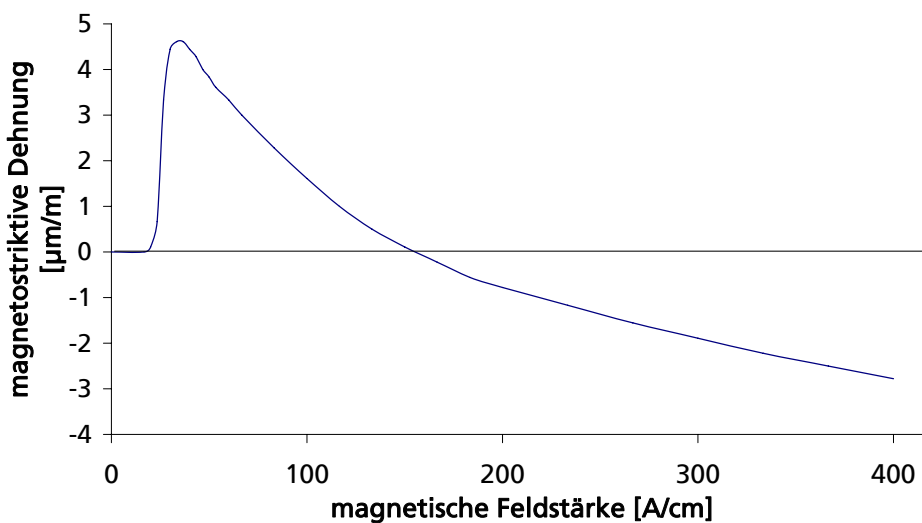


Abbildung 3.8 Längsmagnetostraktion von polykristallinem, spannungsfreiem Eisen [KOC1990]

3.3.5 Empfangsmechanismen

Eine dynamische Verzerrung, hervorgerufen durch eine akustische Welle, verursacht dynamische elektromagnetische Felder, wenn der leitende Festkörper einem statischen Magnetfeld ausgesetzt wird. Die Felder durchdringen die Oberfläche und können mit einer HF-Spule empfangen werden. Der Empfangsmechanismus geht umgekehrt zur Anregung von statten.

Im Falle des Lorentzmechanismus bewirkt eine Ultraschallwelle am Ort der Empfängerspule eine Verschiebung des Materials im statischen Magnetfeld des Wandlers. Bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen führt dies zur Induktion eines elektrischen Feldes, das proportional zur Teilchenverschiebungsgeschwindigkeit und zur Vormagnetisierung ist.

Bei der Wechselwirkung über magnetische Kräfte verursacht die eintreffende Ultraschallwelle Verschiebungen der magnetischen Momente, so dass die statische Vormagnetisierung mit der Ultraschallfrequenz moduliert wird. Die zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte induziert ein elektrisches Feld.

Bei der Magnetostriktion wird durch die elastische Verzerrung des Werkstoffes (Dehnung und Stauchung) durch die Ultraschallwelle die Vormagnetisierung moduliert. Dadurch wird in der Empfangsspule wiederum eine oszillierende Spannung induziert.

4 Entwicklung und Optimierung eines EMUS-Wanddickensensors für die Pipeline-Prüfung

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Wanddickensensors wurde die EMUS-Technik im horizontalen Magnetfeld ausgewählt (Abbildung 4.1). Ein u-förmig ausgebildetes Magnetjoch wird an eine Rohrwand oder einen anderen Testkörper angelegt und erzeugt ein horizontal ausgerichtetes Magnetfeld im Testkörper ähnlich wie bei der klassischen Streuflussprüfung. Zwischen den Polschuhen ist die EMUS-Spulenordnung positioniert. Mit dieser Ausführung kann die Sende-/ Empfangsspule weitgehend mechanisch entkoppelt von der Magnetisierungseinheit angeordnet werden. Dadurch können die mechanischen Belastungen auf das empfindliche Spulensystem minimiert werden, da keine Kräfte ausgehend von der Magnetisierungseinheit auf das Spulensystem wirken. Lediglich eine durch einen Aufhängemechanismus ausgeübte geringe Andruckkraft ist notwendig, um das Spulensystem an der Prüfobjektoberfläche anschieben zu lassen. Die Andruckkraft muss dabei so eingestellt werden, dass das Spulensystem auch bei Bewegung an der Rohroberfläche anliegt und die Abhebezeiten beim Überfahren von Unebenheiten minimal sind.

In diesem Kapitel werden die Abhängigkeiten und Einflussfaktoren für diese Art der elektromagnetischen Ultraschallwandlung untersucht. Aus den Daten können zum einen Informationen über die grundlegenden Wechselwirkungsmechanismen gewonnen werden. Zum anderen erhält man für die Auslegung und Optimierung wichtige Erkenntnisse, sodass im Anschluss ein für die Prüfanwendung angepasster Sensor entworfen und aufgebaut werden kann und die Arbeitspunkte für die praxistauglichen Umsetzung ausgewählt und bestmöglich eingestellt werden können.

Durch die Anordnung im horizontalen Magnetfeld werden die Ultraschallwellen effektiv über die magnetostruktive Wechselwirkung angeregt. Wie bereits in Kapitel 3.3 dargestellt, ist dieser Mechanismus deutlich von der Feldstärke der Magnetisierung abhängig. Deshalb wird als erster Entwicklungsschritt der optimale magnetostruktive Arbeitspunkt für die vorgesehene Prüfaufgabe, der Wanddickenmessung von Rohrwänden, gesucht (Kapitel 4.1).

Daran anschließend werden die EMUS-Sende- und Empfangsspule optimiert. Dazu werden zunächst geeignete Spulentypen aus einer Stichprobe unterschiedlicher Spulengeometrien ausgewählt und anschließend die Dimensionen optimiert. Als Optimierungskriterien dienen dabei an erster Stelle das Schallfeld, das für eine Wanddickenmessung geeignet sein muss, und die Modenreinheit der angeregten Ultraschallwelle (Kapitel 4.2).

Als letzter Entwicklungsschritt für den EMUS-Wanddickensensor wird der komplette elektrische Empfangskreis modifiziert, um ein möglichst kurze Totzone zu erhalten. Dadurch können später auch kleine Wanddicken untersucht werden (Kapitel 4.3).

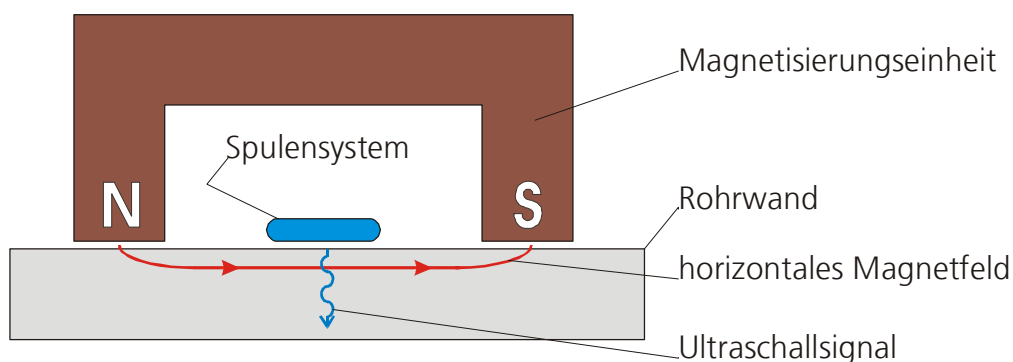


Abbildung 4.1 schematische Sensoranordnung

4.1 Magnetostriktiver Arbeitspunkt

4.1.1 Magnetfeld und Ultraschallwandlung

Die magnetostriktive Ultraschallwandlung ist stark von der angelegten horizontalen Magnetfeldstärke abhängig. Zur Untersuchung dieser Abhängigkeit wurde mit einer EMUS-Spule in einem Testkörper ein Ultraschallsignal angeregt und das Rückwandechosignal empfangen. Die Amplitude des Echosignals wird ausgewertet, während man die Horizontalfeldstärke variiert. Dazu wird die in Abbildung 4.2 schematisch dargestellte Versuchsanordnung benutzt. Mit einem Elektromagnet wird ein Testkörper horizontal magnetisiert. Über ein Steuergerät kann der Spulenstrom eingestellt und somit die Magnetisierungsfeldstärke variiert werden. Auf dem Testkörper ist ein Sensorsystem, bestehend aus EMUS-Sende- und Empfangsspulen und einem Hallensensor zur Messung des Horizontalfeldes, angeordnet. Das Sensorsystem kann parallel zum Horizontalfeld verschoben werden, wobei über einen Weggeber bei Bedarf die Koordinatendaten erfasst werden können. Zur EMUS-Anregung und zur Datenaufzeichnung wird eine am Fraunhofer IZFP entwickelte Elektronik benutzt, bestehend aus einem 4-kanaligen EMUS-Generator und einem PKUS 40-Ultraschallsystem. Das EMUS-Spulensystem wurde mit getrennten Sende- und Empfangsspulen ausgeführt, die als Rundspulen konzentrisch ineinander liegen. Die Sendespule hat einen Durchmesser von 6 mm und die Empfangsspule von 4 mm. Die weiteren Versuchsparameter sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Im ersten Untersuchungsschritt werden der grundsätzliche Verlauf der Wandlungseffizienz über der Horizontalfeldstärke und die Werkstoffabhängigkeit untersucht. Danach folgt die eigentliche Auslegung und Bestimmung des für die Anwendung als Wanddickensensor optimalen Arbeitspunktes.

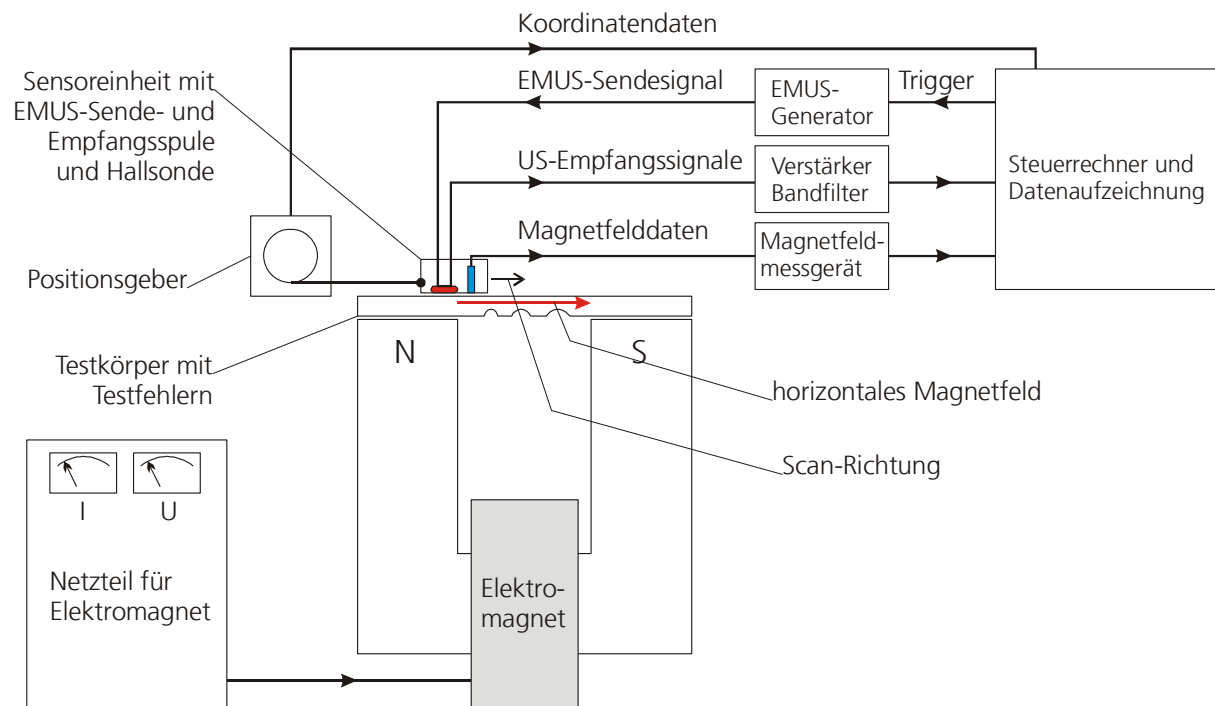


Abbildung 4.2 schematischer Versuchsaufbau zur Messung der Effektivität der magnetostriktiven Ultraschallwandlung in Abhängigkeit des horizontalen Magnetfeldes

Parameter	
Anregungsfrequenz	2,5 MHz
Anregungsburstlänge	2 Zyklen
Empfangsverstärkung	40 dB
Empfangssignalfilterung	Bandfilter: 2,5 MHz – 4 MHz

Tabelle 4.1 Versuchsparmeter

4.1.2 Untersuchung der Wandlungseffizienz bei Variation der Horizontalfeldstärke

Da die Magnetostriktion auch materialabhängig ist, wurde die Wandlungseffizienz an verschiedenen Testkörpern untersucht. Die Untersuchung wird mit einer ortsfesten Sensoranordnung durchgeführt. Als Variationsparameter dient die Feldstärke des horizontalen Magnetfeldes. In Abbildung 4.3 sind die Ergebnisse, die Wandlungseffizienz einer Transversalwelle mit einer Polarisation parallel zur Walzrichtung über der Horizontalfeldstärke, für verschiedene Stahlgüten zusammengefasst. Die Einzelmessungen an mehreren Positionen der Testkörper sowohl für Transversalwellenpolarisationen parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung sind im Anhang angegeben (Kapitel 12.1 *Messergebnisse zur Bestimmung der magnetostriktiven Wandlungseffizienz*: Abbildung 12.1 bis Abbildung 12.18). Zum Einsatz kamen hierbei Testkörper, so genannte Coupons, aus ST37, X60, X70 und X80. Coupons sind Blechproben der Größe 410 x 410 x 20 mm³, die aus Produktionsblechen heraus gearbeitet werden. Sie werden im Blechwalzwerk in der Abnahmeprüfung zur Bestimmung mechanisch technologischer Eigenschaften des Standardzugversuches genutzt.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stahlgüte und Wandlungseffizienz konnte an dieser kleinen Stichprobe nicht festgestellt werden. Für die härtesten Stähle verschiebt sich die Maximumposition leicht zu kleineren Horizontalfeldstärken und die Maximumbreite nimmt ab.

Zusätzlich wurden gleiche Untersuchungen auch an verschiedenen Rohrstücken bzw. Rohrtestkörpern unterschiedlicher Hersteller, Durchmesser, Schweißformen und Wanddicken durchgeführt. Abbildungen der Testkörper sind im Kapitel Testkörper unter 11.2.3 *Sonstige Testkörper* angegeben. Zum Vergleich wurden auch die Werte für einen ST37-Stahl mit angegeben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Man erkennt, dass die Amplitudenmaxima der verschiedenen Testkörper alle in einen Feldstärkeintervall zwischen 250 und 300 A/cm liegen. Die Höhe der Maxima unterscheidet sich für die Rohrwerkstoffe um etwa 5 dB, die maximale Abweichung zum Werkstoff ST37 beträgt dagegen 8 dB.

Lässt man ausgehend vom Amplitudenmaximum eine Reduktion des Echosignals um 10 dB zu, so ergibt sich ein Feldstärkeintervall der horizontalen Magnetisierung von etwa 100 bis 750 A/cm in dem die magnetostriktive Ultraschallwandlung für den Fall der senkrechten Einschallung einer Transversalwelle betrieben werden kann.

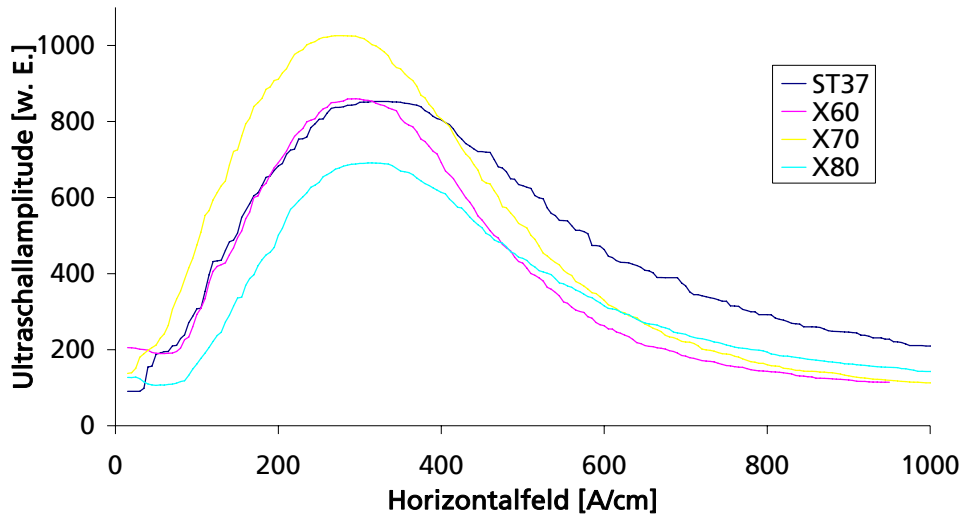


Abbildung 4.3 Effektivität der magnetostriktiven Ultraschallwandlung über der Horizontalfeldstärke bei einer Transversalwellenpolarisation parallel zur Walzrichtung für unterschiedliche Stahlgüten

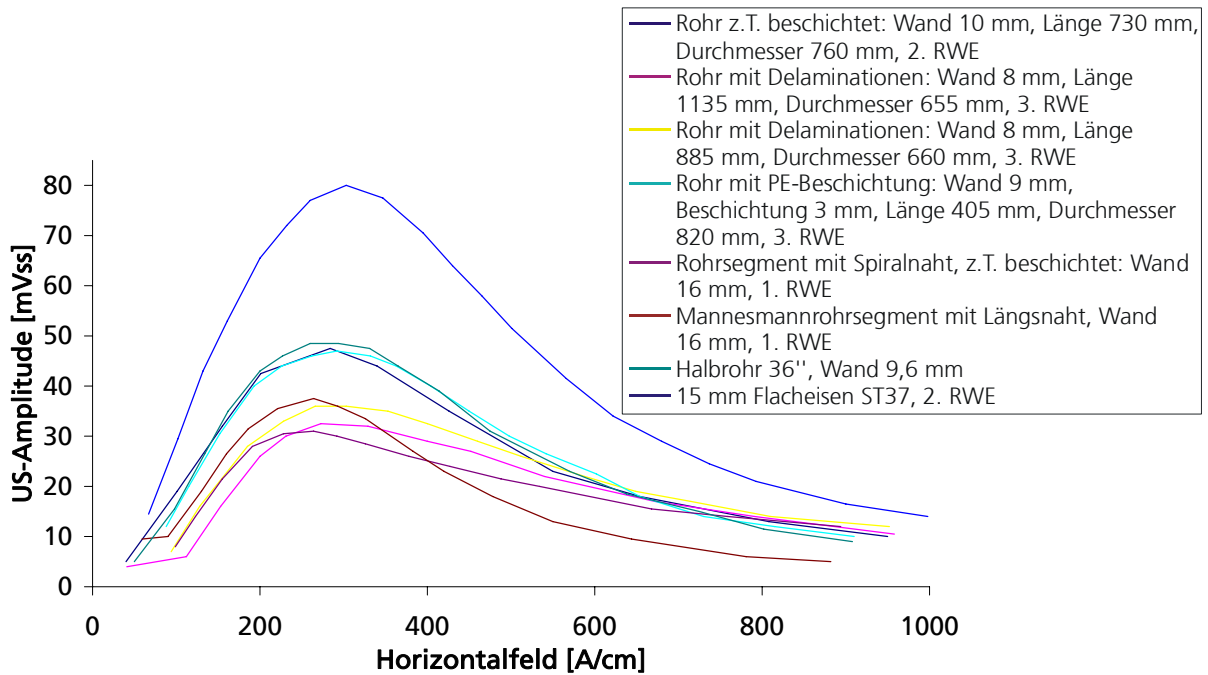


Abbildung 4.4 Effektivität der magnetostriktiven Ultraschallwandlung über der Horizontalfeldstärke bei einer Transversalwellenpolarisation parallel zur Walzrichtung für verschiedene Rohrtestkörper

4.1.3 Auswahl des Arbeitspunktes

Entgegen der üblichen Auslegung, den Arbeitspunkt in das Maximum der Wandlungseffizienz zu legen, kann man dies bei einem magnetostruktiv arbeitenden Ultraschallwandler, der zur Wanddickenbestimmung, oder besser gesagt zur Korrosionstiefenbestimmung genutzt werden soll, nicht tun, da es bei einer Wanddickenreduktion zu einer starken Erhöhung der horizontalen Magnetfeldstärke kommen kann (Abbildung 4.5). Dieser Effekt ist seit langem bekannt und wird bei der Streuflussprüfung eingesetzt und ausgewertet. Dadurch kann der Arbeitspunkt zu so großen Feldstärken verschoben werden, dass die Wandlungseffizienz unter die Rauschschwelle gedrückt wird und keine auswertbaren Empfangssignale mehr detektiert werden können. Deshalb muss das Horizontalfeld in den Bereichen des Prüfobjekts, welche die nominelle Wanddicke aufweisen, deutlich kleiner sein als an der Position der maximalen Wandlungseffizienz. Dadurch bleibt bei Wanddickenreduktionen ausreichend Reserve für die Verschiebung des Arbeitspunktes, denn gerade hier liegen bei der späteren Anwendung die interessanten Prüfbereiche, die auf jeden Fall sicher erfasst werden müssen. Auf der anderen Seite muss die Feldstärke bei nomineller Wanddicke noch ausreichen, um Ultraschallsignale mit ausreichendem Signal-Rauschverhältnis anregen und empfangen zu können.

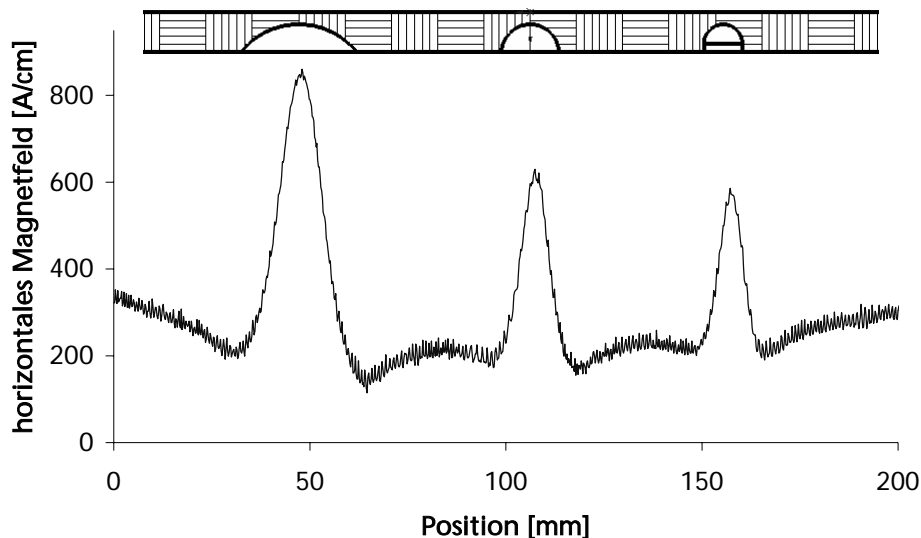


Abbildung 4.5 Horizontalfeldstärke entlang der Testkörperoberfläche: Durch Reduzierung der Wanddicke erhöht sich die Feldstärke im verbleibenden Material. Ein schematischer Schnitt durch den Testkörper ist im oberen Teil der Abbildung dargestellt (TK 10-70%, siehe Tabelle 4.2). Die Testfehler haben eine maximale Tiefe von 70% der Wanddicke.

An den in Tabelle 4.2 aufgeführten Testkörpern wurden Untersuchungen zur Bestimmung des magnetostruktiven Arbeitspunktes vorgenommen. Die Testkörper bestehen aus gezogenem Flachstahl (ST37) mit Wanddicken von 10 bis 20 mm. Sie wurden mit kalottenförmigen Ausfräsungen und Flachbodenbohrungen unterschiedlicher Tiefen und Durchmesser versehen und stellen damit ein breites Spektrum möglicher Wanddickenreduzierungen nach. Die horizontale Feldstärke wurde in den Wanddicke reduzierten und in den fehlerfreien Bereichen gemessen, wobei die Magnetisierung mit Hilfe des Elektromagnets verändert wurde. Die Einzelmessungen als Feldstärkeortskurve über den Testkörper befinden sich im Anhang (Kapitel 12.2 *Messergebnisse zur Bestimmung des magnetostruktiven Arbeitspunktes*: Abbildung 12.19 bis Abbildung 12.63). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 bis Abbildung 4.8 zusammengefasst. Dort werden die absoluten Feldstärkeerhöhungen durch die Wanddickenreduktionen der verschiedenen Testfehler gegen die horizontale Vormagnetisierung im fehlerfreien

Testkörperbereich, das heißt gegen die vorgewählte und eingestellte Magnetisierung dargestellt. Anhand dieser Diagramme kann die Feldstärkeänderung für einen bestimmten Testfehler an einem bestimmten Testkörper bei einer vorgegebenen Magnetisierung im fehlerfreien Bereich abgelesen werden. Während sich die horizontale Feldstärke bei Fehlertiefen bis 30% der Wanddicke maximal verdoppelt, steigt sie bei den größten und tiefsten Testfehlern auf bis zu das Fünffache des fehlerfreien Wertes an.

Faltet man diese Ergebnisse mit der Effektivitätskurve (Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4) so ergibt sich, dass eine horizontale Feldstärke von ~200 A/cm im Bereich der nominellen Wanddicke einen guten Kompromiss darstellt, um sowohl im fehlerfreien Grundwerkstoff als auch in Wanddicke reduzierten Bereichen ausreichende Rückwandechosignale zu erhalten, da sowohl die Testkörper an sich als auch die eingebrachten Testfehler eine gute Näherung der Realität bei korrosionsartigen Defekten darstellen.

Testkörperbezeichnung	nominelle Wanddicke	Fehlertyp	Durchmesser an der Oberfläche	Tiefe
TK 20-70%	20 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	70%, 14 mm
TK 15-70%	15 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	70%, 10,5 mm
TK 10-70%	10 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	70%, 7 mm
TK 20-30%	20 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	30%, 6 mm
TK 15-30%	15 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	30%, 4,5 mm
TK 10-30%	10 mm	kalottenförmig	10, 15 und 30 mm	30%, 3 mm
TK 20-05	20 mm	Flachbodenbohrung	10, 15 und 30 mm	0,5 mm
TK 15-05	15 mm	Flachbodenbohrung	10, 15 und 30 mm	0,5 mm
TK 10-05	10 mm	Flachbodenbohrung	10, 15 und 30 mm	0,5 mm

Tabelle 4.2 Übersicht der Testkörper mit Testfehlern. Alle Testkörper sind aus Stahl ST37 gefertigt. Zeichnungen der Testkörper sind in Kapitel 11.1 *Ebene Testkörper* abgebildet.

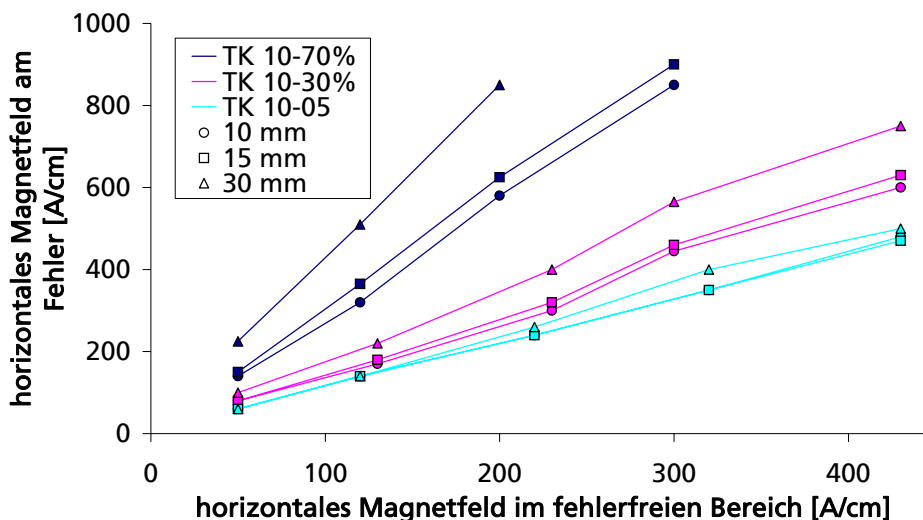


Abbildung 4.6 Feldstärkeerhöhung an verschiedenen Testfehlertiefen (Farben) und -durchmesser (Symbole) für Testkörper mit 10 mm Wanddicke (TK 10-05, TK 10-30% und TK 10-70%)

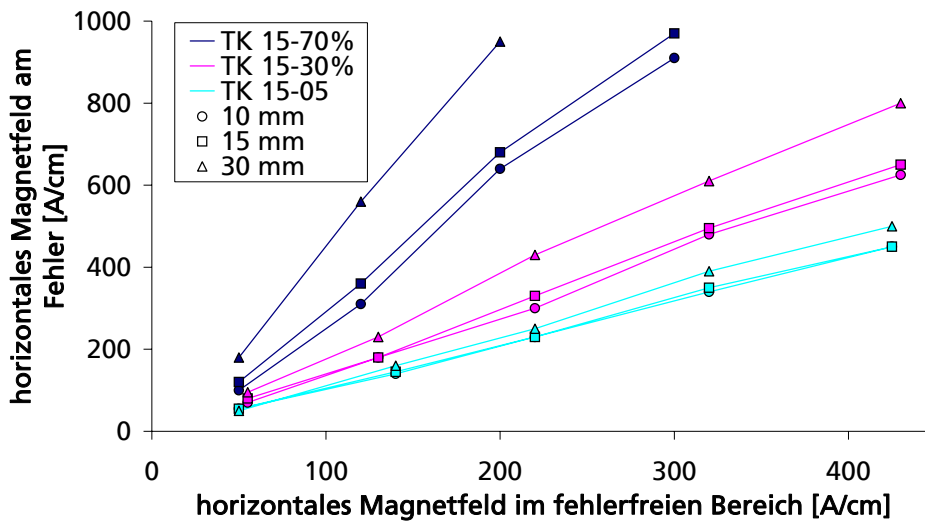


Abbildung 4.7 Feldstärkerhöhung an verschiedenen Testfehlertiefen (Farben) und -durchmesser (Symbole) für Testkörper mit 15 mm Wanddicke (TK 15-05, TK 15-30% und TK 15-70%)

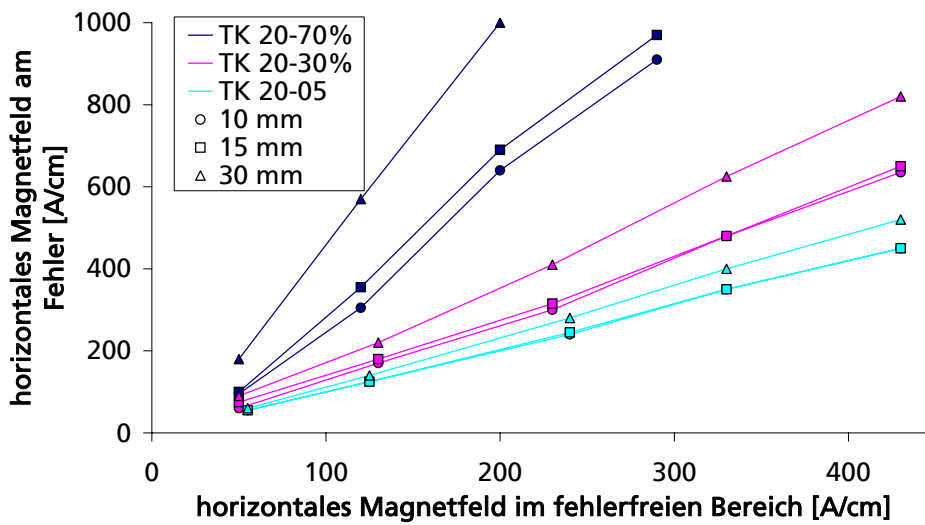


Abbildung 4.8 Feldstärkerhöhung an verschiedenen Testfehlertiefen (Farben) und -durchmesser (Symbole) für Testkörper mit 20 mm Wanddicke (TK 20-05, TK 20-30% und TK 20-70%)

4.2 Schallfelduntersuchungen

Für den Anwendungszweck der Wanddickenprüfung ist eine geeignete Schallfeldverteilung des Ultraschallwandlers von enormer Bedeutung. Sie bestimmt letztlich die Empfindlichkeit der Wanddickenmessung bei nicht planparallelen und/ oder rauen Oberflächen, wie es bei korrodierten Pipeline-Wänden jederzeit auftreten kann. Für den Fall, dass für die Wanddickenbestimmung eine Senkrechteinschallung benutzt wird, besitzt ein geeignetes Schallfeld eine möglichst hohe Hauptkeule unter 0° und möglichst wenige, niedrige Nebenkeulen.

Im Empfangsfall nimmt ein Ultraschallwandler die Amplitude der Ultraschallschwingungen unterhalb der aktiven Sensorfläche wahr. Dabei wird über alle Amplituden, die innerhalb der Wandlerapertur liegen, summiert. Schallfelder mit hohen Nebenkeulenanteilen und/ oder mit einer Nullstelle unter 0° können zum Beispiel bei leicht schräger Reflexion an der Rückwand innerhalb der Wandlerapertur destruktiv interferieren und somit zu Amplitudeneinbrüche führen.

Zur Messung des Schallfeldes der EMUS-Spulen wurde eine Durchschallungsanordnung gewählt (Abbildung 4.9). Die Dicke des Testkörpers wurde bewusst auf 20 mm festgelegt, um hier auch eine typische Stärke einer Pipeline-Wand zu realisieren und das Schallfeld, entgegen dem in den Regelwerken festgelegten Vorgehen, in der Nähe der Nahfeldlänge zu untersuchen. Die Nahfeldlänge eines Kolbenschwingers lässt sich mit Gleichung 4.1 berechnen. Für eine typische, hier in dieser Arbeit verwendeten Spule mit ~ 7 mm Durchmesser und einer Wellenlänge von $\sim 1,3$ mm ergibt sich daraus eine Nahfeldlänge von rund 9,4 mm. Dieser Wert ist als Abschätzung zu verstehen, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Schalldruckverteilung der EMUS-Spule einem idealen Kolbenschwinger entspricht.

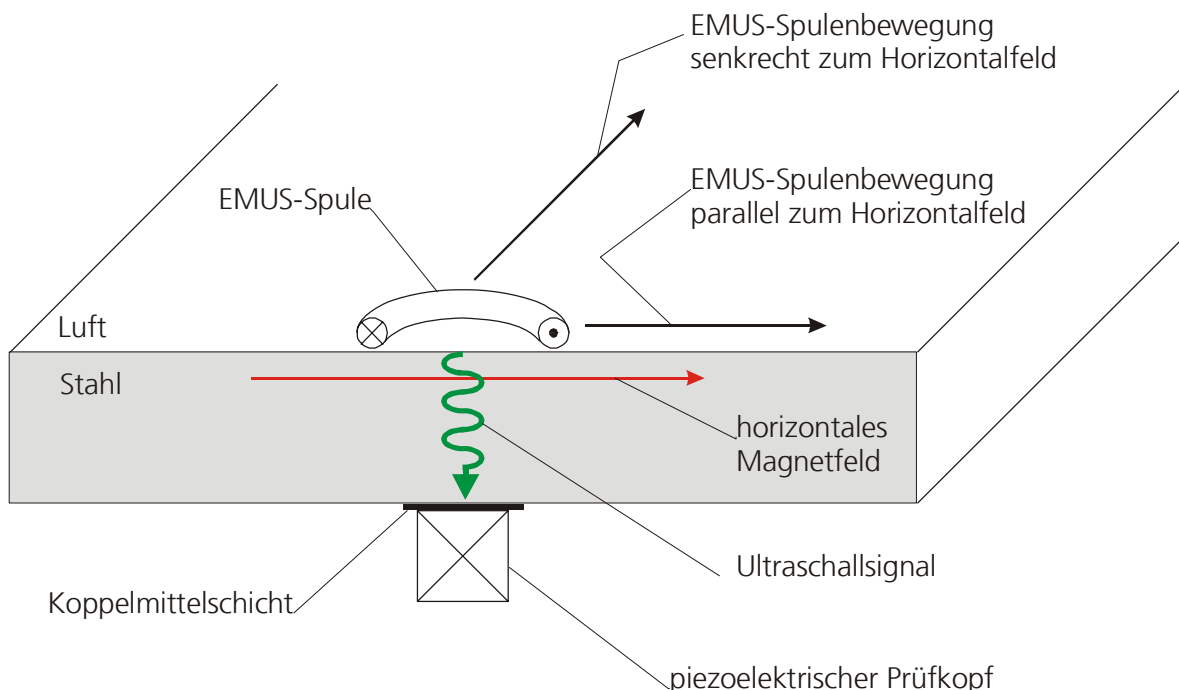


Abbildung 4.9 schematischer Aufbau der Schallfeldmessungen

$$N = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda}$$

Gleichung 4.1 Nahfeldlänge N eines kreisrunden Schwingers mit Schwingerdurchmesser D und Wellenlänge λ [KRA1986]

Die horizontale Vormagnetisierung wurde mit Hilfe eines Elektromagneten auf ~200 A/cm eingestellt. Als Referenzwandler wurden piezoelektrische Ultraschallprüfköpfe benutzt (Tabelle 4.3). Sie wurden mit einem geeigneten Koppelmittel an der Testkörperunterseite angebracht und können wahlweise als Sender oder Empfänger betrieben werden. Im Falle des piezoelektrischen Prüfkopfes für Transversalwellen wurde die Polarisierung parallel zum horizontalen Magnetfeld ausgerichtet, da nur diese Polarisationsrichtung von den EMUS-Spulen angeregt wird. Zur Schallfeldmessung wurden dann die EMUS-Spulen senkrecht oder parallel zum horizontalen Magnetfeld über die Position des piezoelektrischen Prüfkopfes auf der gegenüberliegenden Testkörperoberfläche hinweg bewegt. Da der piezoelektrische Prüfkopf ortsfest gehalten wurde, konnten Koppelmitteleinflüsse weitgehend unterdrückt werden. Die Position des piezoelektrischen Prüfkopfes definiert den Nullpunkt der Verschiebung.

Zur Bestimmung der Schallfeldverteilung wurde zunächst in der angegebenen Richtung die EMUS-Spule bewegt und ein Ultraschall-B-Bild aufgezeichnet. Aus dem B-Bild wird im zeitlichen Erwartungsintervall des ersten Durchschallungssignals eine Amplitudenortskurve erstellt. Diese Kurve kann als Schallfeldverteilung gedeutet werden. Wobei beachtet werden muss, dass auch das Schallfeld des Referenzwandlers in das Ergebnis mit eingeht, man betrachtet also stets die Faltung aus Sender- und Empfängerschallfeld. Da aber immer mit den gleichen Referenzwandlern gearbeitet wird, kann dennoch eine Aussage über die Schallfelder der betrachteten EMUS-Spulen in vergleichender Weise gemacht werden.

Wird die EMUS-Spule als Sender betrieben, so wird sie mit einem Hochspannungsburstsignal beaufschlagt. Das HF-Signal wird mit Hilfe eines EMUS-Generators erzeugt. Bei den folgenden Untersuchungen wurde mit Anregungssignalen mit einer Frequenz von 2,5 MHz und einer Länge von 2 Schwingungszyklen gearbeitet. Das mit dem piezoelektrischen Prüfkopf empfangene Ultraschallsignal wird direkt mit einem Ultraschallsystem (hier PKUS 40) aufgezeichnet.

Da die elektrischen Empfangssignale eines EMUS-Wandlers deutlich kleiner sind als die eines piezoelektrischen Ultraschallempfängers muss vor der Datenaufzeichnung eine rauscharme Vorverstärkung und schmalbandigere Filterung auf das Nutzsignal erfolgen, um genügend Signal-Rauschverhältnis zu erhalten. Die benutzte Verstärkung liegt bei 40 dB, das Bandfilter hat die Grenzfrequenzen 2,5 MHz und 4 MHz.

Wellenart	piezoelektrischer Prüfkopf
Longitudinalwelle	Panametrics V106, 2,25 MHz, 0,5'' long
Transversalwelle	Panametrics V154, 2,25 MHz, 0,5'' trans

Tabelle 4.3 Typenbezeichnung der piezoelektrischen Prüfköpfe

4.2.1 Prinzipielle Schallfelduntersuchungen an verschiedenen Spulengeometrien

Zunächst wurden die grundsätzlichen Einflüsse der Spulengeometrie auf das Schallfeld untersucht. Dabei kamen die in Abbildung 4.10 dargestellten Spulenformen zum Einsatz. Die Spulenparameter sind in Tabelle 4.4 zusammengestellt. Bei dem Spulentyp „abgewinkelte Spule“ wurden die Schallfelder der EMUS-Spule im Sendefall und im Empfangsfall verglichen (Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12). Dabei stellt sich heraus, dass der qualitative Verlauf in beiden Fällen gleich ist. Deshalb wurde bei den weiteren Spulentypen nur das Schallfeld im Sendefall untersucht. Die Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.22 zeigen die Ergebnisse in Form von Amplitudenortskurven, die nach oben beschriebenen Verfahren erstellt wurden. Die relative Phasenlage der einzelnen Schallkeulen zueinander ist in den Abbildungen mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

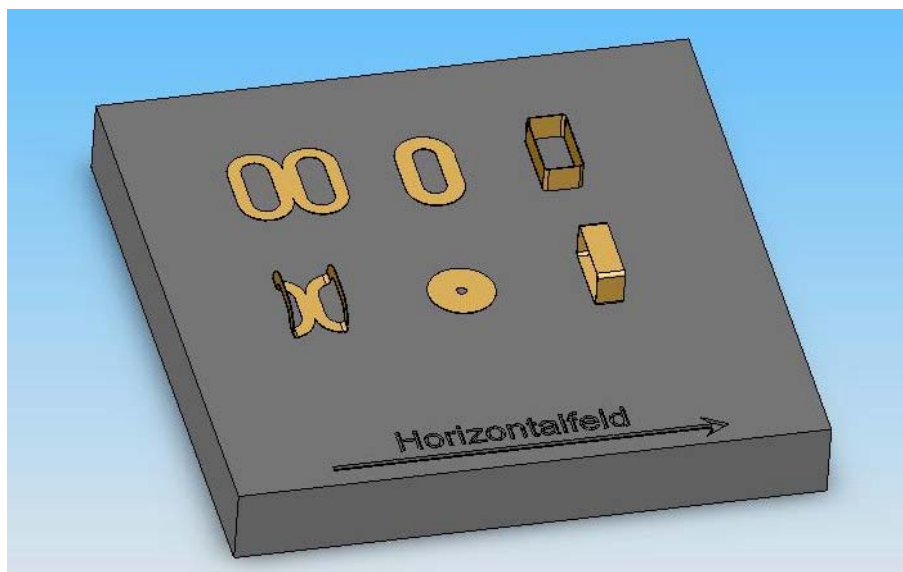


Abbildung 4.10 Übersicht der verschiedenen Spulen (obere Reihe von links: Schmetterlingsspule, O-Spule, Kastenspule (hochkant), untere Reihe von links: abgewinkelte Spule, Spiralspule, Kastenspule (flach))

Es zeigt sich, dass bei Verschiebungen parallel zum Horizontalfeld bei allen Spulentypen sich Nullstellen und Phasensprünge in der Amplitudenortskurve ausbilden. Dabei ist die Anzahl der Nullstellen gleich der Anzahl der Drahtbündel, die das Horizontalfeld senkrecht schneiden. Mit dem Begriff Drahtbündel werden alle Leiterstücke einer Spule zusammengefasst, die die gleiche Stromrichtung aufweisen. Ein einzelnes Drahtbündel, senkrecht zum Horizontalfeld erzeugt nach Wilbrand [WIL1990] bei magnetostriktiver Anregung ein Schallfeld mit einer Nullstelle unter 0° . Durch die Kombination von mehreren in unterschiedlicher Richtung vom Strom durchflossenen angeordneten Drahtbündeln können die beobachteten Schallfeldverteilung qualitativ erklärt werden. Bei einer Verschiebung der EMUS-Spule senkrecht zum horizontalen Magnetfeld haben dagegen die Schallfelder grundsätzlich immer die gleiche Gestalt in Form einer Glockenkurve.

Die für die Wanddickenmessung gestellten Anforderungen an das Schallfeld werden von „Spiralspule“ und „O-Spule“ erfüllt (Abbildung 4.14 und Abbildung 4.18). Zusätzlich zeichnet sich der Spulentyp „Kastenspule (hochkant)“ mit dem höchsten Hauptmaximum bezüglich den Nebenkeulen aus (Abbildung 4.22). Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde die Spulengeometrie weiter optimiert. Bei der Optimierung stellte sich heraus, dass besonders die Bündelung der Leiterstücke zu einem kreisförmigen Ring sich positiv auf das Schallfeld auswirkt: Die Nebenkeulen wurden dadurch deutlich kleiner. In Abschnitt 4.2.3 sind die Schallfelder einer solchen optimierten Rundspule dargestellt.

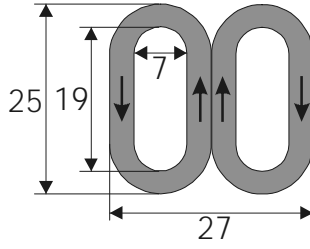
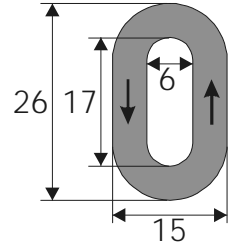
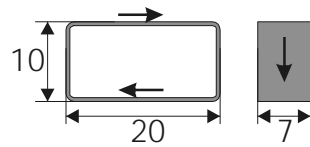
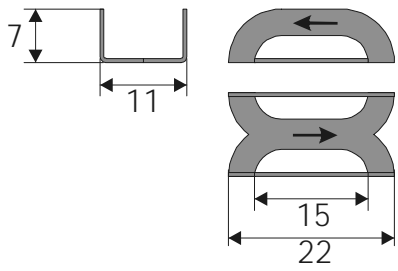
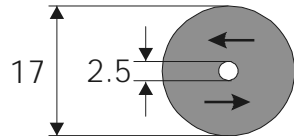
Spulentyp	Windungszahl Drahtdurchmesser \varnothing	Abmessungen [mm]
Schmetterlingspule	2 x 12 Windungen, 0,225 mm \varnothing	
O-Spule	15 Windungen, 0,225 mm \varnothing	
Kastenspule	20 Windungen, 0,225 mm \varnothing	
abgewinkelte Spule	2 x 12 Windungen, 0,225 mm \varnothing	
Spiralspule	32 Windungen, 0,225 mm \varnothing	

Tabelle 4.4 Spulenparameter, die Pfeile im Leiterbereich der Spulen zeigen die momentane Stromrichtung an.

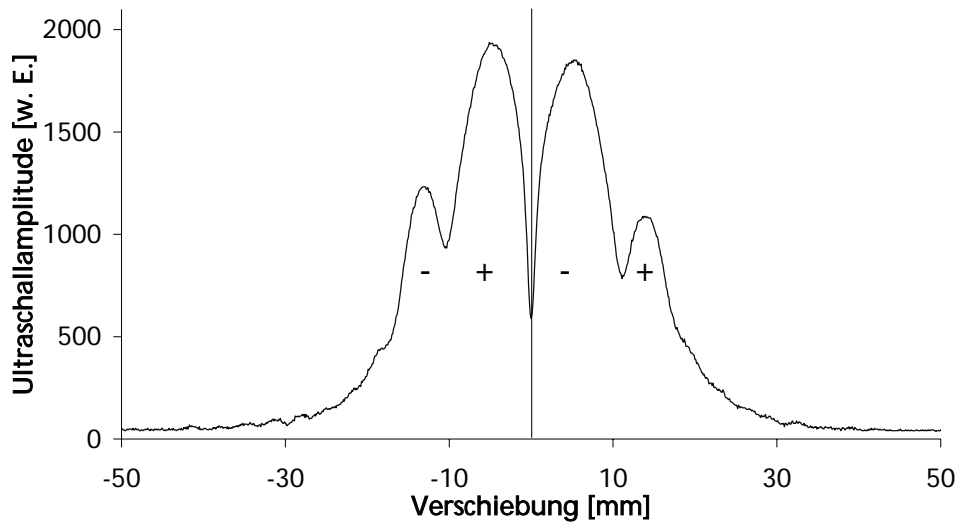


Abbildung 4.11 Amplitudenortskurve der „abgewinkelten Spule“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet. Die EMUS-Spule dient als Sender, der piezoelektrische Prüfkopf als Empfänger.

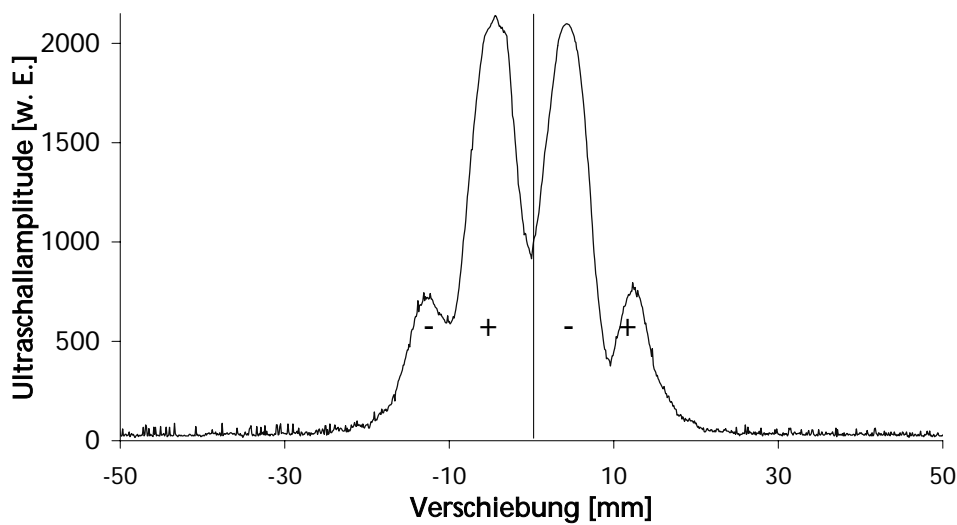


Abbildung 4.12 Amplitudenortskurve der „abgewinkelten Spule“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet. Die EMUS-Spule dient als Empfänger, der piezoelektrische Prüfkopf als Sender.

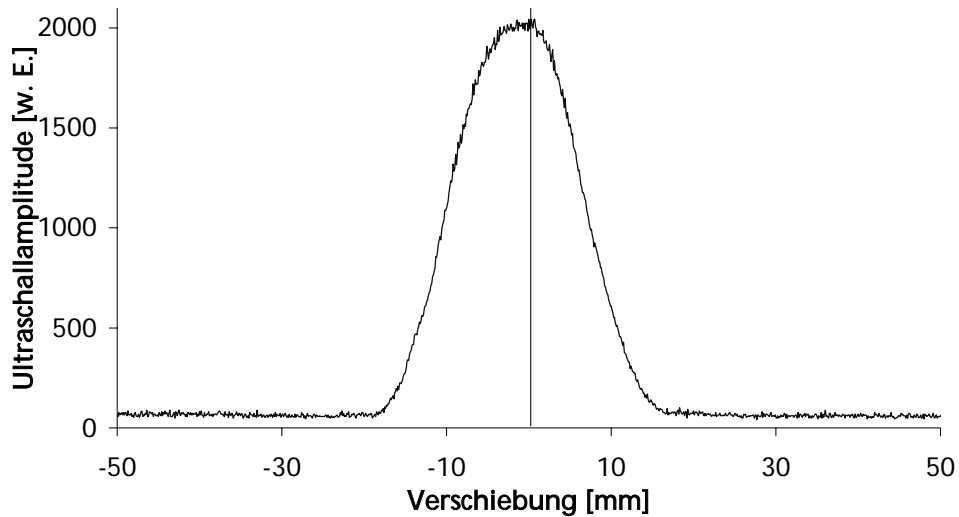


Abbildung 4.13 Amplitudenortskurve der „abgewinkelten Spule“ bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

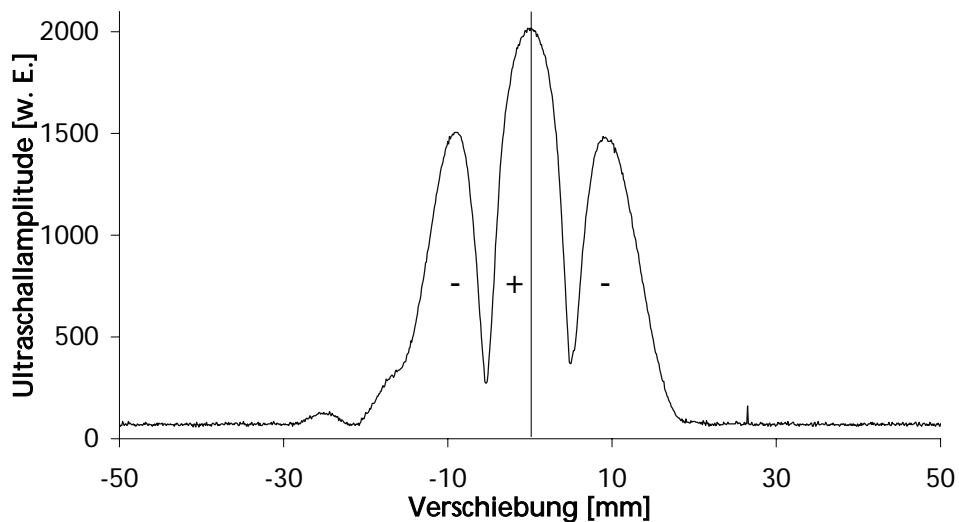


Abbildung 4.14 Amplitudenortskurve der „Spiralspule“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

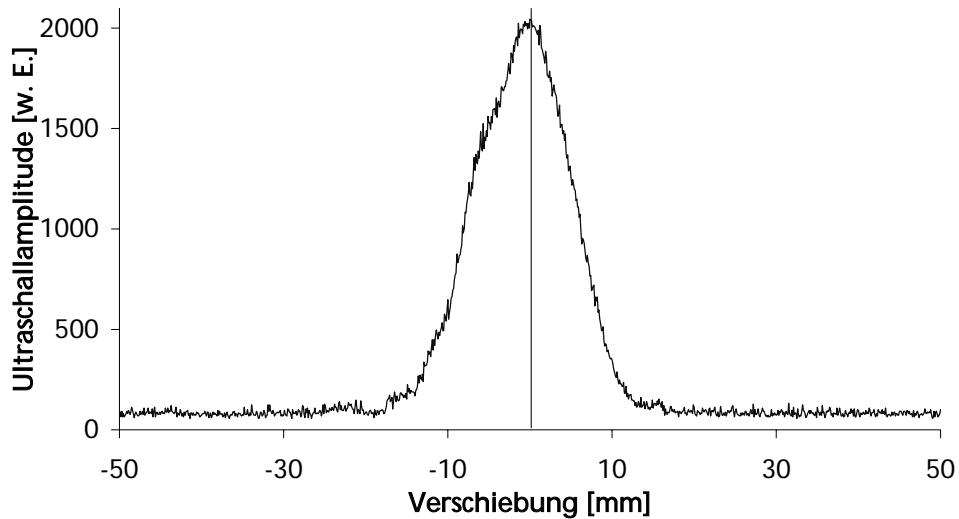


Abbildung 4.15 Amplitudenortskurve der „Spiralspule“ bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

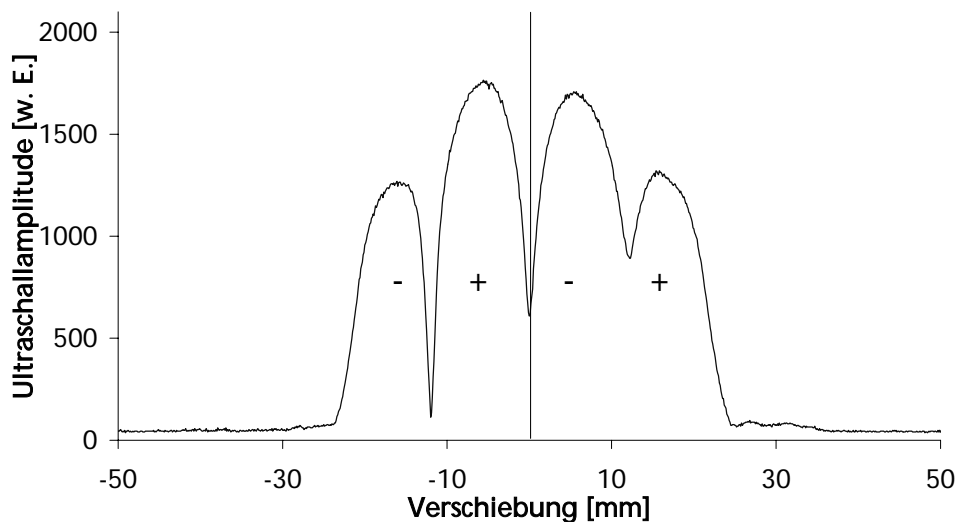


Abbildung 4.16 Amplitudenortskurve der „Schmetterlingsspule“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

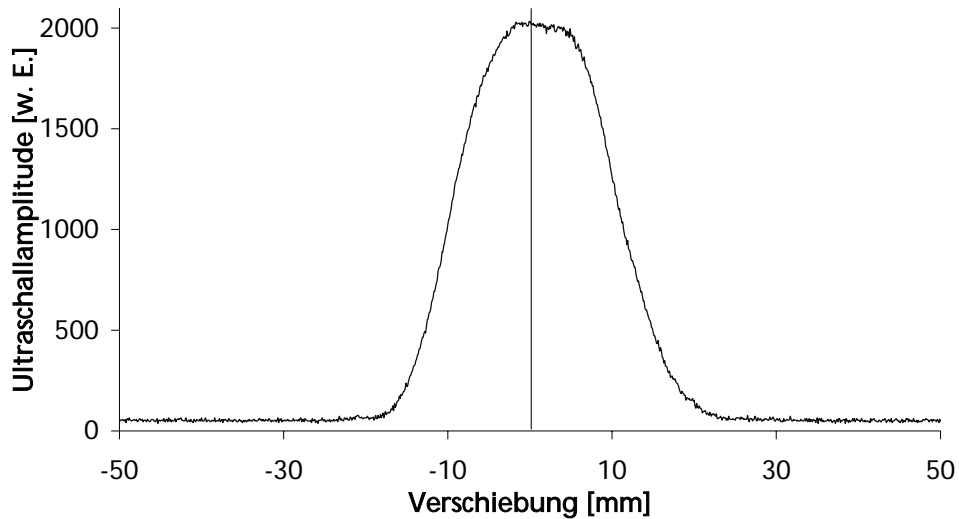


Abbildung 4.17 Amplitudenortskurve der „Schmetterlingsspule“ bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

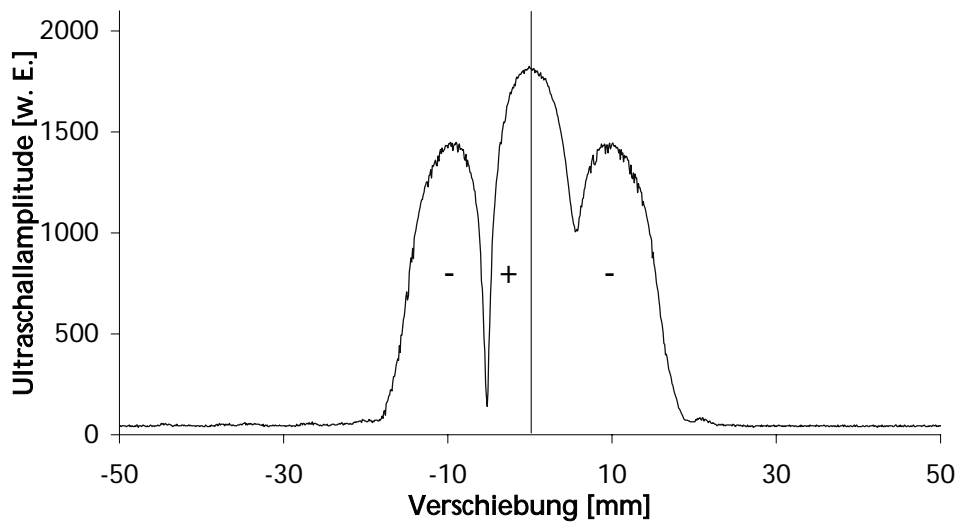


Abbildung 4.18 Amplitudenortskurve der „O-Spule“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

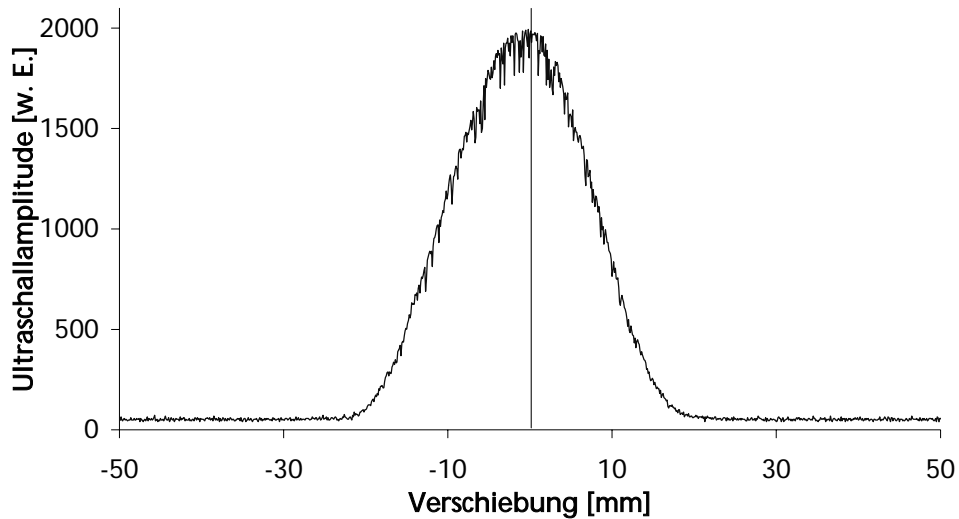


Abbildung 4.19 Amplitudenortskurve der „O-Spule“ bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

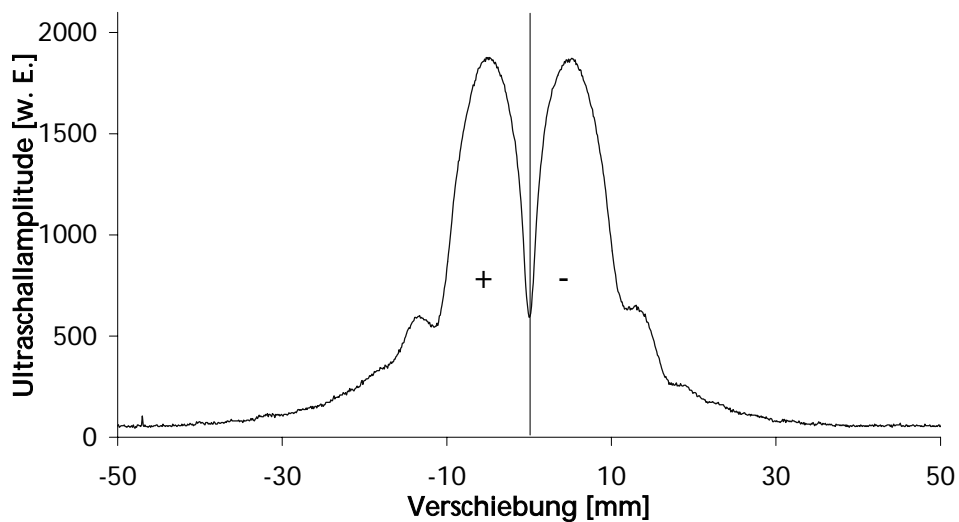


Abbildung 4.20 Amplitudenortskurve der „Kastenspule (flach)“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. Bei der Position 0 findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

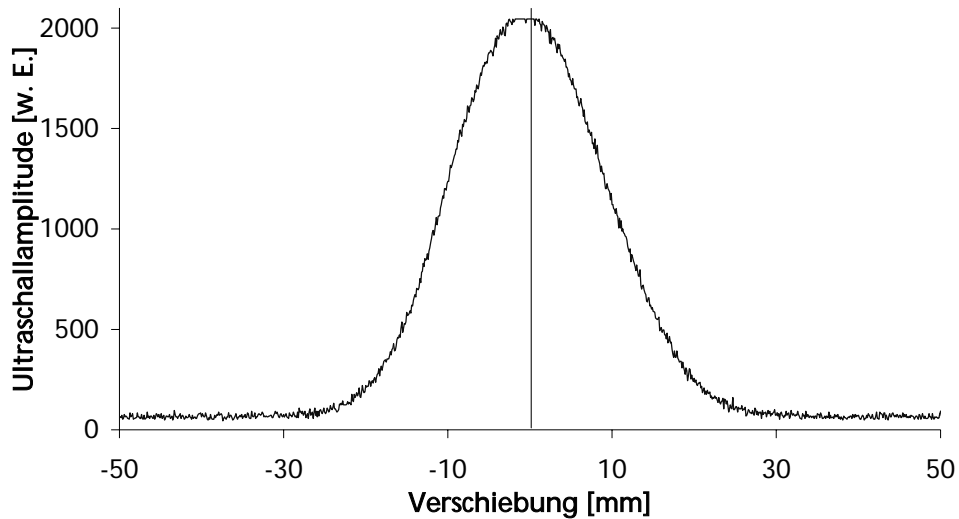


Abbildung 4.21 Amplitudenortskurve der „Kastenspule (flach)“ bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

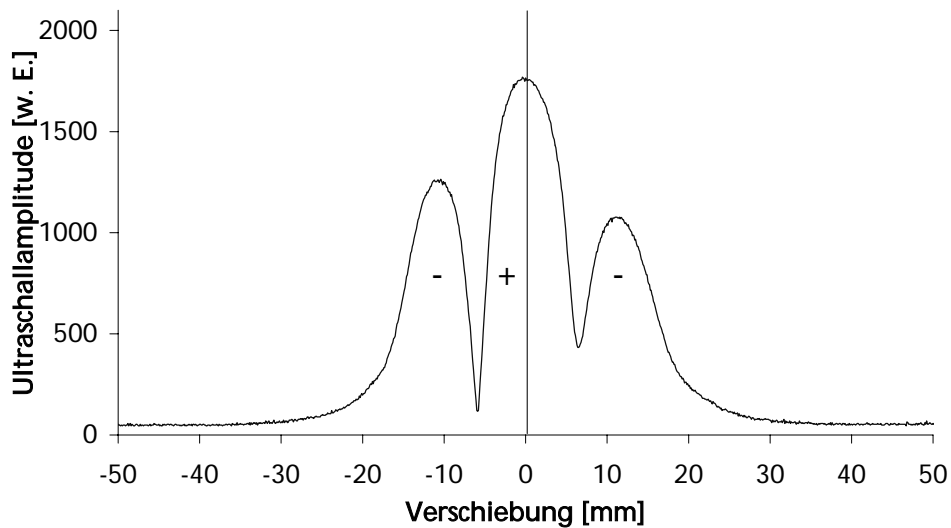


Abbildung 4.22 Amplitudenortskurve der „Kastenspule (hochkant)“ bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. An den Positionen der relativen Minima findet ein Phasensprung statt. Die relative Phasenlage ist mit „+“ und „-“ gekennzeichnet.

4.2.2 Modenreinheit

Neben der Verteilung des Schallfeldes ist ein weiteres wichtiges Optimierungskriterium der EMUS-Spule die Modenreinheit der Ultraschallanregung beziehungsweise die selektive Empfangsensitivität bezüglich Longitudinal- oder Transversalwellen. Nur modenreine Signale lassen eine genaue Bestimmung der Wanddicke zu, da sich die Empfangssignale longitudinaler und transversaler Ultraschallwellen nicht unterscheiden. Nur wenn die Echosignale einem bestimmten Wellentyp zugeordnet werden können, ergeben die Laufzeiten multipliziert mit den richtigen Schallgeschwindigkeiten die korrekte Wanddicke. Außerdem können sich die Echosignale der Transversalwelle mit den zweimal an der Rückwand reflektierten Longitudinalwellensignalen überlagern, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen ungefähr doppelt so hoch ist wie die für Scherwellen. Eine genaue Bestimmung der Wanddicke anhand der Echolaufzeiten des Interferenzsignals ist dann nicht mehr möglich.

Die Abbildung 4.23 zeigt eine Rückwandeckfolge einer EMUS-Rundspule (Typ: S10E8, Sendespulendurchmesser 10 mm, Empfangsspulendurchmesser 8 mm) im horizontalen Magnetfeld. Es sind eine Vielzahl von Echosignalen zu erkennen, die erst mit Hilfe der schematischen Darstellung rechts oben in der gleichen Abbildung identifiziert werden konnten. Es fällt auf, dass es immer bei den Reflexionen an den Oberflächen zu Umwandlungsprozessen von Transversal- zu Longitudinalwellen kommt.

Ein erster Erklärungsversuch der starken longitudinalen Anteile über die Modenumwandlung bei Reflexion und Transmission anhand der entsprechenden Koeffizienten (Abbildung 4.24) schlug fehl, da bei fast senkrechtem Auftreffen auf eine Grenzfläche nur eine minimale Umwandlung stattfindet. Außerdem tritt der Effekt auch bei hohen Echozahlen auf, aber dann ist die Ausbreitungsrichtung nahezu senkrecht zur Oberfläche. In Abbildung 4.23 ist die Umwandlung selbst beim 10. Echo noch erkennbar. Der Schalllaufweg beträgt bis dahin etwa 300 mm bei einem Wandleraperturdurchmesser von gerade einmal 10 mm.

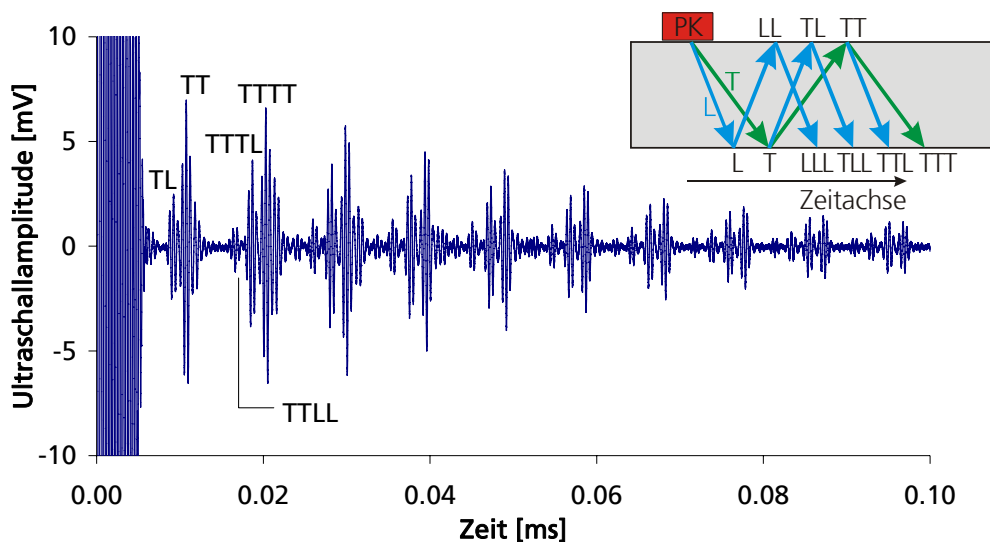


Abbildung 4.23 Rückwandeckfolge einer ringförmigen Rundspule im Horizontalfeld (Typ: S10E8, Sendespulendurchmesser 10 mm, Empfangsspulendurchmesser 8 mm). Misst man die Laufzeiten für die Echos TTLL, TTTL und TTTT bezüglich des vorhergehenden Transversalrückwandeckos aus, können die Echos eindeutig identifiziert werden. Die schematische Darstellung rechts oben dient zur Identifikation der Echosignale (L: Longitudinalwelle, T: Transversalwelle, PK: Prüfkopf).

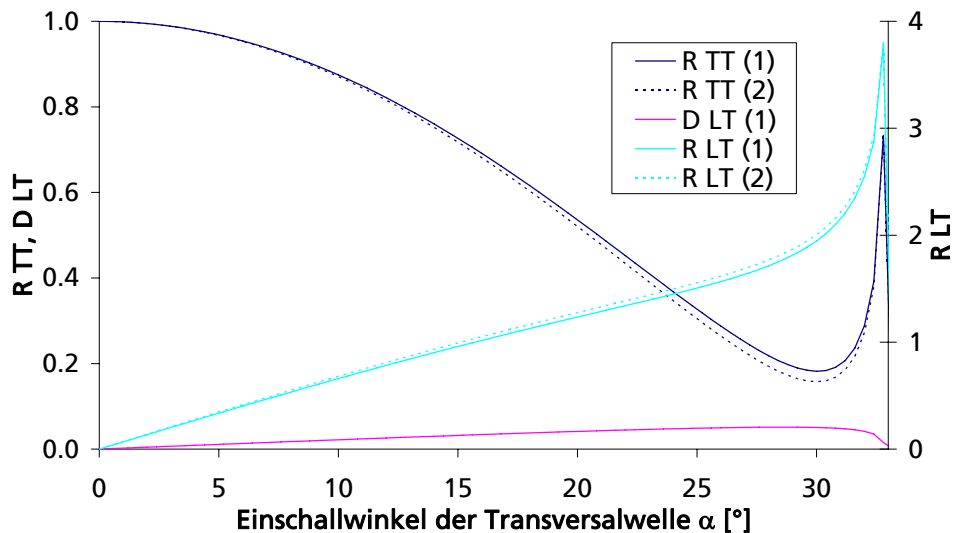


Abbildung 4.24 Reflexionskoeffizient (R) und Transmissionskoeffizient (D) an der Grenzfläche Eisen-Wasser (1) und Eisen-Luft (2) für eine einfallende Transversalwelle. Der Index L steht für Longitudinalwellen und T für Transversalwellen [KRA1986].

Die klassische Betrachtung über die Reflexion- und Transmissionskoeffizienten (für ebene Wellen) bietet also keine Lösung. Da Prüfköpfe mit nur einer Hauptkeule im Schallfeld keine Modenumwandlungseffekte zeigen, kann der Schlüssel für die Erklärung in der Schallfeldverteilung der benutzten EMUS-Spulen liegen. Am Beispiel einer Rundspule wird die Argumentation durchgespielt.

Eine parallel zur Oberfläche ausgerichtete Rundspule besitzt im horizontalen Magnetfeld nach den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Untersuchungen für den transversalen Anteil ein Schallfeld analog zu der in Abbildung 4.26 schematisch dargestellten horizontalen Teilchenauslenkung. Solange eine transversal polarisierte Ultraschallwelle mit einer solchen Schallfeldverteilung durch einen Testkörper läuft, passiert nichts Unerwartetes. Da es sich um eine reine Transversalwelle handelt, gibt es innerhalb des Testkörpers nur Teilchenverschiebungen in horizontaler Richtung.

Trifft aber ein solches Ultraschallsignal senkrecht auf eine Oberfläche, so kommt es dort zu Deformationen in horizontaler aber auch in vertikaler Richtung. Aufgrund der freien Oberfläche und der endlichen Apertur des Schallbündels wirken sich Materialanreicherung und -verarmung auch in vertikaler Richtung aus. Die Abbildung 4.25 verdeutlicht schematisch und rein qualitativ den Gedankengang: Die Oberfläche weicht in vertikaler Richtung in den freien Raum aus, wenn die horizontalen Teilchenverschiebungen sich gegeneinander, aufeinander zu bewegen und es deshalb zu einer Materialanreicherung kommt. Bewegen sich die Teilchen dagegen voneinander weg, gibt es eine Materialverarmung und die Oberfläche zieht sich in den Testkörper hinein. Die resultierenden Teilchenauslenkungen an der Oberfläche sind schematisch in Abbildung 4.26 dargestellt. Da die Verzerrungen an der Oberfläche in Normalenrichtung mit der Ultraschallfrequenz oszillieren, können sie auch als Quelle einer Longitudinalwelle angesehen werden, die senkrecht zur Oberfläche, parallel zur auftreffenden und reflektierten Transversalwelle durch den Testkörper läuft. Das Schallfeld einer auf diese Weise erzeugten Longitudinalwelle hätte dann einen Verlauf proportional zur vertikalen Teilchenauslenkungsamplitude an der Oberfläche.

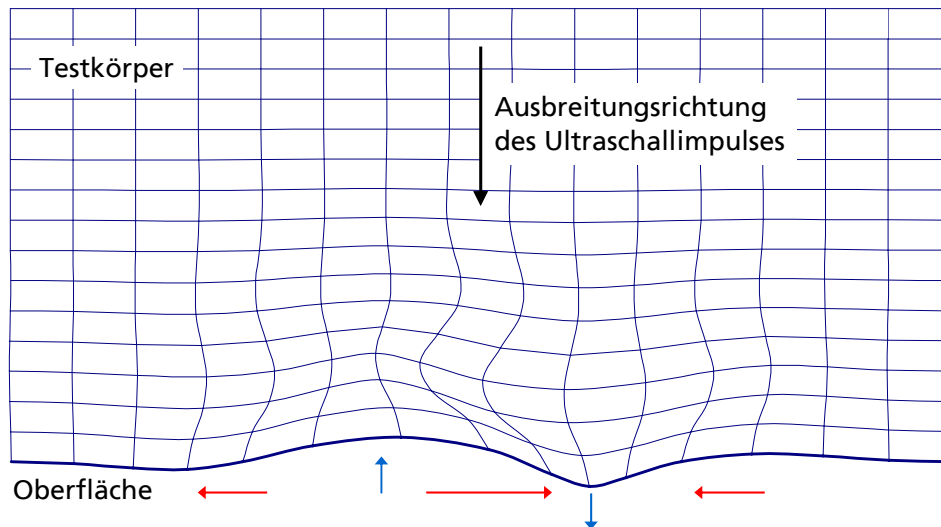


Abbildung 4.25 Ein Ultraschallimpuls einer Rundspule im horizontalen Magnetfeld trifft auf eine Oberfläche (dicke blaue Linie) und erzeugt Teilchenauslenkungen in horizontaler (rote Pfeile) und vertikaler Richtung (blaue Pfeile). Die Verzerrung in vertikaler Richtung kann als Quelle einer Longitudinalwelle angesehen werden.

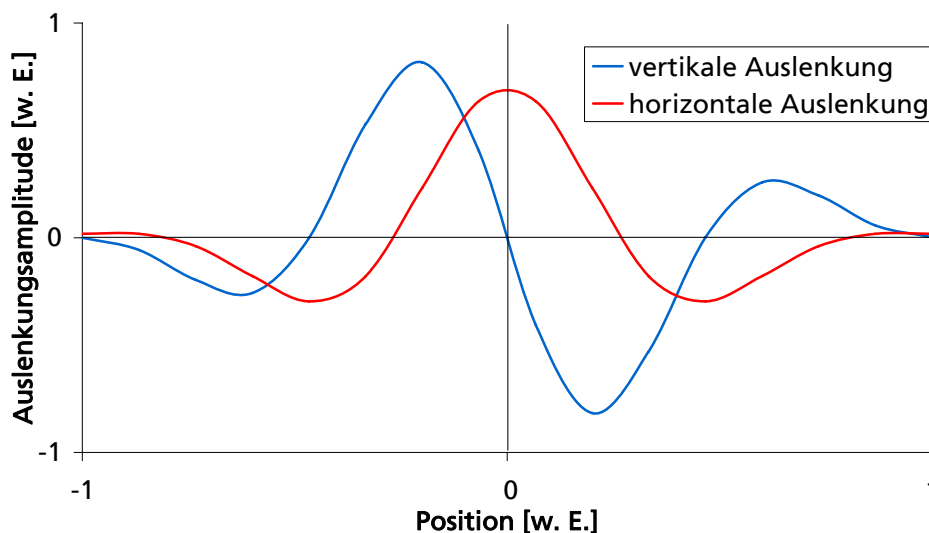


Abbildung 4.26 Teilchenauslenkungen an einer Oberfläche in horizontaler und vertikaler Richtung abhängig von der Position, abgeleitet aus Abbildung 4.25.

Über die magnetostriktive Wechselwirkung können bei der elektromagnetischen Kopplung im horizontalen Magnetfeld Transversalwellen angeregt und empfangen werden (siehe Kapitel 3.3 *Die Wechselwirkungsmechanismen*). Andererseits ist bei einer solchen Spulen-Magnetfeldanordnung aber auch der Empfang von longitudinalen Ultraschallanteilen über Lorentzwechselwirkung möglich. In Abbildung 4.27 wird der Mechanismus verdeutlicht. Die hohen Amplituden der longitudinalen Anteile in der Rückwandeckfolge können dadurch erklärt werden, dass das Empfindlichkeitsprofil für Longitudinalwellen der Rundspule im Horizontalfeld über Lorentzwechselwirkung genau mit dem Schallfeld der durch eine Oberflächenverzerrung an der Rückwand angeregten Longitudinalwelle übereinstimmt (Abbildung 4.26).

Zur Verbesserung der Modenreinheit wurde die Größe der Rundspule variiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Verkleinerung des Spulendurchmessers eine Verringerung des longitudinalen Ultraschallwellenanteils erreicht werden kann. Die maximale Modenreinheit wird für einen Sendespulendurchmesser von 6 mm und einem Empfangsspulendurchmesser von 4 mm erreicht. Diese Rundspulenkombination wird im Folgenden mit S6E4 bezeichnet. In Abbildung 4.29 wird das Ergebnis der Verbesserung der Modenreinheit gegenüber der Ausgangssituation anhand der A-Bilder deutlich. Das Amplitudenverhältnis zwischen Transversal- und Longitudinalwelle hat sich sichtbar erhöht.

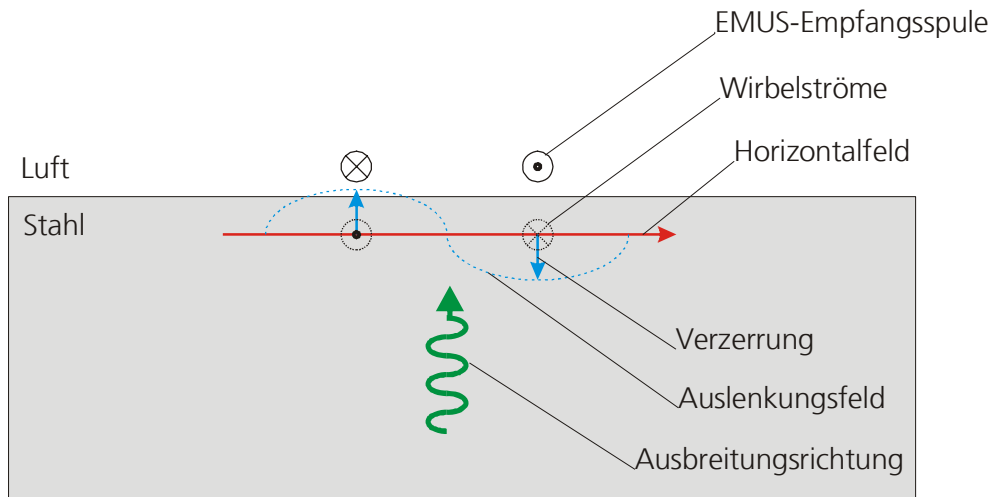


Abbildung 4.27 Empfang einer Longitudinalwelle über Lorentzkräfte

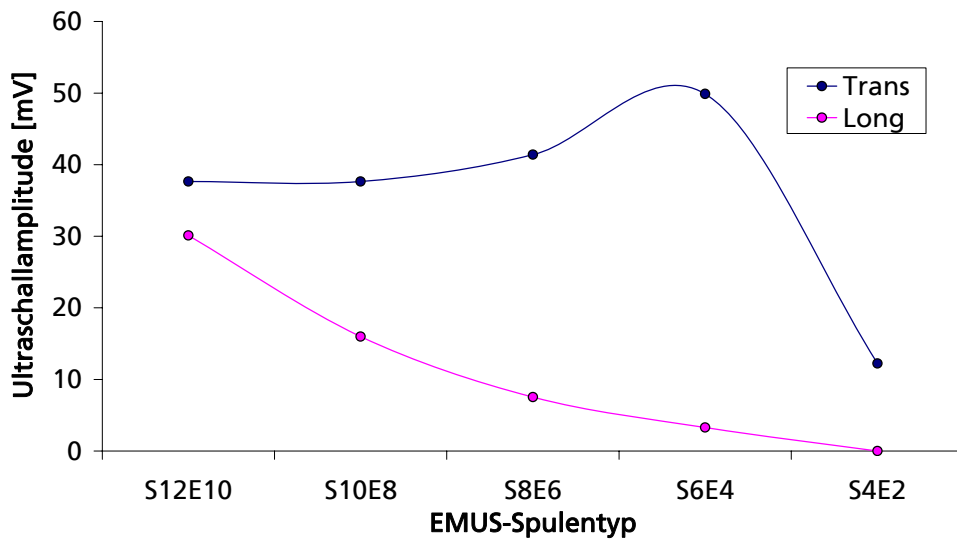


Abbildung 4.28 Absolute Ultraschallamplitude des ersten Rückwandechos des longitudinalen und transversalen Anteils für verschiedene Spulendurchmesser von Rundspulen. Die erste Zahl gibt den Sendespulendurchmesser und die zweite den Durchmesser der Empfangsspule in Millimeter an (zum Beispiel bedeutet S12E10: Sendespulendurchmesser 12 mm, Empfangsspulendurchmesser 10 mm).

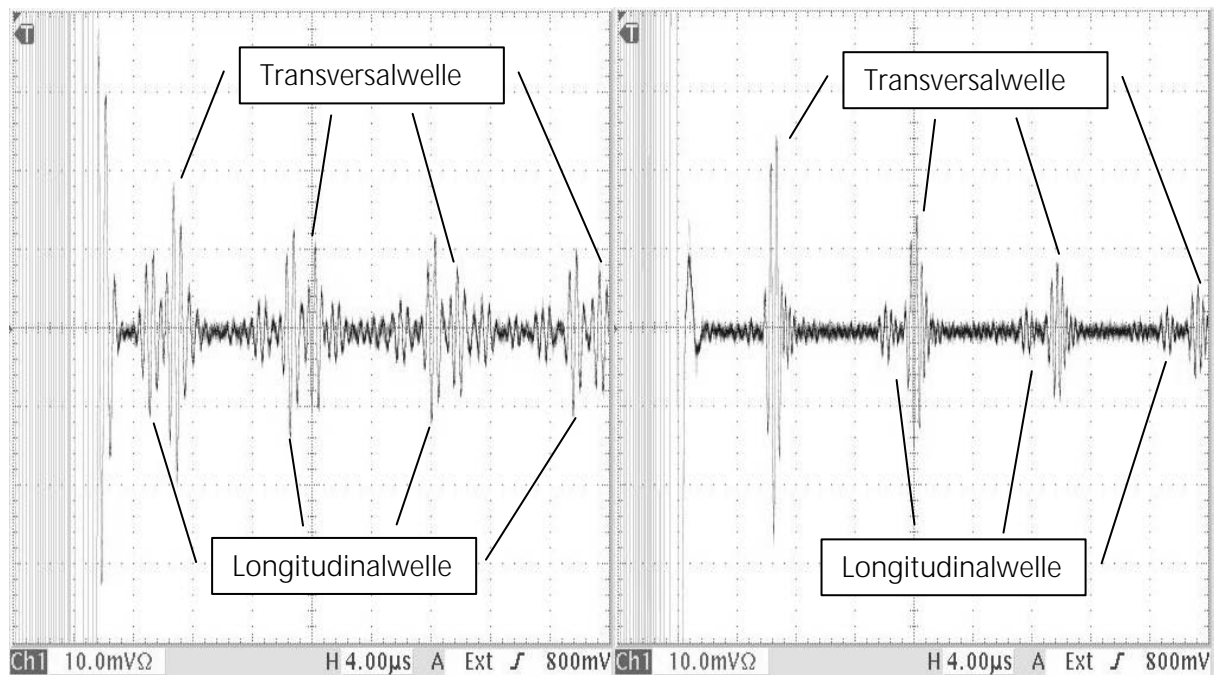


Abbildung 4.29 Ultraschall-A-Bilder verschiedener Spulendurchmesser an der gleichen Testkörperposition. Links: Sendespule 12 mm, Empfangsspule 10 mm (S12E10). Rechts: Sendespule 6 mm, Empfangsspule 4 mm (S6E4), hier sind die longitudinalen Anteile weitgehend unterdrückt.

4.2.3 Schallfeld des optimierten EMUS-Spulensystems

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur schalltechnischen Optimierung einer im horizontalen Magnetfeld arbeitenden EMUS-Spule ermöglichen folgende Schlüsse:

- Nur eine ringförmige Rundspule besitzt das für die Wanddickenprüfung gewünschte Schallfeld mit hoher Hauptkeule unter 0° .
- Um eine hohe Modenreinheit zu gewährleisten, wird der Spulendurchmesser auf die optimierten Werte festgelegt (Sendespule 6 mm, Empfangsspule 4 mm).

Für die optimierte Spulengeometrie und -größe (Spulentyp: S6E4) werden die Schallfelder ausgemessen, dargestellt und bewertet. Dazu wird wie bei den Messungen zuvor gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.2 vorgegangen.

Die Abbildung 4.30 bis Abbildung 4.32 zeigen die Schallfelder des longitudinalen Ultraschallanteils für Verschiebungen senkrecht und parallel zum Horizontalfeld sowohl für den Sende- und Empfangsfall als auch für die Kombination aus beiden, also die Faltung aus Sende- und Empfangscharakteristik. Für diesen Fall wurden die Schallfeldverteilungen von Sender und Empfänger miteinander multipliziert. Analoge Untersuchungen wurden auch für den transversalen Anteil (Polarisation senkrecht zum Horizontalfeld) durchgeführt. Anhand der Verstärkungseinstellungen (Tabelle 4.5) wird deutlich, dass bei der Ultraschallanregung mit der EMUS-Spule S6E4 der transversale Anteil deutlich stärker ist als der longitudinale, zieht man den Sende- und Empfangsfall zusammen ergibt sich ein Unterschied von bis zu 40 dB. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 4.33 bis Abbildung 4.35 dargestellt. Aus den Schallfeldverteilungen wurden für die Spule S6E4 die Halbwertsbreiten ermittelt (Tabelle 4.6).

Während die Anregung der senkrecht eingeschallten Transversalwelle hauptsächlich über die magnetostruktive Wechselwirkung stattfindet, wird der longitudinale Anteil über Lorentzkräfte erzeugt. Aufgrund der entgegengesetzten Stromrichtungen in der linken und rechten Hälfte der EMUS-Spule befindet sich für diese Polarisation unter null Grad eine Nullstelle in der Amplitude (Abbildung 4.27 und Abbildung 4.30).

Die Schallfeldverteilung parallel zum Horizontalfeld ergibt sich aus der Überlagerung zweier Dipolquellen [WIL1990]. Die beiden senkrecht zum Horizontalfeld liegenden Drahtbündel der EMUS-Spule bilden jeweils eine solche Dipolquelle. Die Auslenkungsanteile im Zentrum der Spule überlagern sich konstruktiv und bilden so ein Hauptmaximum der Schallkeule für Transversalwellen aus.

Polarisation der Ultraschallwelle	Verschiebungsrichtung der EMUS-Spule	EMUS-Spule als	
		Sender	Empfänger
longitudinal	parallel zum Horizontalfeld	32 dB	4 dB
	senkrecht zum Horizontalfeld	36 dB	8 dB
transversal, parallel zum Horizontalfeld	parallel zum Horizontalfeld	18 dB	-12 dB
	senkrecht zum Horizontalfeld	16 dB	-14 dB

Tabelle 4.5 Verstärkungseinstellungen

Polarisation der Ultraschallwelle	Verschiebungsrichtung der EMUS-Spule	EMUS-Spule als		
		Sender	Empfänger	Sender und Empfänger
longitudinal	senkrecht zum Horizontalfeld	12 mm	11 mm	8 mm
transversal, parallel zum Horizontalfeld	parallel zum Horizontalfeld	11 mm	7 mm	6 mm
	senkrecht zum Horizontalfeld	7 mm	8 mm	6 mm

Tabelle 4.6 Schallfeldbreiten (Halbwertsbreite) des ersten Durchschallungssignals an 20 mm Testkörper aus Stahl ST37

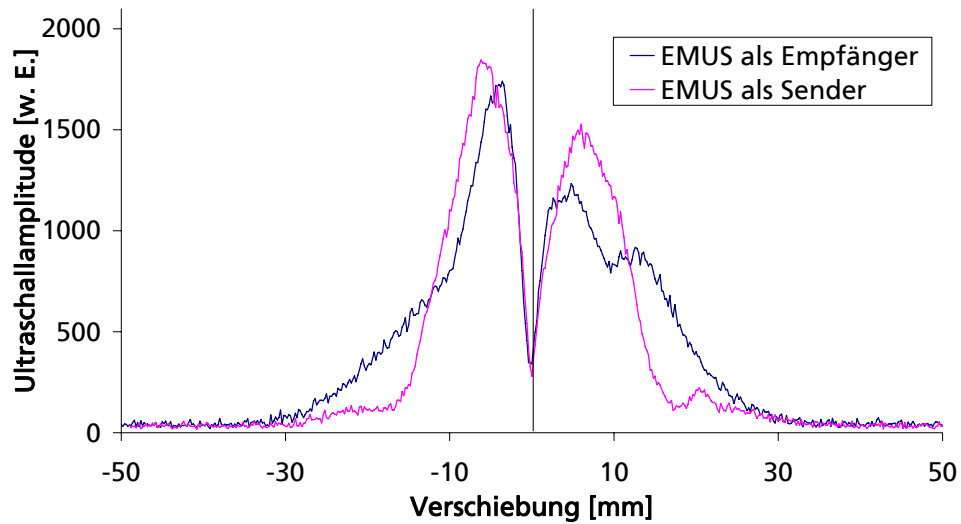


Abbildung 4.30 Amplitudenortskurven bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des longitudinalen Anteils. Bei der Position 0 findet ein Phasensprung statt.

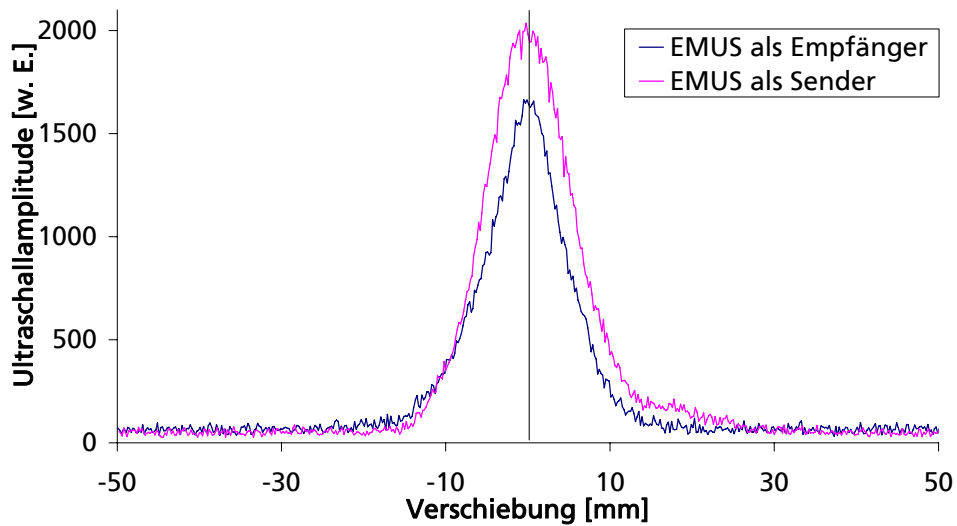


Abbildung 4.31 Amplitudenortskurven bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des longitudinalen Anteils.

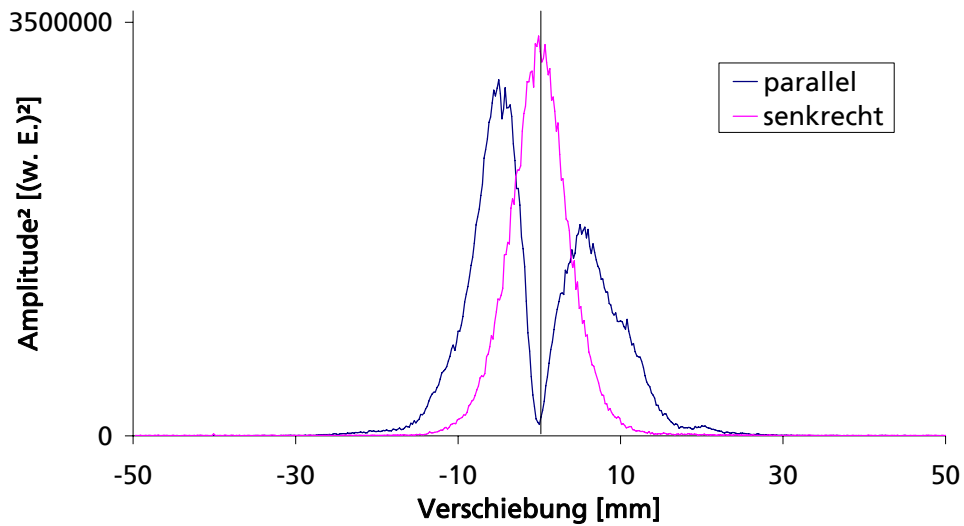


Abbildung 4.32 Produkt aus den Sende- und Empfangsamplitudenortskurven bei senkrechter und paralleler Verschiebung zum Horizontalfeld über die ersten Durchschallungssignale der longitudinalen Anteile.

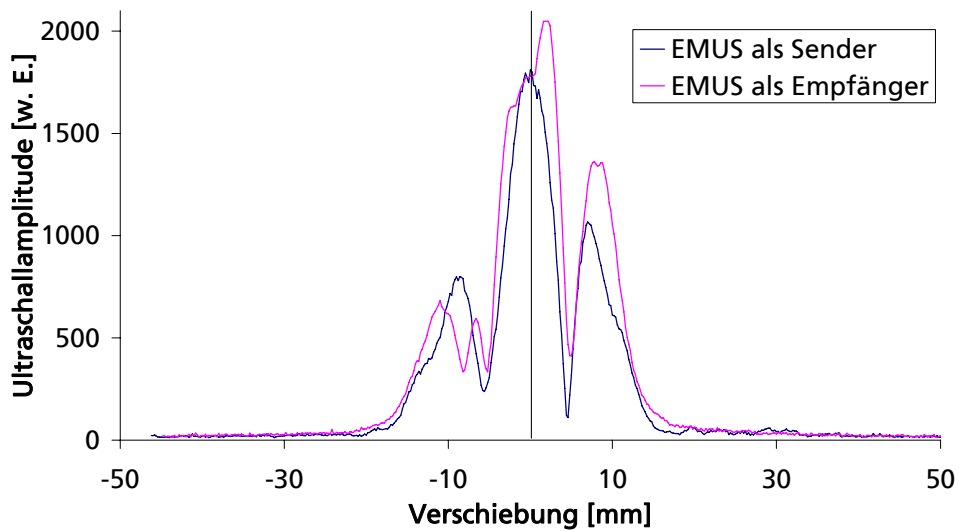


Abbildung 4.33 Amplitudenortskurven bei Verschiebung parallel zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils. Bei den Positionen -6 und 4 findet ein Phasensprung statt.

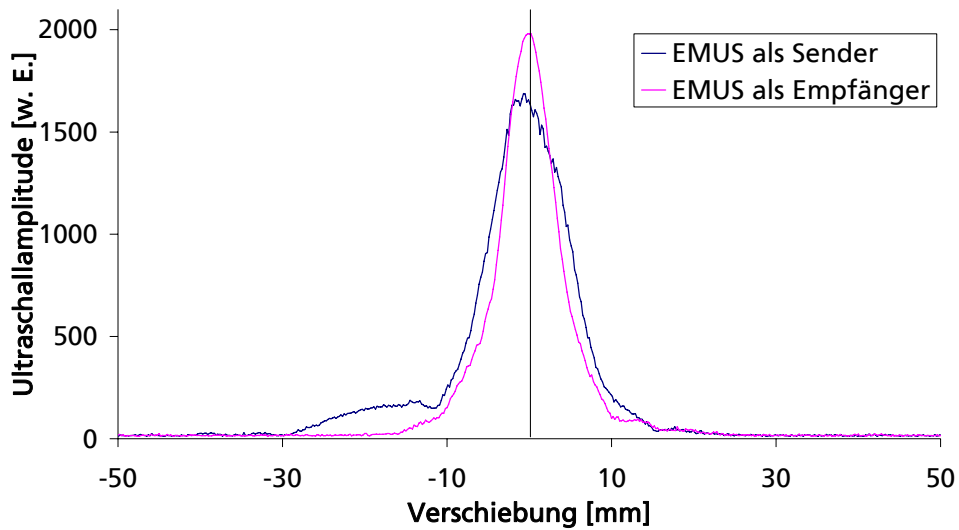


Abbildung 4.34 Amplitudenortskurven bei Verschiebung senkrecht zum Horizontalfeld über das erste Durchschallungssignal des transversalen Anteils.

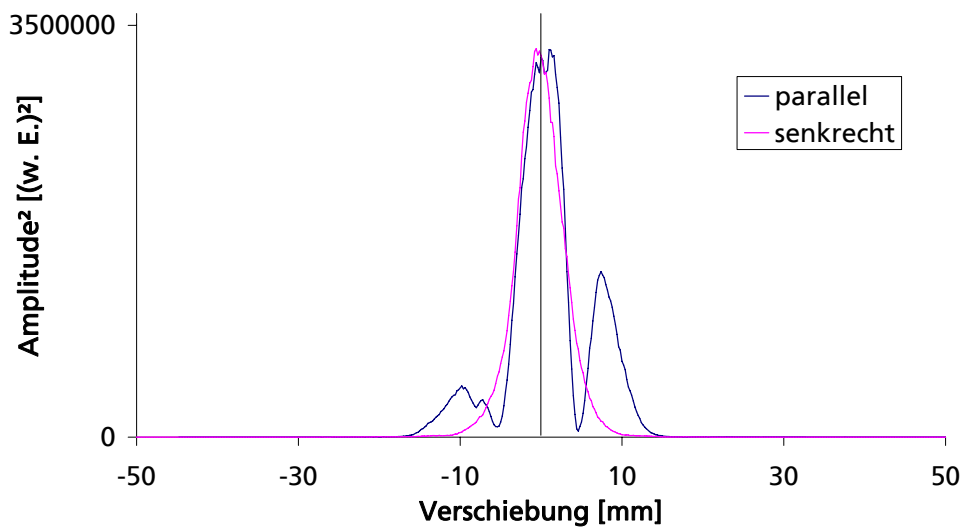


Abbildung 4.35 Produkt aus den Sende- und Empfangsamplitudenortskurven bei senkrechter und paralleler Verschiebung zum Horizontalfeld über die ersten Durchschallungssignale der transversalen Anteile.

4.2.4 Echosignalbreite an Testfehlern und Rückwandechoamplituden des optimierten EMUS-Spulensystems

An verschiedenen Testkörpern gemäß Tabelle 4.2 aus Stahl wurden entlang der Testfehler B-Bilder aufgezeichnet. Als Beispiel sind sie in Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 für kalottenförmige Testfehler und Flachbodenbohrungen dargestellt.

Die 0,5 mm tiefen Flachbodenbohrungen können anhand der zeitlichen Echoverschiebung genau in ihrer Ausdehnung vermessen werden. Dazu werden im B-Bild die Scan-Positionen der Echoverschiebung abgelesen und aus der Differenz die Fehlerbreiten bestimmt. Die experimentellen Fehlerbreiten stimmen sehr gut mit den tatsächlichen Werten überein (Tabelle 4.7). Bei den kalottenförmigen Testfehlern wurden Amplitudenortskurven (Abbildung 4.38) berechnet und die Halbwertsbreiten der Echoanzeigen ausgemessen (Tabelle 4.8). Für den kleinsten kalottenförmigen Testfehler ergibt sich eine Halbwertsbreite von 3 mm. Zum Vergleich wurde auch eine Amplitudenortskurve mit einem in Wanddickenmolchen eingesetzten piezoelektrischen Ultraschallprüfkopf (Sonoscan S54) aufgenommen. Man erkennt, dass die Halbwertsbreiten des neuen EMUS-Wandlers mit denen des piezoelektrischen Prüfkopfes vergleichbar sind.

Die gleiche Datenbasis wurde zusätzlich dazu genutzt, die Rückwandechoamplituden an den verschieden dicken Testkörpern in fehlerfreien Bereichen zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.9 zusammengestellt. Mit dem optimierten EMUS-Spulensystem kann für das erste Rückwandecho eine Amplitudenhöhe von mindestens 24 dB bei 20 mm Wanddicke erreicht werden. Für eine Wanddicke von 10 mm steigt sie auf 29 dB an.

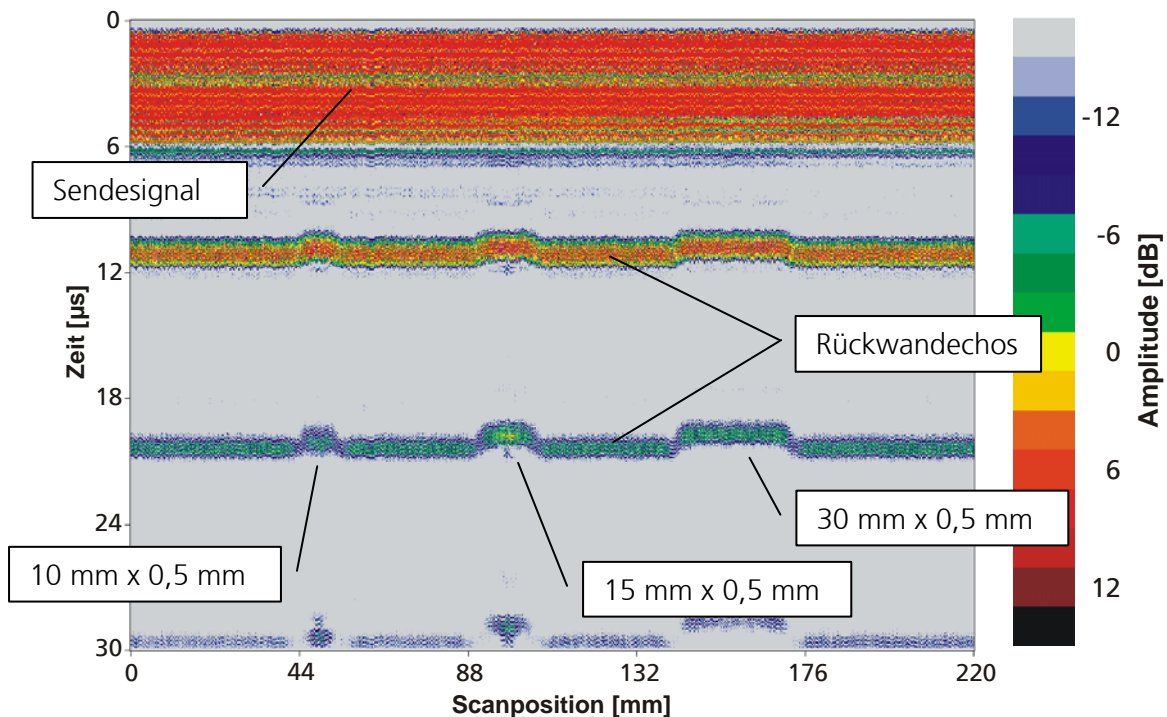


Abbildung 4.36 Ultraschall-B-Bild: Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrung, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

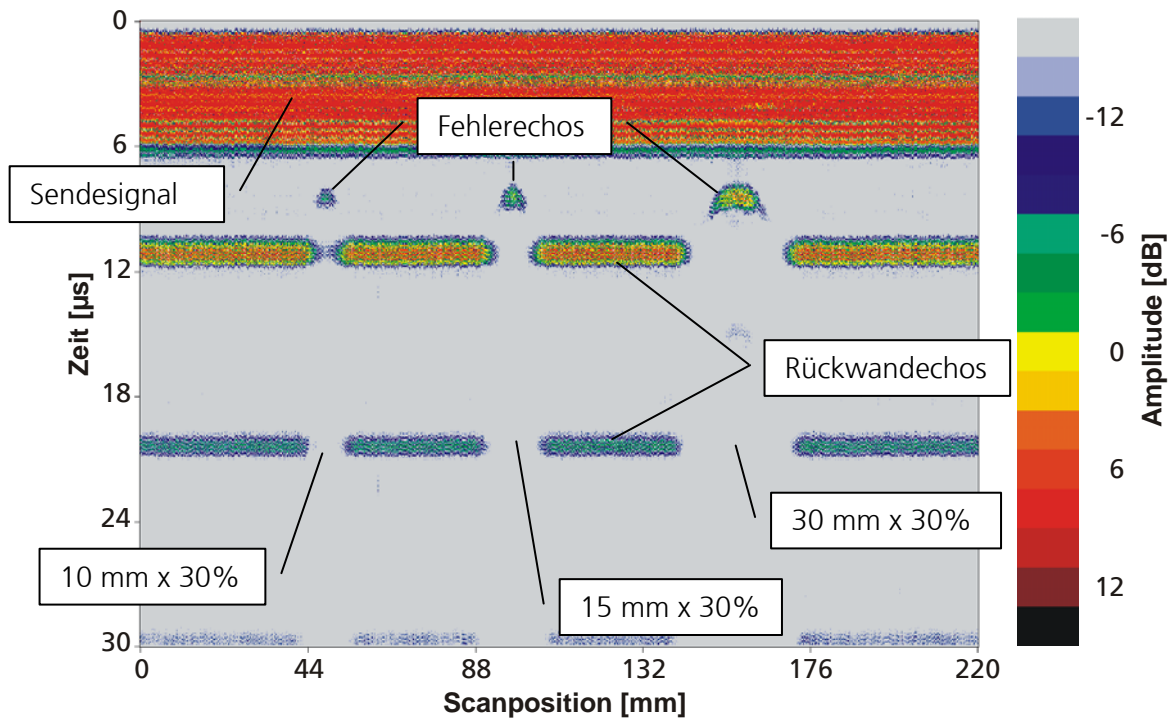


Abbildung 4.37 Ultraschall-B-Bild: Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, kalottenförmige Testfehler, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

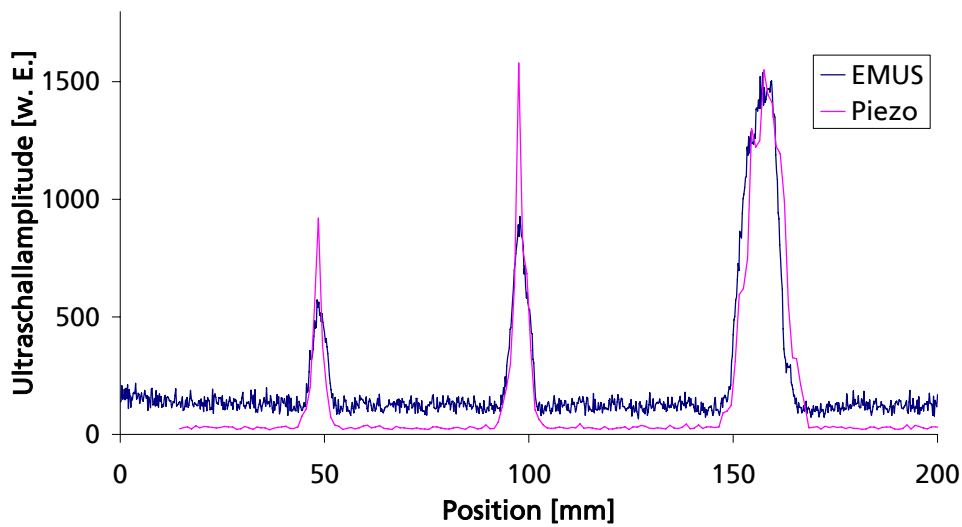


Abbildung 4.38 Amplitudenortskurven für den optimierten EMUS-Wandler und einen piezoelektrischen Ultraschallprüfkopf (Sonoscan S54). Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, kalottenförmige Testfehler, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

Testkörper- bezeichnung	Testfehlerdurchmesser an der Oberfläche [mm]		
	10	15	30
TK 20-05	11 mm	16 mm	30 mm
TK 15-05	11 mm	16 mm	30 mm
TK 10-05	11 mm	16 mm	30 mm

Tabelle 4.7 Testfehlerbreiten der Flachbodenbohrungen aus den B-Bildern. Die Maße der Testkörper sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Testkörper- bezeichnung	Testfehlerdurchmesser an der Oberfläche [mm]		
	10	15	30
TK 20-30%	4 mm	5 mm	8 mm
TK 15-30%	5 mm	5 mm	10 mm
TK 10-30%	3 mm	5 mm	10 mm

Tabelle 4.8 Halbwertsbreiten der Echosignale der kalottenförmigen Testfehler aus Amplitudenortskurven. Die Maße der Testkörper sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Testkörper- bezeichnung	Wanddicke	1. Rückwandecho		2. Rückwandecho	
	[mm]	[mV]	[dB]	[mV]	[dB]
TK 20-05	20	45	24	14	14
TK 15-05	15	63	27	21	17
TK 10-05	10	83	29	33	21

Tabelle 4.9 Rückwandechoamplitude bei unterschiedlichen Wanddicken. Der Pegel des Rauschuntergrundes beträgt 3,0 mV.

4.2.5 Anschauliche Erklärung des Wechselwirkungsmechanismus am Beispiel einer Rundspule

Die Abbildung 4.39 zeigt einen Schnitt durch die Spulenanordnung parallel zum horizontalen Magnetfeld \mathbf{H}_0 . Im Sendefall wird die EMUS-Spule mit einem HF-Burstsignal angeregt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Anregung wird die Spule in der gezeigten Richtung vom elektrischen Strom durchflossen. Dieser Momentanstrom erzeugt um die Leiterstücke ein zusätzliches Magnetfeld \mathbf{H}_{HF} gemäß der Rechten-Hand-Regel, dieses Feld moduliert das horizontale Magnetfeld. Unter dem Leiterstück A ist jetzt die Feldstärke reduziert und unter dem Leiterstück B erhöht. Diese lokale Veränderung der Magnetfeldstärke führt zu einer Veränderung der magnetostriktiven Dehnung in Feldrichtung (Abbildung 4.40). Die örtlichen Veränderungen in der magnetostriktiven Dehnung (Abbildung 4.41) wiederum resultieren in Teilchenverschiebungen parallel zum horizontalen Magnetfeld und senkrecht zu den Leiterstücken der Spule. Für den betrachteten Moment ist die Richtung der Teilchenverschiebung zwischen den Leiterstücken nach rechts und außerhalb der Leiterstücken nach links orientiert (Abbildung 4.42).

Direkt unterhalb des Leiters gibt es in horizontaler Richtung keine Teilchenverschiebung. Das entspricht genau den Ergebnissen der Arbeiten von Wilbrand [WIL1990], der bei seinen Modellrechnungen und im Experiment bei der Schallfeldverteilung einer Linienquelle im horizontalen Magnetfeld unter 0° auch immer eine Nullstelle erhielt. Eine solche Linienquelle kann als Dipol aufgefasst werden. Die beiden betrachteten Leiterstücke der Rundspule bilden auch Linienquellen, deren Dipolfelder sich durch die geschickte Anordnung und Dimensionierung so überlagern, dass ein senkrecht abgestrahltes Schallbündel entsteht. Die gemessenen Schallfeldverteilungen einer Rundspule und auch der anderen Spulengeometrien können mit diesem Ansatz erklärt werden (vgl. Abbildung 4.33 und Abbildung 4.35).

Dass nur die senkrecht zum horizontalen Magnetfeld ausgerichteten Leiterstücke wesentlich zur Ultraschallanregung beitragen, konnte durch ein weiteres Experiment bestätigt werden. Dabei wurde die EMUS-Spule entweder senkrecht oder parallel zum horizontalen Magnetfeld zu einer Kante des Testkörpers bewegt und die Ultraschallamplitude ausgewertet (Abbildung 4.43). Im ersten Fall ist die Amplitude auf die Hälfte reduziert, wenn etwa $1/3$ der Spule die Testkörperkante überragt. Erreicht dagegen der Spulenrand die Testkörperkante bei einer Verschiebung parallel zum horizontalen Magnetfeld, ist bereits hierbei eine deutliche Amplitudenschwächung zu erkennen.

Das heißt also, dass nur die Leiterstücke der Spule, die senkrecht zum horizontalen Magnetfeld liegen, in der hier untersuchten Konfiguration den wesentlichen Anteil zur Ultraschallwandlung liefern. Ein einzelnes Leiterstück kann als Linienquellen gelten und besitzt Dipolcharakter bei der Schallfeldverteilung. Die Dipolfelder der beiden senkrecht zum Horizontalfeld ausgerichteten Leiterstücke der Rundspule überlagern sich und bilden im Zentrum eine hohe Hauptkeule unter 0° aus. Die Leiterstücke parallel zum horizontalen Magnetfeld tragen dagegen nur geringfügig bei. Die Gestalt der Schallfeldverteilung kann, zumindest qualitativ, mit den oben ausgeführten Überlegungen erklärt werden und sie sind im Einklang mit den Ergebnissen von Wilbrand [WIL1990].

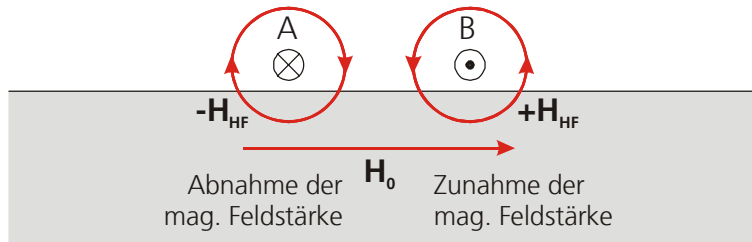


Abbildung 4.39 Magnetfeldkomponenten im Bereich der EMUS-Sendespule: H_0 horizontales Magnetfeld, H_{HF} momentanes Magnetfeld der Leiterstücke senkrecht zur Bildebene zum Sendezeitpunkt. Das Schnittbild liegt parallel zum horizontalen Magnetfeld.

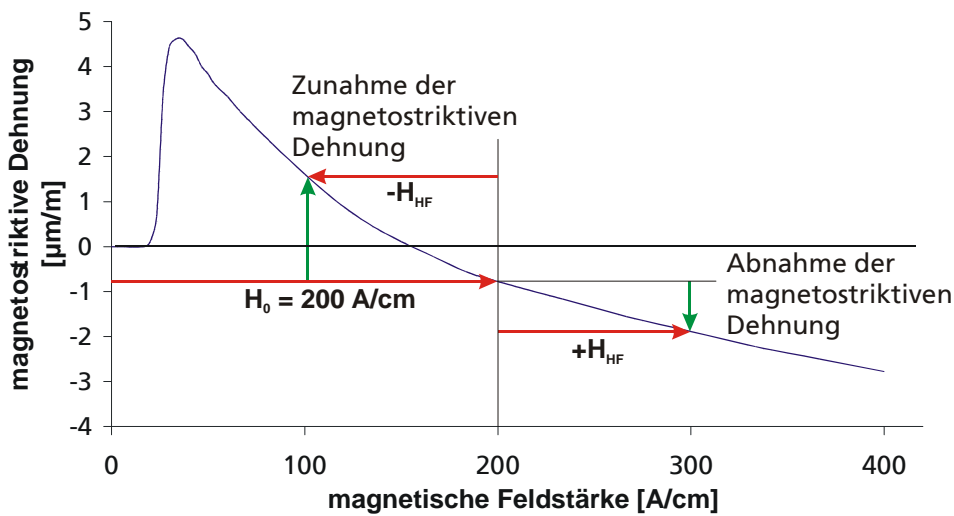


Abbildung 4.40 Variation der magnetostriktiven Dehnung bei Modulation des Magnetfeldes (vgl. Abbildung 3.8)

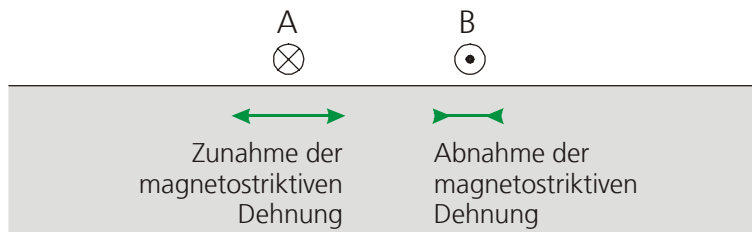


Abbildung 4.41 resultierende Änderung der magnetostriktiven Dehnung aufgrund der Überlagerung des statischen horizontalen Magnetfeldes mit dem Magnetfeld der Strom durchflossenen Sendespule (Abbildung 4.40)

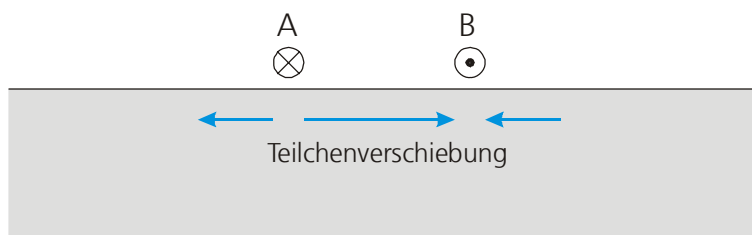


Abbildung 4.42 aus der magnetostriktiven Dehnung (Abbildung 4.41) resultierende Teilchenverschiebung

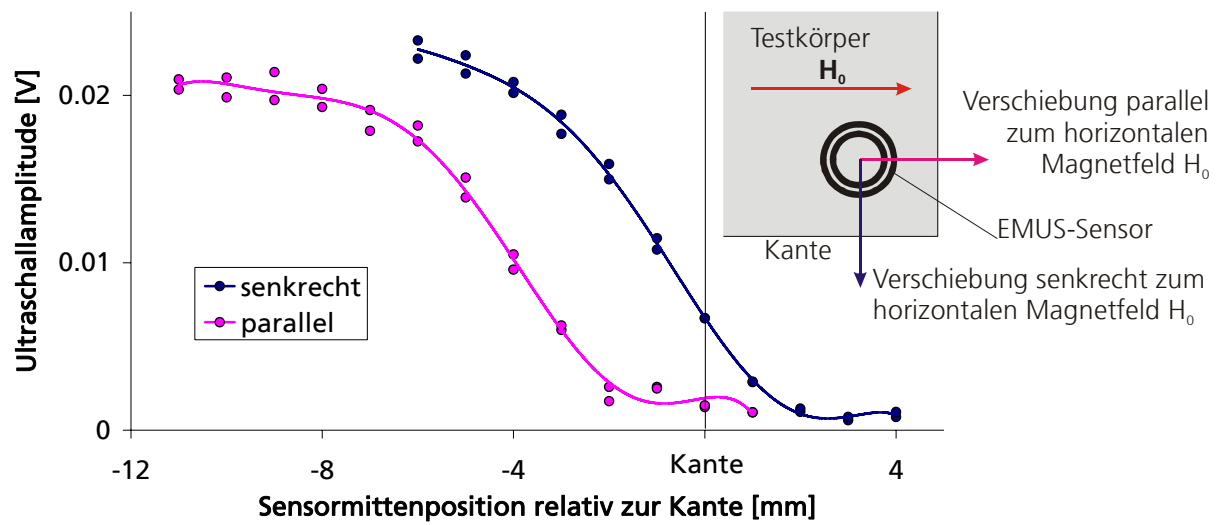


Abbildung 4.43 Amplitudenortskurve des ersten Rückwandechos bei Sensorverschiebung senkrecht und parallel zum horizontalen Magnetfeld relativ zur Kante des Testkörpers (Sendepulendurchmesser: 6 mm)

4.3 Optimierung des Empfangskreises zur Verkürzung der Totzone

Um auch kleine Wanddicken mit dem EMUS-Prüfkopf bestimmen zu können, ist es besonders wichtig, dass die Totzone möglichst kurz ist. Unter Totzone versteht man das Zeitintervall in dem der Empfangskreis durch das Anregungssignal in der Übersteuerung liegt und keine Ultraschallsignale empfangen bzw. detektiert werden können. Bei dem Gebrauch von piezoelektrischen Ultraschallprüfköpfen zur Wanddickenmessung ist diese Forderung leicht zu erfüllen. Mit Hilfe eines Vorlaufkörpers wird der Schallweg zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt verlängert, sodass sich die Laufzeit der Echosignale so weit vergrößert, dass die Störsignale im Prüfkopf abgeklungen sind und somit die Echosignale immer zeitlich außerhalb der Totzone empfangen werden können. Dadurch vergrößert sich zwar der Prüfkopf, trotzdem kann es für viele Anwendungen mit geringem Aufwand umgesetzt werden. Im Fall eines EMUS-Prüfkopfes ist eine solch einfache Lösung nicht anwendbar, da das Ultraschallnutzsignal nicht im Prüfkopf sondern direkt in der Prüfobjektoberfläche zeitgleich mit der elektrischen Anregung erzeugt wird.

Zur Lösung wurde der Vorverstärkereingang modifiziert und mit einer zeitlich variablen Bedämpfung ausgestattet. Die Zusatzschaltung erlaubt es, den Vorverstärker am Eingang, während das Anregungssignal an der Sendespule anliegt, stark zu bedämpfen bzw. kurz zu schließen und kurze Zeit später für den Empfang der Ultraschallsignale die volle Empfindlichkeit ohne störende scharfe Schaltflanken verfügbar zu haben (Abbildung 4.44). Zu steile Flanken verursachen im weiteren Empfangspfad aufgrund der hohen Bandbreite und durch die hohe benötigte Verstärkung wiederum zum Teil sehr große Störsignale, die die Nutzsignale überdecken können.

Als aktives Schaltelement wurde ein Feldeffekttransistor eingesetzt. Die Gate-Spannung wird über eine triggerbare Ansteuerschaltung bereitgestellt. Die zeitliche Ansteuerung und die Form der Ansteuersignale sind in Abbildung 4.45 wiedergegeben. Die zeitliche Position des Sendeburstsignals ist am Übersprechen auf den Source-Drain-Strom zu erkennen. Der Source-Drain-Strom wurde mit Hilfe einer Gleichspannungsquelle bestimmt. Der Kurzschlussstrom im Sendefall wurde nicht dargestellt.

Durch diese Maßnahme konnte die Totzone auf etwa $2 \mu\text{s}$ (gemessen vom zeitlichen Ultraschallursprung) verkürzt werden. In Abbildung 4.46 sind die Auswirkungen der neuen Vorverstärkereingangsbeschaltung ersichtlich. Mit dem modifizierten Vorverstärkereingang ist die Totzone deutlich kürzer als mit herkömmlicher Eingangsbeschaltung, ohne dass sich die Rückwandechoamplitude ändert. Experimentell konnten damit mit dem ersten Rückwandecho Restwanddicken von 4,5 mm an kalottenförmigen Testfehlern gemessen werden (Abbildung 4.47).

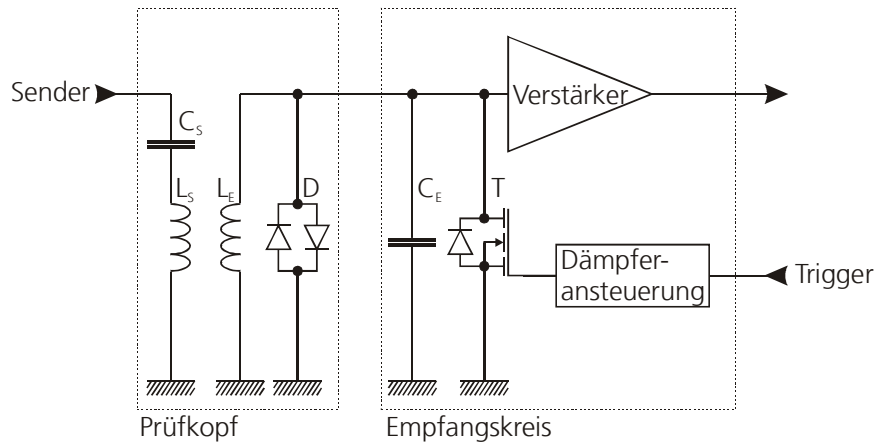


Abbildung 4.44 Blockschaltbild des EMUS-Prüfkopfes und des Empfangskreises (L_S : EMUS-Sendespule, L_E : EMUS-Empfangsspule, C_S : Sendeabstimmung, C_E : Empfangsabstimmung, D: Diodenbegrenzer, T: Feldeffekttransistor zur Empfangskreisbedämpfung)

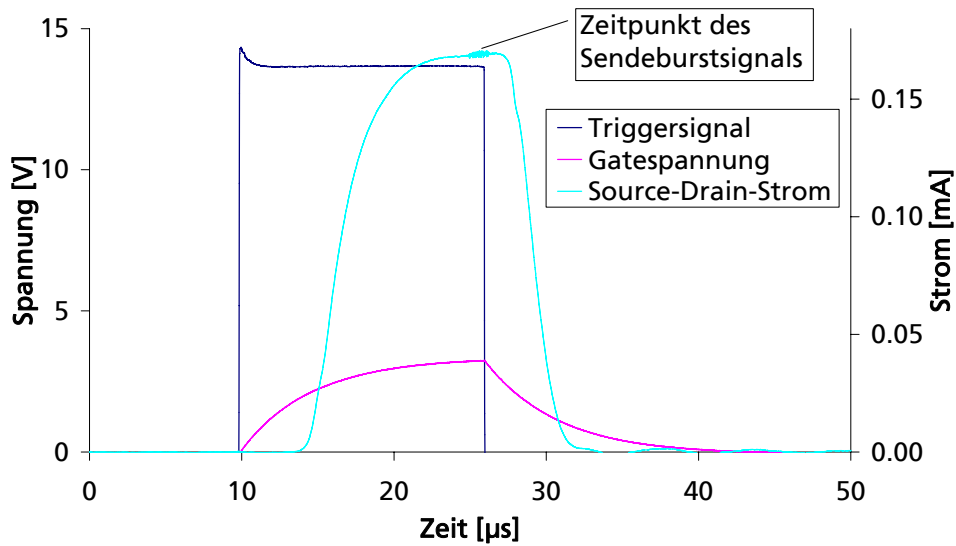


Abbildung 4.45 Ansteuersignale der Empfangskreisbedämpfung

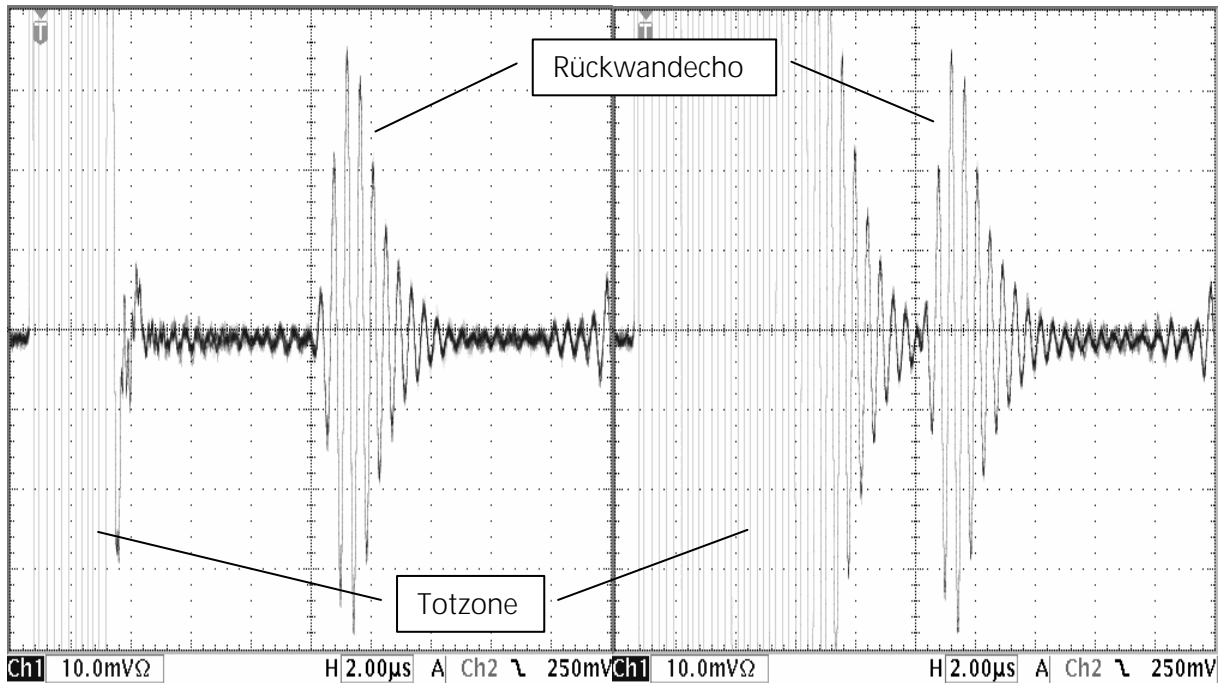


Abbildung 4.46 Ultraschall-A-Bilder: Mit dem modifizierten Vorverstärkereingang (links) ist die Totzone deutlich kürzer als mit herkömmlicher Eingangsbeschaltung (rechts). Das Rückwandecho bleibt unverändert.

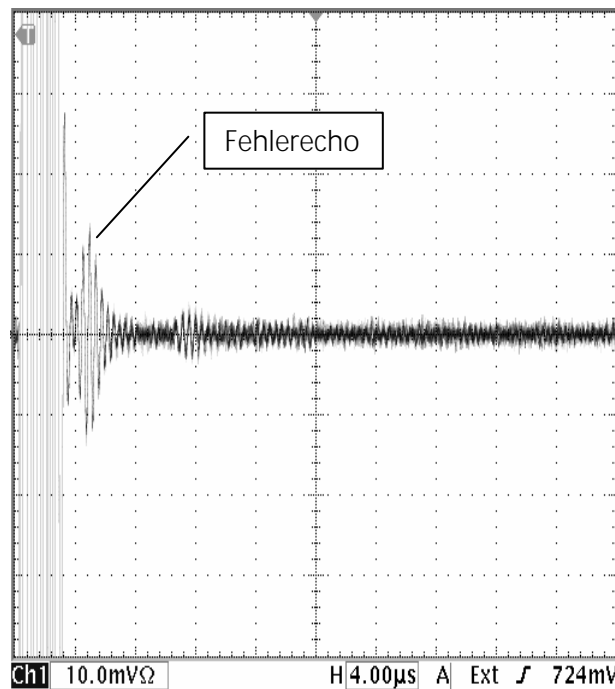


Abbildung 4.47 Ultraschall-A-Bild: Die Restwanddicke von 4,5 mm kann bei einem kalottenförmigen Testfehler (Durchmesser 15 mm) bestimmt werden (Testkörper TK 15-70%).

4.4 Zusammenfassung der Entwicklung und Optimierung

Bei der elektromagnetischen Ultraschallwandlung im horizontalen Magnetfeld werden die Ultraschallwellen über die magnetostriktive Wechselwirkung angeregt. Dieser Mechanismus ist von der Feldstärke und vom Werkstoff abhängig. Diese Abhängigkeit wurde an Testkörpern verschiedener Stahlgüten und an Rohrtestkörpern unterschiedlicher Art untersucht. Die Maxima der Wandlungseffizienz liegen für alle Testkörper in einem Feldstärkeintervall zwischen 250 und 300 A/cm. Die Höhe der Maxima unterscheidet sich um bis zu 8 dB. Zwar verschiebt sich für die höherfesten Stähle die Maximumposition leicht zu kleineren Horizontalfeldstärken und die Maximumbreite nimmt ab, aber ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Güte und Wandlungseffizienz konnte an der in dieser Arbeit untersuchten Stichprobe nicht festgestellt werden. Lässt man ausgehend vom Amplitudenmaximum eine Reduktion des Ultraschallsignals um 10 dB zu, so ergibt sich ein Feldstärkeintervall der horizontalen Magnetisierung von etwa 100 bis 750 A/cm in dem die magnetostriktive Ultraschallwandlung für den Fall der senkrechten Einschallung betrieben werden kann.

Die Stärke des horizontalen Magnetfeldes kann durch die lokale Wanddicke des Prüfobjektes erheblich beeinflusst werden. Dadurch kann sich der Arbeitspunkt der magnetostriktiven Ultraschallwandlung verschieben. Deshalb wurde ein Feldstärkenbereich ermittelt, der es erlaubt, sowohl in fehlerfreien als auch in Wanddicke reduzierten Bereichen mit stark erhöhter Feldstärke mit ausreichendem Signal-Rauschverhältnis eine Ultraschallprüfung durchzuführen. Die horizontale Feldstärke im Bereich der nominellen Wanddicke sollte demnach ~ 200 A/cm betragen.

Ferner wurden die EMUS-Sende- und Empfangsspulen optimiert. Dazu wurden zunächst geeignete Spulentypen ausgewählt und anschließend die Dimensionen optimiert. Als Optimierungskriterien dienen dabei an erster Stelle das Schallfeld und die Modenreinheit der angeregten Ultraschallwelle. Als geeignet für die Bestimmung der Restwanddicke bei korrosionsbedingtem Wandabtrag wurde eine Spulengeometrie mit Rundspulen identifiziert. Die Sendespule hat einen Durchmesser von 6 mm und die Empfangsspule von 4 mm. Wird mit dieser Anordnung ein Prüfobjekt untersucht, werden die Fehleranzeigen von kalottenförmigen Wanddickenschwächungen mit ähnlichen Signalbreiten angezeigt, wie es auch bei der Prüfung mit piezoelektrischen Ultraschallprüfköpfen der Fall ist. Bei Flachbodenbohrungen kann der Durchmesser zuverlässig bestimmt werden. Die Rückwandechoamplitude beträgt mindestens 24 dB bei 20 mm Wanddicke und steigt auf 29 dB bei 10 mm Wanddicke an.

Mit dieser Spulenanordnung ist man in der Lage, linear polarisierte Transversalwellen anzuregen und zu empfangen, die sich senkrecht zur Prüfobjektoberfläche ausbreiten. Die Polarisationsrichtung der Scherwellen wird dabei durch die Ausrichtung der horizontalen Magnetisierung vorgegeben. Den Hauptbeitrag zur Ultraschallwandlung liefern die senkrecht zum Horizontalfeld ausgerichteten Leiterstücke der EMUS-Spulen.

Abschließend wurde der Empfangskreis mit einer aktiven, triggerbaren Bedämpfung ausgestattet. Dadurch konnte der Übersteuerungsbereich des Vorverstärkers in dem keine Ultraschallsignale ausgewertet werden können, also die Totzone, auf etwa 2 μ s verkürzt werden, sodass für den Werkstoff Stahl mit dem ersten Rückwandecho noch Wanddicken von unter 5 mm aufgelöst werden können.

5 Integration der Wirbelstromprüftechnik

5.1 Motivation für die Integration der Wirbelstromprüftechnik

Bei der EMUS-Technik werden die Ultraschallwellen direkt in der Prüfobjektoberfläche angeregt. Es gibt somit kein Eintrittsecho wie es bei der Wanddickenprüfung mit piezoelektrischen Prüfköpfen der Fall wäre. Deshalb kann anhand der Laufzeit des Rückwandechos lediglich eine Aussage über die Restwanddicke getroffen werden. Eine Unterscheidung, ob eine eventuell vorhandene Wanddickenreduktion auf der dem Sensor zugewandten oder dem Sensor abgewandten Prüfkörperoberfläche stattgefunden hat, ist mit dem EMUS-Verfahren zum gegenwärtigen Stand der Technik nicht möglich.

Für viele Anwendungen und gerade für die Korrosionsprüfung bei Pipelines ist die Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehlern wichtig. Eine Methode, die Korrosionstiefe bzw. Ungängen auf der dem Sensor zugewandten Prüfobjektoberfläche zu bestimmen, bietet die Wirbelstromprüftechnik. Deshalb kann sie auch für eine koppelmittelfreie Abstandsmessung zwischen Sensor und Prüfobjekt benutzt werden. Der optimierte EMUS-Sensor wird deshalb zusätzlich für den Einsatz als Wirbelstromsensor ertüchtigt.

5.2 Grundlagen des Wirbelstromprüfverfahrens

Das Wirbelstromverfahren eignet sich als induktives Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von elektrisch leitenden und/ oder ferromagnetischen Werkstoffen. Dabei wird gemäß der Definition nach DIN 54140 Teil 1 "... elektromagnetische Energie mit Frequenzen unterhalb von etwa 200 MHz benutzt ... zum Nachweis von Inhomogenitäten, Werkstofftrennungen und zur Ermittlung oder zum Vergleich von Werkstoffeigenschaften, die von der elektrischen Leitfähigkeit und/ oder der Permeabilität abhängen; weiterhin können Formabweichungen und Maße festgestellt werden ...".

Bei der Wirbelstromprüfung fließt ein elektrischer Strom der Stärke I und der Frequenz $\omega = 2\pi f$ in einer Sendespule und erzeugt dadurch ein elektromagnetisches Wechselfeld in der Umgebung, das heißt auch am Ort des Empfängers und im Prüfobjekt (Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3). Dieses Feld wird beeinflusst von [UDP2004]:

- den Spulenparametern (Geometrie, Abmessungen, Windungszahl, ...)
- der räumlicher Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ in der Spulumgebung
- der Analysierfrequenz (Wirbelstromprüffrequenz) $\omega = 2\pi f$

Wird als Empfängersensor ebenfalls eine Induktionsspule eingesetzt, so induziert das elektromagnetische Feld die elektrische Spannung $U_{ws}(t)$ in dieser Spule (Abbildung 5.1). Als Messgröße kann bei der Wirbelstromprüfung auch die Spannung an der Spule mit Erregerstrom benutzt werden (Abbildung 5.2). Die Wirbelstromimpedanz ist definiert als Quotient zwischen der Wechselfeldspannung und der Wechselstromstärke. Sie ist abhängig von den oben genannten Parametern. Als alternativer Empfänger kann auch ein Magnetfeldsensor verwendet werden, der die Magnetfeldstärke $H(t)$ in die elektrische Spannung $U_{ws}(t)$ umsetzt (Abbildung 5.3). Eine Analyse der am Wirbelstromsensor gemessenen Spannung und somit der Wirbelstromsensorimpedanz ermöglicht Aussagen über magnetische (Permeabilität μ) und elektrische (Leitfähigkeit σ) Werkstoffeigenschaften bzw. über eventuell vorhandene

Geometriefehler (Einschlüsse, Risse, Korrosion, ...) und mögliche Inhomogenitäten des Prüfobjektes [YAS2008].

Der Zusammenhang zwischen den zeitlichen Verläufen des Spulenstroms und der Spulenspannung bei einer Wirbelstromprüfung mit zeitharmonischer (sinusförmiger) Anregung ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Neben der einfachen zeitharmonischen Anregung mit einer Prüffrequenz werden auch andere Anregungssignalformen eingesetzt, wie zum Beispiel bei der Impulswirbelstromtechnik, der Mehrfrequenzwirbelstromtechnik usw. Abbildung 5.5 zeigt einen beispielhaften zeitlichen Verlauf des Spulenstroms und der Spulenspannung bei der Impulswirbelstromtechnik [YAS2008].

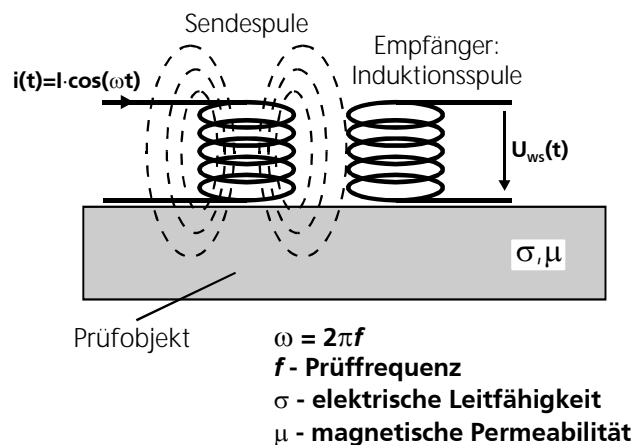


Abbildung 5.1 Messprinzip bei der Wirbelstromprüfung mit einer Sende- und einer Empfangsspule [YAS2008]

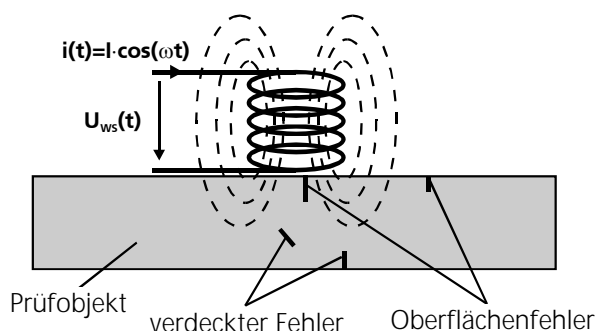


Abbildung 5.2 Messprinzip bei der Wirbelstromprüfung mit einer einzigen Spule [YAS2008]

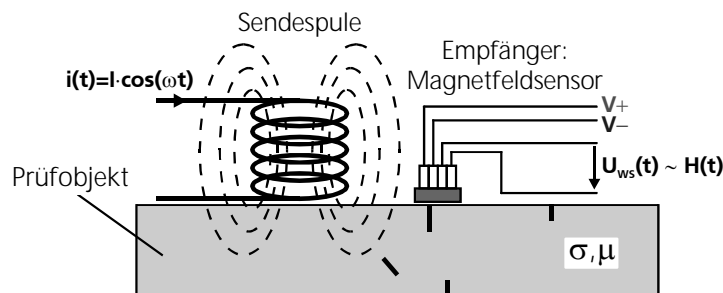


Abbildung 5.3 Messprinzip bei der Wirbelstromprüfung mit einer Sendespule und einem Magnetfeldsensor als Empfänger [YAS2008]

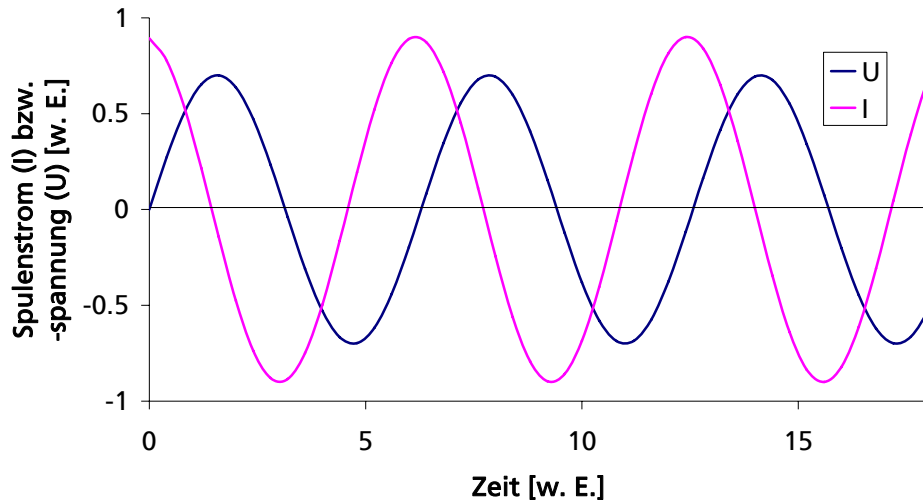


Abbildung 5.4 zeitlicher Verlauf des Spulenstroms und der Spulenspannung bei einer Wirbelstromprüfung mit zeitharmonischer (sinusförmiger) Anregung

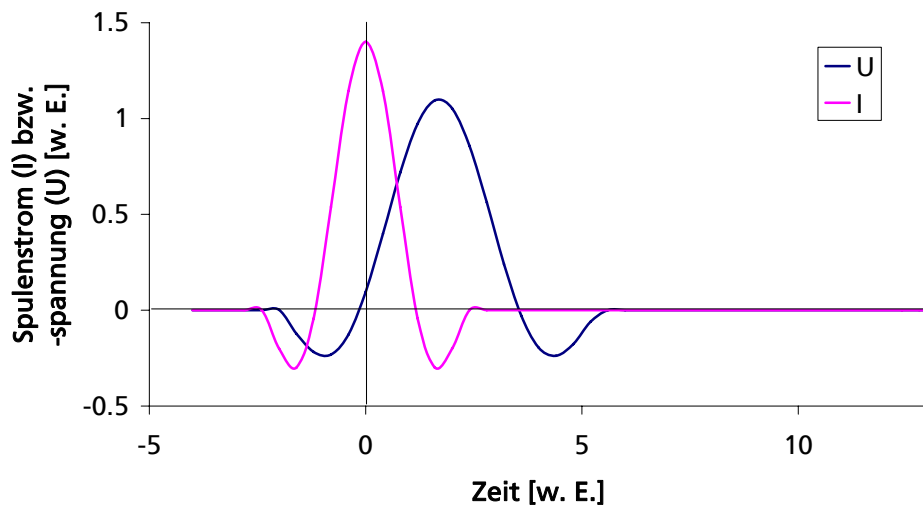


Abbildung 5.5 zeitlicher Verlauf des Spulenstroms und der Spulenspannung bei einer Impulswirbelstromprüfung

5.3 Erweiterung des EMUS-Wanddickensensors mit dem Wirbelstromverfahren

Bereits in der 1990er Jahren wurden am Fraunhofer IZFP Ansätze verfolgt, einen EMUS-Prüfkopf und eine Wirbelstromsonde zu kombinieren. Seinerzeit wurde versucht, die Abhebung eines EMUS-Prüfkopfes von der Prüfobjektoberfläche zu erfassen. Dazu wurde in das Prüfkopfgehäuse in der Nähe des Ultraschallwandlers eine zusätzliche Wirbelstromspule angeordnet, die in Messpausen der Ultraschallprüfung mit einem Wirbelstromprüfgerät betrieben wird. Anhand von Kalibrierimpedanzortskurven kann dann der Werkstoffzustand und der Abstand des Prüfkopfes zur Oberfläche ermittelt werden. Änderungen in Amplitude und Phase des gesendeten und empfangenen Ultraschallsignals können mit den gemessenen Werten für Abstand und Werkstoffzustand korrigiert werden [SAL1995].

Einen ähnlichen Ansatz benutzt auch eine englische Arbeitsgruppe um Steve Dixon. Auch hier beruht die Kombination lediglich auf der Integration von zwei mehr oder weniger räumlich getrennten Sensoren für die EMUS- und die Wirbelstromprüfung in einem Prüfkopfgehäuse. Ziel ist dabei die Vorteile beider berührungsfreien Verfahren für eine Verbesserung der Werkstoffprüfung im Fertigungsprozess und im Servicefall zusammen nutzen zu können. Während die Wirbelstromprüfung sehr empfindlich auf Oberflächenfehler und oberflächennahe Fehler reagiert, können mit Ultraschall auch Fehler im Volumen gut nachgewiesen werden. Beide Verfahren können sich also gut ergänzen [EDW2006, SOP2005].

Im Gegensatz zur konventionellen Wirbelstromtechnik, bei der mit einer einzigen Frequenz quasikontinuierlich angeregt wird, wird bei der Impulswirbelstromtechnik ein Impuls zur Anregung genutzt. Dadurch erhält man ein breitbandiges Signal, das sowohl in seiner Signalform als auch spektral, das heißt in Amplitude und Phase über der Frequenz, ausgewertet werden kann. Aus einer einzigen Messung können also mehrere unabhängige Größen bestimmen werden. Deshalb kann man mehr, genauere oder redundante Informationen über den Testkörper und dessen Zustand erhalten [GIG2001, TIA2005]. Da die Form eines Impulswirbelstromempfangssignals einem Ultraschallsignal ähnelt, können sie mit der gleichen Empfangselektronik aufgenommen und verarbeitet werden. Arbeiten, die Impulswirbelstrom und (piezoelektrischen) Ultraschall zur kombinierten Prüfung von Plattierungen nutzen, wurden bereits in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, durchgeführt [ERH1992, ERH1996].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz umgesetzt. Da ein EMUS-Prüfkopf wie auch eine Wirbelstromsonde aus einer oder mehreren Spulenwicklungen besteht, kann auch das Wirbelstromverfahren und zwar in Form der Impulswirbelstromtechnik damit wie folgt realisiert werden:

Während das Ultraschallsendesignal an der EMUS-Sendespule anliegt, kann an einer zweiten Spule, zum Beispiel der EMUS-Empfangsspule oder eine zusätzliche Wirbelstromempfangsspule, ein über die Wirbelströme induziertes Signal empfangen werden. Dadurch erhält man eine typische Wirbelstrommessanordnung gemäß Abbildung 5.1. Die in der Empfangsspule zur Zeit der Anregung detektierten Signale können mit den klassischen Auswerteverfahren der Wirbelstromtechnik verarbeitet werden. Dadurch können Zielgrößen wie Sensorabhebung und Wandabtrag auf der dem Sensor zugewandten Seite bestimmt werden. Durch Kombination der Ergebnisse aus der Ultraschallmessung mit den Wirbelstromergebnissen kann eine sichere Aussage über eine Wanddickenreduktion gemacht werden und ob sie auf der Innen- oder Außenseite der Komponente liegt.

Das EMUS- und das Wirbelstromverfahren werden gleichzeitig betrieben, da die Ultraschall- und die Impulswirbelstromanregung gleichzeitig mit dem Ultraschallanregungssignal über eine EMUS-Sendespule erfolgt. Das Wirbelstromempfangssignal liegt quasi gleichzeitig zum Sendesignal an und hat eine ähnliche Signalform wie ein Ultraschallsignal. Deshalb kann es auch mit dem gleichen Ultraschallempfangskanal verarbeitet und ausgewertet werden. Eine gegenseitige Beeinflussung beider Empfangssignale ist weitgehend ausgeschlossen, da die

relevanten Ultraschallrückwandechosignale erst zu wesentlich späteren Zeiten an der Empfangsspule anliegen als die Wirbelstromantwort.

Außerdem ist die Wirbelstrommessung insbesondere für die Anwendung zur zerstörungsfreien Messung von Materialverlusten in metallischen Komponenten wie zum Beispiel Pipelines wesentlich, weil bei einer Sensorabhebung beispielsweise im Bereich von Korrosion auf der dem Sensor zugewandten Seite das Ultraschallsignal aufgrund von Schwächungseffekten verloren gehen kann.

5.4 Wirbelstrommessungen mit dem optimierten EMUS-Spulensystem

Die Wirbelstrommessung wird als Impulswirbelstrommessung durchgeführt. Dazu wird das EMUS-Anregungssignal auch für die Wirbelstromanregung genutzt. Das hat den Vorteil, dass zum einen keine zusätzliche Elektronikkomponenten für die Wirbelstromanregung benötigt werden und zum anderen die Wirbelstrommessung gleichzeitig zur EMUS-Messung durchgeführt wird, das heißt bei bewegten Sensorsystemen findet die Messung für beide Verfahren am gleichen Ort statt. Das Wirbelstromantwortsignal kann über die EMUS-Empfangsspule oder eine separate Wirbelstromempfangsspule abgegriffen werden. Da das Wirbelstromempfangssignal gleichzeitig mit der Anregung anliegt und die Ultraschallempfangssignale deutlich später eintreffen, können die Wirbelstrom- und Ultraschallempfangssignale durch die Auswertung verschiedener Zeitfenster voneinander getrennt werden.

Die Abbildung 5.6 zeigt die Impulswirbelstromempfangssignale, aufgenommen mit der EMUS-Empfangsspule, für verschiedenen Spulenabhebungen. Als Messgröße wurde der Strom im Empfangskreis gewählt, da die Empfangsspulenspannung zum Schutz des Vorverstärkers vor Überspannung durch einen Diodenbegrenzer (siehe Abbildung 4.44) beschränkt wird. Durch den relativ kleinen Spulendurchmesser von nur 4 mm wird schon bei etwa 3 mm Abhebung ein Sättigungswert in der Amplitude erreicht. Da dieser Wert für den Einsatz zur Korrosionstiefenbestimmung nicht ausreichend ist, wurde eine zusätzliche Wirbelstromempfangsspule mit größerem Durchmesser in das EMUS-Spulensystem integriert. In diesem Fall kann direkt die Spulenspannung ausgewertet werden. Dadurch ändert sich zwar die Phasenlage und es kommt zu einer leicht veränderten Empfangssignalforn gegenüber der Wirbelstrommessung mit der EMUS-Empfangsspule, aber dies wirkt sich nicht auf die maximal detektierbare Spulenabhebung aus. Zur optimalen Spulenauslegung wurde die Abhängigkeit der Spulengröße auf die maximal detektierbare Spulenabhebung untersucht. In Abbildung 5.7 sind die Ergebnisse zusammengefasst: Die maximal detektierbare Spulenabhebung steigt innerhalb des untersuchten Bereiches linear mit dem Spulendurchmesser an.

Neben der maximal detektierbaren Spulenabhebung ist als weiterer Optimierungsparameter die Spulengröße an sich zu nennen, da diese Größe den minimalen Spurabstand für benachbarte Spulensysteme bestimmt. Als Kompromiss zwischen den beiden gegenläufigen Größen wurde ein Spulendurchmesser von 10 mm gewählt, damit lassen sich maximale Abhebungen zwischen 5 und 8 mm detektieren (Abbildung 5.8).

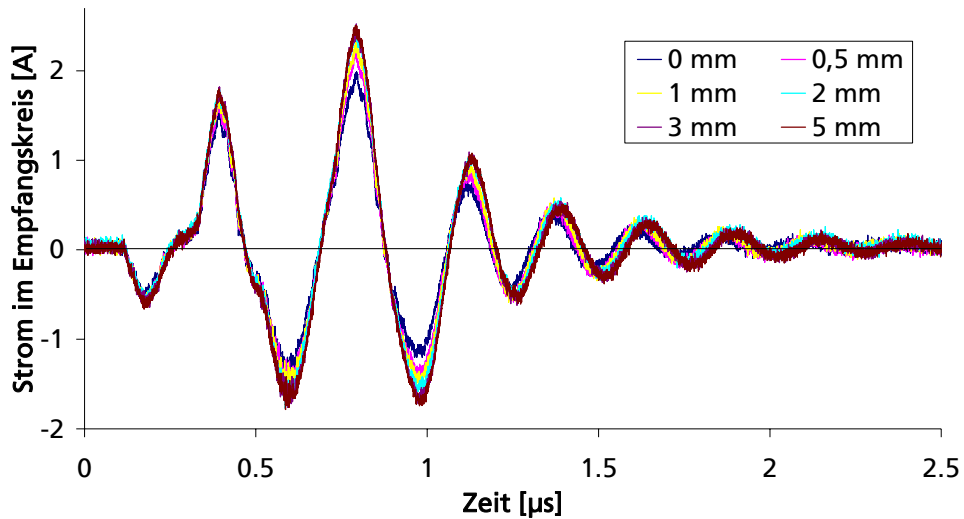


Abbildung 5.6 Impulswirbelstrommessung mit EMUS-Empfangsspule (Durchmesser 4 mm): Strom im EMUS-Empfangskreis bei Variation der zusätzlichen Sensorabhebung. Die Magnetisierung des Testkörpers beträgt 200 A/cm.

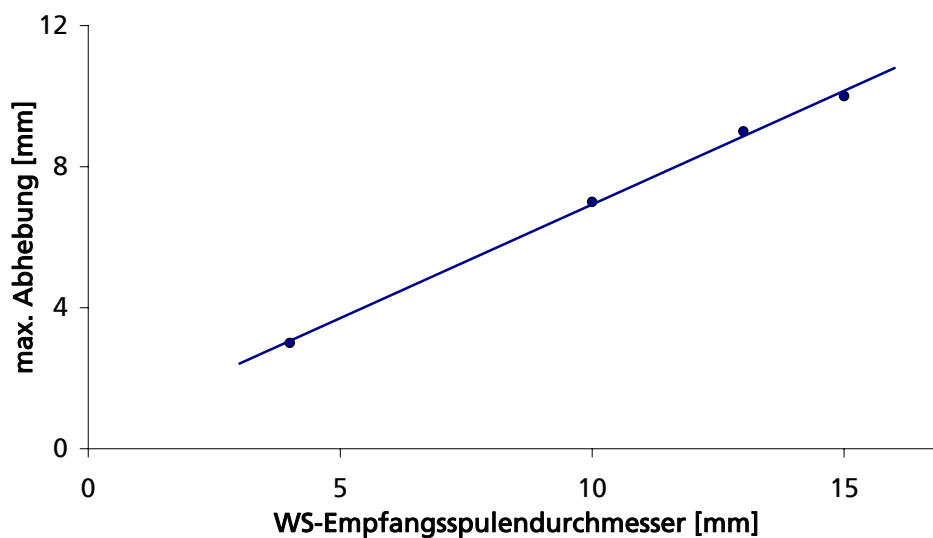


Abbildung 5.7 Durchmesser der Impulswirbelstromempfangsspulen gegen maximal detektierbare Abhebung

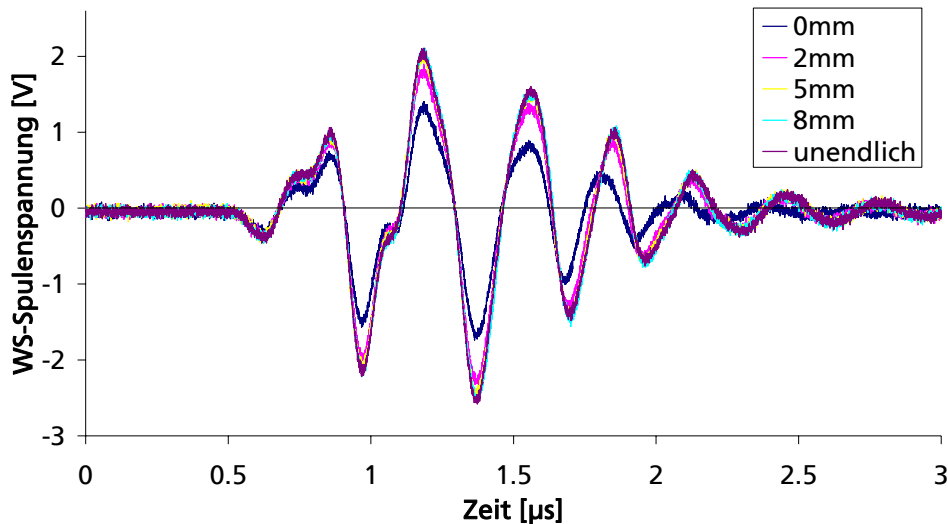


Abbildung 5.8 Impulswirbelstrommessung mit EMUS-Wanddickensensor mit zusätzlicher Wirbelstromempfangsspule (Durchmesser 10 mm) bei Variation der zusätzlichen Sensorabhebung.

Die Auswertung des Impulswirbelstromempfangssignals folgt der klassischen Wirbelstromauswertung (Darstellung von Amplituden- und Phasenwerten). Da das Wirbelstromsignal nur wenige Schwingungszyklen lang ist, enthält es neben der Grundschwingung der Anregungsfrequenz noch weitere Frequenzanteile. Zur Auswertung wird das Empfangssignal der Wirbelstromspule $WS(t)$ frequenzselektiv ausgewertet, das heißt für eine oder mehrere Auswertefrequenzen f wird ein Amplituden- und ein Phasenwert (Amp_{WS} , φ_{WS}) bzw. der Real- und Imaginärteil (RE_{WS} , IM_{WS}) bestimmt und diese Größen der Zielgröße (hier der Sensorabhebung) zugeordnet. Aus dem Zeitsignal können die spektralen Anteile über eine Fourier-Analyse bzw. eine diskrete Fourier-Analyse gemäß Gleichung 5.1 ermittelt werden [STÖ1995].

$$\int_0^{\infty} WS(t) \cdot e^{i2\pi ft} dt = \int_0^{\infty} (WS(t)\cos(2\pi ft) + i \cdot WS(t)\sin(2\pi ft)) dt$$

$$\Rightarrow RE_{WS}(f) = \int_0^{\infty} WS(t)\cos(2\pi ft) dt ; IM_{WS}(f) = \int_0^{\infty} WS(t)\sin(2\pi ft) dt$$

$$\Rightarrow Amp_{WS}(f) = \sqrt{RE_{WS}^2 + IM_{WS}^2} ; \varphi_{WS}(f) = \arctan 2(IM_{WS}, RE_{WS})$$

Gleichung 5.1 Auswertung des Wirbelstromsignals

Die Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 zeigen die Kalibrierkurven der Impulswirbelstrommessung. Die zusätzliche Spulenabhebung ist gegenüber der Wirbelstromamplitude bzw. -phase bei verschiedenen Auswertefrequenzen dargestellt. Während die Phasenkurven schon bei geringen Abhebungen in Sättigung gehen, ab etwa 3 mm, kann bei der Amplitudenauswertung sogar zwischen 5 und 8 mm noch unterschieden werden. Den maximalen Amplitudenunterschied zwischen einer Sensorabhebung von 10 mm und dem auf der Testkörperoberfläche aufgesetzten Sensor wird bei einer Auswertefrequenz von 2 MHz erreicht (Abbildung 5.11). Ein Jitter im Wirbelstromempfangssignal bzw. bei der Digitalisierung

um einen einzigen Sample-Punkt ruft bei der hier benutzten Abtastfrequenz von 80 MHz bereits einen Phasenfehler von 9° (entspricht 0,16 rad) hervor.

Aufgrund dieser Erkenntnisse beschränkt sich die Auswertung für alle folgenden Impulswirbelstrommessungen im Rahmen dieser Arbeit auf eine Amplitudenbewertung bei 2 MHz Auswertefrequenz. Mit Hilfe der Kalibrierkurve (Abbildung 5.9) kann aus dem gemäß Gleichung 5.1 ausgewerteten Empfangssignalen die Abhebung des Sensors vom Prüfobjekt bestimmt werden. Unter der Annahme, dass in fehlerfreien Bereichen der Sensor auf der Prüfobjektoberfläche anliegt, kann bei sensorseitigen Materialverlusten aus der Abhebung die Restwanddicke bestimmt werden, da die Sensorabhebung dann der Fehlertiefe entspricht. Die Wirbelstrommessung erlaubt in Verbindung mit den anderen Verfahren eine Unterscheidung von innen bzw. außen liegenden Materialverlusten.

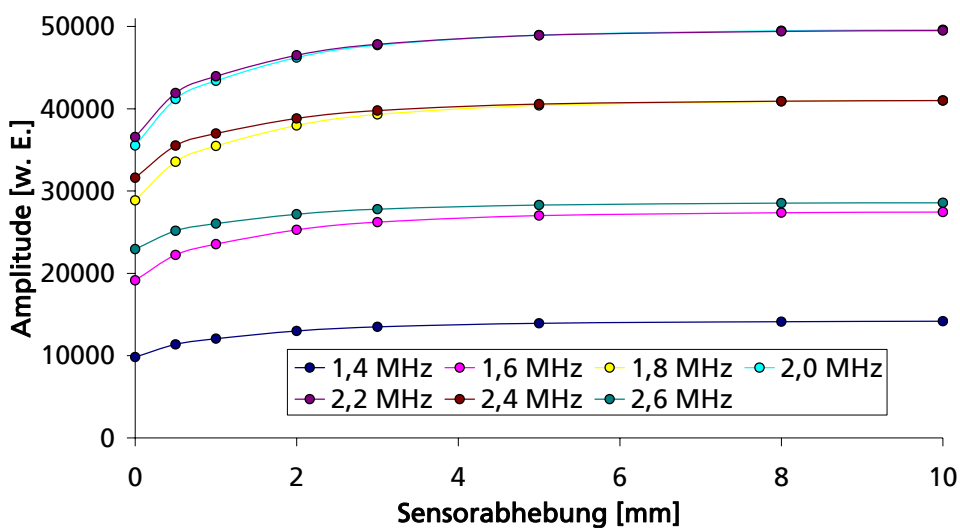


Abbildung 5.9 Amplitudenkalibrierkurven der Impulswirbelstrommessung für verschiedene Auswertefrequenzen

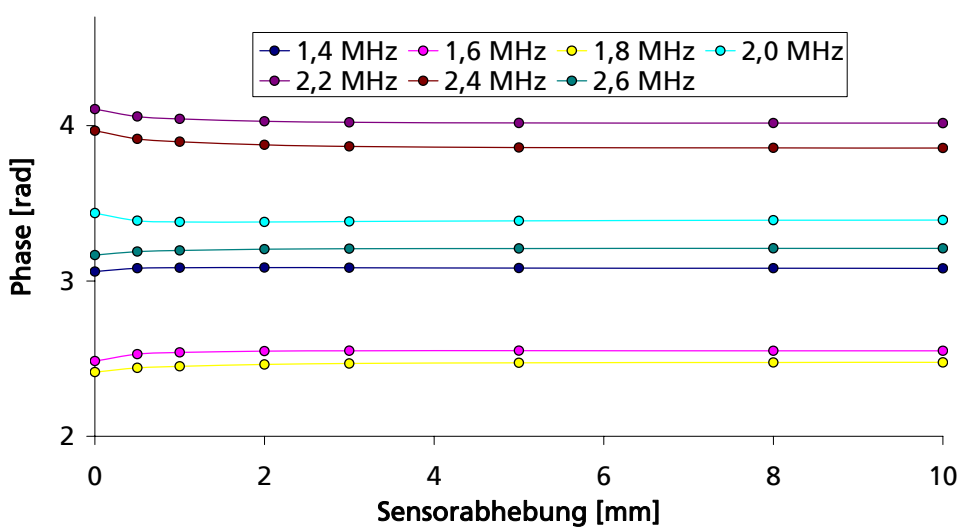


Abbildung 5.10 Phasenkalibrierkurven der Impulswirbelstrommessung für verschiedene Auswertefrequenzen

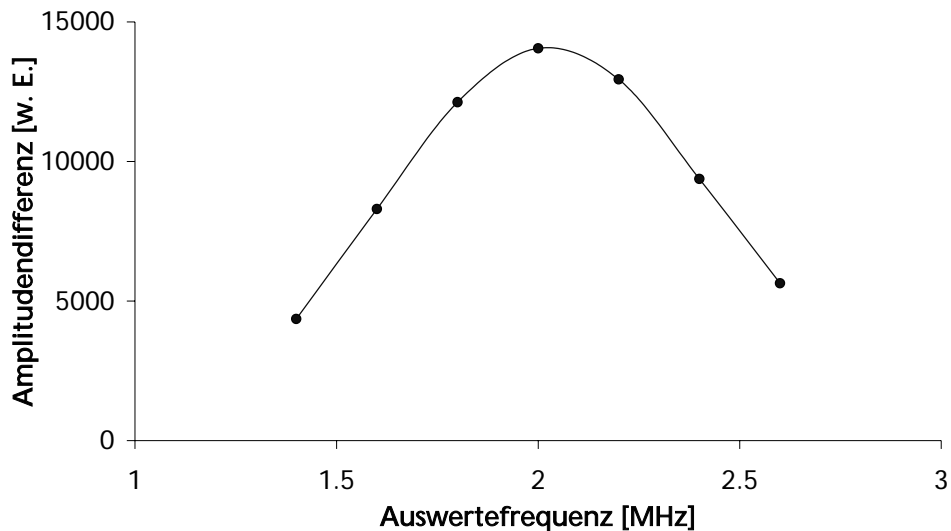


Abbildung 5.11 Amplitudendifferenz zwischen eine Abhebung von 10 mm und dem aufgesetzten Sensor für verschiedene Auswertefrequenzen

Es ist bekannt, dass sich der Magnetisierungszustand einer ferromagnetischen Probe auf eine Wirbelstromprüfung auswirkt, da durch den Einfluss eines Magnetfeldes sich die Permeabilität in der Umgebung der Wirbelstromspule und damit auch deren Induktivität ändert. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben kann das für die magnetostruktive Ultraschallwandlung benötigte horizontale Magnetfeld an lokalen Wanddickenverringerungen stark ansteigen. Da gerade diese Fehlerpositionen von besonderem Interesse bei der Prüfung sind, muss auch die Abhängigkeit der mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens gewonnenen Signale des kombinierten EMUS-Wirbelstromsensors untersucht werden. Abbildung 5.12 zeigt die bei unterschiedlichen horizontalen Magnetfeldern aufgenommenen Amplitudenkalibrierkurven. Für einen Großteil der Sensorabhebungen liegen die Kurven dicht beieinander. Lediglich im Bereich kleiner 2 mm fächern sie für Feldstärken kleiner 200 A/cm auf. Da aber der Arbeitspunkt des horizontalen Magnetfeldes auf 200 A/cm in fehlerfreien Bereichen des Prüfobjektes eingestellt wird (siehe Abschnitt 4.1.3) und die Feldstärke an lokalen Wanddickenreduktionen aufgrund der Verdichtung des magnetischen Flusses nur ansteigen kann, sind die Ergebnisse der Wirbelstrommessung eindeutig einer bestimmten Sensorabhebung bzw. einer bestimmten Tiefe einer Innenkorrosion zu zuordnen.

Da die Sensorabhebung aus der Amplitude abgeleitet wird, kann sie Schwankungen unterliegen. Besonders im Fall großer Abhebungen wirken sich kleine Amplitudenschwankungen aufgrund der dort flachen Kalibrierkurve deutlicher aus (Abbildung 5.9). Zur Abschätzung der Genauigkeit wurden unterschiedliche Sensorabhebungen eingestellt und jeweils mehrere Impulswirbelstrommessungen durchgeführt. Die Empfangssignale wurden bei einer Frequenz von 2 MHz ausgewertet und eine Abhebung bestimmt. Die Abbildung 5.13 stellt die im Experiment mittel Impulswirbelstrom bestimmte Sensorabhebung gegen die eingestellte, reale Sensorabhebung dar. Die Länge der Fehlerbalken entspricht der Standardabweichung über die Stichprobe aller Messungen einer eingestellten Sensorabhebung. Da die Kalibrierkurve bei größeren Abhebungen immer flacher wird, nimmt in diese Richtung auch der Fehler zu.

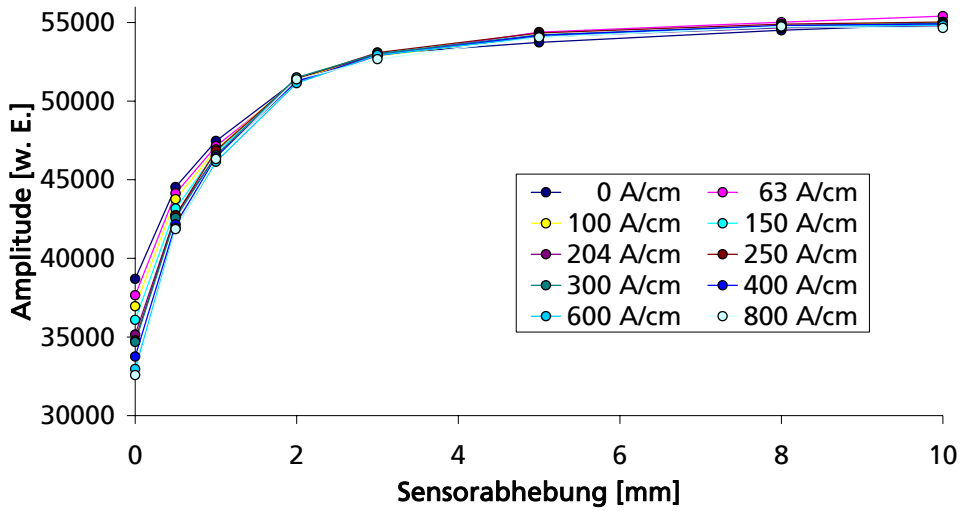


Abbildung 5.12 Amplitudenkalibrierkurven der Impulswirbelstrommessung für verschiedene Horizontalfeldstärken bei 2 MHz Auswertefrequenz

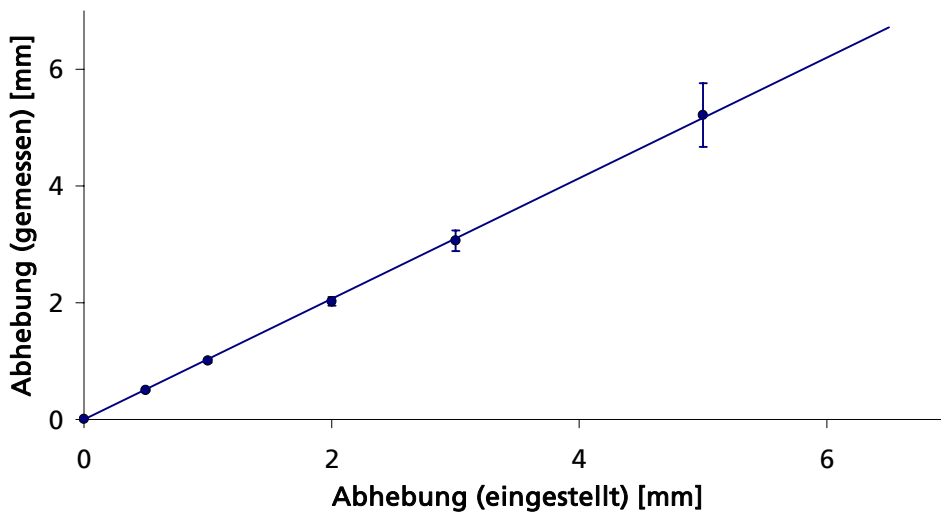


Abbildung 5.13 Gegenüberstellung der eingestellten Sensorabhebung und der mittels Impulswirbelstrom bestimmten Sensorabhebung.

6 Integration des Streuflussverfahrens

6.1 Grundlagen des Streuflussverfahrens

Beim Streuflussverfahren wird das Prüfobjekt mit einer Magnetisierungseinrichtung, entweder einem Elektromagnet oder einem Permanentmagnet, horizontal magnetisiert. An Stellen mit reduzierter Wanddicke oder bei Rissen senkrecht zu den Feldlinien erhöht sich die magnetische Flussdichte und/ oder an der Oberfläche treten Streufelder aus dem Prüfobjekt aus (Abbildung 6.1). Diese Streufelder können mit Hallsensoren oder Spulen detektiert werden. Je nach Ausrichtung der Sensoren können Streufeldkomponenten senkrecht oder parallel zur Testkörperoberfläche erfasst werden. Während mit Hallsensoren die Feldstärke direkt gemessen werden kann, erhält man beim Einsatz von Spulen ein Messsignal, dass proportional zur Änderung des magnetischen Flusses ist.

Die Messsignale können anhand einer vorher durchgeführten Kalibrierung ausgewertet und die Fehlertiefe bestimmt werden. Änderungen in den Materialeigenschaften, den magnetischen Eigenschaften sowie in den mechanischen Spannungszuständen wirken sich auf die Messung aus. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, ist eine sorgfältige Kalibrierung notwendig und während der Messung dürfen sich die oben genannten Parameter nicht ändern. Dies ist jedoch nicht immer gegeben, sodass die Ergebnisse durchaus große Abweichungen aufweisen können.

Ansätze, die EMUS-Technik mit dem Streuflussverfahren zu kombinieren, gibt es schon seit einigen Jahren. Dabei geht es hauptsächlich um Anlagen, die zylindrische oder rohrförmige Werkstücke mit einem rotierenden Sensorsystem auf Oberflächenfehler oder Fehler in der Rohrwand prüfen. Normalerweise wird für eine solche Prüfaufgabe das Streuflussverfahren als einfach umzusetzende Technik eingesetzt. Aber wegen der schlechten Sensitivität gegenüber in Umfangsrichtung orientierten Fehlern wurde die EMUS-Technik ergänzt, um sowohl Umfangsfehler als auch die Wanddicke oder Laminationen zu erkennen. Typischerweise werden bei diesen Systemen die Magnetisierungseinheit sowohl für das Streuflussverfahren als auch für die EMUS-Technik eingesetzt. Die Sensoren für beide Einzelverfahren blieben jedoch getrennt, um sie an für die Prüfaufgabe günstigen Positionen platzieren zu können [HUE1985, SUH1983].

Auch im Bezug auf die vorgesehene Prüfaufgabe, der Dickenmessung von Pipeline-Wänden, gibt es durch die Kombination von Ultraschall- und Streuflussverfahren deutliche Synergien. Mittlerweile sind Molche verfügbar, die Streufluss- und klassische (piezoelektrische) Ultraschallprüfung kombinieren. Die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren gleichen sich gegenseitig aus, wenn sie in einem Inspektionssystem zusammengefasst werden. Flächigen Wandabtrag und größere korrodierte Bereiche können genau und zuverlässig mit der Ultraschalltechnik erfasst werden, dagegen werden kleine Anomalien (zum Beispiel Pitting Corrosion) sehr detailliert mit Streuflussmessungen erkannt [ROS2007].

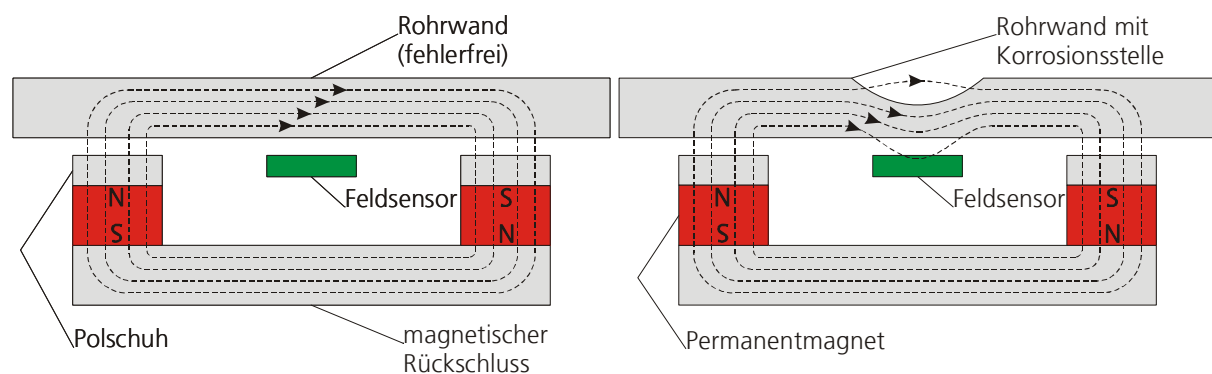


Abbildung 6.1 Prinzip der Streuflussprüfung

6.2 Erweiterung des EMUS-Wandlers mit dem Streuflussverfahren

Bei der klassischen, piezoelektrischen Wanddickenmessung mit Ultraschallankopplung über eine Flüssigkeitsvorlaufstrecke lässt sich anhand des Eintrittsechos und des Rückwandechos neben der Restwanddicke auch die Lage eines möglichen Wandabtrags (innen oder außen) bestimmen (siehe Abbildung 2.7). Da es bei der EMUS-Technik kein Ultraschalleintrittsecho gibt, lässt sich lediglich die Restwanddicke bestimmen. Außerdem kann es bei Innenkorrosion zu einer Abhebung des EMUS-Wandlers kommen. Schon bei geringer Abhebung ist eine Ultraschallwandlung mit der EMUS-Technik nicht mehr möglich. Deshalb wird in den EMUS-Wandler das Wirbelstrom- und zusätzlich auch das Streuflussverfahren integriert. Dadurch hat man in einem einzigen Sensor verschiedene Verfahren zur Verfügung, die sich gegenseitig bei der Wanddickenbestimmung ergänzen und zum Teil auf gleiche Hardwarekomponenten zurückgreifen.

Um die ungeprüften Bereiche bei der EMUS-Prüfung zu minimieren und trotz einer Variation der Materialparameter eine belastbare Auswertung der Streuflussmessung zu bekommen, werden beide Verfahren in einem einzigen Sensor kombiniert. Da beide Techniken auf unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungen beruhen, beim Ultraschall wird das mechanische Verzerrungsfeld durch Anomalien im Prüfobjekt beeinflusst und beim Streuflussverfahren sind es die magnetischen Felder, ergänzen sie sich zu einem redundanten, abhebungsunempfindlicheren Kombinationsverfahren. Dabei werden wesentliche Bestandteile der EMUS-Sensorik für beide Verfahren gleichzeitig genutzt: sowohl die Magnetisierung als auch die EMUS-Spule. Die Magnetisierungseinheit dient zum Einstellen des Arbeitspunktes bei der magnetostriktiven Ultraschallanregung und -detektion sowie für eine ausreichende Magnetisierung im Prüfobjekt für die Streuflussmessung. Die EMUS-Spule dient im Falle der Ultraschallmessung zur Einkopplung bzw. zur Detektion der überlagerten HF-Felder. Andererseits ist diese Spule auch in der Lage die Normalkomponenten der aus dem Prüfobjekt austretenden Streufelder bei einer Relativbewegung zur Oberfläche als Induktionsspannung zu detektieren.

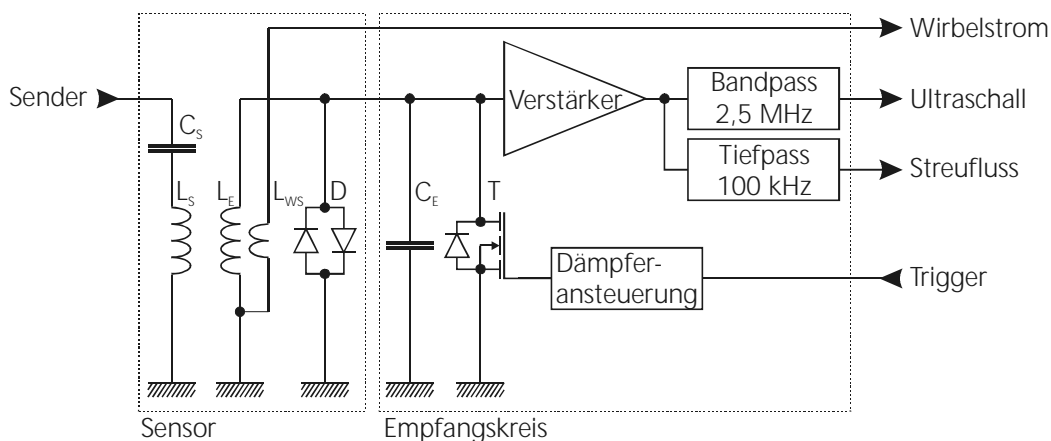


Abbildung 6.2 Blockschaltbild des EMUS-Wanddickensensors und des Empfangskreises mit integrierter Impulswirbelstrom- und Streuflussprüfung (L_S : EMUS-Sendespule, L_E : EMUS-Empfangsspule, L_{WS} : Wirbelstromempfangsspule, C_S : Sendeabstimmung, C_E : Empfangsabstimmung, D : Diodenbegrenzer, T : Feldeffekttransistor zur Empfangskreisbedämpfung)

Das EMUS- und das Streuflussverfahren können mit einer Sensorspule gleichzeitig, parallel betrieben und ausgewertet werden. Dazu wird das verstärkte Empfangssignal in einen niederfrequenten Streuflussanteil und einen höherfrequenten Ultraschallanteil aufgespalten. Dies ist möglich, da beide Verfahren auf unterschiedlichen Frequenzbändern liegen: Die Ultraschallprüfung findet bei 2,5 MHz statt und die Streuflusssignale liegen, abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit der Spule über die Oberfläche, in einem Frequenzbereich kleiner 10 kHz. Die Abbildung 6.2 zeigt das Blockschaltbild des um die Wirbelstromprüfung mit separater Wirbelstromempfangsspule und zusätzlich um die Streuflussprüfung erweiterten EMUS-Wanddickensensors und des Empfangskreises.

Die normalen Streufelder induzieren bei einer Bewegung des Spulensystems parallel zur Oberfläche eine Spannung, die proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit und zur Feldänderung der normalen Komponenten ist. Die Größe der normalen Streufelder für eine Sensorposition kann aus dem Induktionsgesetz nach einfachen Umformungen abgeleitet werden (Gleichung 6.1). Die Streufeldamplitude kann damit aus den Spannungswerten bestimmt werden, wenn bei der Messung neben der Induktionsspannung gleichzeitig auch die Bewegungsgeschwindigkeit des Spulensystems erfasst wird. Gleichzeitig erreicht man durch die Integration auch eine Signalverbesserung, da sie eine Tiefpasswirkung hat. Die Rauschanteile verschwinden weitgehend (vergleiche Abbildung 6.3 mit Abbildung 6.4).

$$\begin{aligned}
 k \cdot U_{ind} &= \frac{dB_{\perp}}{dt} = \frac{dB_{\perp}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dB_{\perp}}{dx} \cdot v \\
 \Leftrightarrow \frac{dB_{\perp}}{dx} &= k \cdot \frac{U_{ind}}{v} \\
 \Leftrightarrow B_{\perp}(x) &= k \cdot \int_0^x \frac{U_{ind}(x')}{v(x')} dx'
 \end{aligned}$$

Gleichung 6.1 Zusammenhang zwischen Induktionsspannung U_{ind} , normalem Streufeld B_{\perp} und Bewegungsgeschwindigkeit des Spulensystems v
(k Proportionalitätskonstante, x Ortskoordinate)

Bei der Integration ist zu beachten, dass das Integral stabil bleibt, das heißt in fehlerfreien Bereichen einen Wert nahe 0 behält. Dazu ist es notwendig, Offsetschwankungen, die zum Beispiel durch den Vorverstärker hervorgerufen werden können, in der Induktionsspannung temporär auszugleichen. Zur Stabilisierung kann die lokale Streufeldkomponente B_{\perp} um den gleitenden Mittelwert der Streufeldkomponente $\langle B_{\perp} \rangle_{x-\delta x}^{x+\delta x}$ über das Intervall $[x - \delta x, x + \delta x]$ reduziert werden (Gleichung 6.2). Die Intervallbreite der Mittelung ist dabei größer als die typischen Fehlerbreiten zu wählen. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden Werte für δx von 30 bis 50 mm benutzt. In Abbildung 6.4 ist die Wirkung der Stabilisierung der Integration an einem Beispiel dargestellt.

$$B_{\perp}^{stab}(x) = B_{\perp}(x) - \langle B_{\perp}(x) \rangle_{x-\delta x}^{x+\delta x}$$

Gleichung 6.2 Stabilisierung der Magnetfeldkomponente

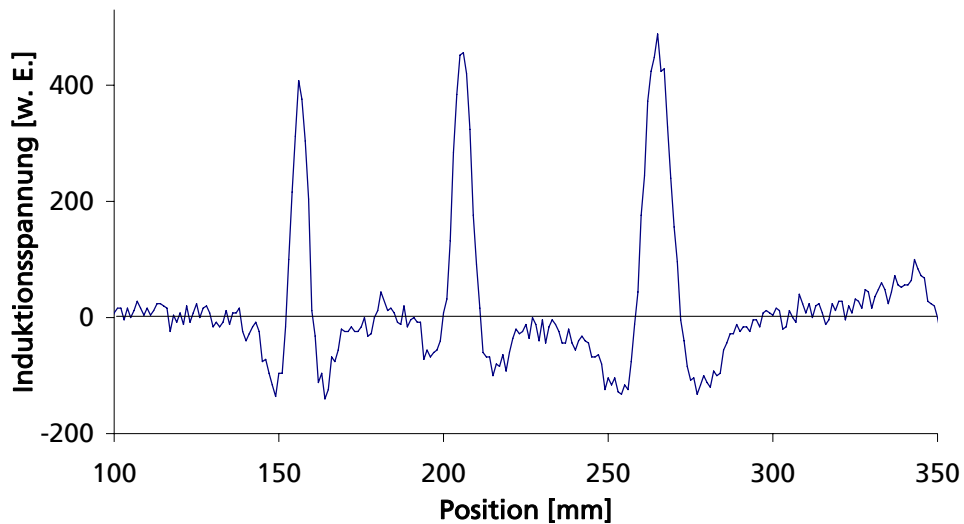


Abbildung 6.3 Streuflussmessung an Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigern Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Dargestellt ist die Induktionsspannung ohne Geschwindigkeitskorrektur. Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

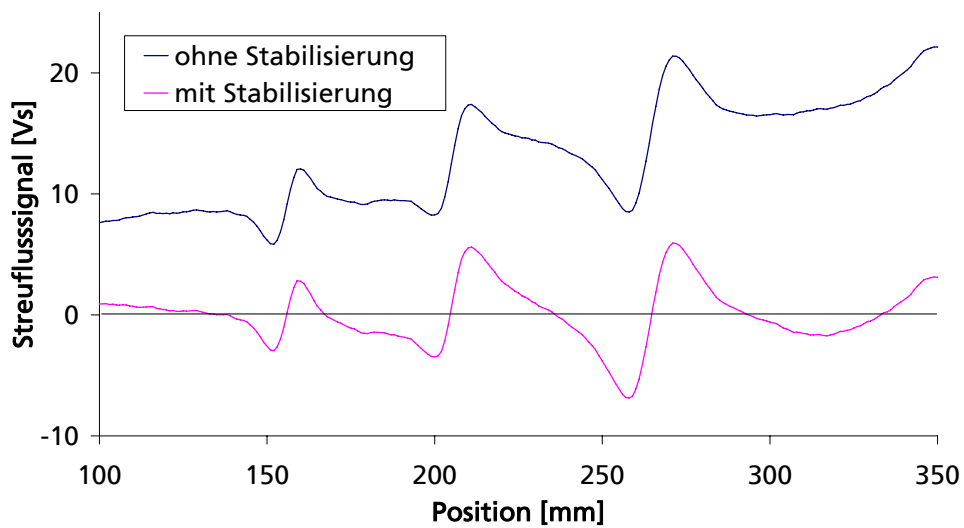


Abbildung 6.4 Streuflussmessung an Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigern Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Dargestellt sind die aufintegrierten Signale der geschwindigkeitskorrigierten Induktionsspannung ohne und mit Stabilisierung (vgl. Abbildung 6.3). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

6.3 Kalibrierung

Mit dem Streuflussverfahren können bei ausreichender Relativgeschwindigkeit des Sensors gegenüber dem Prüfobjekt sowohl Innen- als auch Außenfehler detektiert werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen innen und außen nur sehr eingeschränkt möglich. Eine Quantifizierung der Fehlertiefe ist nur nach einer aufwendigen Kalibrierung an einer Vielzahl von Testfehlern und unter Einbeziehung von Nachbarschaftskriterien möglich [REB2006]. Sowohl die Fehlerausdehnung in Umfangsrichtung und in axialer Richtung als auch die Fehlertiefe müssen in eine Kalibrierung einbezogen werden [TIR2003]. Eine Kalibrierung der Streuflussmessung wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

7 Erprobung des Kombinationssensors

Mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Kapiteln zur Optimierung und zur Erweiterung mit zusätzlichen Prüftechniken wurde ein kombinierter EMUS-Wanddickensensor mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung aufgebaut. Dieser Sensor enthält drei konzentrische Rundspulen: die EMUS-Empfangsspule, die gleichzeitig auch als induktiver Streufeldsensor genutzt wird, die EMUS-Sendespule und die Wirbelstromempfangsspule. Die Spulenparameter sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Sowohl an ebenen Testkörpern als auch an einem mehrere Meter langem Rohrsegment jeweils mit kalottenförmigen Testfehlern bzw. Flachbodenbohrungen wurde der Kombinationssensor erprobt. Dazu wurden die Prüfobjekte mit dem optimalen horizontalen Feld vormagnetisiert. Die Prüf- und Auswerteparameter für die Untersuchungen im Rahmen der Sensorerprobung befinden sich in Tabelle 7.2.

Anhand der Laufzeit des Ultraschallrückwandechos wurde die lokale Restwanddicke der Testkörper bestimmt. Um die Wanddicke aus den Ultraschallmessungen zu erhalten, geht man wie folgt vor: Zunächst wird der zeitliche Ultraschallursprung bestimmt. Dazu werden die Laufzeiten der Maxima des ersten und zweiten Rückwandechos ermittelt. Zieht man die Differenz von der Laufzeit des ersten Rückwandechos ab, erhält man den zeitlichen Ultraschallursprung (Gleichung 7.1). Dieser Wert muss einmal als Offset-Wert ermittelt werden. Für die eigentliche Wanddickenbestimmung muss dann für jede Sensorposition die Laufzeit des Maximums des ersten Rückwandechos bestimmt werden, der Offset-Wert abgezogen und mit der Hälfte der für den Werkstoff gültigen Schallgeschwindigkeit multipliziert werden (Gleichung 7.2). Durch diese Vorgehensweise erreicht man, dass die Wanddicke allein mit der Auswertung des ersten Rückwandechos bestimmt werden kann.

$$t_0 = t_1 - (t_2 - t_1) = 2 \cdot t_1 - t_2$$

Gleichung 7.1 Bestimmung des zeitlichen Ultraschallursprungs t_0 aus den Laufzeiten der Maxima des ersten und zweiten Rückwandechos t_1 und t_2

$$WD = \frac{c}{2} \cdot (t_1 - t_0)$$

Gleichung 7.2 Bestimmung der Wanddicke WD aus der Laufzeit des Maximums des ersten Rückwandechos t_1 , dem zeitlichen Ultraschallursprung t_0 und der Schallgeschwindigkeit c

Mit dem Impulswirbelstromverfahren wurde die Sensor zugewandte Oberfläche auf Wandabtrag untersucht. Die Empfangssignale wurden frequenzselektiv ausgewertet (Gleichung 5.1) und mit Hilfe einer Kalibrierkurve (Abbildung 5.9) einer Fehlertiefe zugeordnet. Zusätzlich wurden die magnetischen Streufelder durch geschwindigkeitskorrigierte Integration der Induktionsspannungen bestimmt (Gleichung 6.1) und dargestellt.

Befinden sich die kalottenförmigen Testfehler auf der dem Sensor zugewandten Oberfläche, werden sie als Innenfehler (IF) bezeichnet, Testfehler auf der abgewandten Oberfläche werden mit Außenfehler (AF) gekennzeichnet. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Erprobung dargestellt und analysiert.

Spule	Spulendurchmesser	Windungszahl
EMUS-Empfangsspule	4 mm	60
EMUS-Sendespule	6 mm	30
Wirbelstromempfangsspule	10 mm	1

Tabelle 7.1 Spulenparameter des Kombinationssensors für die Erprobung

Parameter	
horizontale Magnetfeldstärke in fehlerfreien Bereichen	200 A/cm
EMUS-Anregungsfrequenz	2,5 MHz
EMUS-Anregungsburstlänge	2 Zyklen
EMUS-Empfangssignalfilterung	Bandpass: 2,5 MHz – 4 MHz
Wirbelstromauswertefrequenz	2 MHz
Spulenabstand zum Prüfobjekt	0,5 mm
Schallgeschwindigkeit	3,2 mm/ μ s

Tabelle 7.2 Prüf- und Auswerteparameter bei der Erprobung

7.1 Wanddickenmessung an ebenen Testkörpern

Bei den ebenen Testkörpern handelt es sich um die in Tabelle 4.2 zusammengestellten Prüfobjekte. Sie wurden bereits zur Bestimmung des magnetostriktiven Arbeitspunktes benutzt (Kapitel 4.1.3). Für die Sensorerprobung wurden sie mit einem Elektromagnet in horizontaler Richtung statisch vormagnetisiert. Ein Kombinationssensor wird parallel zum horizontalen Magnetfeld auf der Testkörperoberfläche verschoben und dabei die Messwerte der drei Prüftechniken entlang der zentralen Achse der Testfehler aufgezeichnet.

In Abbildung 7.7 bis Abbildung 7.24 werden für die untersuchten ebenen Testkörper die berechneten Restwanddicken aus der Ultraschallmessung (blau, Bezeichnung „EMUS“) und die Innenfehlertiefe aus der Impulswirbelstrommessung (rot, Bezeichnung „WS“) dargestellt. Zusätzlich werden die Streuflussamplituden (türkis, Bezeichnung „Streufluss“) als unkalibrierte Größe dargestellt.

Daneben wurden exemplarisch für einen Testkörper (TK 10-30%, nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief) auch die Ultraschall- und Impulswirbelstrom-B-Bilder und Wirbelstromamplitudenortskurven sowohl für Innen- als auch für Außenfehler dargestellt. Anhand der Ultraschall-B-Bilder (Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2) wird klar, dass das EMUS-Verfahren nur bei Außenfehlern zur Wanddickenbestimmung herangezogen werden kann, da bei Innenfehlern durch den Abhebeeffect die Ultraschallsignale verschwinden. Außerdem lässt sich schon an der Laufzeitverteilung der Fehlerechos die Kalottenform der Testfehler erkennen, die sich dann sehr deutlich in der Wanddickekurve zeigt (Abbildung 7.7). Das Wirbelstromverfahren kann dagegen nur Innenfehler detektieren (Abbildung 7.3 bis Abbildung 7.6). Die Anstiege in den Amplitudenortskurven für Positionen kleiner 65 mm und größer 350 mm (Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6) werden durch den experimentellen Aufbau, das heißt durch die gegenüber dem Spulensystem unbewegliche Magnetisierungseinheit verursacht und stellen keine Fehleranzeigen dar. Mit Hilfe einer Kalibrierkurve (Abbildung 5.9) können die bei der

Wirbelstromauswertefrequenz gewonnenen Amplitudenwerte auf eine Abhebung zurückgerechnet werden. Die Ergebnisse sind zusätzlich zu den Ultraschallergebnissen in Abbildung 7.8 dargestellt.

Für die Testkörper mit 0,5 mm tiefen Flachbodenbohrungen als Testfehler (TK 10-05, TK 15-05 und TK 20-05, nominelle Wanddicken 10, 15 und 20 mm, jeweils mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief) zeigt sich für alle Wanddicken ein einheitliches Bild: Sowohl bei Außen- als auch bei Innenfehler können die Restwanddicke und die Fehlerausdehnung mit der Ultraschallmessung bestimmt werden. Aber erst die zusätzliche Information aus der Wirbelstrommessung macht eine Unterscheidung der beiden Fehlerarten möglich (TK 10-05: Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10, TK 15-05: Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14, TK 20-05: Abbildung 7.19 und Abbildung 7.20).

Der Testkörper TK 10-70% stellt in sofern eine Besonderheit dar, da bei ihm die minimalen Restwanddicken an den Testfehlern lediglich 3 mm betragen. Die Ultraschallrückwandechos an diesen Positionen liegen also in der Totzone. Deshalb ist dort keine Laufzeitauswertung möglich. Eine Bestimmung der Restwanddicke aus den Ultraschalldaten ist somit für Außen- wie für Innenfehler nicht durchführbar, aber die Fehlerpositionen und -größen können weiterhin ermittelt werden. Zusätzlich zeigt auch die Streuflussprüfung die Fehlstellen klar an. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehler ist durch die Wirbelstrommessung gegeben (Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Streuflussprüfung keine Kalibrierung durchgeführt. Sie liefert deshalb keine quantitativen Aussagen über die Fehlertiefe und -größe. Es lassen sich jedoch Abhängigkeiten feststellen: Während sich Innen- und Außenfehler in der Amplitude nur geringfügig unterscheiden (vergleiche zum Beispiel Abbildung 7.17 mit Abbildung 7.18 oder Abbildung 7.23 mit Abbildung 7.24), ist ein Einfluss des Fehlervolumens erkennbar. Vergleicht man die 30%- mit dem 70%-tiefen Testfehler einer Wanddicke, werden die tieferen mit einer deutlich höheren Streuflussamplitude angezeigt (vergleiche zum Beispiel Abbildung 7.15 mit Abbildung 7.17 oder Abbildung 7.16 mit Abbildung 7.18). Ähnliches gilt mit Einschränkungen auch für die Testfehler gleicher Tiefe aber unterschiedlicher Größe bei gleicher nomineller Wanddicke des Testkörpers (siehe Abbildung 7.11, Abbildung 7.17 und Abbildung 7.23). Da diese Messungen mit relativ kleinen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt wurden ($v < 0,5$ m/s), induzieren die Streufelder auch nur niedrige Spannungen in die Empfangsspule. Deshalb ist die Aussagekraft der Streuflussmessung bei kleinen Fehlertiefen eingeschränkt bzw. ist bei den 0,5 mm tiefen Flachbodenbohrungen keine Auswertung durchführbar.

Während die Ultraschallmessung bei Außenfehlern die Fehlerkontur und -tiefe sehr gut abbildet, ist die Wirbelstrommessung bei der Bestimmung der maximalen Innenfehlerentiefe bei flächenmäßig kleinen Fehlern gegenüber der Sensorapertur ungenau. Der Grund dafür ist, dass sich das Wirbelstromempfangssignal aus dem Mittelwert der Faltung aus dem Empfindlichkeitsprofil über der Wandlerapertur und der Fehlerkontur unterhalb der Wandlerapertur zusammensetzt. Innenfehlern, die gleich groß oder kleiner als die Wandlerapertur sind, werden deshalb nur mit einer gemittelten Tiefe und nicht mit der realen maximalen Fehlertiefe angezeigt. Für große Innenfehler wie die kalottenförmigen Testfehler mit 30 mm Durchmesser wird die Fehlertiefe solange gut abgebildet bis das Wirbelstromsignal in Sättigung geht (Abbildung 7.8, Abbildung 7.16 und Abbildung 7.22). Dieser Wert wird bei etwa 8 mm Fehlertiefe erreicht. Tiefere Bereiche der Innenfehler werden zwar weiterhin detektiert, aber als Fehlertiefe wird ihnen immer die Sättigungstiefe zugewiesen (Abbildung 7.18 und Abbildung 7.24).

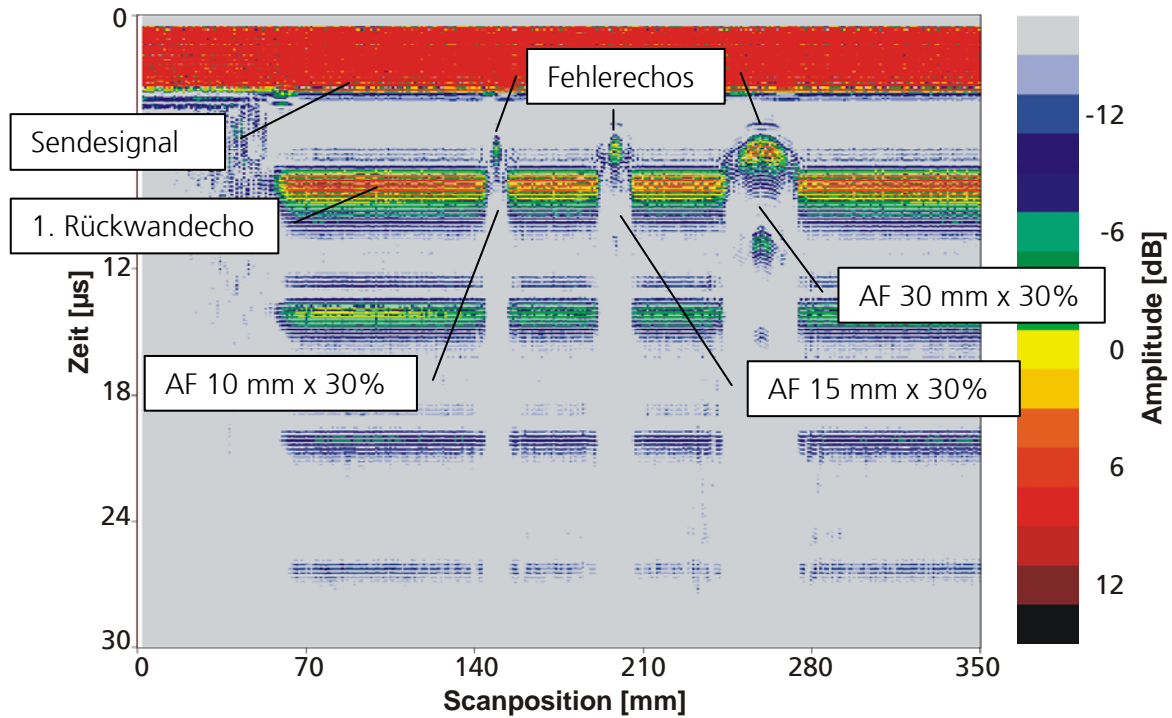


Abbildung 7.1 Ultraschall-B-Bild: Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

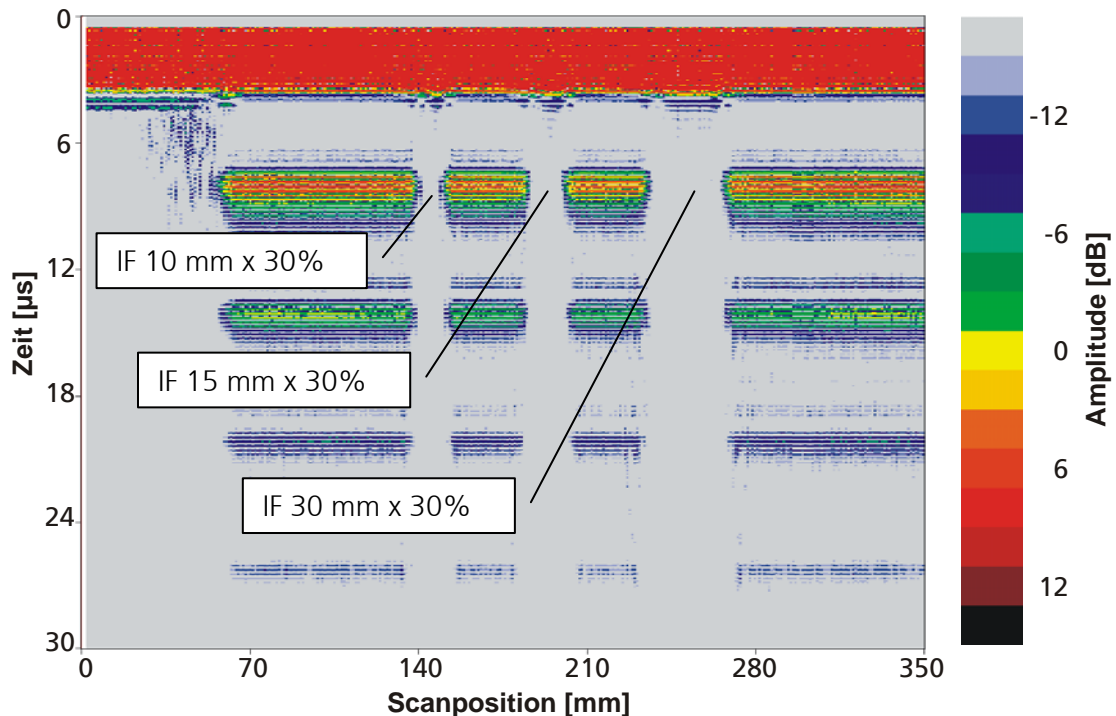


Abbildung 7.2 Ultraschall-B-Bild: Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

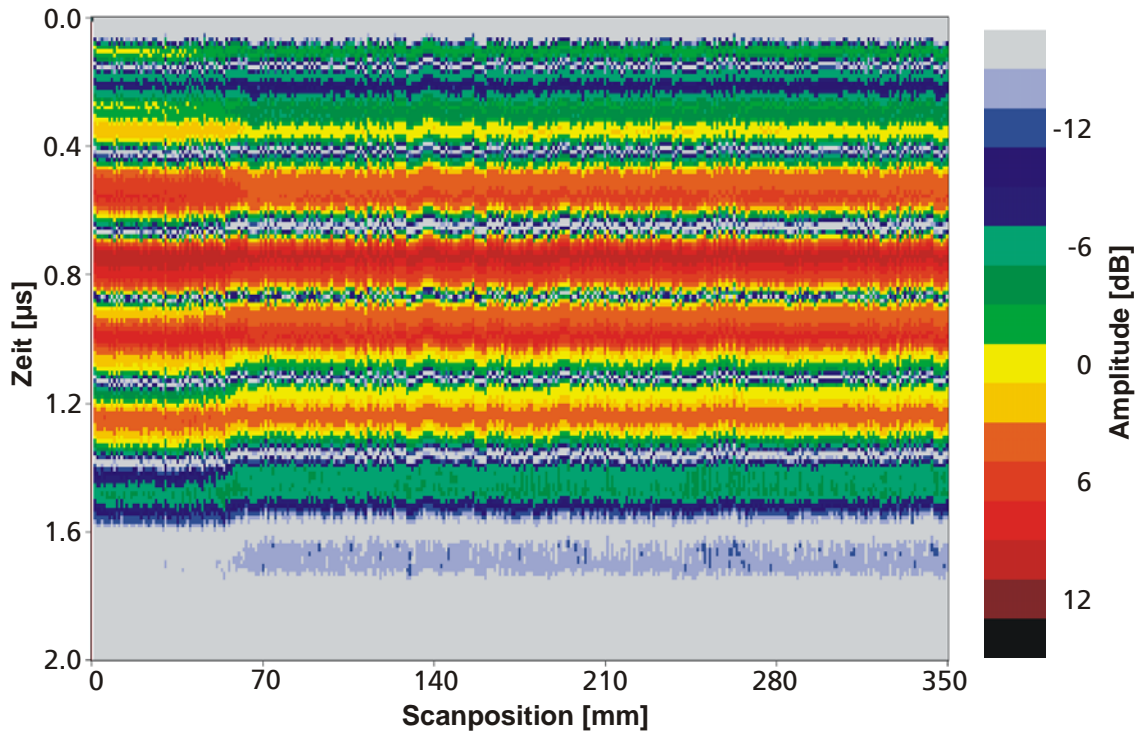


Abbildung 7.3 ImpulsWirbelstrom-B-Bild: Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

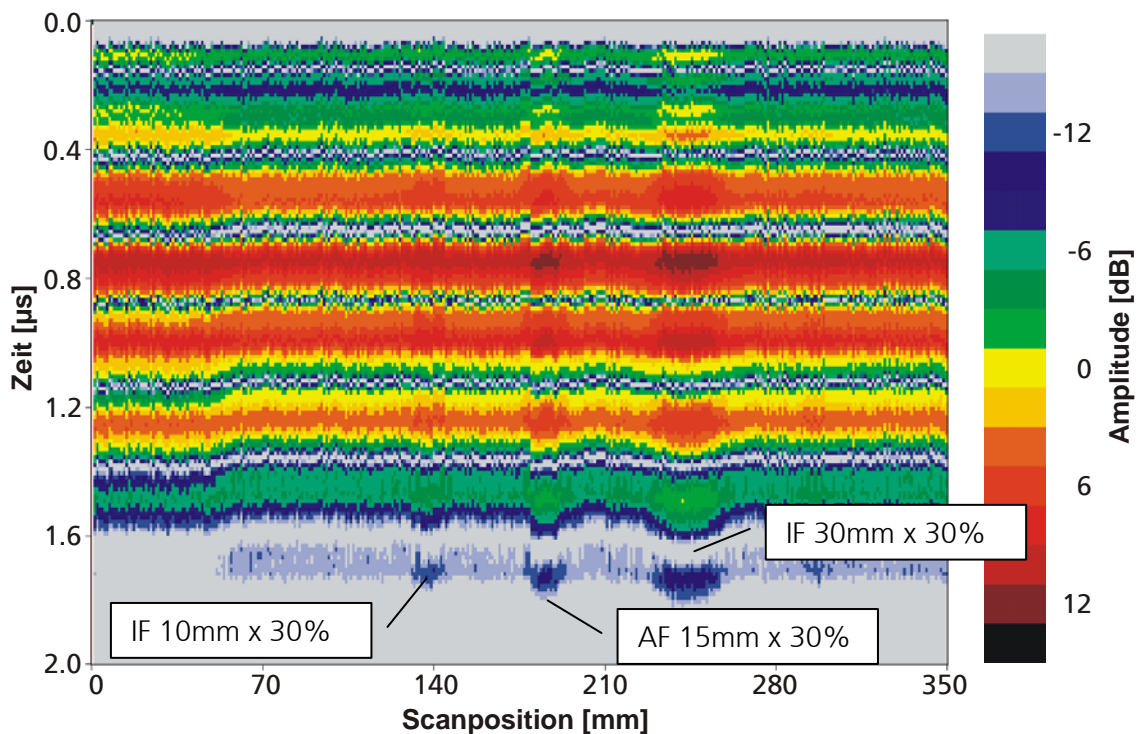


Abbildung 7.4 ImpulsWirbelstrom-B-Bild: Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

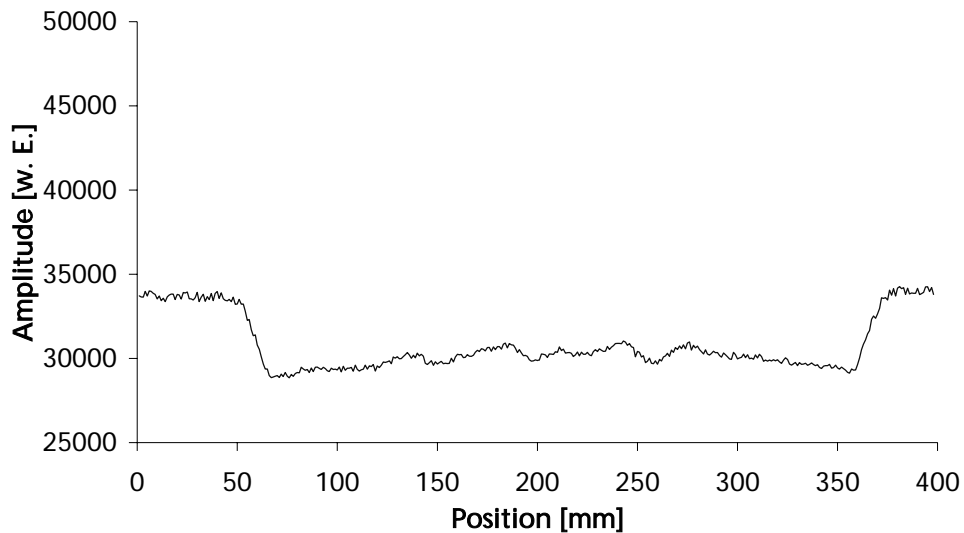


Abbildung 7.5 Wirbelstromamplitudenortskurve bei einer Auswertefrequenz von 2 MHz. Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

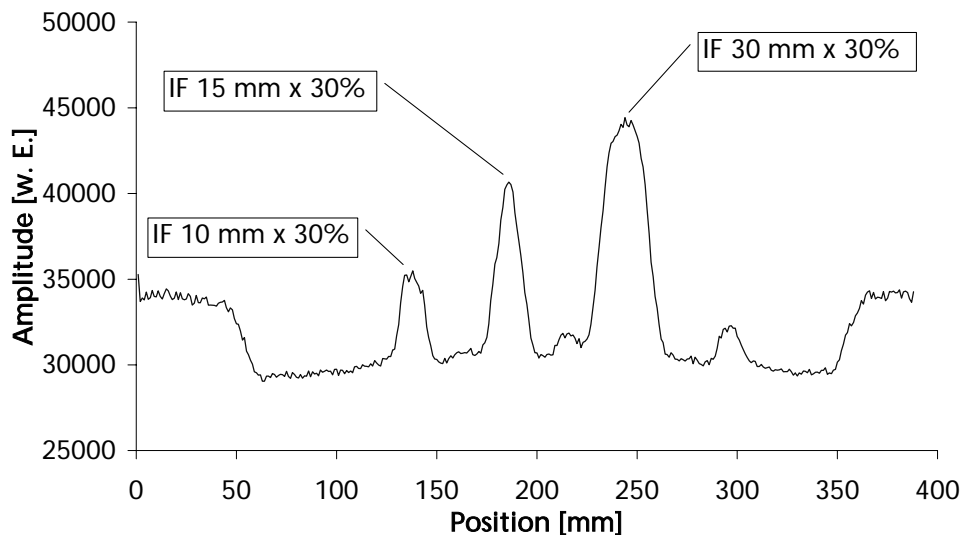


Abbildung 7.6 Wirbelstromamplitudenortskurve bei einer Auswertefrequenz von 2 MHz. Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

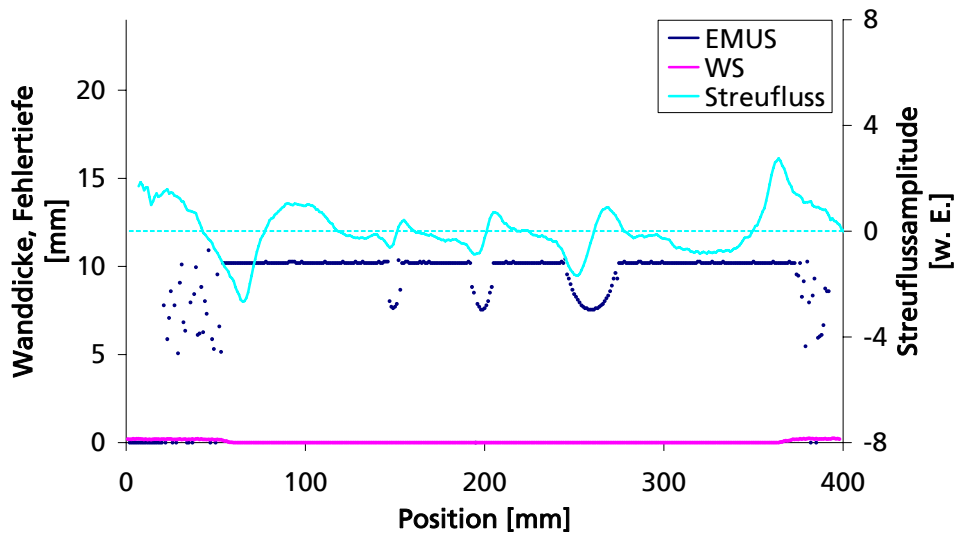


Abbildung 7.7 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

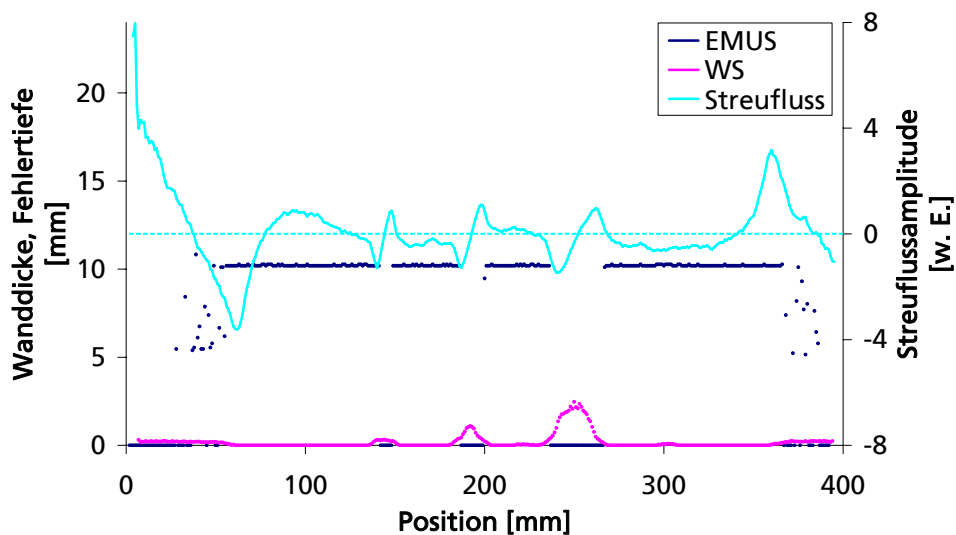


Abbildung 7.8 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

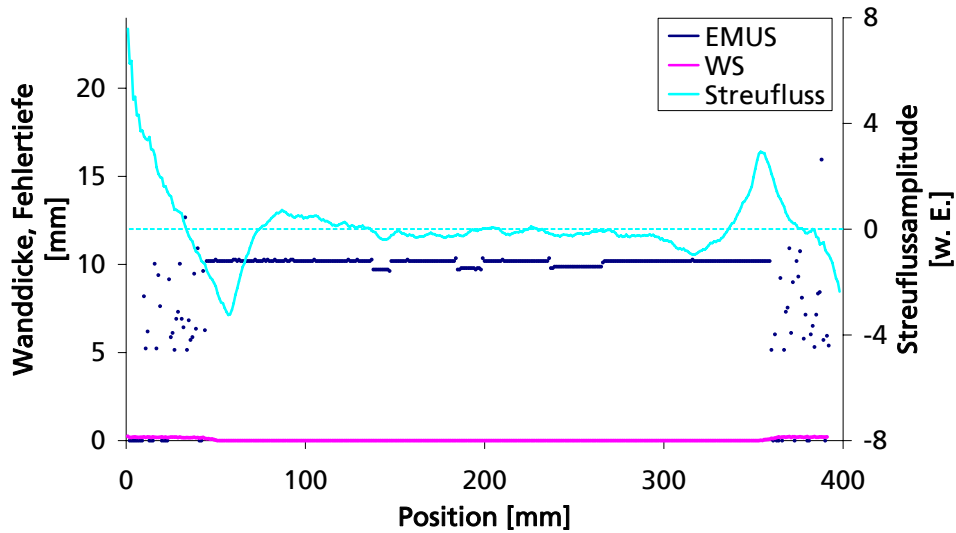


Abbildung 7.9 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

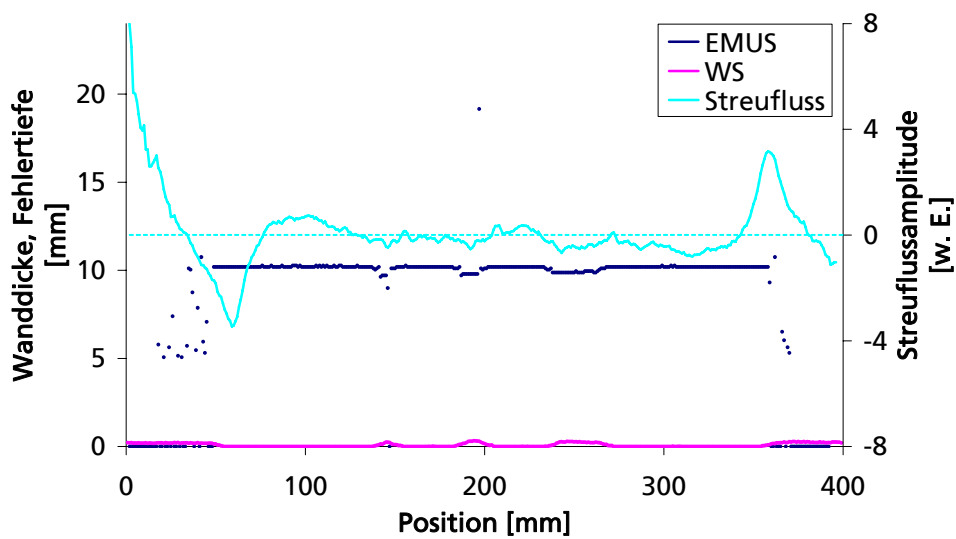


Abbildung 7.10 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

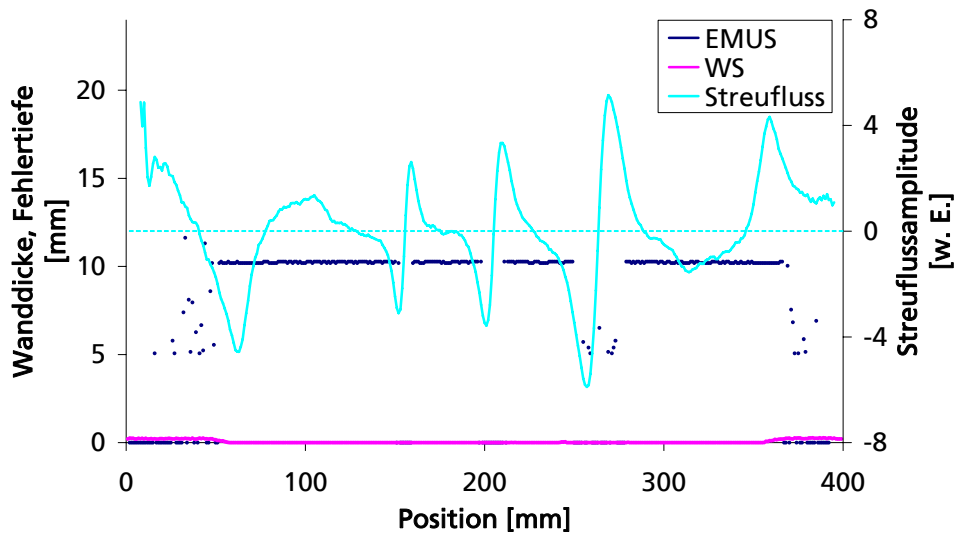


Abbildung 7.11 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

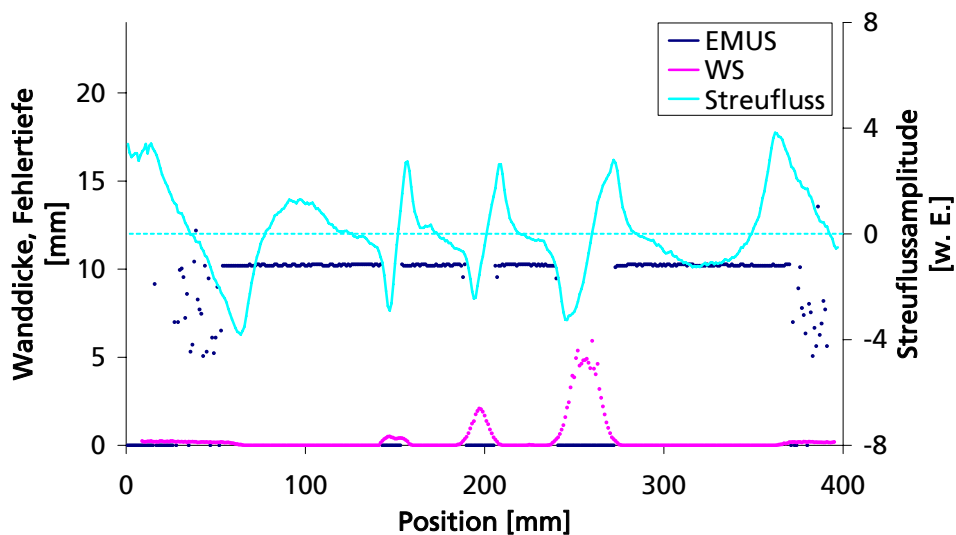


Abbildung 7.12 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

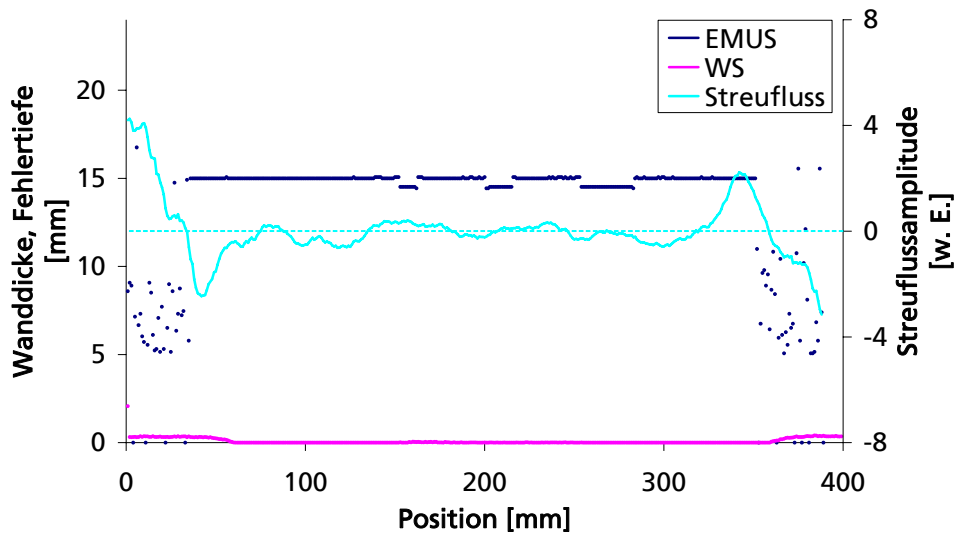


Abbildung 7.13 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

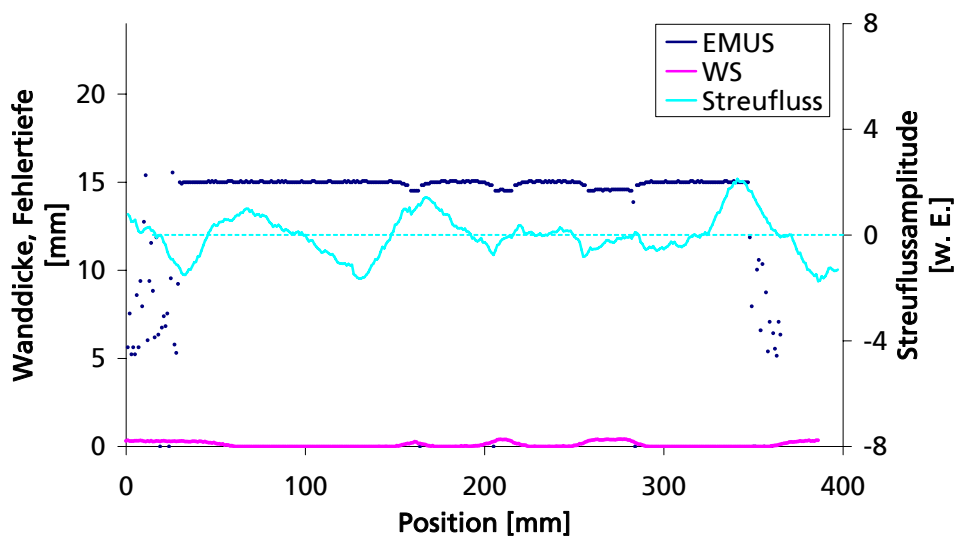


Abbildung 7.14 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

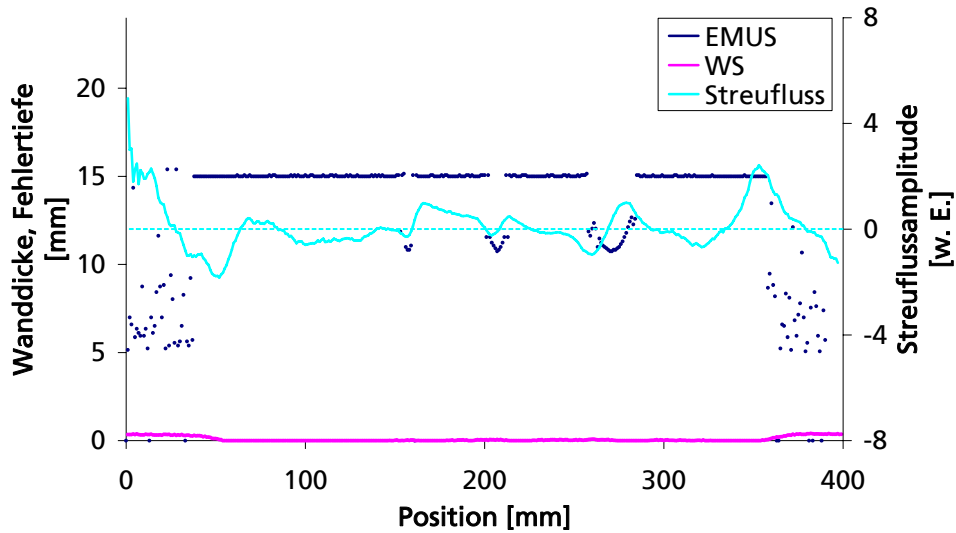


Abbildung 7.15 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

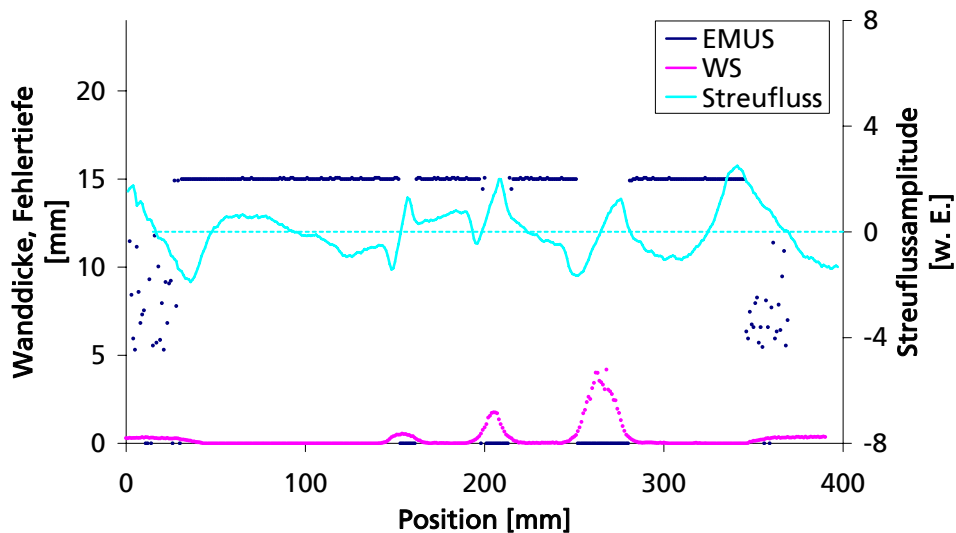


Abbildung 7.16 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

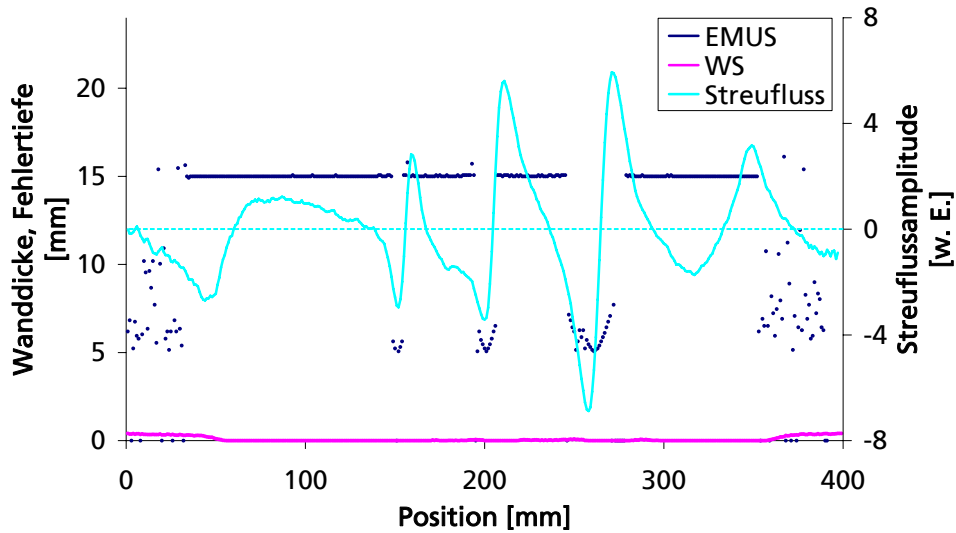


Abbildung 7.17 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

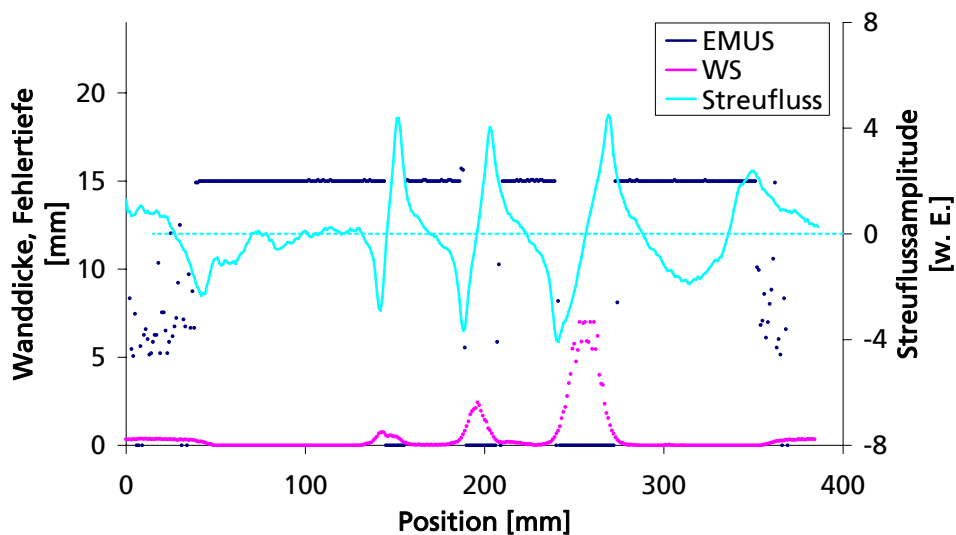


Abbildung 7.18 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

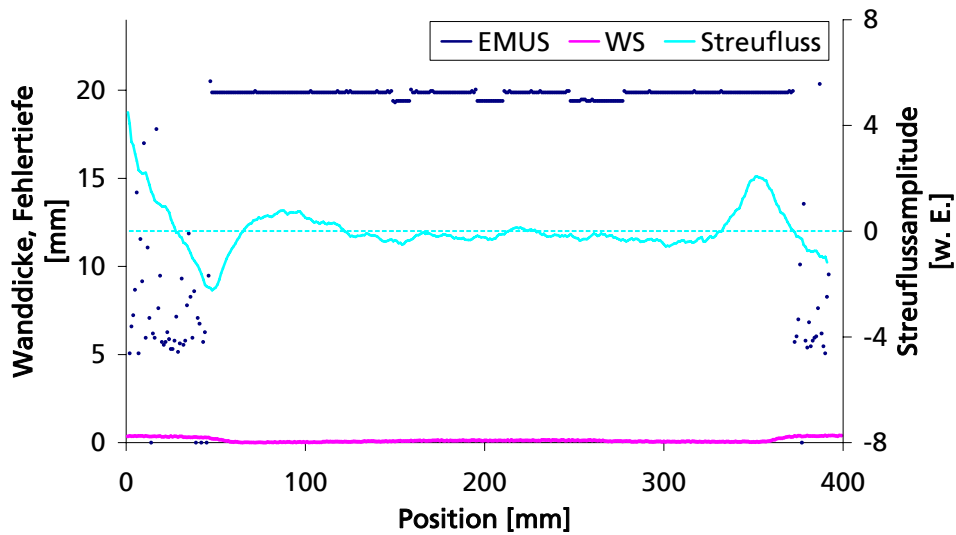


Abbildung 7.19 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

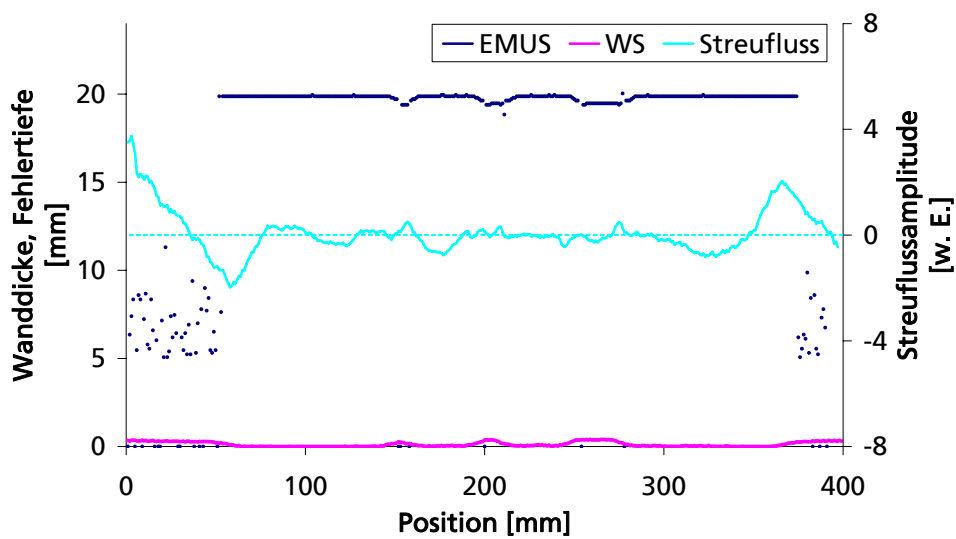


Abbildung 7.20 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

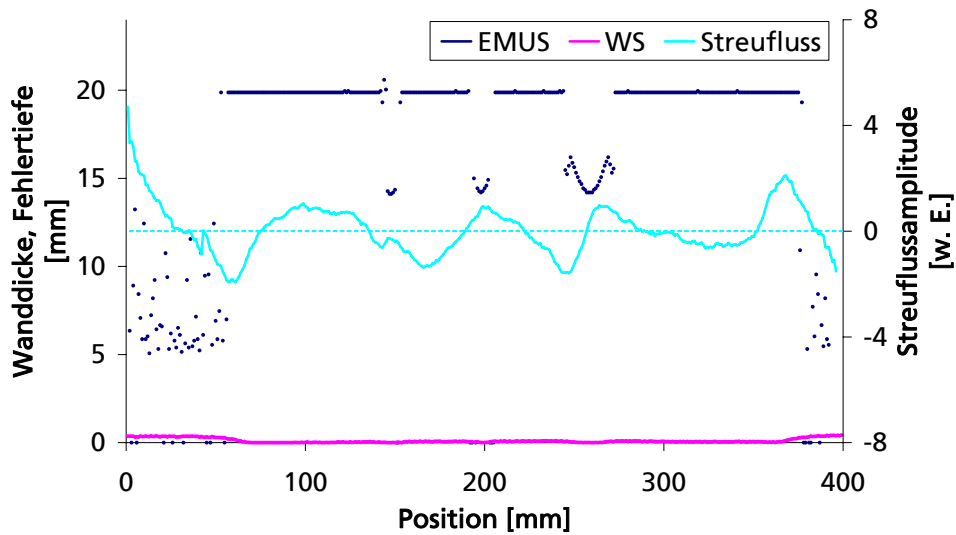


Abbildung 7.21 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

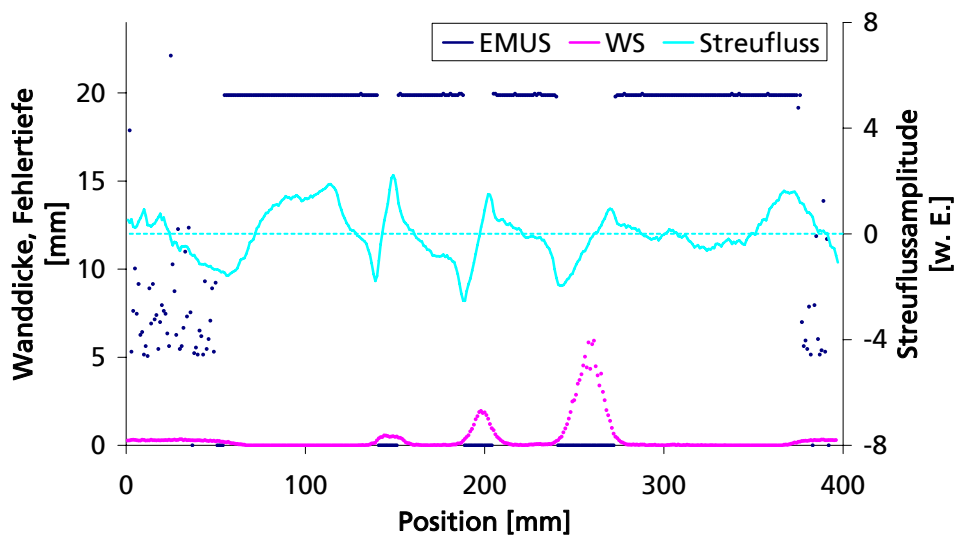


Abbildung 7.22 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

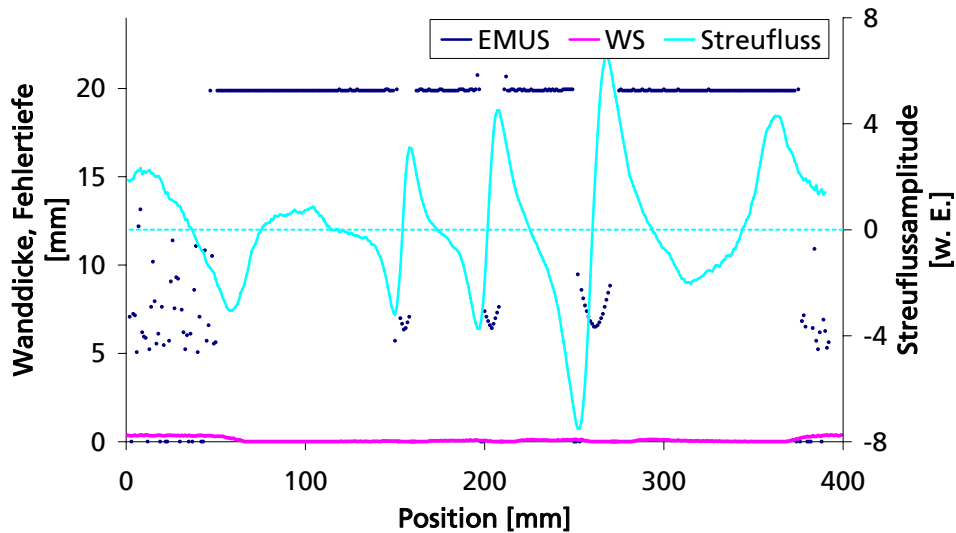


Abbildung 7.23 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor abgewandten Testkörperoberfläche (Außenfehler).

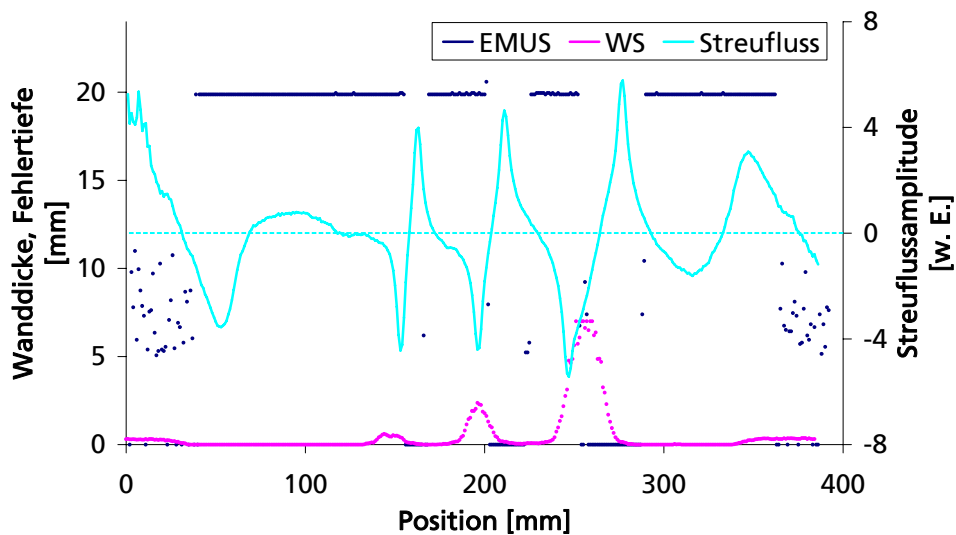


Abbildung 7.24 ausgewertete Ultraschall-, Impulswirbelstrom- und Streuflussdaten für Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief). Die Testfehler liegen auf der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche (Innenfehler).

7.2 Wanddickenmessung an Gasfernleitungen

Neben den Messungen an ebenen Testkörpern wurden auch Untersuchungen an einem Rohrsegment durchgeführt. Die Testkörperabmessungen sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst. In ein fehlerfreies Rohrstück wurden verschiedene kalottenförmige Innen- und Außenfehler eingebracht (10, 15 und 30 mm Durchmesser und bis 70% der nominellen Wanddicke tief). Eine genaue Beschreibung und die Positionen der Testfehler sind im Kapitel Testkörper unter 11.2.1 *Rohrsegment mit kalottenförmigen Testfehlern* angegeben.

Wanddicke Grundmaterial	9,4 mm
Durchmesser	36", ~900 mm
Länge	4150 mm

Tabelle 7.3 Abmessungen des Rohrsegments mit kalottenförmigen Testfehlern

Zur horizontalen Vormagnetisierung wurde ein rollengelagertes und höhenverstellbares Magnetjoch benutzt, das die Rohrwand in axialer Richtung magnetisiert (Abbildung 7.25). Die Abbildung 7.26 zeigt die Feldstärke des mit der Magnetisierungseinheit erzeugten horizontalen Magnetfeldes in axialer und in Umfangsrichtung für eine Polschuhabhebung von 3 mm. Zwischen den Polschuhen ist das Spulensystem in 8-kanaliger Ausführung als Array zentral angebracht (Abbildung 7.27). Der Spulenabstand zwischen benachbarten Spulen beträgt in axialer Richtung 12 mm und in Umfangsrichtung 8 mm. Die Auflösung in Umfangsrichtung ist somit auch auf 8 mm festgelegt. In axialer Richtung wird mit einem Messraster von 1 mm gearbeitet.

Legt man die Mittelpunkte der Einzelsensoren zugrunde wird mit dem Sensorarray eine Fläche von 56 mm x 12 mm (Umfangsrichtung x axiale Richtung) abgedeckt. Eine merkliche Verringerung der horizontalen Vormagnetisierung tritt lediglich in Umfangsrichtung auf, hier beträgt die Abnahme von der Mitte zum Sensorrand etwa 7%.

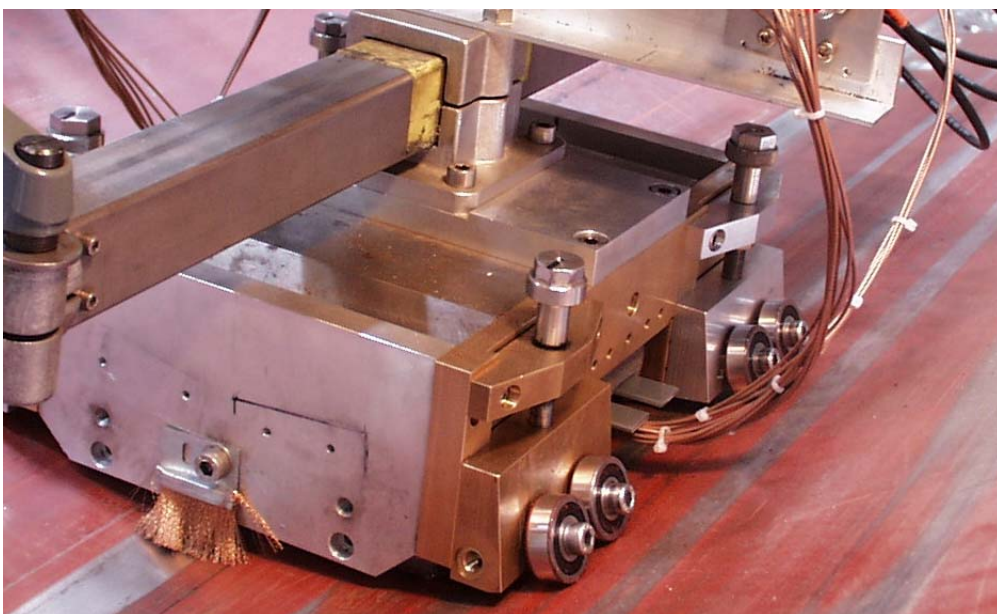


Abbildung 7.25 höhenverstellbares Magnetjoch in einem Rohrsegment

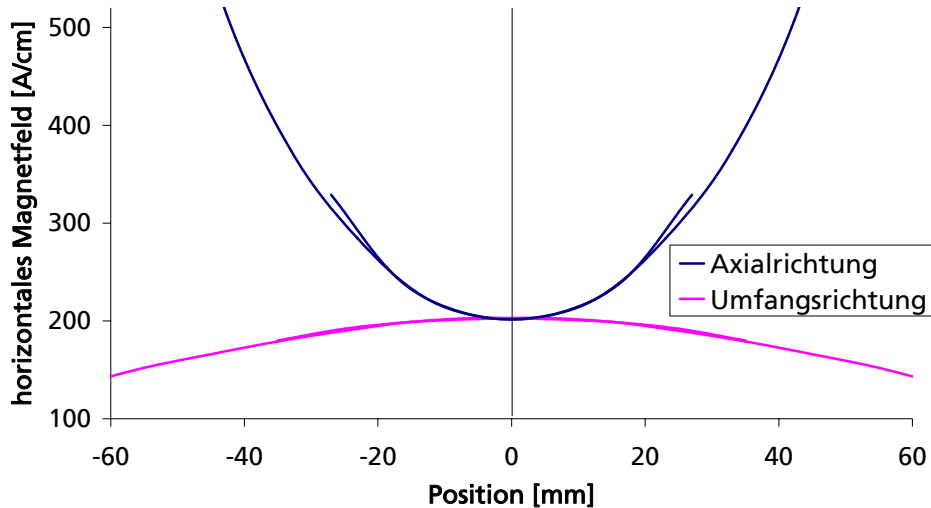


Abbildung 7.26 Verteilung des axialen, horizontalen Magnetfeldes zwischen den Polschuhen bei 3 mm Polschuhabhebung von der Rohrwand (Wanddicke: 9,4 mm)

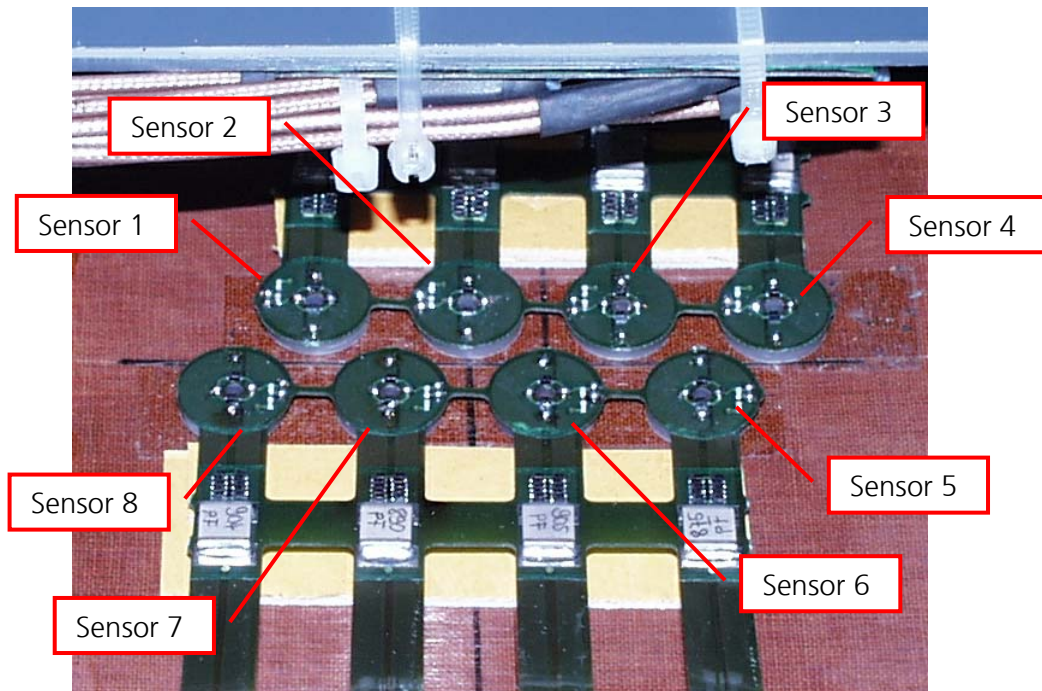


Abbildung 7.27 8-kanaliges Sensorarray

Die Ergebnisse der Messungen sind separat für die einzelnen Verfahren in den folgenden Abbildungen dargestellt. Für die EMUS- und die Impulswirbelstrommessung sind die Restwanddicke bzw. die Fehlertiefe und für das Streuflussverfahren die Streufeldamplitude für alle 8 Prüfkanäle, für die EMUS-Messung zur besseren Übersichtlichkeit nur für Kanal 6, als Längsschnitt dargestellt (Abbildung 7.28, Abbildung 7.30 und Abbildung 7.32). Zusätzlich sind die Ergebnisse auch in C-Bilddarstellung aufgetragen (Abbildung 7.29, Abbildung 7.31 und Abbildung 7.33). In den C-Bilddarstellungen ist auf der Abszisse die axiale Rohrposition und auf der Ordinate die Umfangsposition des vom Sensorarray abgedeckten Umfangssegmentes angegeben.

Die Ultraschallmessungen zeigen sowohl für Innen- als auch für Außenfehler die Fehlergrößen in Umfangsrichtung und in axialer Richtung gut an. Die Fehlertiefe kann bei Außenfehlern bis zu einer Restwanddicke von etwa 5 mm bestimmt werden. Für größere Fehlertiefen, oder wenn kein auswertbares Rückwandecho empfangen wird, wird die Tiefe im C-Bild weiß dargestellt (Abbildung 7.29). Dass kein Rückwandecho empfangen wird, kann mehrere Gründe haben:

- Aufgrund einer Sensorabhebung, zum Beispiel an einem Innenfehler, kann kein Ultraschallsignal über elektromagnetische Wechselwirkung in das Prüfobjekt eingekoppelt oder abgegriffen werden.
- Bei zu geringer Restwanddicke kann das Rückwandechosignal in der Totzone des EMUS-Wandlers liegen und somit nicht ausgewertet werden.
- Da mit kalottenförmigen Testfehlern gearbeitet wird, kann das Ultraschallsignal in Bereichen einer nicht parallelen Rückwand wegreflektiert werden und es trifft nicht mehr auf die Apertur des Empfängers.

Mit der Wirbelstrommessung können nur Innenfehler detektiert werden, deren Fehlerposition im Rohr wird korrekt wiedergegeben. Die Fehlertiefen können aufgrund des bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen Apertureffektes nur bei flächenmäßig großen Fehlern genau bestimmt werden (Abbildung 7.30 und Abbildung 7.31).

Die Streuflussmessung ist in der Lage, alle Testfehler zu erkennen. Die Fehlerposition wird in axialer Richtung sehr gut wiedergegeben, in Umfangsrichtung dagegen verschmieren selbst kleine Fehler über die gesamte Arraybreite des Sensors. Die Ursache hierfür ist, dass eine Magnetisierungseinheit benutzt wurde, die nur einen schmalen Bereich des Testkörperumfangs abdeckte. Da das horizontale Magnetfeld in Umfangsrichtung abnimmt (siehe Abbildung 7.26), können die Streufelder sehr leicht in Umfangsrichtung um die Testfehler herum ausweichen und verbreitern dadurch die Fehleranzeige. Eine Unterscheidung nach Innen- und Außenfehlern ist dabei nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich (Abbildung 7.32 und Abbildung 7.33).

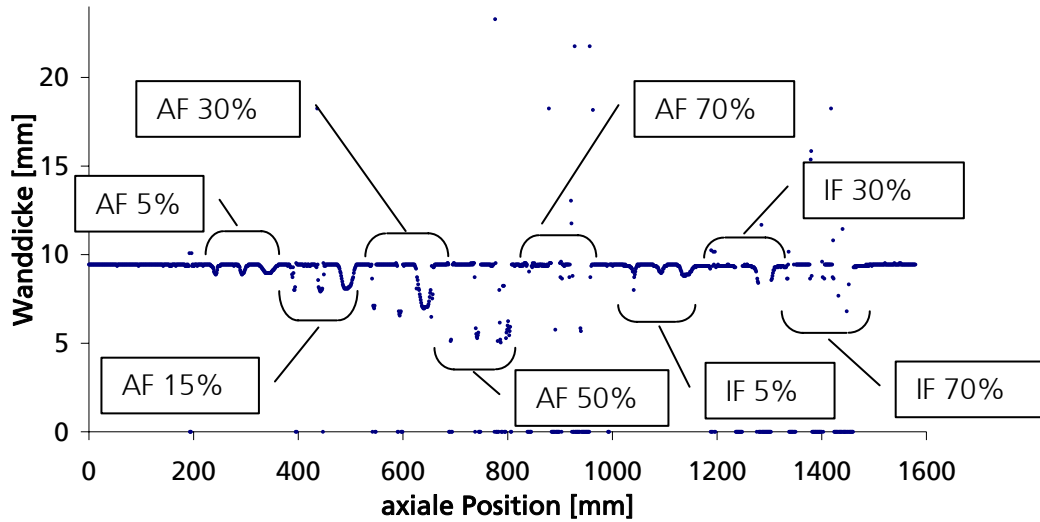


Abbildung 7.28 aus den Rückwandcholaufzeiten berechnete Wanddicken für Kanal 6

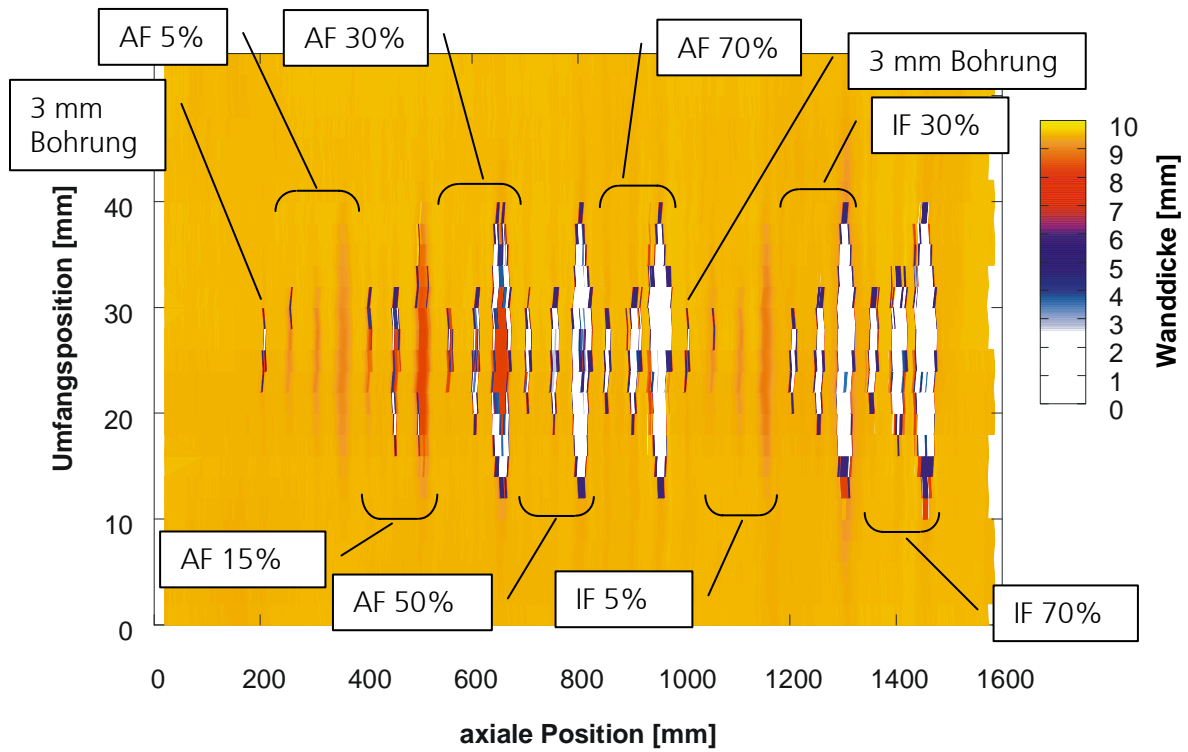


Abbildung 7.29 aus den Rückwandcholaufzeiten berechnete Wanddicken in C-Bilddarstellung

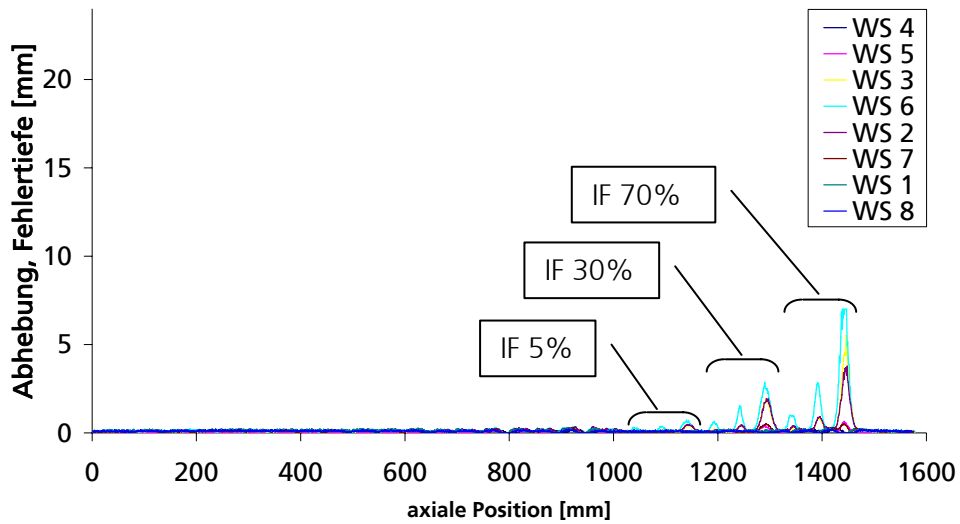


Abbildung 7.30 aus den Impulswirbelstrommessungen berechnete Innenfehlertiefe der 8 Kanäle des Sensorarrays

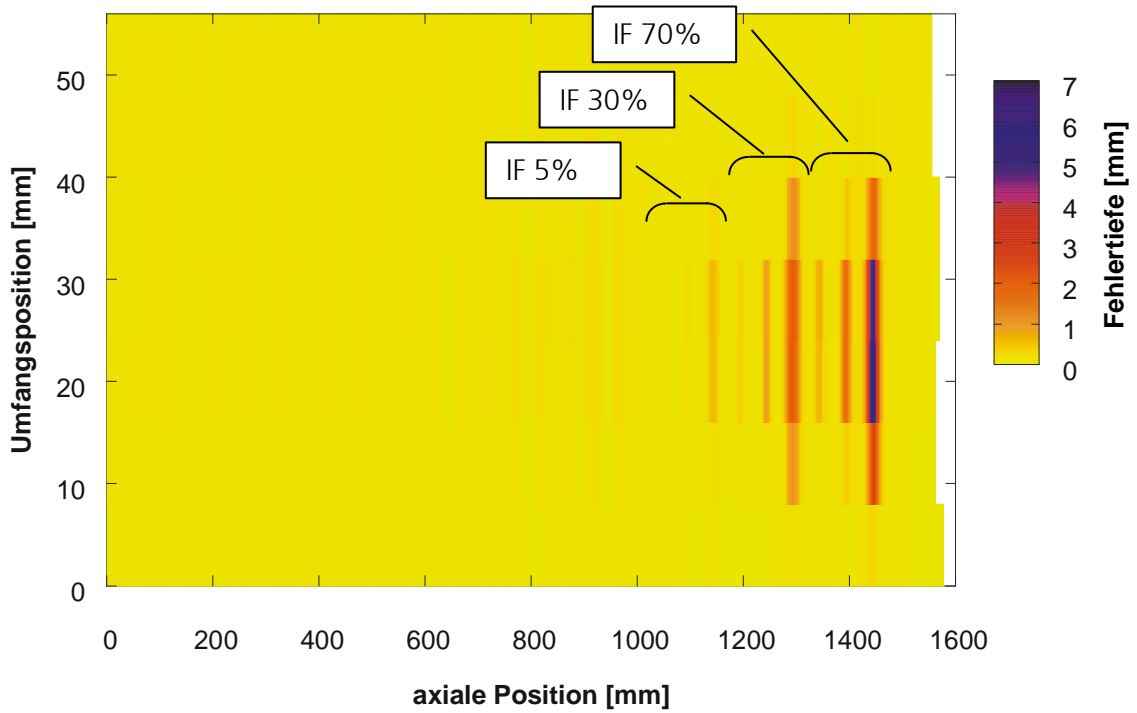


Abbildung 7.31 aus den Impulswirbelstrommessungen berechnete Innenfehlertiefe in C-Bildarstellung

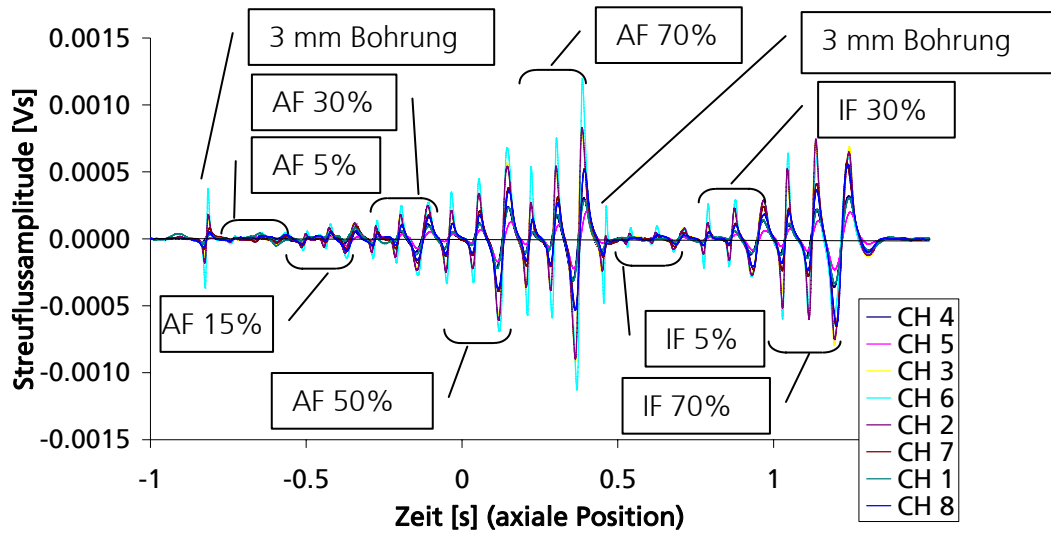


Abbildung 7.32 Streuflussamplitude der 8 Kanäle des Sensorarrays, sie ergibt sich aus der Integration der Induktionsspannung.

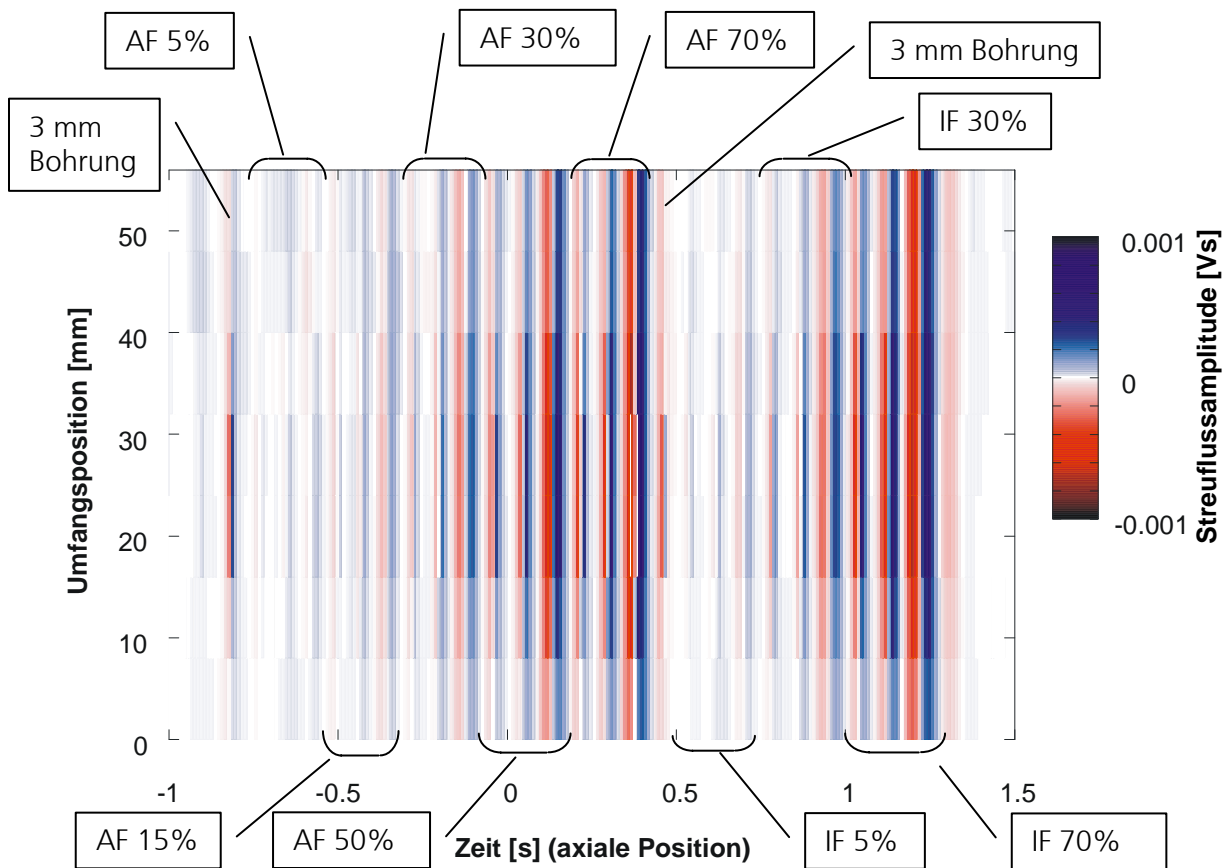


Abbildung 7.33 Streuflussamplitude in C-Bild Darstellung

7.3 Zusammenfassung der Messergebnisse

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und optimierte Kombinationssensor ist in der Lage, die Wanddicke beziehungsweise eine Wanddickenreduzierung mit drei verschiedenen Verfahren zu detektieren. Dabei hat jedes Einzelverfahren seine Stärken und Schwächen.

Mit EMUS ist eine exakte Wanddickenbestimmung bei außenseitiger Wanddickenreduktion über eine Laufzeitmessung ohne eine vorher durchgeführte Kalibrierung möglich, wenn die lokale Schallgeschwindigkeit hinreichend genau bekannt ist. Beträgt die verbleibende Restwanddicke mindestens etwa 5 mm, reicht die Auswertung des ersten Rückwandechos aus. Wertet man neben dem ersten Rückwandecho auch die Folgeechos aus sind auch dünnere Wanddicken bestimmbar. Dabei ist aber sicher zu stellen, dass der Sensor an der Prüfobjektoberfläche aufliegt oder nur geringfügig abhebt. Bei geringen Fehlertiefen (bis etwa 0,5 mm) ist eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehlern nicht möglich.

Die Impulswirbelstrommessung ist grundsätzlich nur für Innenfehler sensitiv. Für flächenmäßig große Fehler im Vergleich zur Sensorapertur kann mit Hilfe einer einfachen Amplitudenkalibrierung die Fehlertiefe bestimmt werden. Bei kleineren Fehlern wird über die Apertur gemittelt und man erhält einen zu geringen Wert für die Fehlertiefe. Für tiefe Fehler geht das Wirbelstromsignal bei etwa 8 mm in die Sättigung, das heißt tiefere Innenfehler werden weiterhin detektiert, aber als Fehlertiefe wird ihnen immer die Sättigungstiefe zugewiesen. Wanddickenreduktionen auf der dem Sensor abgewandten, äußeren Rohroberfläche werden nicht detektiert, da die Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder in ferromagnetischen Werkstoffen sehr gering ist. Bei Prüffrequenzen von 2.5 MHz sind es unter 10 μm .

Mit dem Streuflussverfahren können bei ausreichender Relativgeschwindigkeit des Sensors gegenüber dem Prüfobjekt sowohl Innen- als auch Außenfehler sicher detektiert werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen innen und außen nur sehr eingeschränkt möglich. Eine Quantifizierung der Fehlertiefe ist nur nach einer aufwendigen Kalibrierung an einer Vielzahl von Testfehlern und unter Einbeziehung von Nachbarschaftskriterien möglich und wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

In Tabelle 7.4 werden die unterschiedlichen Techniken gegenübergestellt. Aufgrund der hohen Genauigkeit der Wanddickenbestimmung mit Ultraschall können die beiden zusätzlichen Verfahren quasi während des Messbetriebs nachkalibriert werden. Dadurch kann auch bei diesen Verfahren die Messgenauigkeit erhöht werden. Aber auch wenn mit EMUS keine Wanddickeninformation mehr erhalten werden kann, da ein Innenfehler vorliegt oder die Restwanddicke zu gering ist und das Rückwandecho von der Totzone verdeckt wird, liefert die Ultraschallmessung noch wichtige Informationen über die Fehlergröße (Länge und Breite). Von diesem Vorwissen kann die Impulswirbelstrom- aber auch die Streuflussmessung bei der quantitativen Auswertung stark profitieren, da bei beiden Verfahren die Messgrößen auch vom Fehlervolumen abhängig sind.

Fehlertyp und -tiefe d (Wanddickenreduktion)		Prüftechnik		
		EMUS	Impulswirbelstrom	Streufluss *
Innenfehler (IF)	$0 \text{ mm} < d < 0,5 \text{ mm}$	bemaßbar, keine IF/AF- Unterscheidung	bemaßbar, nach Kalibrierung	bemaßbar
	$0,5 \text{ mm} < d < 8 \text{ mm}$	indirekt detektierbar, kein Rückwandecho	bemaßbar, nach Kalibrierung	bemaßbar
	$8 \text{ mm} < d < \text{WD}$ (WD = Wanddicke)	indirekt detektierbar, kein Rückwandecho	detektierbar, Sättigung erreicht	bemaßbar
Außenfehler (AF)	$0 \text{ mm} < d < 0,5 \text{ mm}$	bemaßbar, keine IF/AF- Unterscheidung	nicht detektierbar	bemaßbar
	$0,5 \text{ mm} < d < (\text{WD}-5 \text{ mm})$	bemaßbar	nicht detektierbar	bemaßbar
	$(\text{WD}-5 \text{ mm}) < d < \text{WD}$	indirekt detektierbar, Rückwandecho von Totzone maskiert	nicht detektierbar	bemaßbar

Tabelle 7.4

Gegenüberstellung von EMUS, Impulswirbelstrom und Streufluss
„bemaßbar“: Länge, Breite und Tiefe des Fehlers sind quantitativ bestimmbar.
„detektierbar“: nur die Fehlerlänge und -breite können bestimmt werden.
***** Eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehler ist nicht oder nur eingeschränkt möglich. Eine Fehlerbemaßung ist im Rahmen der Genauigkeit bei Streuflussmessungen nach einer Kalibrierung und unter Einbeziehung von Nachbarschaftskriterien möglich.

8 Ausblick

8.1 Umsetzung in ein Pipeline-Prüfsystem

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sensorsystem eignet sich zur kombinierten Wanddickenmessung mit EMUS, Wirbelstrom und Streufluss. In Kooperation mit der Fa. NDT Systems & Services AG, Stutensee, wird zurzeit ein auf dieser Sensortechnik basierender Pipeline-Prüfmolch aufgebaut und erprobt.

Der Einsatz eines solchen Sensorsystems in einem Pipeline-Molch erfordert eine robuste Implementierung zum einen in Bezug auf die Randbedingungen in Gas-Pipelines, wie Umgebungsdruck und Gasatmosphäre, zum anderen aber auch eine ausreichende mechanische Standfestigkeit, um über lange Prüfdistanzen eine aussagekräftige Prüfung gewährleisten zu können. Zusätzlich müssen auch noch konstruktive Anforderungen, wie der geforderte Sensorabstand in Rohrumfangsrichtung, eine ausreichende Bewegungsfreiheit der einzelnen Sensoren beim Überfahren von Schweißnähten und beim Durchfahren von Rohrbögen und oval verformten Rohrstücken, bei der Umsetzung beachtet werden. Darüber hinaus wird sowohl für die Ansteuer- und Verarbeitungselektronik als auch für die mechanischen Komponenten ein kleinstmöglicher Bauraum gefordert.

Die Abbildung 8.1 zeigt ein Funktionsmodell einer Sensorkufe, wie sie im Prüfmolch eingesetzt wird. Damit die innen liegenden Sensorkomponenten sichtbar bleiben, wurde sie mit einem durchsichtigen Epoxydharz eingegossen. Um die geforderte Umfangsabdeckung erreichen zu können, wurden in einer Kufe zwei Kombinationssensoren axial hintereinander und in Umfangsrichtung leicht versetzt angeordnet. In der Kufenmitte wurde zusätzlich ein Hallsensor integriert, um die Feldstärke des horizontalen Magnetfeldes in axialer Richtung messen und überwachen zu können. Am vorderen und hinteren Ende der Kufe sind metallische Einsätze mit Anlaufschrägen angebracht, um der Sensorik ein beschädigungsfreies Überfahren von Schweißnähten und sonstigen Hindernissen zu ermöglichen. Zum Schutz des Spulensystems wurden zwei Arten von Verschleißschutz umgesetzt: eine Sensorabdeckung mit einer monolithischen Aluminiumoxid-Keramik oder in Epoxydharz eingebettete keramische Noppen aus Siliziumnitrid-Keramik. Beide Ausführungen befinden sich in der experimentellen Erprobung.

Jeweils 10 Sensorkufen werden mit einer Aufhängungseinheit zu einem Array zusammengefügt (Abbildung 8.2). Die benötigte horizontale Magnetisierung der Rohrwand erfolgt ähnlich wie bei klassischen Streuflussmolchen über Magnetjoche, so genannte Magnetbars. Sie bestehen aus einem ferromagnetischen Rückschluss, Permanentmagneten und Polschuhen für den magnetischen Nord- und Südpol, über die das magnetische Feld in das Prüfobjekt eingekoppelt wird. Sie sind in axialer Richtung orientiert. Zwischen den Polschuhen sind die Sensoren angebracht. Dabei ist für jedes Sensorarray mit 10 Kufen eine Magnetisierungseinheit vorgesehen. Die enormen Anzugskräfte der Magnetbars an die Rohrwand von mehreren Kilonewton werden von einem Fahrwerk abgefangen. Zusätzlich ist in direkter Nachbarschaft an das Magnetbar eine Vorortelektronik angebracht, um die Sensoren über möglichst kurze Kabelwege ansprechen und auslesen zu können. Die Kombination aus Magnetbar, Sensorenarray, Vorortelektronik und Fahrwerk wird als Magnetizer-Modul bezeichnet. Je nach zu prüfenden Rohrdurchmesser kann die Anzahl solcher über den Umfang verteilter Magnetizer-Module angepasst werden. In Abbildung 8.3 ist ein mit im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Kombinationssensorik ausgestatteter Pipeline-Prüfmolch bei der Felderprobung dargestellt.

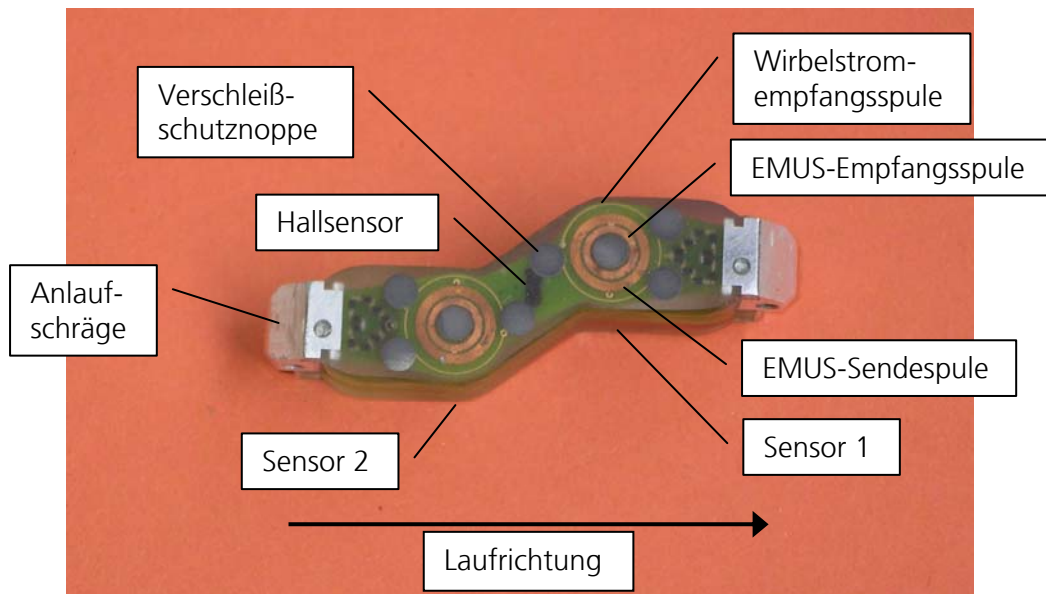


Abbildung 8.1 Funktionsmodell einer Sensorkufe für den Einsatz in einem Pipeline-Prüfmolch. Der Verschleißschutz besteht hier aus keramischen Noppen. In jeder Kufe sind zwei Kombinationssensoren mit einem leichten Spurversatz hintereinander untergebracht.



Abbildung 8.2 20-kanaliges Sensorarray: 10 Sensorkufen mit Verschleißschutz aus monolithischer Al₂O₃-Keramik bilden mit einer Aufhängungseinheit ein Array.

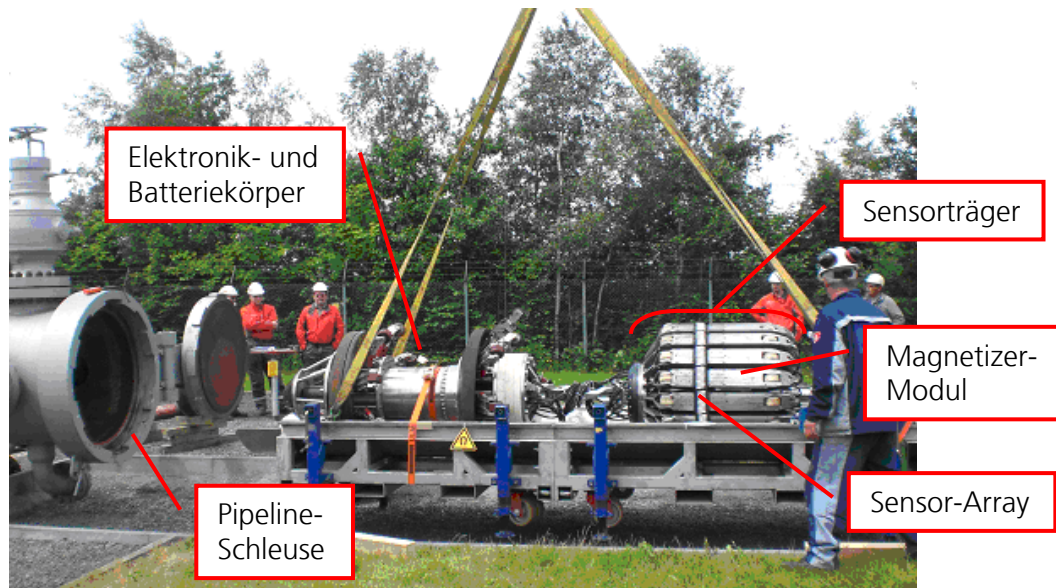


Abbildung 8.3 Ein mit Kombinationssensorik ausgestatteter Pipeline-Prüfmolch bei der Felderprobung: Einschleusen in eine Gas-Pipeline (Quelle: NDT Systems & Services AG, Stutensee)

Erste Ergebnisse aus den Feldversuchen werden in den folgenden Abbildungen gezeigt. Dazu wurde ein Prüfmolch durch ein Rohrstück gezogen, das mit Flachbodenbohrungen als künstliche Ersatzfehler versehen ist. Solche Untersuchungen an einem Testrohr zu Erprobungs- oder Kalibrierzwecken eines Prüfmolches werden auch als Zugversuche bezeichnet. Sie sind jedoch nicht zu verwechseln mit Zugversuchen, um mechanisch technologische Kenngrößen einer Werkstoffprobe zu ermitteln. Das hier benutzte Rohr hat einen Durchmesser von 40" (entspricht ~1000 mm), eine Länge von 6 m und eine nominelle Wanddicke von 16 mm. Es sind Testfehler mit unterschiedlichen Tiefen, Längen (axiale Richtung) und Breiten (Umfangsrichtung) in Form von Flachbodenausfräsungen sowohl von innen als auch von außen in die Rohrwand eingebracht worden. Eine Übersicht aller Testfehler ist im Kapitel Testkörper unter 11.2.2 *Testrohr für Zugversuche* (Tabelle 11.6 und Tabelle 11.7) zusammengestellt. Die Ergebnisse der verschiedenen Prüftechniken sind separat in C-Bilddarstellung wiedergegeben. In Umfangsrichtung werden die Daten von etwa zwei Magnetizer-Modulen aufgetragen. Das axiale Messintervall entspricht der Rohrlänge von 6 m. In dieser Richtung wird mit einem Messraster von 3 mm gearbeitet. Die Anzeigen der Testfehler sind in den Darstellungen von links nach rechts durchnummeriert, sodass eine Zuordnung stattfinden kann.

In Abbildung 8.4 werden die aus den Rückwandechoaufzeiten der Ultraschallmessung berechneten Wanddicken dargestellt. Die Position, die Ausdehnung und die Tiefe der Außenfehler werden im Rahmen der Auswertegenauigkeit richtig wiedergegeben. Für die Impulswirbelstrommessung sind die Ergebnisse von einem Rohrbereich mit Innenfehlern in Form der maximalen Empfangssignalamplitude in Abbildung 8.5 dargestellt. Eine Kalibrierung der Amplitudenwerte zu der Fehlertiefe wurde nicht durchgeführt. Auch hier lassen sich die Fehlerpositionen und -dimensionen gut ablesen. Die Fehlertiefe ist zumindest qualitativ bestimmbar und ohne Widerspruch zu den Werten in Tabelle 11.7. Aber auch hier gelten die bereits in Kapitel 7.3 genannten Einschränkungen für kleine Fehler. Da die Streuflussprüfung sowohl auf Innen- als auch auf Außenfehler anspricht, werden Ergebnisse beider Fehlerarten gezeigt (Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7). Dargestellt ist die verstärkte Induktionsspannung der Empfangsspulen. Alle Fehler werden erkannt und positionsrichtig wiedergegeben. Die flächige Ausdehnungen und die Tiefen können abgeschätzt werden, soweit das für eine Streuflussprüfung ohne Kalibrierung möglich ist.

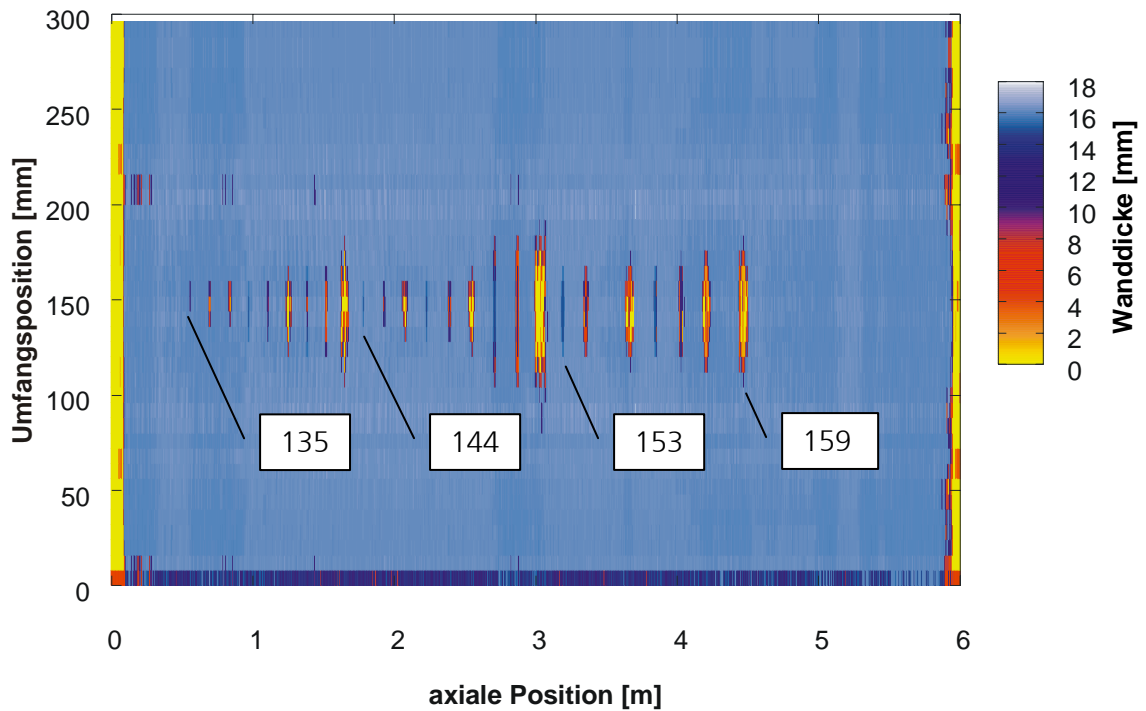


Abbildung 8.4 Die aus den Ultraschallrückwandechoaufzeiten berechnete Rohrwalldicke. Das C-Bild bildet einen Bereich des Testrohren mit Außenfehlern ab. (Datenquelle: NDT Systems & Services AG, Stutensee)

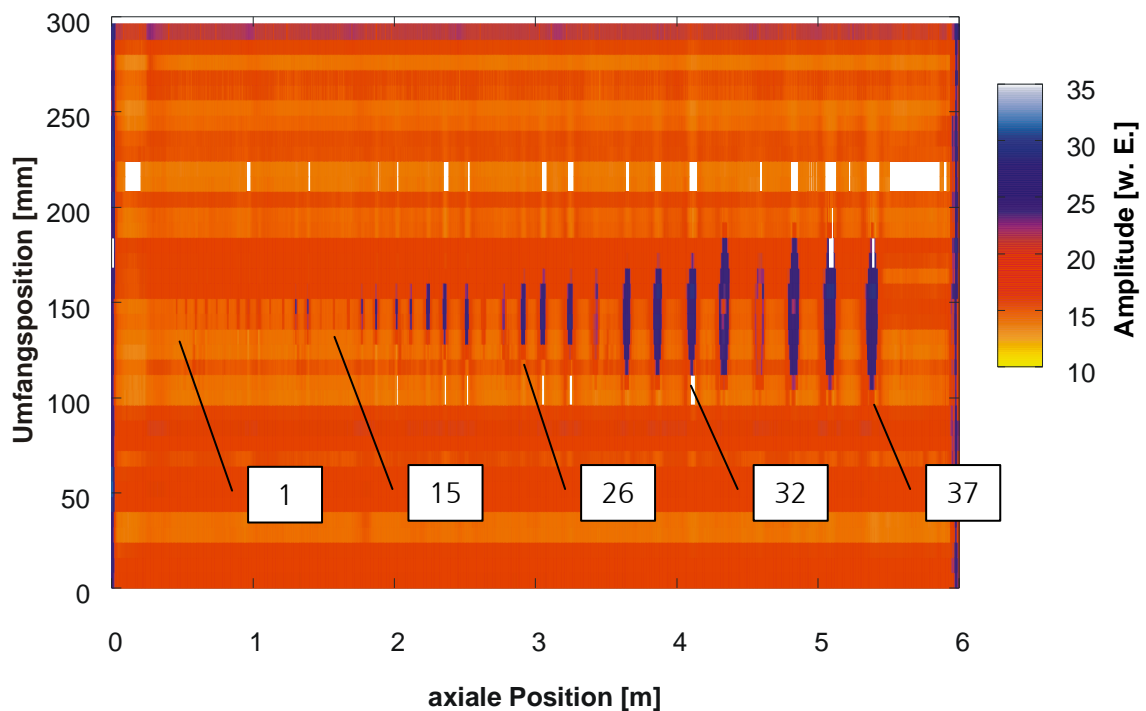


Abbildung 8.5 Impulswirbelstromempfangsamplitude bei unterschiedlich großen und tiefen Testfehlern auf der dem Sensor zugewandten Oberfläche in C-Bildarstellung. Eine Kalibrierung der Impulswirbelstromamplitude wurde nicht durchgeführt. (Datenquelle: NDT Systems & Services AG, Stutensee)

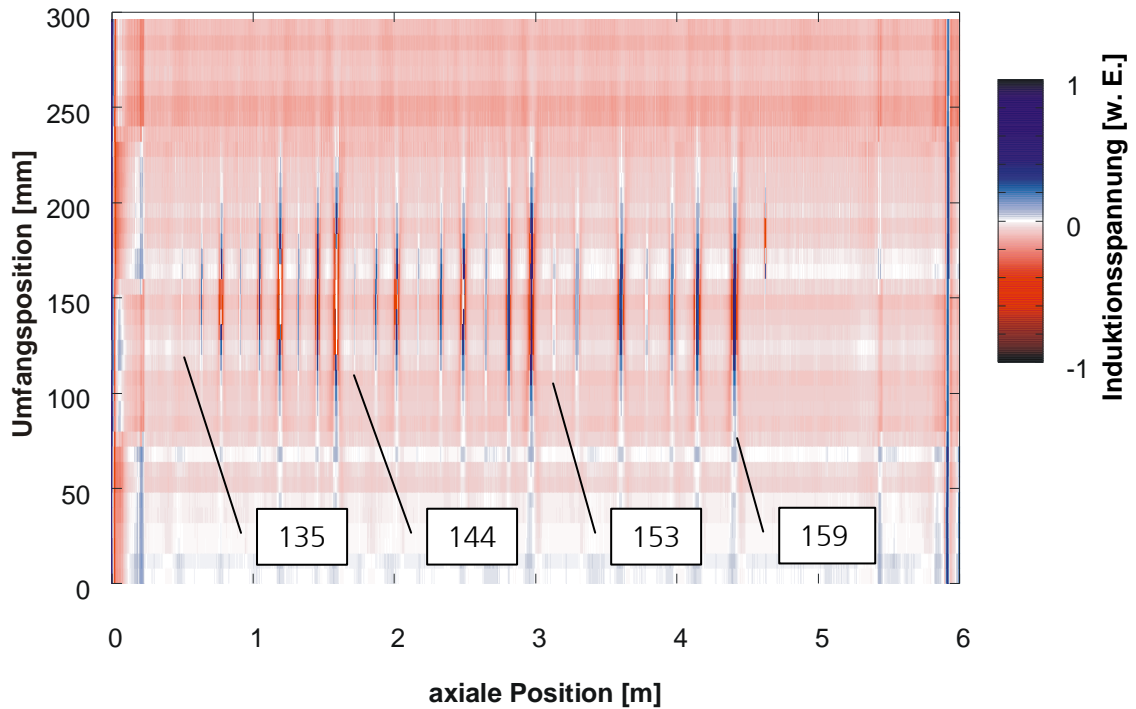


Abbildung 8.6 Die bei der Streuflussmessung erhaltenen Induktionsspannungen. Das C-Bild bildet einen Ausschnitt des Testrohres mit Außenfehlern ab. (Datenquelle: NDT Systems & Services AG, Stutensee)

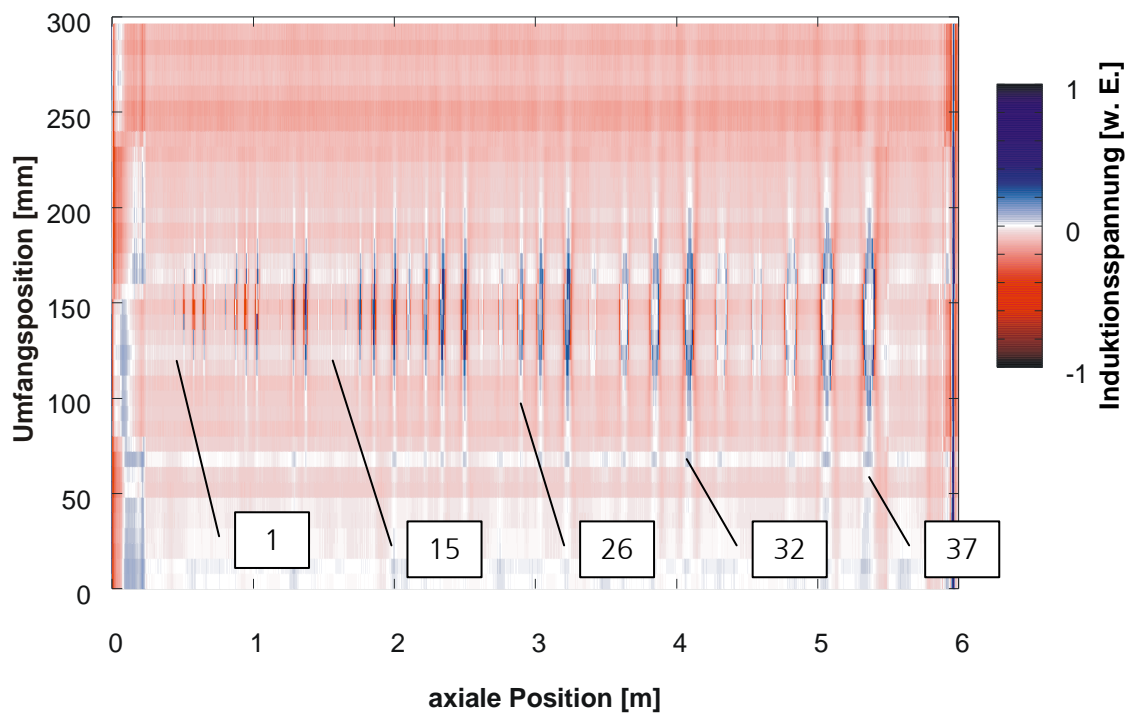


Abbildung 8.7 Die bei der Streuflussmessung erhaltenen Induktionsspannungen. Das C-Bild bildet einen Ausschnitt des Testrohres mit Innenfehlern ab. (Datenquelle: NDT Systems & Services AG, Stutensee)

Neben den Versuchen an Rohrstücken sind auch Molchläufe in Gasfernleitungen mit bekannten, nach dem Stand der Technik geprüften Zustand zur Erprobung und Qualifizierung geplant. Hierbei wird sich zeigen, wie standfest und robust die Sensorausführungen samt Aufhängungen über mehrere hundert Kilometer sind und ob sich die Zuverlässigkeit der Kombinationssensorik bestätigt. Mit einem voll bestückten Molchsystem eingeschränkter Funktionalität wurde bereits an einer etwa 70 km langen 40" Gas-Pipeline die Streuflussprüfung und der entsprechende Signalpfad sowie das Verschleißverhalten der Sensoren mit sehr zufrieden stellendem Erfolg erprobt. Wirbelstrom- und Ultraschalldaten konnten dabei noch nicht aufgezeichnet werden. Dies ist aber für die nahe Zukunft vorgesehen.

Die ersten Messungen deuten darauf hin, dass auch die industrietaugliche Umsetzung der Sensorik in ein Molchsystem die gleichen, belastbaren Ergebnisse liefert wie die Prototypen im Rahmen dieser Arbeit. Für quantitative Aussagen über die Fehlertiefe sind bei der Streufluss- und der Wirbelstromprüfung aber noch Aufgaben im Bereich der Kalibrierung zu erledigen. Zusätzlich müssen vergleichende Messungen durchgeführt werden, um das Verhalten an realen Fehlern zu ermitteln und um die Überlegenheit/ Verbesserung gegenüber konventionellen (separaten) Prüftechniken nach dem Stand der Technik analysieren zu können.

Aber auch Fragen, die bei einer gemeinsamen Auswertung der drei Verfahren auftreten, insbesondere wenn sie unterschiedliche Prüfaussagen liefern, müssen noch beantwortet werden. Angefangen bei einem augenscheinlich einfachen Problem: Wie geht man beispielsweise bei der simultanen Darstellung der Ergebnisse, die aufgrund der verschiedenen Prüftechniken auch unterschiedlich zuverlässige Fehleraussagen machen, vor? Daneben gibt es aber auch substantielle Fragestellungen, etwa wie man die Datenfusion der Ergebnisse gestaltet und wie damit der maximale Informationszugewinn erreicht wird. Oder wie eine nahezu ortstgetreue Kalibrierung der indirekten Verfahren Streufluss und Wirbelstrom mit Ultraschall bei einer Vielzahl von Stützstellen umgesetzt werden kann.

8.2 Rissprüfung

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sensor eignet sich zur kombinierten Wanddickenmessung mit EMUS, Wirbelstrom und Streufluss. Wie bereits in Kapitel 2.2 *Fehlerarten* beschrieben gehören neben Korrosion auch Risse zu den kritischen Fehlerarten in Pipelines. Zur Detektion von Rissen können neben geführten Ultraschallwellen [KRÖ2003] auch schräg eingeschallte Volumenwellen genutzt werden. Unter einem Winkel eingeschallte Ultraschallwellen werden auch bei den klassischen Ultraschallrissprüfmolchen eingesetzt. Die Ultraschallwandlung erfolgt dabei mit piezoelektrischen Prüfköpfen. Für die akustische Ankopplung an die Rohrwand ist jedoch ein Koppelmittel notwendig, das den Einsatz in Gasleitungen erschwert und zum Teil verbietet. Deshalb wäre es auch für die Rissprüfung wünschenswert, ein koppelmittelfreies Prüfsystem zur Verfügung zu haben.

Neben der Senkrechteinschallung lässt sich im horizontalen Magnetfeld mit einer hochkant angeordneten Kastenspule auch eine Schrägeinschallung realisieren, mit der eine Rissprüfung durchgeführt werden kann (Abbildung 8.8). Dabei werden SV-Wellen je nach Spulengeometrie etwa unter 45° in beide Richtungen zur Oberflächennormalen abgestrahlt. Erste Untersuchungen zur Detektion rissartiger Fehler wurden durchgeführt. Die Abbildung 8.10 zeigt ein Ultraschall-B-Bild entlang einer Rohrlängsschweißnaht. In direkter Nachbarschaft zur Naht wurde auf der Außenseite ein Testfehler in Form eines Sägeschnitts eingebracht (Abbildung 8.9). Neben einer deutlichen Anzeige des Testfehlers sind zusätzlich auch die Rückwandechosignale zu erkennen, sodass eine gleichzeitige Rissprüfung und Wanddickenmessung möglich sein kann.

Aber diese ersten Stichversuche haben auch gezeigt, dass sich eine Sensorabhebung bei der Schrägeinschallung deutlich stärker bemerkbar macht als bei der Senkrechteinschallung. Die schräg eingeschallten Ultraschallsignale werden um etwa 14 dB/mm Abhebung stärker gedämpft als der senkrechte Anteil (Abbildung 8.11). Da bei der Bewegung durch Rohrleitungen bzw. entlang der Prüfobjektoberfläche immer mit mehr oder weniger starken

Abhebeschwankungen gerechnet werden muss, ist dieser Ansatz nicht direkt für den Praxiseinsatz übertragbar. Verbesserungen sind absolut erforderlich. In den weiterführenden Arbeiten muss geklärt werden, welches Optimierungspotential im Spulensystem steckt. Es erscheint durchaus möglich, dass die Abhebeproblematik direkt oder durch eine deutliche Erhöhung der Grundsignalstärke überwunden werden kann. Dazu können Variationen am Spulensystem selbst und/ oder an der Anordnung des Spulensystems in Bezug auf die Magnetisierungseinrichtung und dem Prüfobjekt als erste Optimierungsansätze geeignet sein.

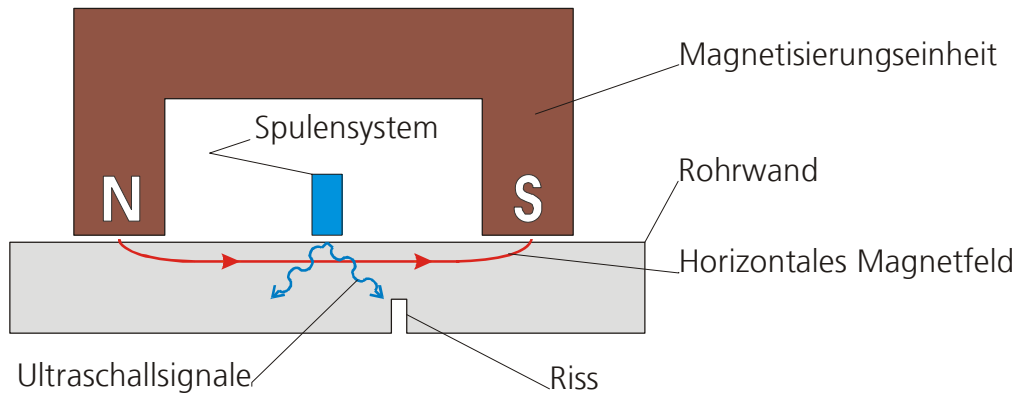


Abbildung 8.8 schematische Anordnung bei der Rissprüfung

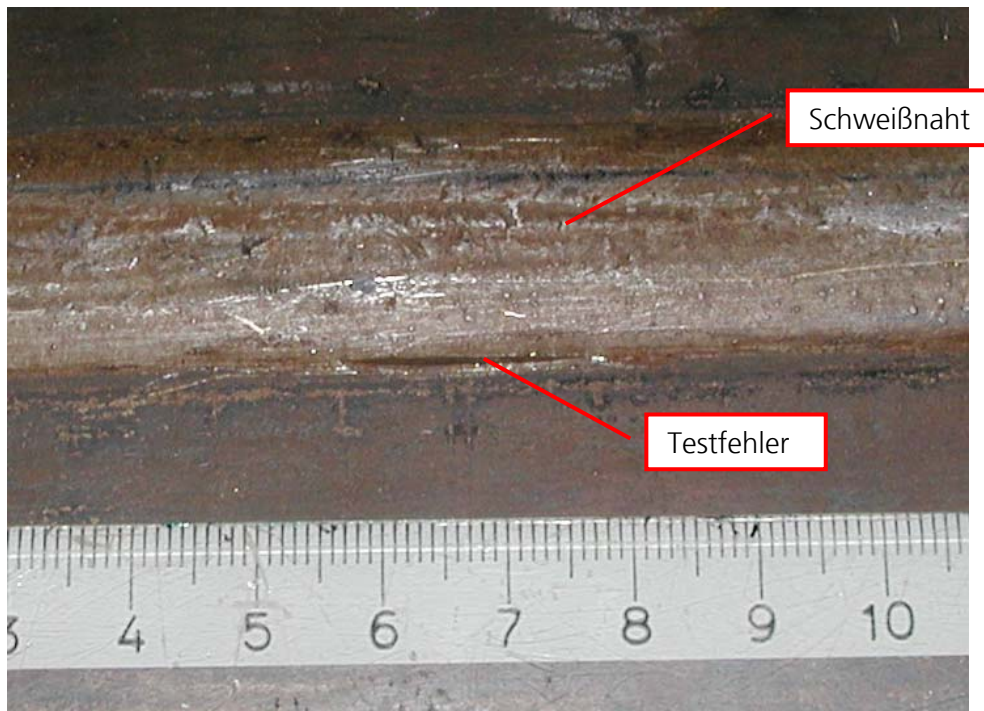


Abbildung 8.9 Rohrsegment mit Testfehler (Sägeschnitt, 16 x 1,5 mm²) an der Längsschweißnaht

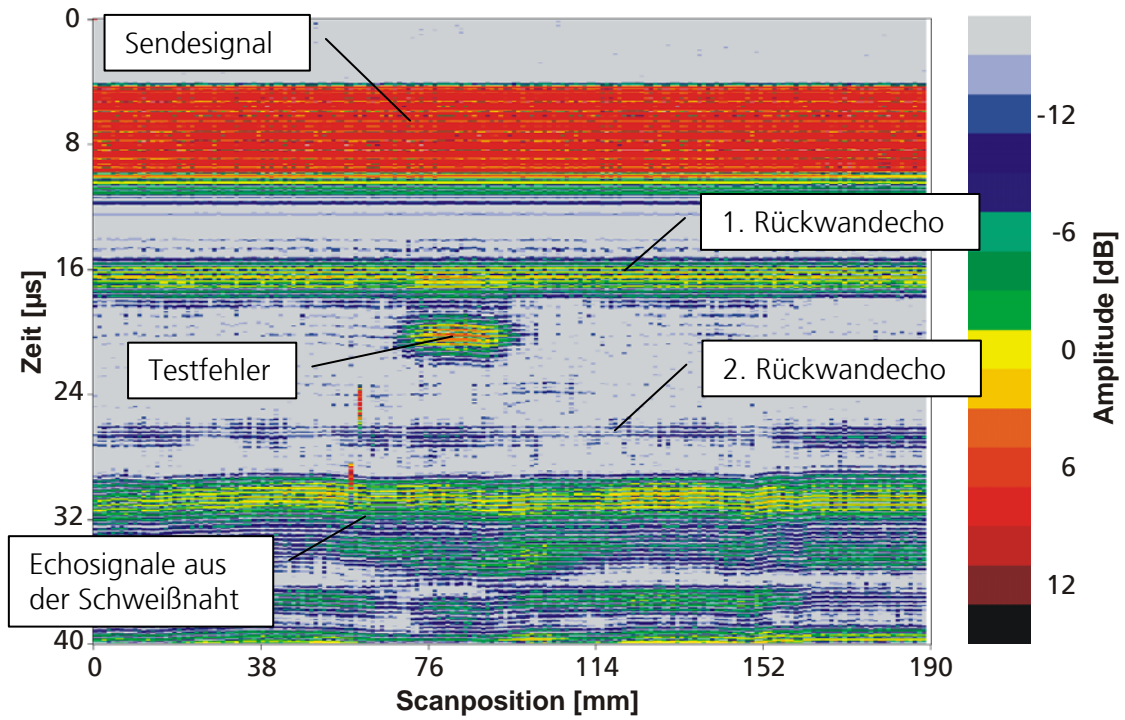


Abbildung 8.10 Ultraschall-B-Bild: Die Messfahrt erfolgte parallel zur Längsschweißnaht.

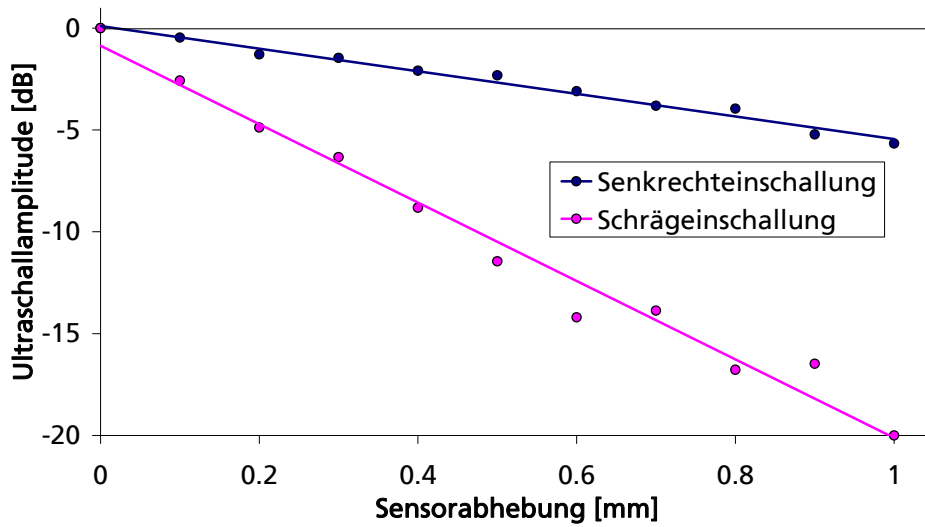


Abbildung 8.11 Ultraschallechoamplitude gegen Sensorabhebung für Senkrecht- und Schrägeinschallung

9 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein kombinierter EMUS-Wanddickensensor entwickelt und optimiert, der sich neben der Ultraschallprüfung zusätzlich auch für die Wirbelstrom- und Streuflussprüfung einer Komponente eignet. Als Entwicklungsansatz wurde die magnetostriktive Ultraschallwandlung in einem horizontal zur Prüfobjektoberfläche ausgerichteten Magnetfeld gewählt, da durch diese Art der Magnetisierung das empfindliche Spulensystem von der Magnetisierungseinheit mechanisch entkoppelt werden kann. Damit erreicht man, dass die Krafteinwirkungen während einer dynamischen Prüfung auf das Sensorsystem gegenüber früheren Ansätzen minimiert werden. Der Verschleiß an der Sensoreinheit reduziert sich und die Standzeiten erhöhen sich, was insgesamt der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu Gute kommt.

Der EMUS-Sensor ist in der Lage, linear polarisierte Transversalwellen anzuregen und zu empfangen, die sich senkrecht zur Prüfobjektoberfläche ausbreiten. Die Polarisationsrichtung der Scherwellen wird dabei durch die Ausrichtung der horizontalen Magnetisierung vorgegeben. Die Stärke des horizontalen Magnetfeldes kann stark durch die lokale Wanddicke des Prüfobjektes beeinflusst werden und bestimmt den Arbeitspunkt der magnetostriktiven Ultraschallwandlung. Deshalb wurde ein Feldstärkenbereich ermittelt, der es erlaubt, sowohl in fehlerfreien als auch in Wanddicke reduzierten Bereichen mit stark erhöhter Feldstärke sicher eine Ultraschallprüfung durchzuführen.

Ferner wurde das Schallfeld und die Modenreinheit der Ultraschallsignale für die Messung der Wanddicke von Blechen oder Rohrwandungen optimiert. Dabei wurde der Fokus auf die Bestimmung der Restwanddicke bei korrosionsbedingtem Wandabtrag gelegt. Um auch dünne Wanddicken erfassen zu können, wurde die Totzone des EMUS-Sensors minimiert. Dazu kommt eine angepasste elektronische Dämpferschaltung im Empfangskreis zum Einsatz.

Ist eine Wanddickenreduktion auf der dem Sensor zugewandten Seite, ist es nicht möglich, die verbleibende Wanddicke zu bestimmen, da die Abhebung des EMUS-Sensors, verursacht durch die Wanddickenreduktion, zu einem kompletten Ausfall des Ultraschallsignals führen kann. Um die Messzuverlässigkeit für diesen Fall sicher zu stellen, wurde der EMUS-Wandler so ausgestaltet, dass er zusätzlich auch als Wirbelstrom- und Streuflusssensor genutzt werden kann.

Mit der integrierten Wirbelstromprüfung, die das EMUS-Anregungssignal als Impulswirbelstromanregung nutzt, kann die Sensorabhebung bzw. eine mögliche Wanddickenreduktion an der dem Sensor zugewandten Oberfläche, zum Beispiel durch Innenkorrosion hervorgerufen, detektiert werden und zwar zeitgleich zur Ultraschallmessung. Die Auswertung der Wirbelstromempfangssignale orientiert sich an der klassischen Wirbelstromprüfung. Wobei für eine Abhebungsmessung eine Einfrequenzauswertung mit anschließendem Amplitudevergleich ausreichend ist.

Parallel dazu nutzt man bei der integrierten Streuflussprüfung die horizontale Magnetisierung und die EMUS-Empfangsspule als Streufeldsensor. Wird der Sensor über ein Prüfobjekt bewegt, induzieren die Normalkomponenten des Streufeldes, die an Bereichen mit Wanddickenänderungen auftreten, in der Spule eine Spannung. Die Induktionsspannung kann von der Messeinrichtung aufgenommen werden. Da der Streufeldanteil sehr niederfrequent gegenüber dem Wirbelstrom- und Ultraschallanteil ist, können die Signalanteile durch geeignete Bandfilter voneinander getrennt, separat verarbeitet und ausgewertet werden.

Durch die Kombination erhält man einen Sensor, der über verschiedene Verfahren die Wanddicke einer Komponente und die Lage der Korrosionsstelle, auf der dem Sensor zugewandten oder abgewandten Seite, detektieren kann. Da alle Verfahren koppelmittelfrei und berührungsfrei arbeiten, ist eine Verunreinigung der Prüfobjektoberfläche ausgeschlossen. Dadurch wird besonders bei großen Objekten der prüftechnische Aufwand reduziert. Die Schwächen der Einzelverfahren können durch die Kombination überwunden werden. Wobei

wesentliche Hardwarekomponenten wie zum Beispiel die Magnetisierungseinheit für das horizontale Magnetfeld und das Spulensystem gleichzeitig mehrfach genutzt werden.

Aufgrund der hohen Genauigkeit der Wanddickenbestimmung mit Ultraschall können die beiden zusätzlichen Verfahren quasi während des Messbetriebs nachkalibriert werden und deren Messgenauigkeit erhöht werden. Selbst wenn mit EMUS lokal keine Wanddickeninformation mehr erhalten werden kann, da ein Innenfehler vorliegt oder das Rückwandecho in der Totzone liegt, liefert die Ultraschallmessung noch wichtige Informationen über die Fehlergröße (Länge und Breite). Bei der Auswertung sowohl der Impulswirbelstrom- als auch der Streuflussdaten werden mit diesem Vorwissen präzisere Aussagen über die Fehlertiefe gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Technik möglich.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen, dass der neue Sensor die Anforderungen für eine hoch auflösende In-line-Inspektion erreicht. Deshalb wurde ein Pipeline-Prüfmoich konzipiert und aufgebaut, der mit diesen Kombinationssensoren ausgestattet ist und alle Anforderungen für die kommerzielle Pipeline-Prüfung erfüllt. Das System befindet sich zurzeit in der Erprobung. Die ersten Messungen an mehreren Meter langen Pipeline-Rohren zeigen, dass auch die industrietaugliche Umsetzung der Sensorik die gleichen Ergebnisse liefert wie die Prototypen im Rahmen dieser Arbeit.

In Stichversuchen wurde gezeigt, dass nach dem gleichen Prinzip auch Ultraschallwandler für eine Rissprüfung möglich erscheinen. Ob dies machbar ist und/ oder ob sogar die Anregung schräg eingeschallter Volumenwellen in den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kombinationssensor zusätzlich integrierbar ist, müssen die weitergehenden zukünftigen Arbeiten auf diesem Gebiet zeigen.

Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung

10 Literatur

- ARG2003 Argent, C. (Ed.): MACAW'S Pipeline Defects: Manufacturing, Construction, Operation, Coating and CP, Defect Interaction
London: Yellow Pencil Marketing Co. Ltd., 2005. - ISBN 0-9544295-0-8
- BAR2006 Barbian O.-A.: private Mitteilung, 2006
- BER1964 Berlincourt, D. A.; Curran, D. R. and Jaffe, H.: Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers
in: Mason, W. (Hrsg.): Physical Acoustics. Volume I, Part A;
New York, London: Academic Press, 1964. (Physical Acoustics; I A).
S. 169-270
- BER1998 Bertotti, G.: Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers
San Diego: Academic Press, 1998. - ISBN 0-12-093270-9
- BER2007 Berniga, G.; Hohl, J.V.; Salzburger, H.-J.; Arnold, W.: Non-destructive testing of laser welds in tailored blanks using electromagnetic transducers
Nondestructive Testing and Evaluation, 22, 2007, S. 1-18
- BRÜ2003 Brüggemann, H.: Korrosionsprognosen zur Abschätzung des Korrosionsfortschritts an Rohrleitungen
in: Lenz, J. (Hrsg.): Rohrleitungen - eine unendliche Geschichte? Band 27, Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg
Essen: Vulkan Verlag, 2003. - ISBN 3-8027-5389-5
- BSI2005 British Standards Institution: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: British standard BS 7910:2005
London: BSI, British Standards Institution, 2005
- BTS2005 Bureau of Transportation Statistics: U.S. Oil and Gas Pipeline Mileage
(www.bts.gov/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_10.html), 2005
- COR1996 Cordell, J.; Vanzant, H.: All About Pigging: the design of pipelines and facilities for conventional and intelligent pigging and a guide to pig selection, operation and maintenance and to pipeline pigging services
Circencester, Glos.: On-Stream-Systems Ltd., 1996
- COS2003 Cosham, A.; Hopkins, P.: The Assessment of Corrosion in Pipelines: Guidance in the Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)
in: Andrew Palmer (Ed.): International Colloquium "Reliability of High Pressure Steel Pipelines"
Penspen Integrity, UK, 2003, S. 1-29
- COS2004 Cosham, A.; Hopkins, P.: An Overview of the Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)
in: Denys, R. (Ed.): Pipeline Technology Conference.
Scientific Surveys Ltd, UK, 2004, S.1487-1502
- COV2006 Covino, B. S.; Bullard, S. J.; Cramer, S. D.; Holcomb, G. R.; Ziomek-Moroz, M.; Kane, R. D.; Meidinger, B.: Detecting Internal Corrosion of Natural Gas Pipelines
in: Pipeline Pigging and Integrity Management Conference,
Clarion Technical Conferences, Houston, 2006, Vortrag Nr. 14
- CUL2009 Cullity, B.D.; Graham, C. D.: Introduction to Magnetic Materials : Second Edition
2nd ed. New York usw. : Wiley & Sons, 2009. - ISBN 978-0-471-47741-9

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- DEC1972 Dechant, K. E.: Stresstest an Rohrleitungen zur Erhöhung der Sicherheit und Lebensdauer
Technische Überwachung 13, März 1972
- DNV2006 DNV-RP-F101 Corroded Pipelines
DNV, Oslo, October 2006
- DOB1973 Dobbs, E. R.: Electromagnetic Generation of Ultrasonic Waves
in Mason, W. (Hrsg.), Thurston, R.N. (Hrsg.): Physical Acoustics. Volume X;
New York, London: Academic Press, 1973. (Physical Acoustics; X). - ISBN 0-12-477907-7, S. 127-191
- DOB2006 Dobmann, G.: Product Innovation in Non-Destructive Testing by the Fraunhofer Institute IZFP
in: Rork, A. (Ed.); Welding Technology Institute of Australia: Australasian Welding Journal: Official Journal of the Welding Technology Institute of Australia, 51, 2006, Second Quarter, S. 10-12
- EDW2006 Edwards, R. S.; Sophian, A.; Dixon, S.; Tian, G. Y.; Jian, X.: Dual EMAT and PEC Non-Contact-Probe: Applications to Defect Testing
NDT&E international 39, 2005, S. 45-52
- ERH1992 Erhard, A.; Thomas, H.-M.; Wüstenberg, H.: Plattierungsprüfung mittels Ultraschall-Gruppenstrahler und Impulswirbelstrom
In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): Innovative ZfP - eine Herausforderung für die gesamte Industrie. Teil 1. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1992, 279-286. (DGZfP-Berichtsbände 33).
- ERH1996 Erhard, A.; Thomas, H.-M.: Prüfung der Plattierung mit Impuls-Wirbelstrom- und Ultraschallverfahren
Materialprüfung 38, 1996, S. 474-478
- ESS2004 Essel, R.: Druck- und Durchsatzerhöhung am Beispiel einer Gasfernleitung
in: 6. Internationales Pipelinesymposium Pipelinetechnik, TÜV Rheinland, 2004
- GAE1969 Gaerttner, M. R.; Wallace, W. D. and Maxfield, B. W.: Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals
Phys. Rev. 184, 1969, S. 702-704
- GIG2001 Giguere, S.; Lepine, B. A.; Dubois, J. M. S.: Pulsed Eddy Current Technology: Characterizing Material Loss with Gap and Lift-Off Variations
Res. Nondestr. Eval. 13, 2001, S. 119-129
- HIR2003 Hirao, M. and Ogi, H.: EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements
Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. – ISBN 1-4020-7494-8
- HÖL1987 Höller, P.; Salzburger, H.-J.; Wilbrand, A.: Electromagnetic ultrasonic transducers and systems for in-service inspection of gas pipelines
IEE proceedings: Science, Measurement and Technology. 134, 1987, Nr. 3, S. 279-282
- HÜB1984 Hübschen, G., Repplinger, W., Salzburger, H.-J.: Ultraschallprüfung mit elektromagnetischen Wandlern
FhG-Berichte (1984), No. 1, S. 23-32: Abb., Lit. ISSN: 0342-1953

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- HÜB1986 Hübschen, G.: Senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Ultraschalltransversalwellen; Elektromagnetische Wandlung, Ausbreitung und Anwendungspotential in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Saarbrücken, 1986. (Saarbrücken, Universität, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 1986).
- HÜB1993 Hübschen, G.; Salzburger, H.-J.; Kröning, M.; EPRI NDE Center: Progress in UT of austenitic and dissimilar metal welds using Shear Horizontal Waves and Electromagnetic US (EMUS) probes
In: EPRI NDE Center: EPRI Pipe Inspection Workshop. Charlotte : EPRI NDE Center, 1993, Sess. 2.
- HUE1985 Hueschelrath, G.: A Combined Rotating EMAT Wall Thickness Measuring and Flux Leakage Defect Detection System for In-Line Tube Testing International Committee on Nondestructive Testing, Columbus, OH, USA 1985, S. 1830-1837
- IGA1998 Igarashi, B.; Alers, G. A.: Excitation of Bulk Shear Waves in Steel by Magnetostrictive Coupling
IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 1998, S. 893-896
- ILI1980 Il'in, V and Kharitonov, A. V.: Theory of the EMA Method of Detecting Rayleigh Waves for Ferromagnetic and Ferrimagnetic Materials
Sov. J. NDT, 16, 1980, S. 549-554
- IVE2005 Ives, B.; Beaubouef, B.: Operators planning current and future activity Pipeline and Gas Technology,
(www.pipelineandgastechnology.com/gcr2005.html), 2005
- JÄG1976 Jäger, P.: Zur Lebensdauerberechnung fehlerbehafteter Rohrfernleitungen unter Innendruck mit Hilfe dimensionsloser Kenngrößen
München, 1976. (München, Technische Universität, Dissertation, 1976)
- JAN1994 Jansen, H. J. M. et al.: Magnetization as a Key Parameter of Magnetic Flux Leakage Pigs for Pipeline Inspection
Insight, 36, 1994, S. 672-677
- KIT1976 Kitel, A.: Der Reißprüfmolch – ein Gerät zum Auffinden von Fehlern bei erdverlegten Rohrleitungen
3R International, 15. Jahrgang, Heft 2/3, 1976
- KRA1986 Krautkrämer, H.; Krautkrämer, J.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall (5.A.), 5., völlig überarb.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1986.
- KLE1982 Kleine Enzyklopädie Struktur der Materie
Leipzig: VEB Bibliographisches Institut, 1982
- KOC1990 Koch, R.: Entwicklung und Erprobung eines Moduls zur Ausnutzung der dynamischen Magnetostraktion als eine Messgröße zur Charakterisierung von Struktur- und Spannungszuständen im Rahmen des 3MA-Ansatzes
Technisch-Wissenschaftlicher Bericht Nr. 900129-TW, IZFP Saarbrücken, 1990
- KÖH1997 Köhler, B.; Hübschen, G.; Trommer, E.; Paul, M.; Maier, K.; Roos, E.; Julisch, P.; Schuler, X.: Studie zur Evaluierung des Potentials koppelmittelfreier Ultraschall-Techniken für die zerstörungsfreie Prüfung von Gas-Fernleitungen mit Hilfe von Prüfmolchen
Saarbrücken, Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, 1997
- KOP1993 Kopitzki, K.: Einführung in die Festkörperphysik
Stuttgart: B. G. Teubner, 1993

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- KRÖ2003 Kröning, M. (Hrsg.): Fraunhofer IZFP, Leistungen und Ergebnisse, Jahresbericht 2002
Saarbrücken: Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, 2003. S. 52-55
- KRÖ2004 Kröning, M.; Nikiforenko, G.; Boulavinov, A.: Vorrichtung und Verfahren zur Materialprüfung und/ oder Dickenmessung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufzuweisendes Prüfobjekt Deutsche Patentschrift DE 10 2004 053 584 B4, 2004
- MIX2005 Mix, P. E.: Introduction to Nondestructive Testing (Second Edition)
Chirchester: Wiley & Sons, 2005. - ISBN 978-0-471-42029-3
- NIE2006 Niese, F.; Yashan, A.; Willems, H.: Wall-Thickness Measurement Sensor for Pipeline Inspection using EMAT Technology in Combination with Pulsed Eddy Current and MFL
in: European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT): European Conference on Nondestructive Testing (9). DGZfP-Jahrestagung 2006. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung.
Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2006, Tu 3.1.5.
- NIE2007A Niese, F.; Willems, H and Barbian O.-A.: New Approaches for the Quantitative Wall Thickness Measurement in Gas Pipelines
in: 7. Internationales Pipelinesymposium Pipelinetechnik, TÜV Rheinland, 2007
- NIE2007B Niese, F.; Salzburger, H.-J.; Zenner, J.: Scannende Prüfung auf Außenkorrosion an Rohrleitungen mittels umlaufenden geführten Wellen
In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2007. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung : Zerstörungsfreie Materialprüfung. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2007, Vortrag 65. (DGZfP-Berichtsbände 104-CD).
- NIE2008 Niese, F.; Hübschen, G. und Salzburger, H.-J.: Das Potential senkrecht eingeschallter linear polarisierter Transversalwellen zur genauen Dickenmessung und Mikrostrukturbestimmung
in: DGZfP Arbeitskreis Saarbrücken, 3. April 2008
- OGI1997 Ogi, H.: Electromagnetic Acoustic Resonance and Noncontacting Materials Characterization
Osaka, 1997. (Osaka University, Graduate School of Engineering Science, Department of Systems and Human Science, Division of Mechanical Sciences, 1997).
- POR2006 Porter, P. C.: Inline Technology Ready to Handle New Pipeline Challenges
Pipeline and Gas Journal, October 2006, S. 50-53
- QUI1967 Quinn, J. J.: Electromagnetic Generation of Acoustic Waves and the Surface Impedance of Metals
Phys. Lett. 25A, 1967, S. 522-523
- REB2002 Reber, K.; Beller, M.; Uzelac, N.: How Do Defect Assessment Methods Influence the Choice and Construction Of In-Line Inspection Tools
Proceedings of IPC2002: International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002.
- REB2006 Reber, K.: private Mitteilung, 2006

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- ROS2007 Rosen: Magnetic Flux Leakage (MFL) and Ultrasonic Testing (UT) for optimal detection of metal loss and pipeline wall features
3R international Special-Edition 2/2007, S. 44-47
- SAL1983 Salzburger, H.-J.; Repplinger, W.: Automatic in-motion inspection of the treads of railway wheels by e.m.a. excited Rayleigh waves
in: Novak, Z. (Hrsg.): Ultrasonic International 1983: Conference Proceedings, Guildford: IPC Science and Technology Press (Ultrasonics International), 1983
- SAL1995 Salzburger, H. J.; Hübschen, G.; Kröning, M.; Pitkänen, J.: Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung der Prüfkopfhebung bei der zerstörungsfreien Untersuchung von metallischen Werkstoffen mit elektromagnetischen Ultraschallwandlern
Europäische Patentschrift EP 0 677 742 B1, 1995
- SAL1998 Salzburger, H.-J.: Long Range Detection of Corrosion by Guided Shear Horizontal (SH-) Waves
In: Comité Européen sur les Essais Non Destructifs (ECNDT): European Conference on Nondestructive Testing (7). Vol. 1 : Non-Destructive Testing for Safety, Reliability and Protection of Environment. Broendby, Denmark : 7th ECNDT, 1998, S. 751-758.
- SAL2002 Salzburger, H.-J.; Mohrbacher, H.: In-line Quality-Control of Laser Welds of Tailored Blanks by Couplant Free Ultrasonic Inspection – EMUS-LASUS
in: Kristensen, J.K. (Hrsg.): Advanced Progresses and Technologies in Welding and Allied Processes. Copenhagen: International Institute of Welding (iiw), 2002, E-III, S. 309-316
- SAL2005 Salzburger, H.-J.: Prozessintegrierte trockene Ultraschallprüfung der Laserschweißnähte von Tailored Blanks
in: Schweißen und Schneiden 2005. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), 2005, S. 265-269 (DVS-Berichte 237)
- SAL2009 Salzburger, H.-J.; Schuppmann, M.; Wang Li and Gao Xiaorong: In-motion ultrasonic testing of the treads of high-speed railway wheels using the inspection system AUROPA III
Insight, 51, 2009, S. 370-372
- SAW2000 Sawaragi, K.; Salzburger, H.-J.; Hübschen, G.; Enami, K.; Kirihigashi, A.; Tachibana, N.: Improvement of SH-Wave EMAT Phased Array Inspection by New Eight Segment Probes
Nuclear Engineering and Design. 198, 2000, S. 153-163.
- SKE2000 Skerra, B. (Hrsg.): Handbuch Molchtechnik
Essen: Vulkan-Verlag, 2000. - ISBN 3-8027-2178-0
- SOP2005 Sophian, A.; Edwards, R. S.; Tian, G. Y.; Dixon, S.: Dual-Probe Methodes Using Pulsed Eddy Currents and Electromagnetic Acoustic Transducers for NDT Inspection
Insight 47(6), 2005, S. 341-345
- STÖ1995 Stöcker, H. (Hrsg.): Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren
Frankfurt : Harri Deutsch, 1995. - ISBN 3-8171-1461-3
- SUH1983 Suhr, P. J.; Brooks, R. A.; Banach, T. R.: Magnetic and Ultrasonic object Testing Apparatus
United Kingdom Patent GB 2 120 789 B, 1983

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- SÜS2000 Süsser, H.; Birringer, R.; Hübschen, G.; Salzburger, H.-J.: LIMATEST - Erste Betriebserfahrungen mit einem neuen Püfssystem zum schnellen und flächendeckenden Nachweis von Korrosion an Lichtmasten und Rohrleitungen
In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2000 ZfP im Übergang zum 3. Jahrtausend Band 1. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2000, S. 405-418. (DGZfP-Berichtsbände 73.1).
- TAP2008 Tappert, S.; Allen, D. L.; Mann, A.: Inline Inspection for Cracks in Gas Pipelines – Enhancements Derived from 5 Years’ Operational Experience
in: Proceedings of the ASME International Pipeline Conference - 2008: presented at 2008 7th International Pipeline Conference, September 29 - October 3, 2008, Calgary, Alberta, Canada. / sponsored by ASME, IPTI, an ASME Institute
New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- THO1973 Thompson, R. B.: A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves
IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-20, 1973, S. 340-346
- THO1978A Thompson, R. B.: New configuration for the electromagnetic generation of SH waves in ferromagnetic materials
IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 1978, S. 374-378
- THO1978B Thompson, R. B.: A Model for the Electromagnetic Generation and Detection in Ferromagnetic Metal Polycrystals
IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-25, 1978, S. 7-15
- THO1979 Thompson, R. B.: Generation of horizontal polarized shear waves in ferromagnetic materials using magnetostrictive coupled meander-coil electromagnetic transducers
Appl. Phys. Lett. 34, 1979, S. 175-177
- THO1990 Thompson, R. B.: Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers
in: Pierce, A.D. (Hrsg.); Thurston, R.N. (Hrsg.): Physical Acoustics. Volume XIX: Ultrasonic measurements methods
Boston: Academic Press, 1990. (Physical Acoustics; XIX). - ISBN 0-12-477919-0, S. 157-200
- TIA2005 Tian, G. Y.; Sophian, A.: Defect Classification Using a New Feature for Pulsed Eddy Current Sensors; NDT&E international 38, 2005, S. 77-82
- TIR2003 Tiratsoo, J. (Editor): Pipeline Pigging & Integrity Technology; Beaconsfield: Scientific Surveys Ltd., 2003
- UDP2004 Udpa, S.S. (Technical Ed.); Moore, P.O. (Ed.); American Society for Nondestructive Testing INC. (ASNT): Electromagnetic Testing; 3rd ed. Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing (ASNT), 2004. (Nondestructive Testing Handbook; 5). - ISBN 1-57117-046-4. - ISBN 1-57117-116-9
- WIL1983 Wilbrand, A.: EMUS-Probes for Bulk Waves and Rayleigh Waves, Model for Sound Field and Efficiency Calculations
in: Höller, P. (Hrsg.): New procedures in nondestructive testing;
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1983. S. 71-80
- WIL1984 Wilbrand, A.: Wechselwirkungsmechanismen bei der elektromagnetischen Ultraschallwandlung
Materialprüfung 26 Nr.1/2, 1984, S. 7-11

- Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung
- WIL1987 Wilbrand, A.: Quantitative Modeling and Experimental Analysis of the Physical Properties of Electromagnetic-Ultrasonic Transducers
in: Chimenti, D.E. (Ed.); Thompson, D.O. (Hrsg.): Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 7A;
New York, London: Plenum Press, 1988. (Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation; 7A). - ISBN 0-306-42837-7, S. 671-680
- WIL1990 Wilbrand, A.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu einem quantitativen Modell für elektromagnetische Ultraschallprüfköpfe
Technisch-Wissenschaftlicher Bericht Nr. 900125-TW; Saarbrücken: Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, 1990
- WIL2009 Willems, H.; Niese, F.; Jaskolla, B. und Barbian, O.-A.: New Possibilities for Non-Destructive Testing of Pipelines with Intelligent Pigs
in: Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart: MPA-Seminar 35. Stuttgart: Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2009, S. 8.1-8.21. (MPA-Seminar 35).
- WIS2004A Wißkirchen, A.: Druckerhöhung von Gashochdruckleitungen der öffentlichen Versorgung
in: 6. Internationales Pipelinesymposium Pipelinetechnik, TÜV Rheinland, 2004
- WIS2004B Wißkirchen, A.: Druckerhöhung von Gashochdruckleitungen der öffentlichen Versorgung
3R international (43) 3/2004, S. 166-169
- YAS2005 Yashan, A.; Willems, H. und Niese, F.: Verfahren und System zur zerstörungsfreien Prüfung eines metallischen Werkstücks
Deutsche Patentanmeldung DE 10 2005 060 582 A1, 2005
- YAS2007 Yashan, A.; Willems, H. and Niese, F.: Method and System for Non-Destructively Testing a Metallic Workpiece
Internationale Patentanmeldung WO 2007/068327 A1, 2007
- YAS2008 Yashan, A.: Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren
Saarbrücken, 2008. (Saarbrücken, Universität, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Dissertation, 2008).

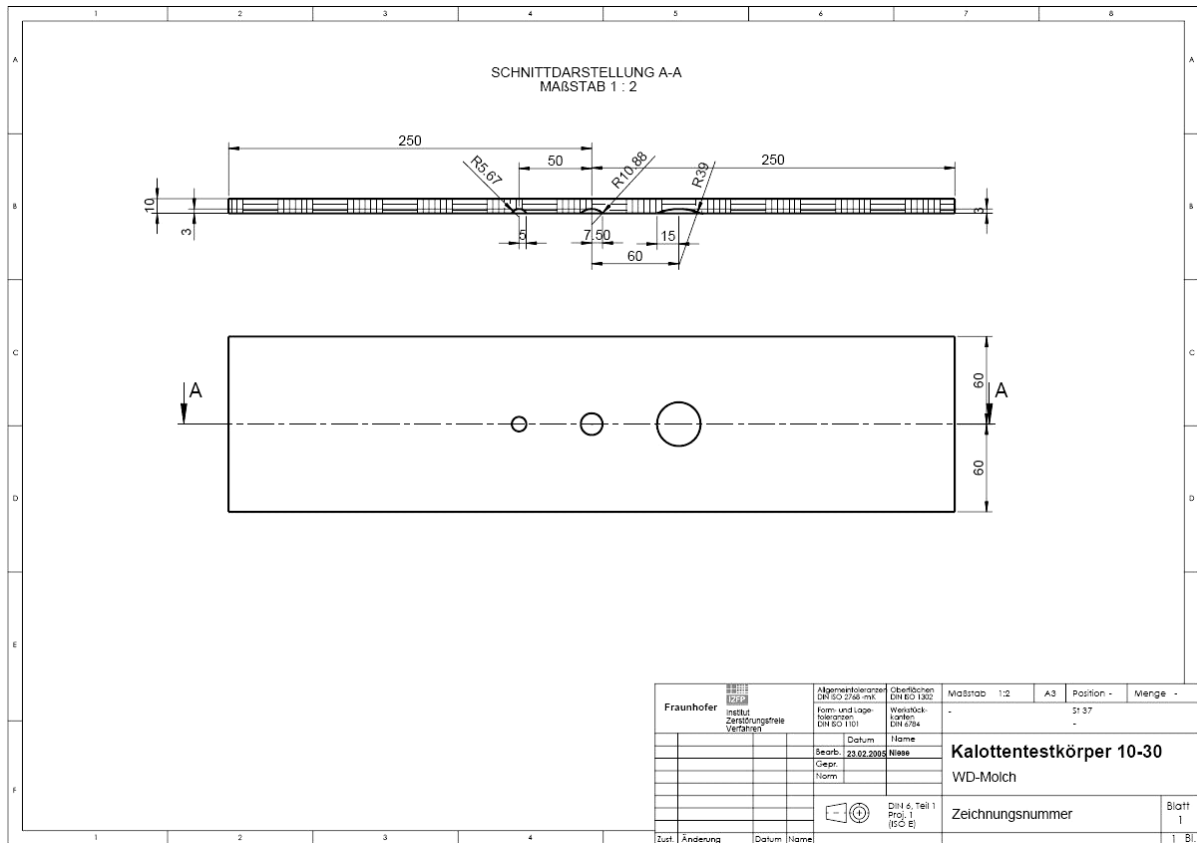


Abbildung 11.2 Testkörper TK 10-30% mit kalottenförmigen Testfehlern

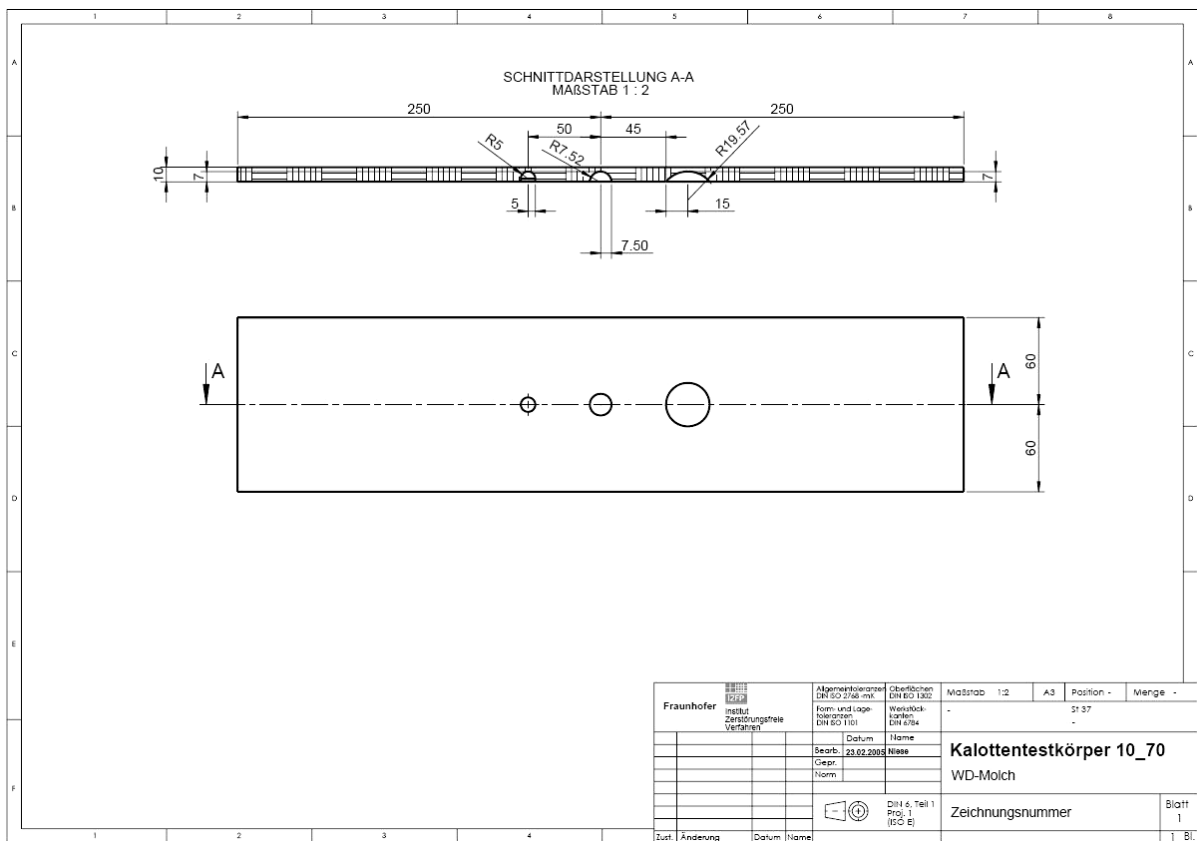


Abbildung 11.3 Testkörper TK 10-70% mit kalottenförmigen Testfehlern

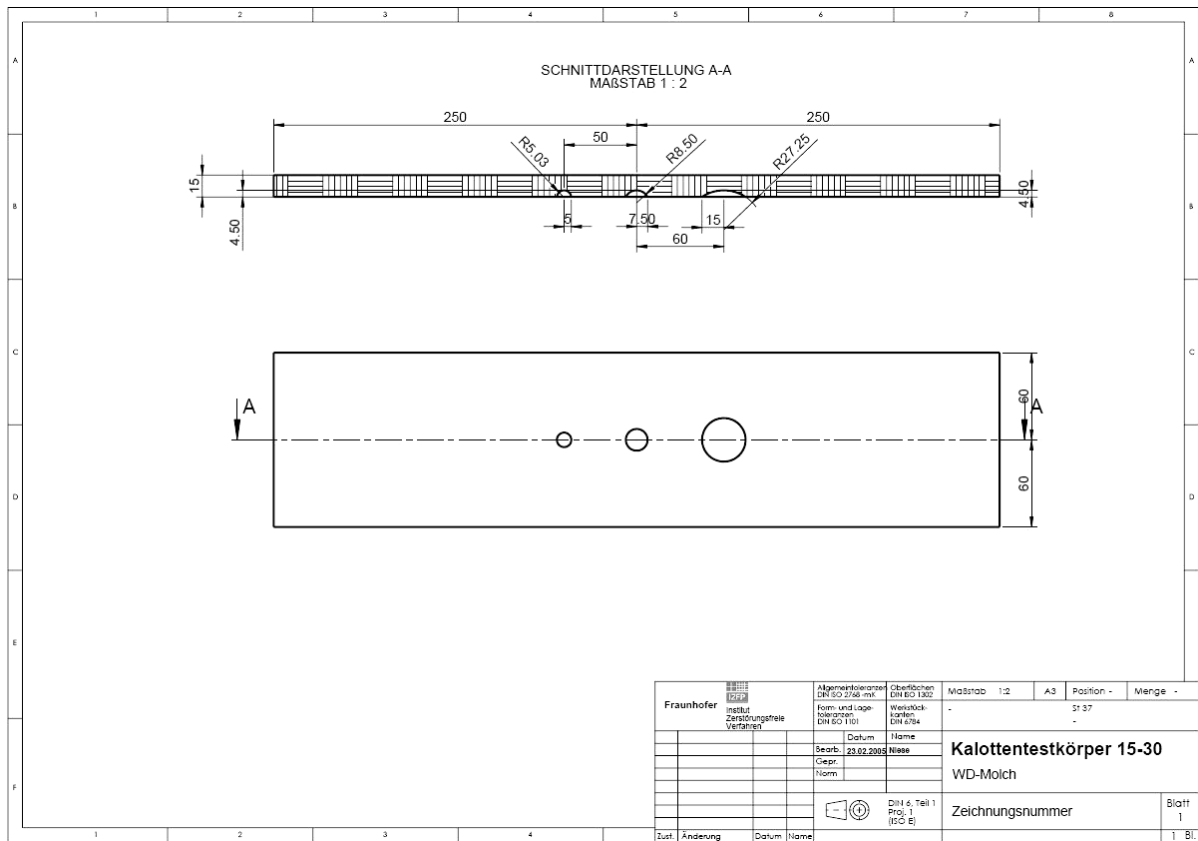


Abbildung 11.4 Testkörper TK 15-30% mit kalottenförmigen Testfehlern

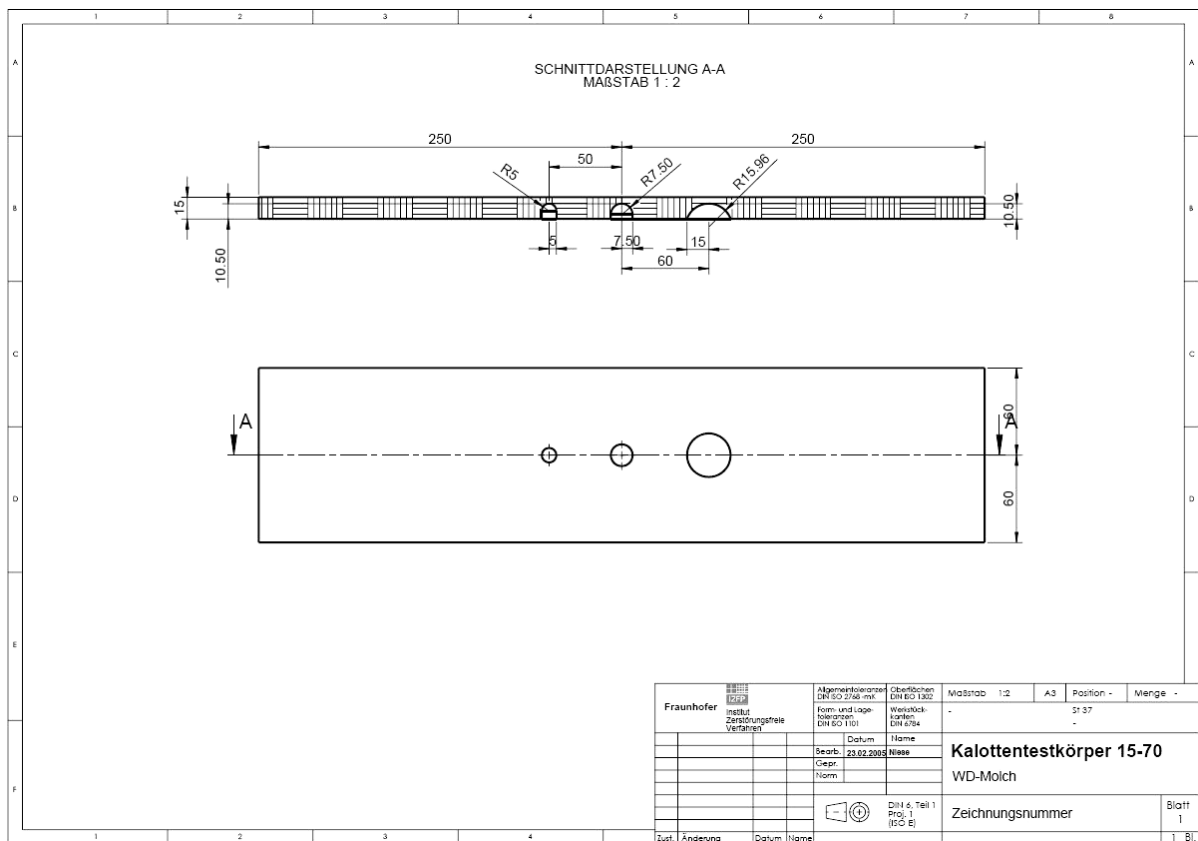


Abbildung 11.5 Testkörper TK 15-70% mit kalottenförmigen Testfehlern

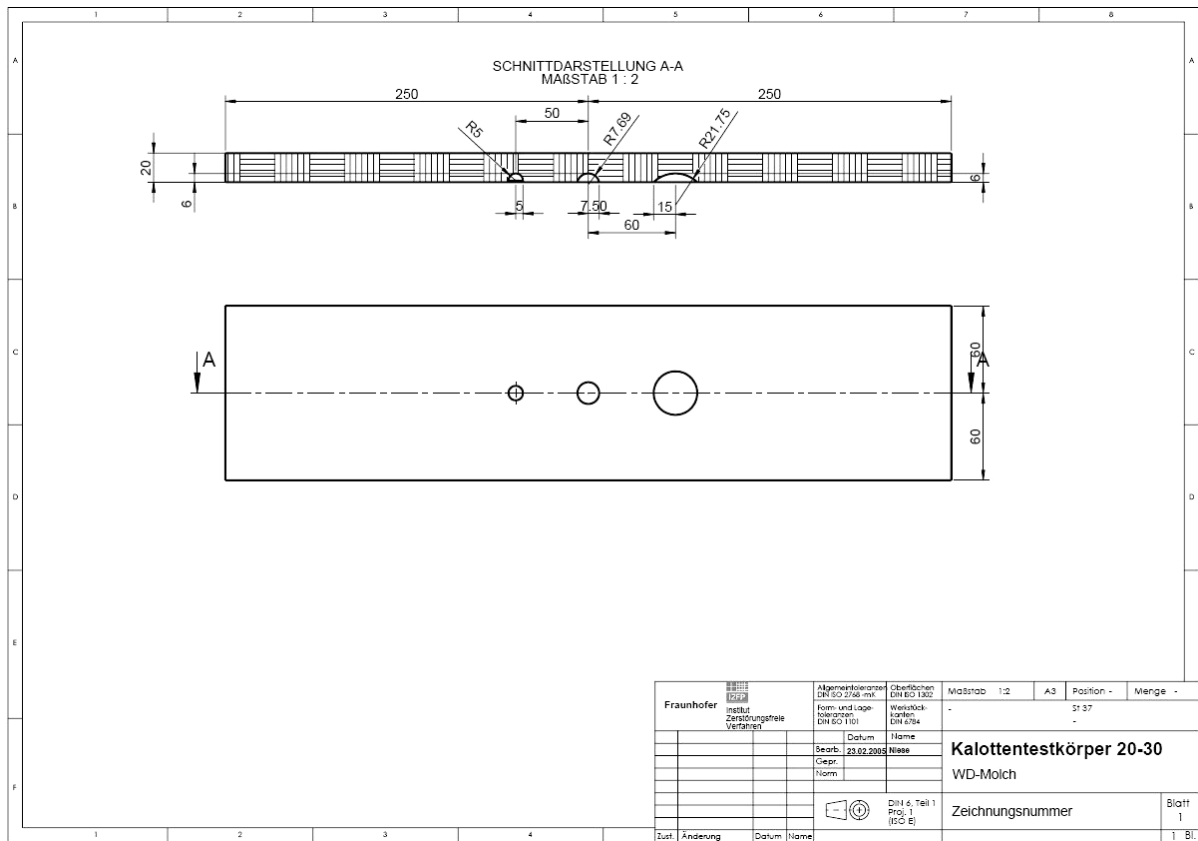


Abbildung 11.6 Testkörper TK 20-30% mit kalottenförmigen Testfehlern

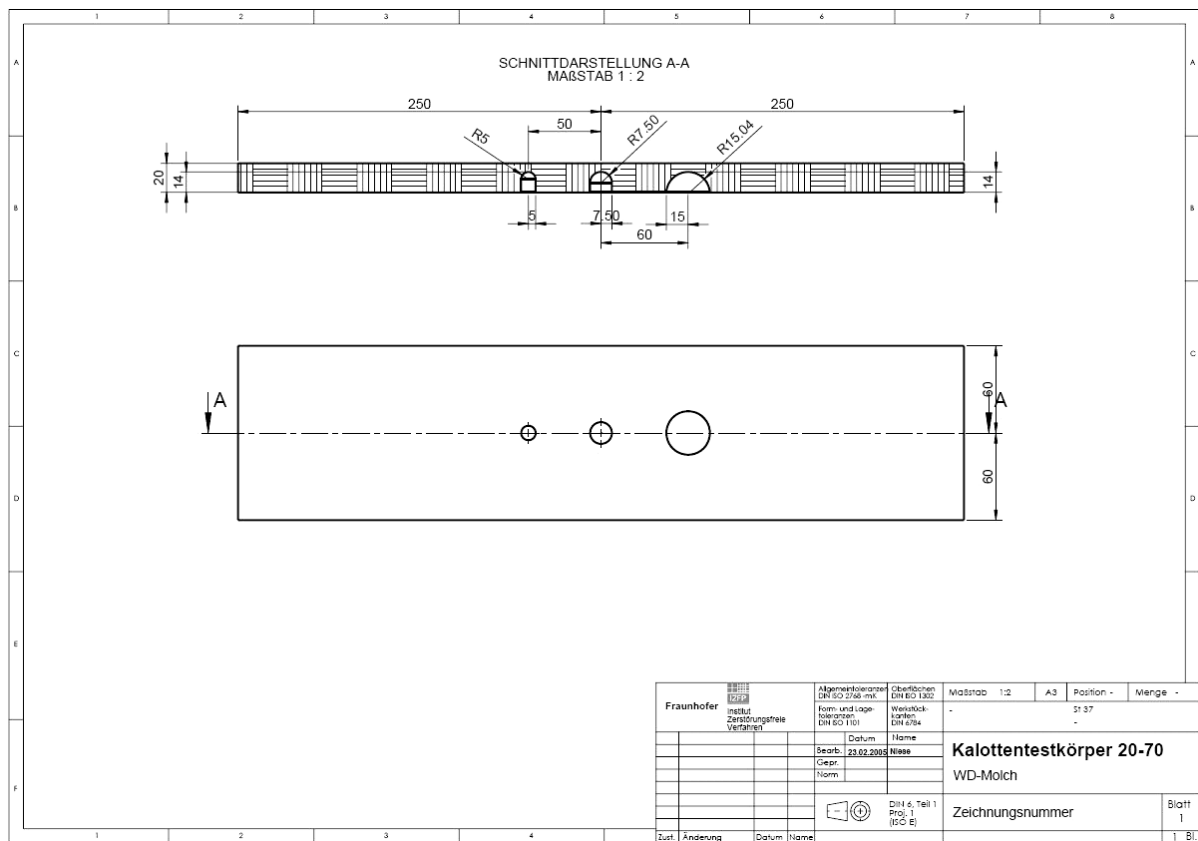


Abbildung 11.7 Testkörper TK 20-70% mit kalottenförmigen Testfehlern

11.2 Rohrförmige Testkörper

11.2.1 Rohrsegment mit kalottenförmigen Testfehlern

Wanddicke Grundmaterial	9,4 mm
Durchmesser	36", ~900 mm
Länge	4150 mm

Tabelle 11.2 Abmessungen des Rohrsegments

Fehlerdurchmesser an der Oberfläche	Fehlertiefe (Außenfehler)				
	5% 0,5 mm	15% 1,4 mm	30% 2,8 mm	50% 4,7 mm	70% 6,6 mm
10 mm	700 mm	850 mm	1000 mm	1150 mm	1300 mm
15 mm	750 mm	900 mm	1050 mm	1200 mm	1350 mm
30 mm	800 mm	950 mm	1100 mm	1250 mm	1400 mm

Tabelle 11.3 Position der Außentestfehler in axialer Richtung

Fehlerdurchmesser an der Oberfläche	Fehlertiefe (Innenfehler)		
	5% 0,5 mm	30% 2,8 mm	70% 6,6 mm
10 mm	1500 mm	1650 mm	1800 mm
15 mm	1550 mm	1700 mm	1850 mm
30 mm	1600 mm	1750 mm	1900 mm

Tabelle 11.4 Position der Innentestfehler in axialer Richtung



Abbildung 11.8 kalottenförmige Außentestfehler; Tiefe 5%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm



Abbildung 11.9 kalottenförmige Außentestfehler; Tiefe 15%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm

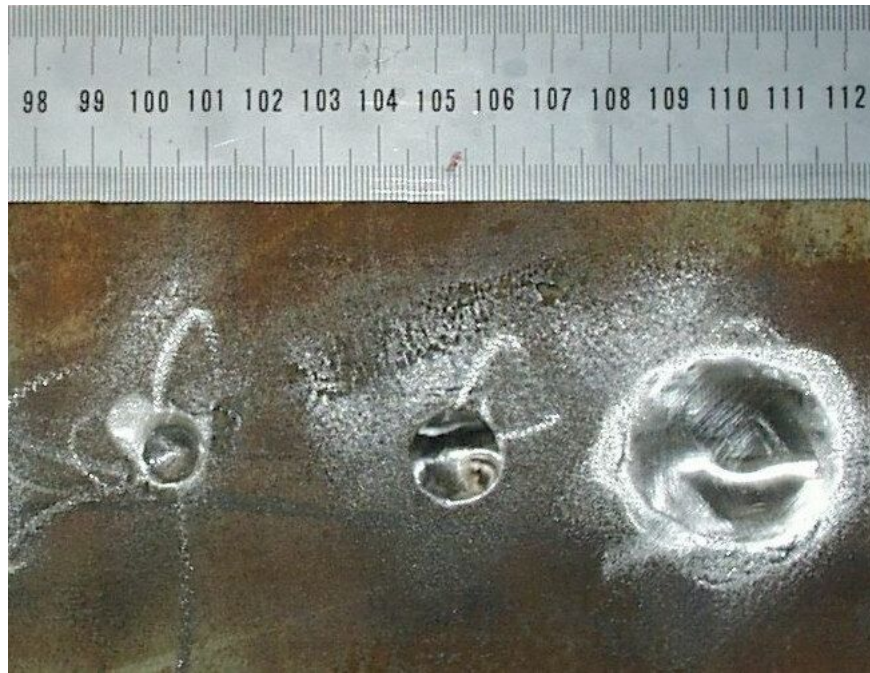


Abbildung 11.10 kalottenförmige Außentestfehler; Tiefe 30%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm

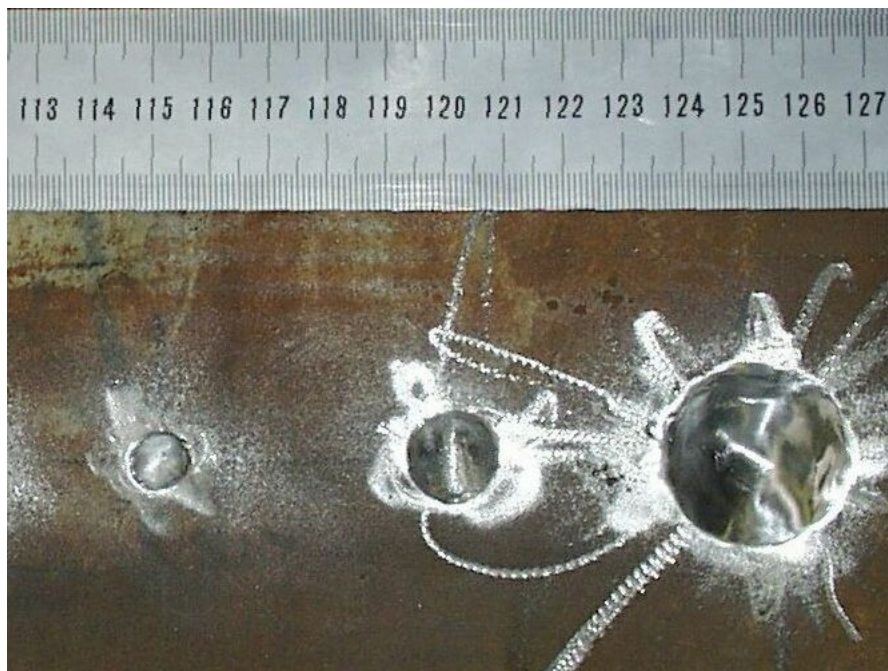


Abbildung 11.11 kalottenförmige Außentestfehler; Tiefe 50%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm



Abbildung 11.12 kalottenförmige Außentestfehler; Tiefe 70%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm



Abbildung 11.13 kalottenförmige Innentestfehler; Tiefe 5%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm

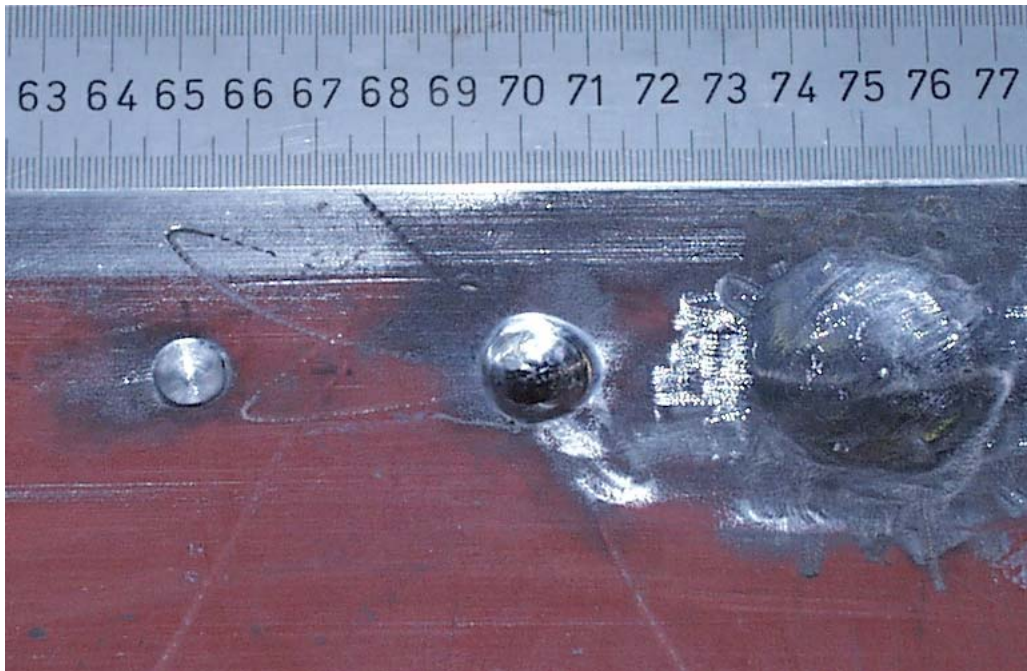


Abbildung 11.14 kalottenförmige Innentestfehler; Tiefe 30%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm

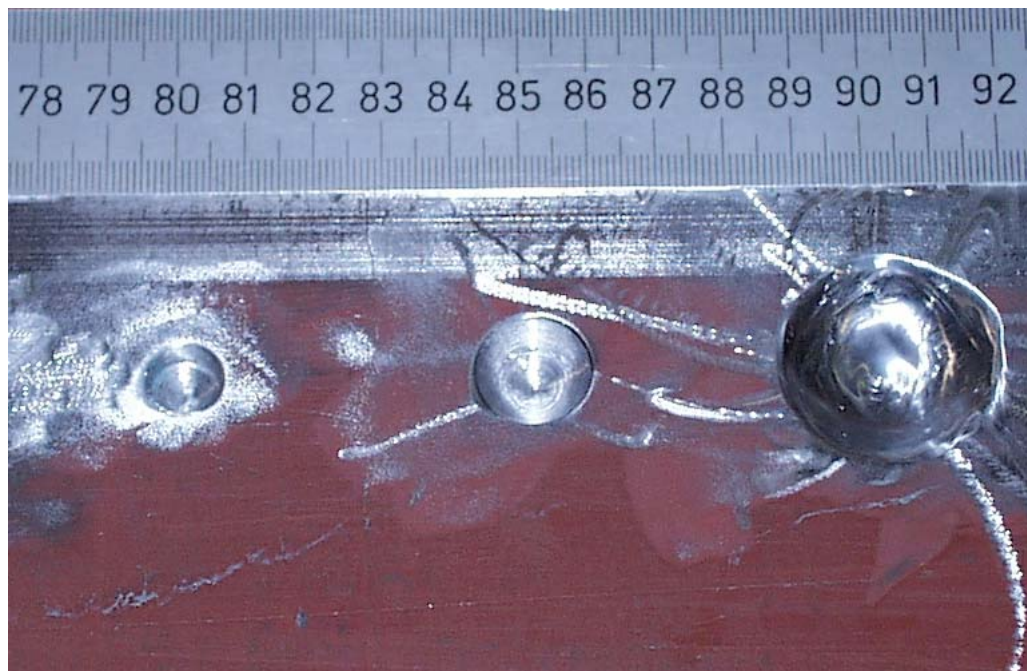


Abbildung 11.15 kalottenförmige Innentestfehler; Tiefe 70%, Durchmesser 10, 15 und 30 mm

11.2.2 Testrohr für Zugversuche

Wanddicke Grundmaterial	16 mm
Durchmesser	40", ~1000 mm
Länge	~6000 mm

Tabelle 11.5 Abmessungen des Rohrstücks

Nr.	axiale Position [mm]	Testfehlergröße			Nr.	axiale Position [mm]	Testfehlergröße		
		Länge [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]			Länge [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
135	550	10	20	1,6	148	2426	20	40	4,8
136	690	10	20	4,8	149	2586	20	40	11,2
137	830	10	20	11,2	150	2746	20	80	1,6
138	970	10	40	1,6	151	2906	20	80	4,8
139	1110	10	40	4,8	152	3066	20	80	11,2
140	1250	10	40	11,2	153	3226	30	50	1,6
141	1390	10	60	1,6	154	3386	30	50	4,8
142	1530	10	60	4,8	155	3700	30	50	11,2
143	1670	10	60	11,2	156	3880	30	60	1,6
144	1810	16	30	1,6	157	4060	30	60	4,8
145	1962	16	30	4,8	158	4240	30	60	8,0
146	2114	16	30	11,2	159	4500	30	60	11,2
147	2266	20	40	1,6					

Tabelle 11.6 Übersicht der Testfehler an der Außenseite des Rohrstücks

Nr.	axiale Position [mm]	Testfehlergröße		
		Länge [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
1	450	6	6	1,6
2	522	6	6	4,8
3	594	6	6	11,2
4	666	6	6	12,8
5	738	10	10	0,8
6	818	10	10	1,6
7	898	10	10	7,2
8	978	10	10	11,2
9	1058	10	10	12,8
10	1138	16	16	0,8
11	1230	16	16	1,6
12	1322	16	16	8,0
13	1414	16	16	11,2
14	1506	20	20	0,5
15	1606	20	20	0,8
16	1706	20	20	1,6
17	1806	20	20	6,4
18	1906	20	20	9,6
19	2050	20	20	12,8

Nr.	axiale Position [mm]	Testfehlergröße		
		Länge [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
20	2150	30	30	3,2
21	2270	30	30	7,2
22	2390	30	30	11,2
23	2550	30	30	12,8
24	2670	40	40	0,8
25	2810	40	40	1,6
26	2950	40	40	5,6
27	3090	40	40	8,8
28	3280	40	40	12,8
29	3460	60	60	1,6
30	3680	60	60	4,8
31	3900	60	60	8,0
32	4140	60	60	12,8
33	4360	80	80	1,6
34	4620	80	80	3,2
35	4860	80	80	4,8
36	5120	80	80	11,2
37	5400	80	80	12,8

Tabelle 11.7 Übersicht der Testfehler an der Innenseite des Rohrstücks

11.2.3 Sonstige Testkörper



Abbildung 11.16 Rohrsegment, 16 mm Wanddicke, mit Spiralnaht, außen zum Teil beschichtet



Abbildung 11.17 kurzes Halbrohrsegment 36", Länge: 350 mm, Wanddicke 9,6 mm



Abbildung 11.18 Mannesmann Rohrsegment mit Längsnaht, Wanddicke 16 mm



Abbildung 11.19 Rohr z. T. beschichtet, Wanddicke 10 mm; Länge 730 mm; Durchmesser 760 mm



Abbildung 11.20 Rohr mit Delaminationen (#6), Wanddicke 8 mm; Länge 1135 mm; Durchmesser 655 mm



Abbildung 11.21 Rohr mit Delaminationen (km 19,036), Wanddicke 8 mm; Länge 885 mm; Durchmesser 660 mm

Dissertation Niese: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung

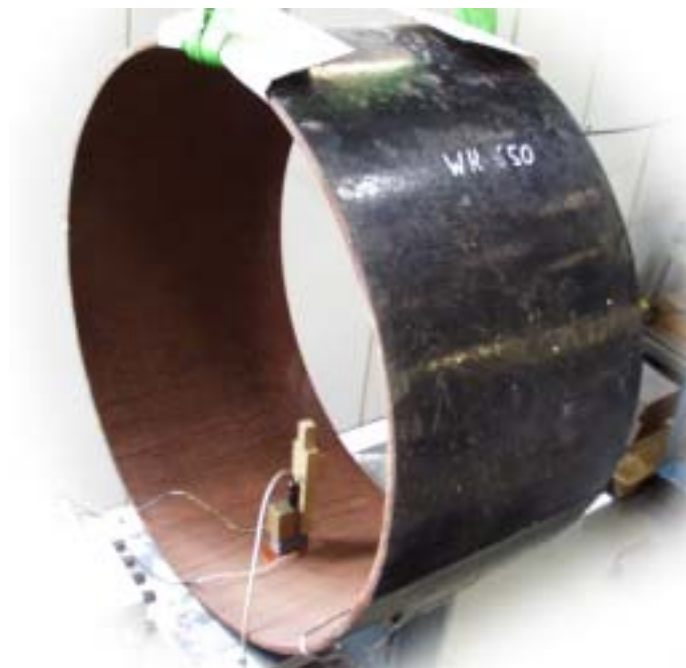


Abbildung 11.22 Rohr mit PE-Beschichtung, Wanddicke 9 mm; Beschichtung 3 mm; Länge 405 mm; Durchmesser 820 mm

12 Anhang

12.1 Messergebnisse zur Bestimmung der magnetostriktiven Wandlungseffizienz

12.1.1 Werkstoff ST37

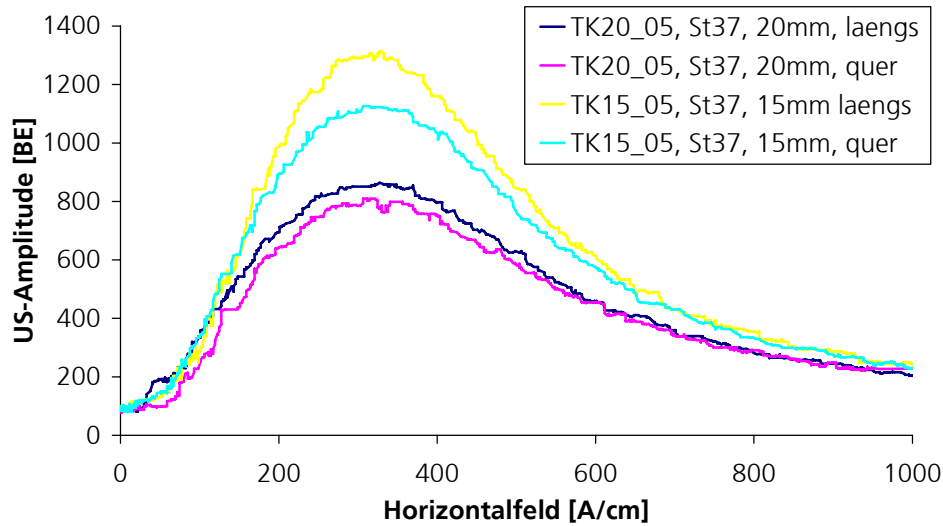


Abbildung 12.1 magnetostriktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) und senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Testkörper TK 20-05, 20 mm und TK 15-05, 15 mm, beide ST37

12.1.2 Werkstoff X60

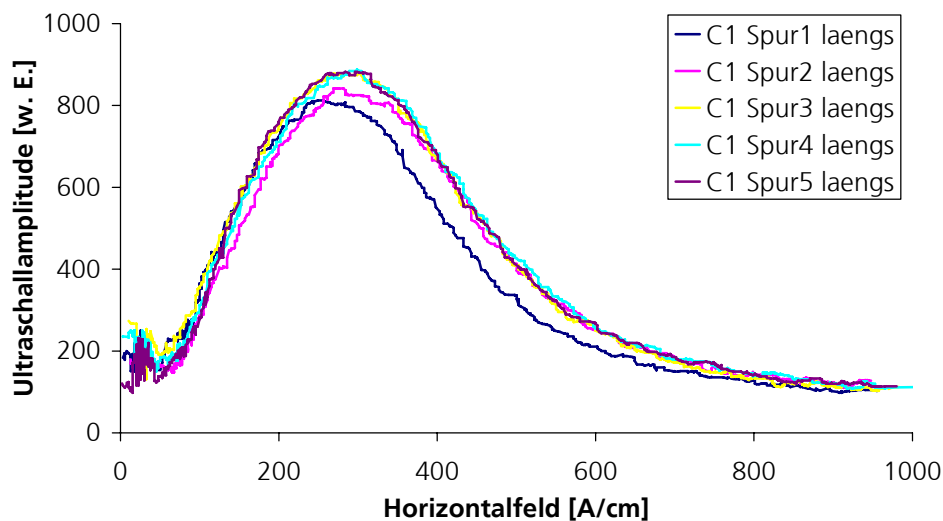


Abbildung 12.2 magnetostriktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) zur Walzrichtung, Coupon 980218 DH, 22 mm, X60

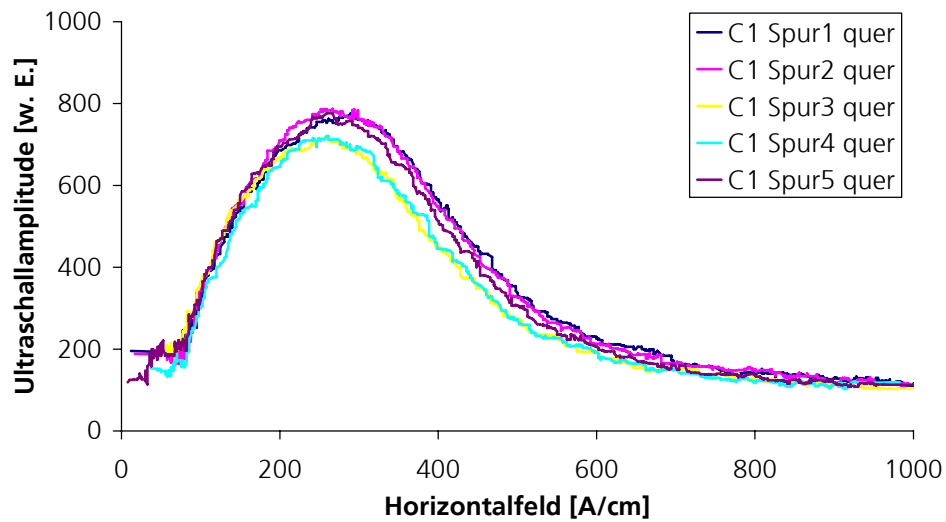


Abbildung 12.3 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 980218 DH, 22 mm, X60

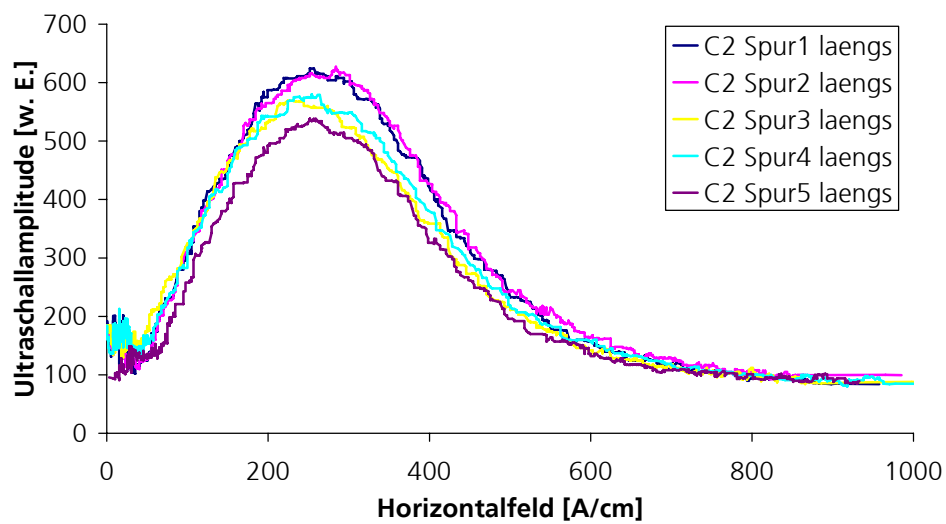


Abbildung 12.4 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (laengs) zur Walzrichtung, Coupon 762164_04, 32 mm, X60

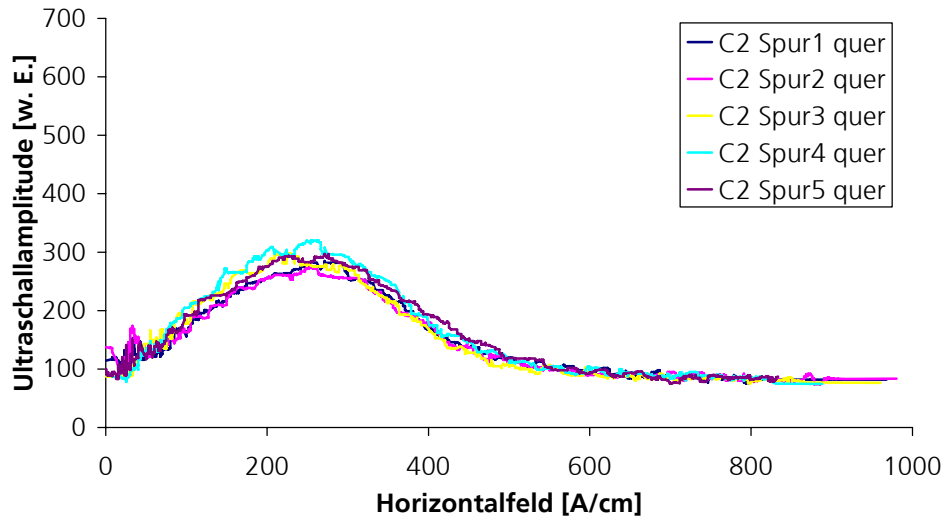


Abbildung 12.5 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 762164_04, 32 mm, X60

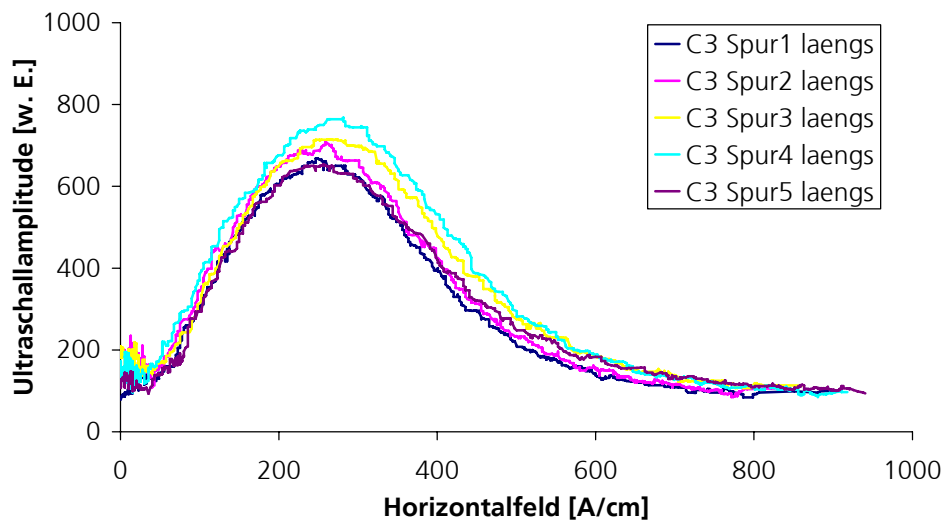


Abbildung 12.6 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (laengs) zur Walzrichtung, Coupon 762164_02, 32 mm, X60

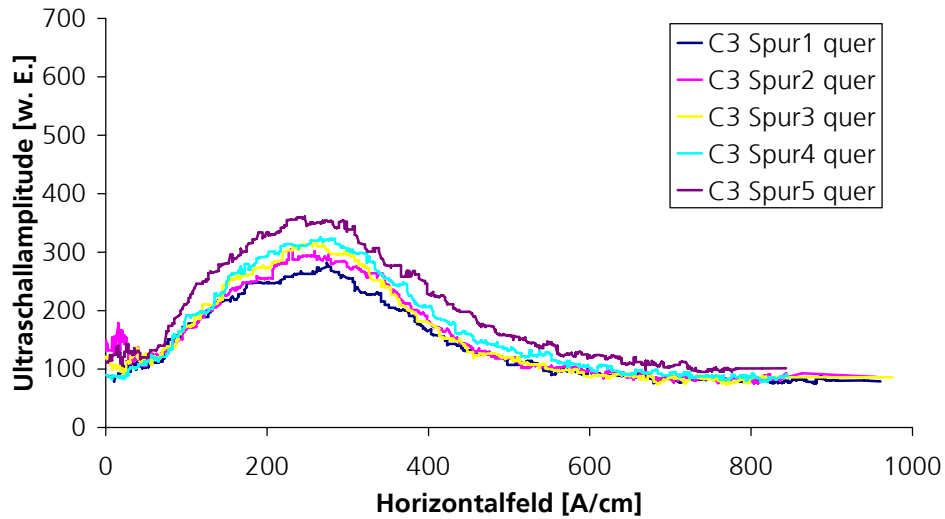


Abbildung 12.7 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 762164_02, 32 mm, X60

12.1.3 Werkstoff X70

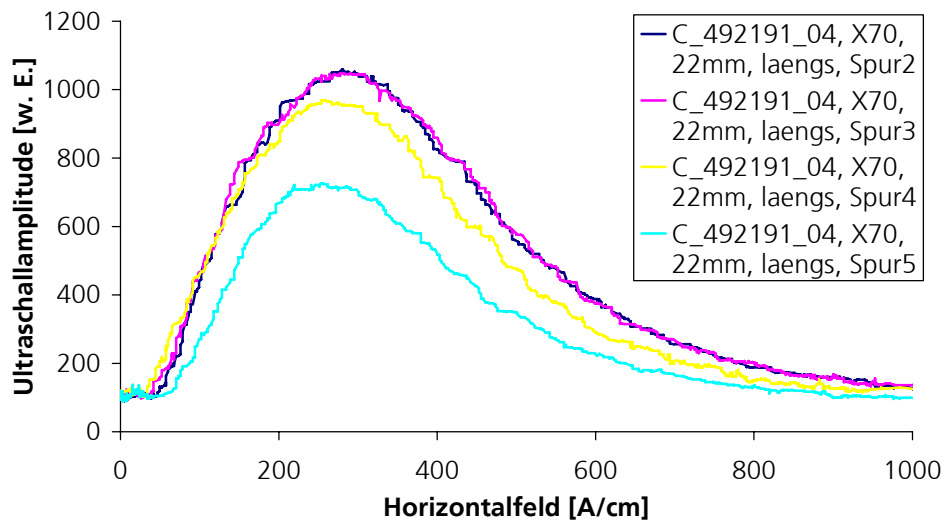


Abbildung 12.8 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) zur Walzrichtung, Coupon 492191_04, 22 mm, X70

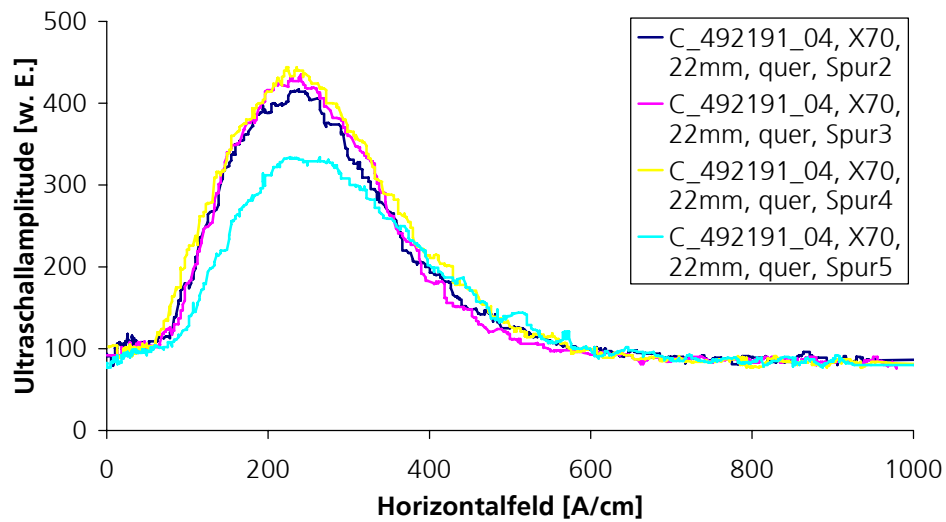


Abbildung 12.9 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 492191_04, 22 mm, X70

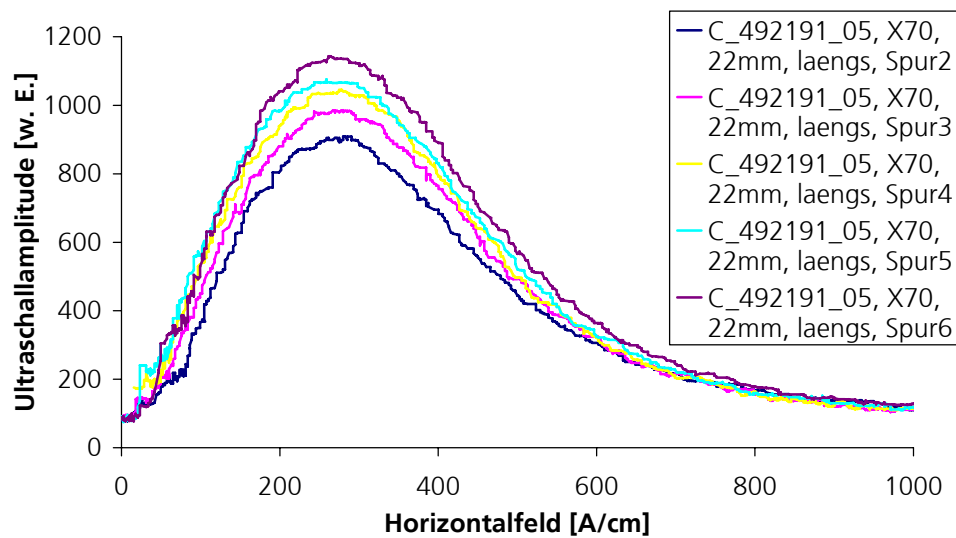


Abbildung 12.10 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) zur Walzrichtung, Coupon 492191_05, 22 mm, X70

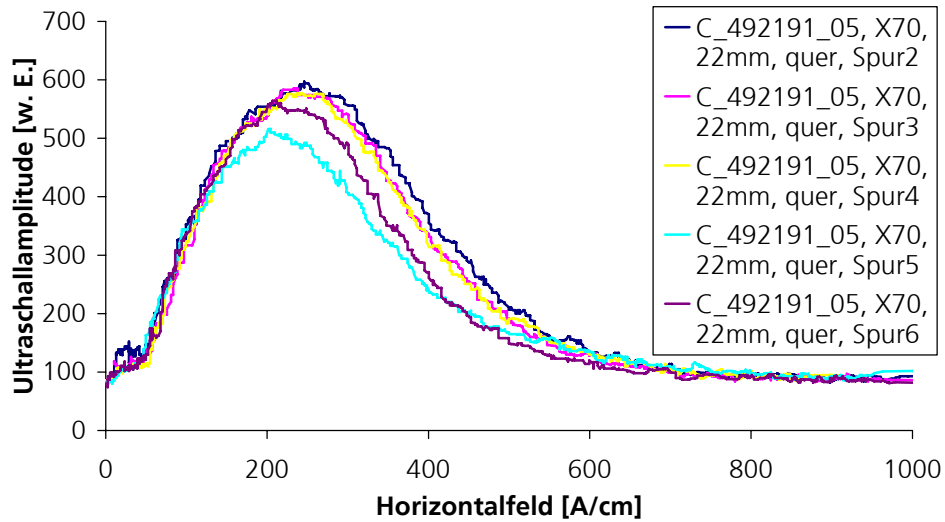


Abbildung 12.11 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 492191_05, 22 mm, X70

12.1.4 Werkstoff X80

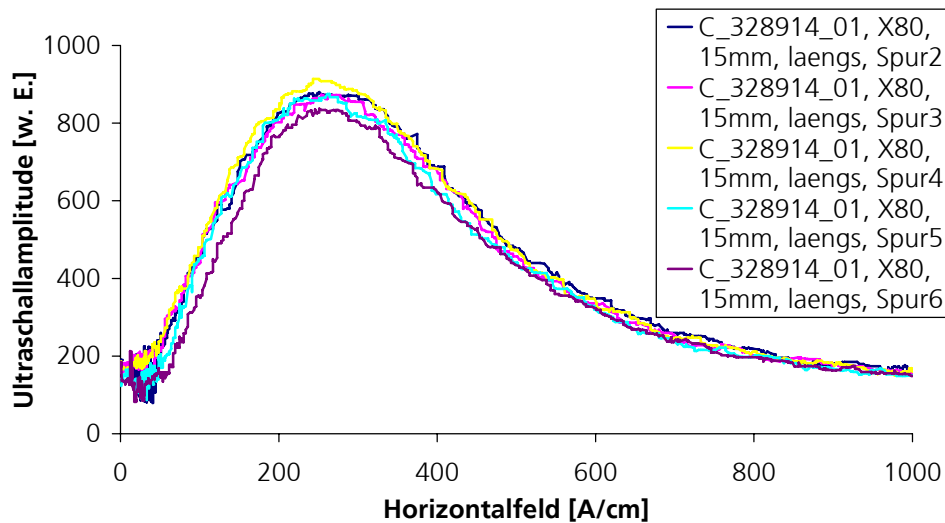


Abbildung 12.12 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (laengs) zur Walzrichtung, Coupon 328914_01, 15 mm, X80

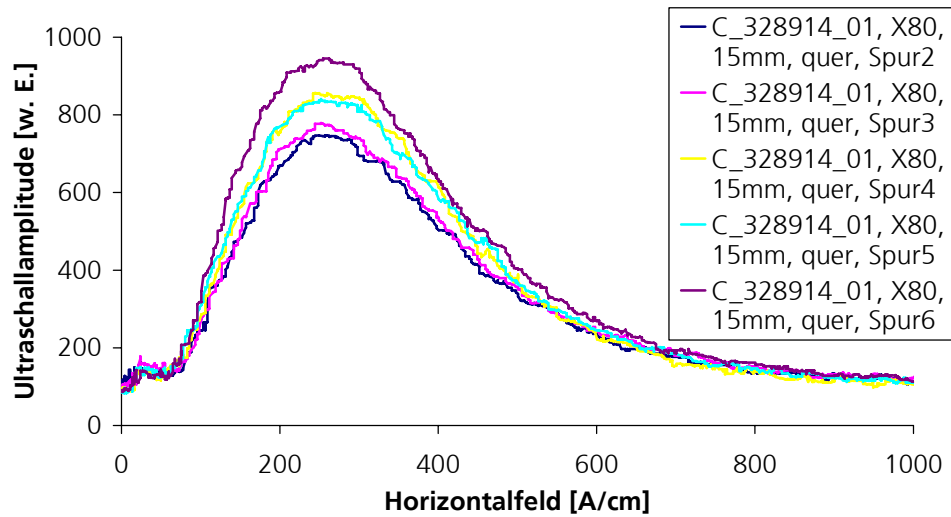


Abbildung 12.13 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 328914_01, 15 mm, X80

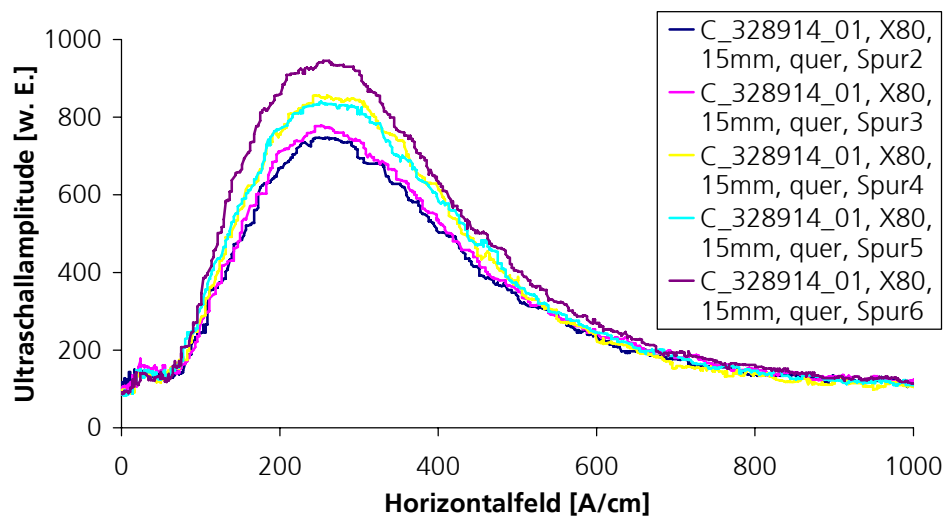


Abbildung 12.14 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 328914_01, 15 mm, X80 (Wiederholungsmessung)

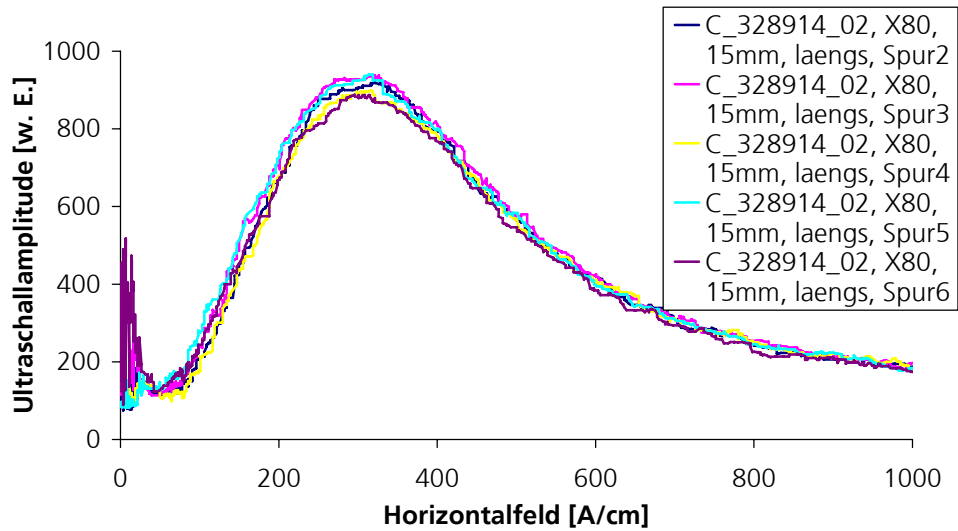


Abbildung 12.15 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) zur Walzrichtung, Coupon 328914_02, 15 mm, X80

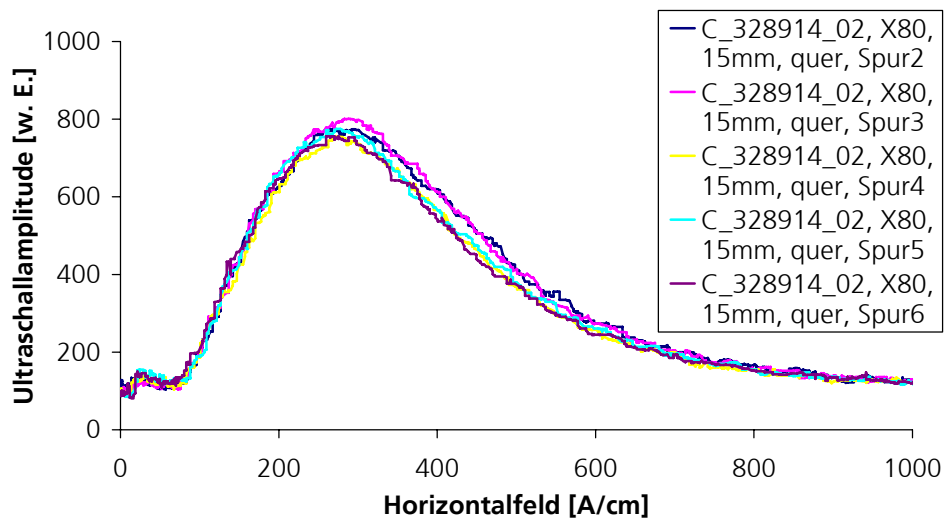


Abbildung 12.16 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 328914_02, 15 mm, X80

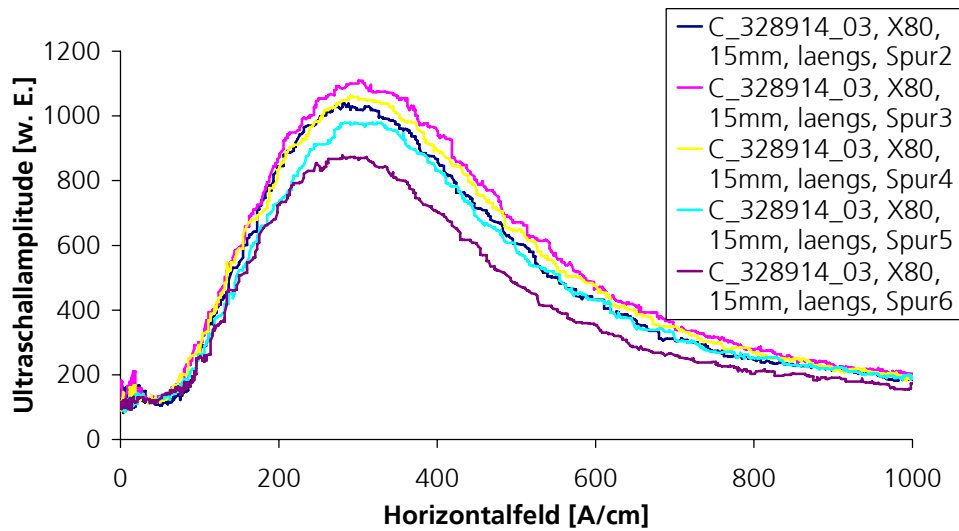


Abbildung 12.17 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation parallel (längs) zur Walzrichtung, Coupon 328914_03, 15 mm, X80

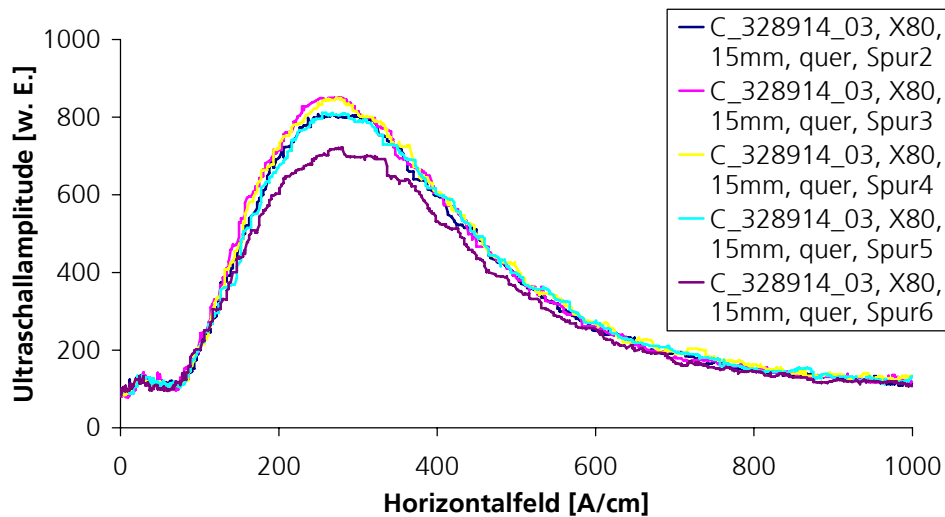


Abbildung 12.18 magnetostruktive Ultraschall-Wandlungseffizienz, Transversalwellenpolarisation senkrecht (quer) zur Walzrichtung, Coupon 328914_03, 15 mm, X80

12.2 Messergebnisse zur Bestimmung des magnetostriktiven Arbeitspunktes

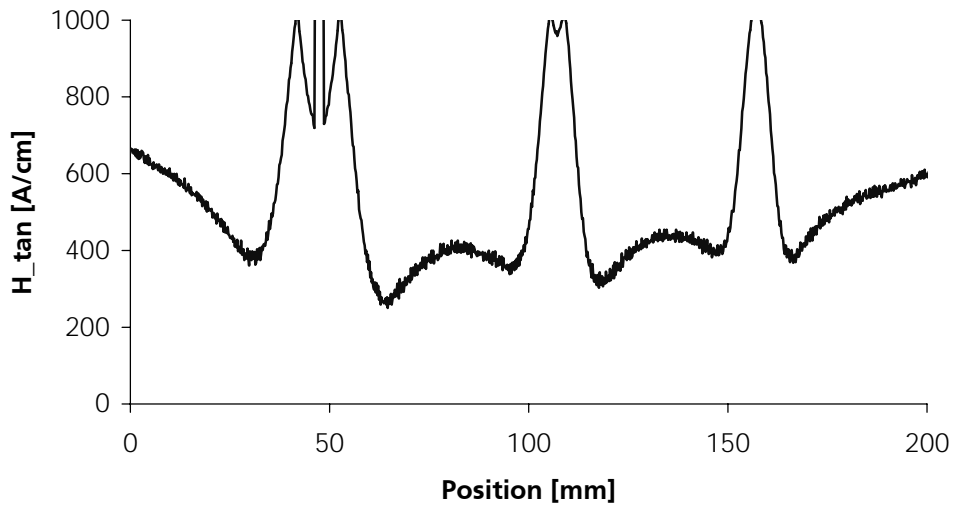


Abbildung 12.19 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

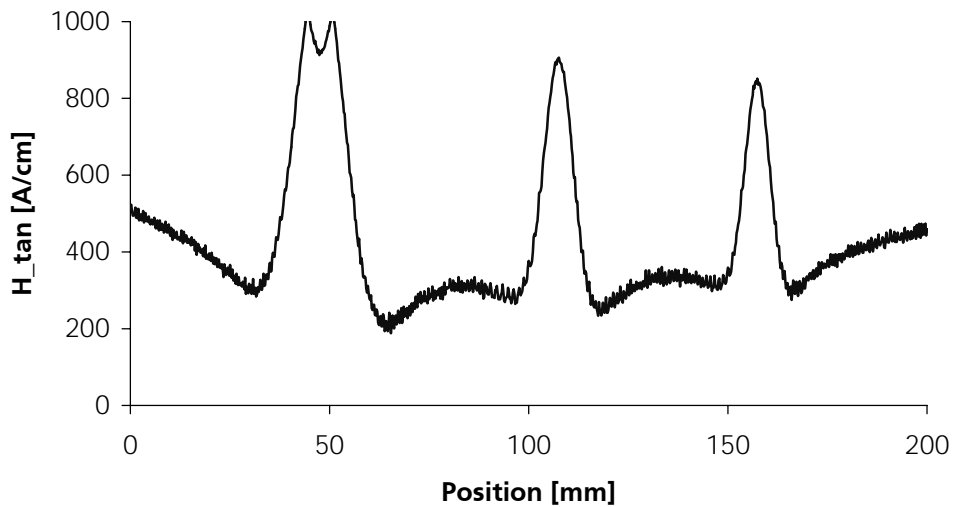


Abbildung 12.20 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

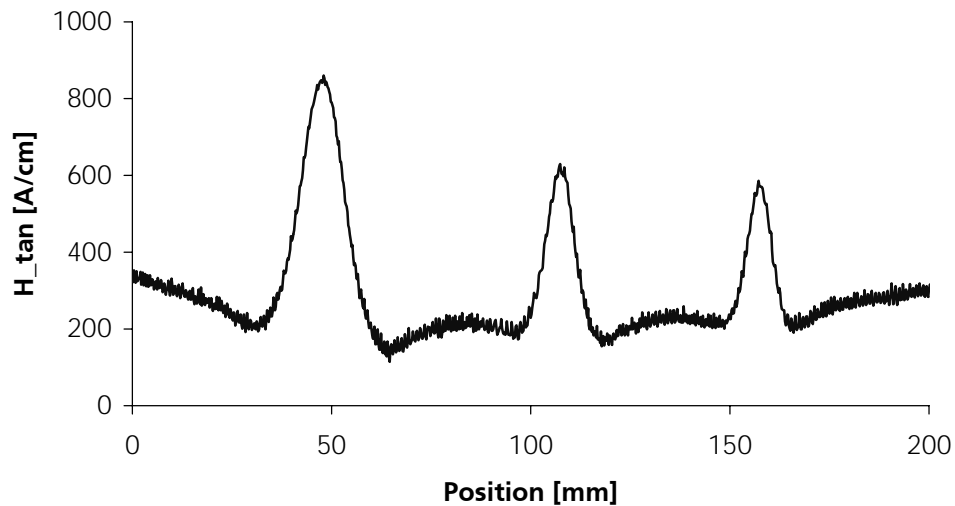


Abbildung 12.21 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

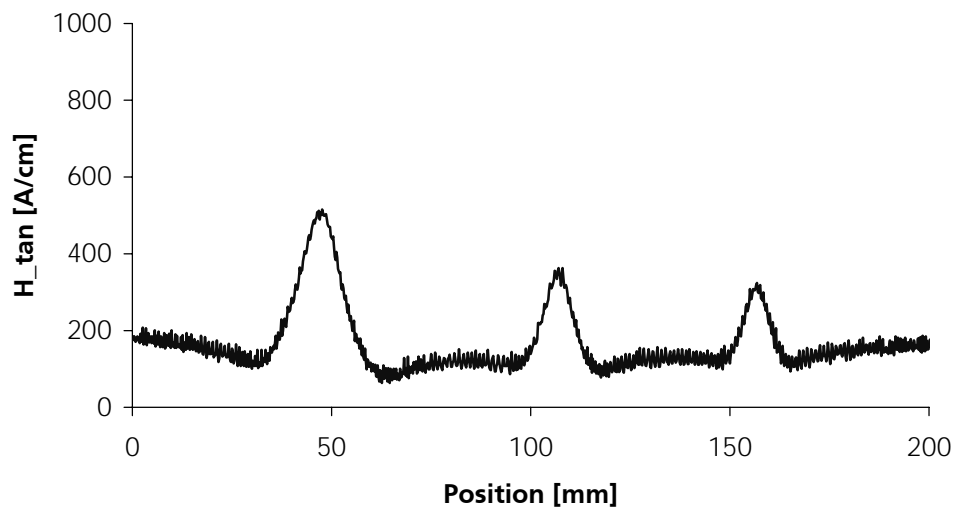


Abbildung 12.22 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

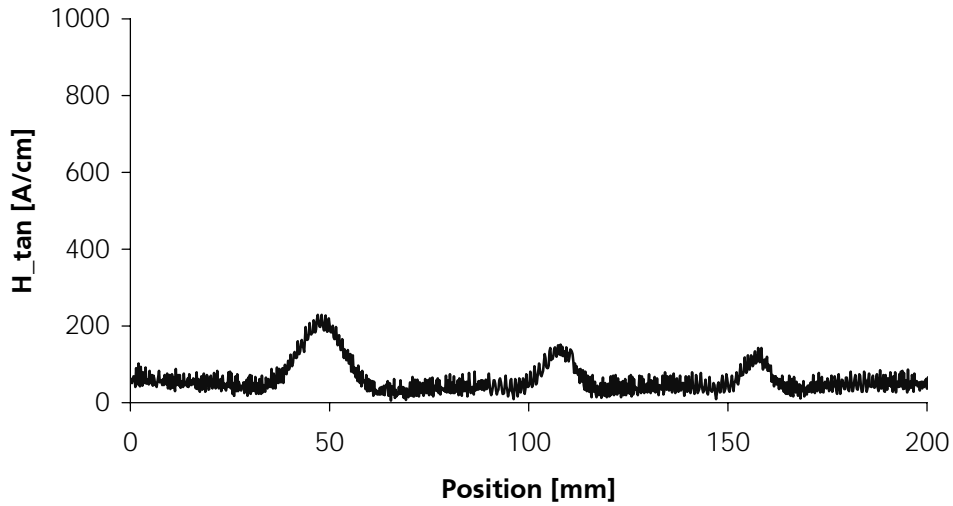


Abbildung 12.23 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-70% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

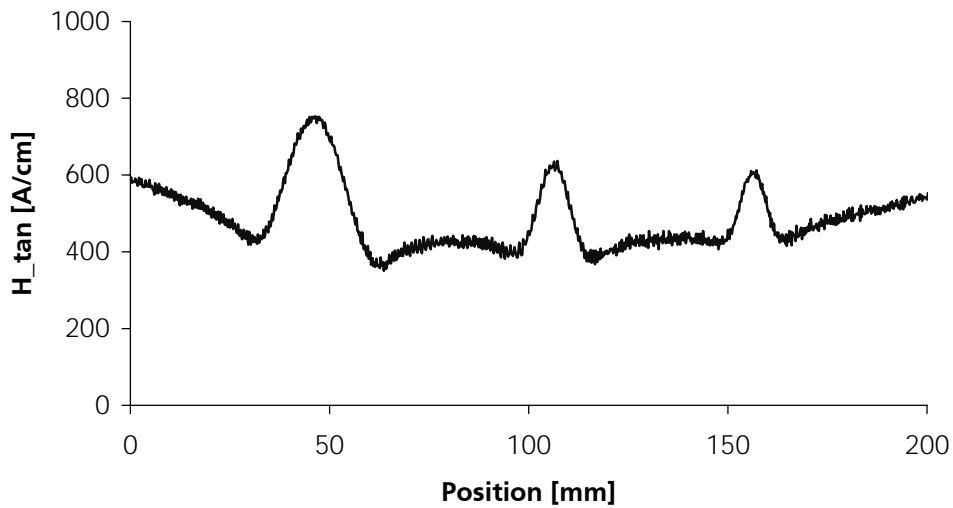


Abbildung 12.24 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

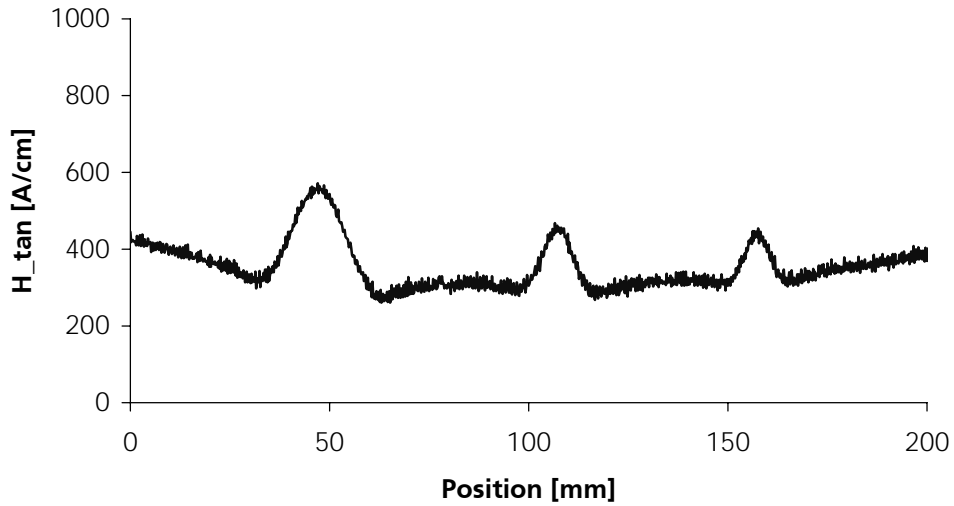


Abbildung 12.25 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

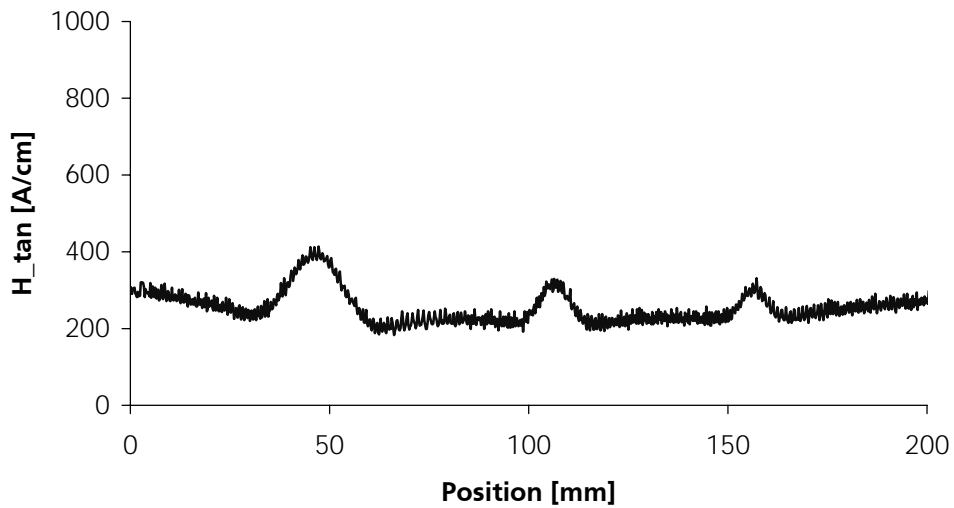


Abbildung 12.26 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

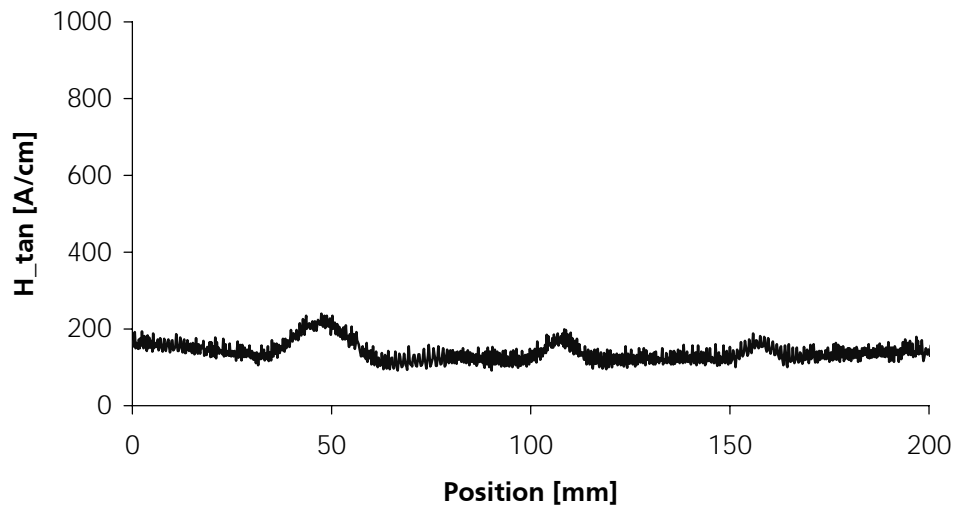


Abbildung 12.27 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

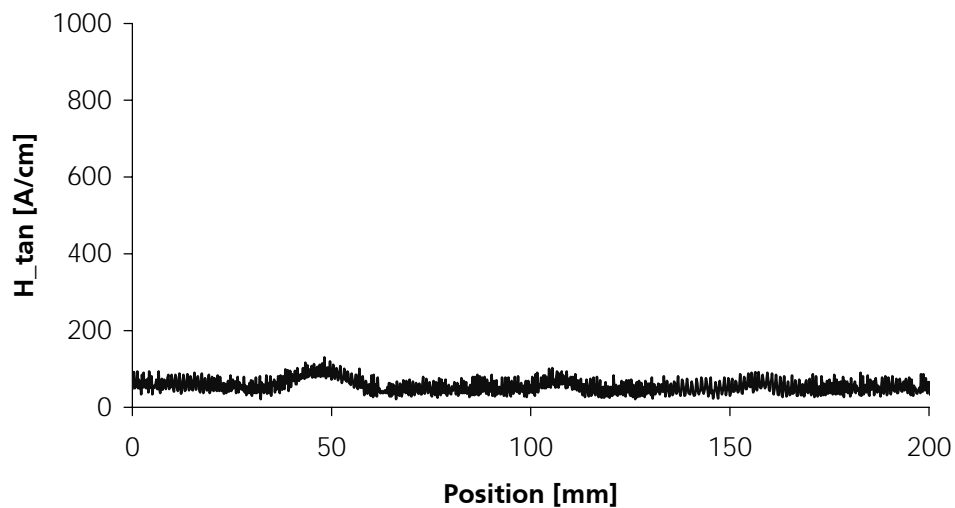


Abbildung 12.28 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-30% (nominelle Wanddicke 10 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

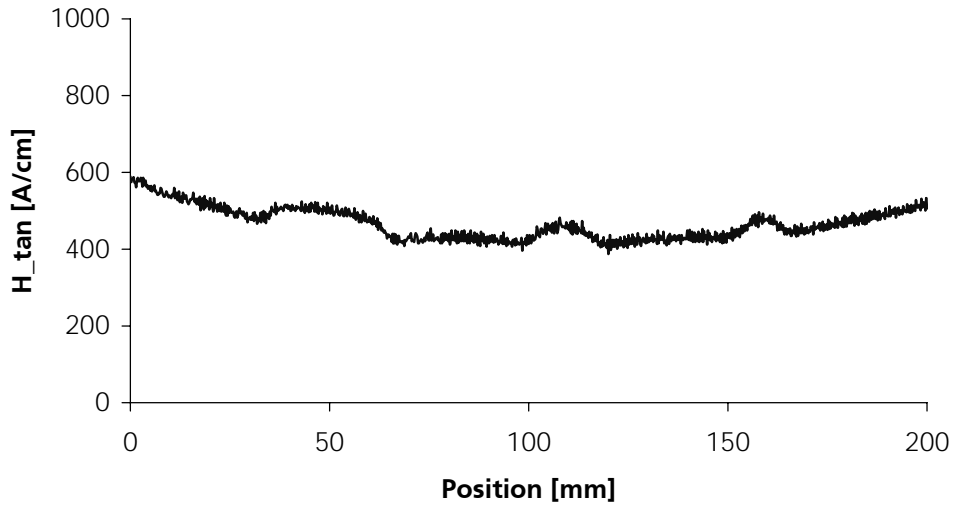


Abbildung 12.29 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

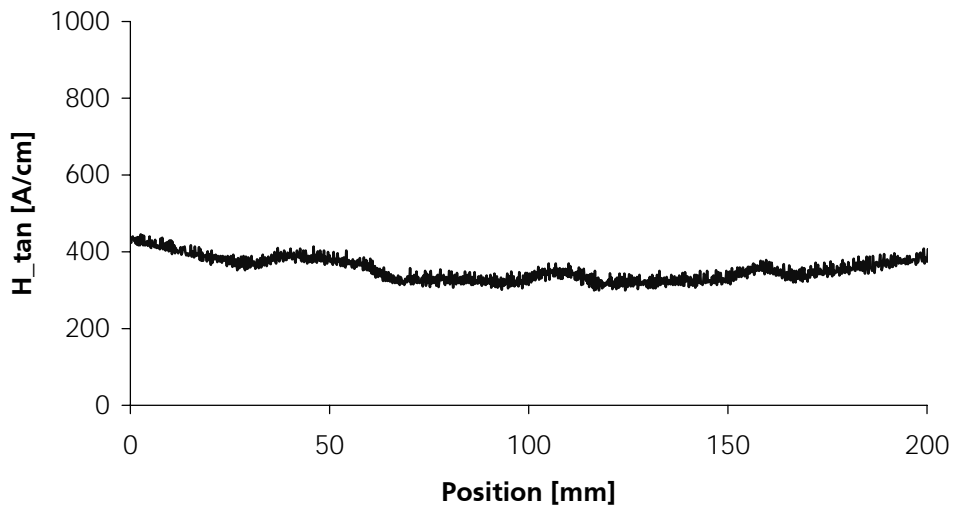


Abbildung 12.30 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

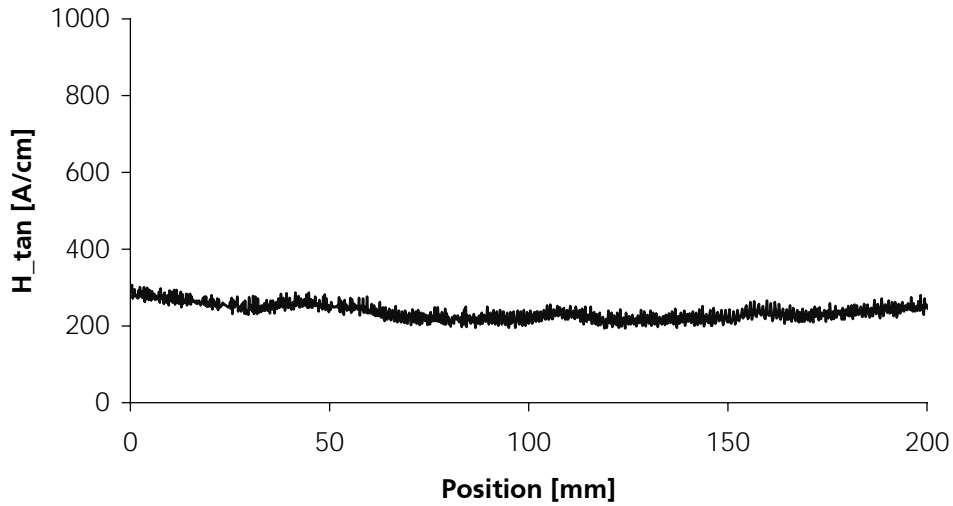


Abbildung 12.31 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

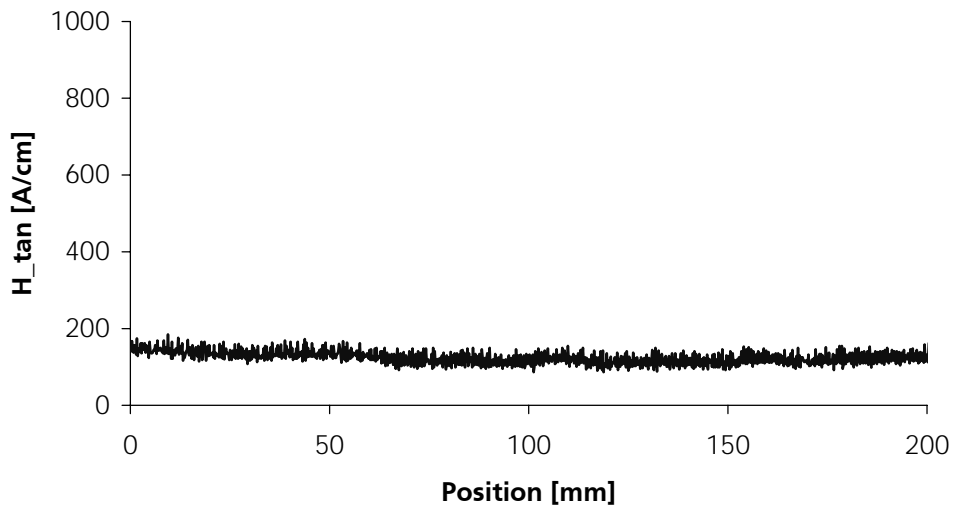


Abbildung 12.32 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

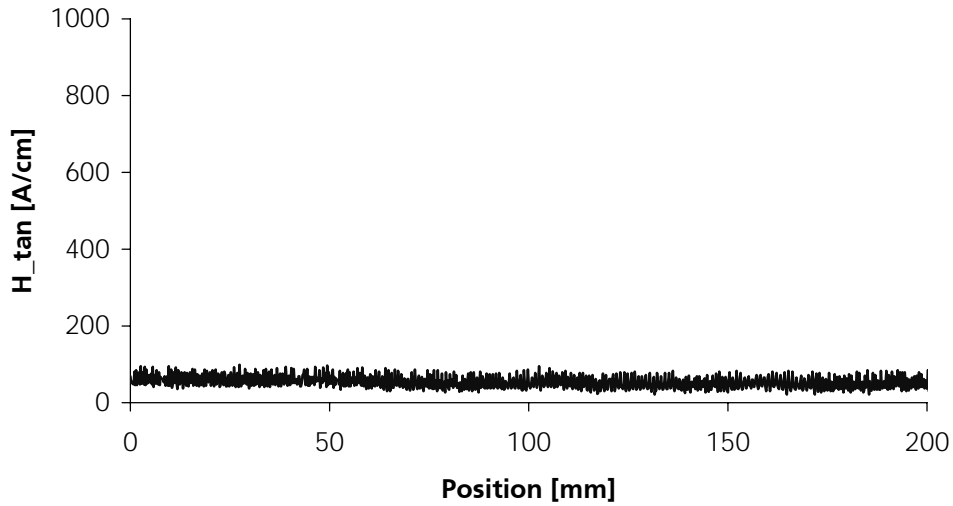


Abbildung 12.33 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 10-05 (nominelle Wanddicke 10 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

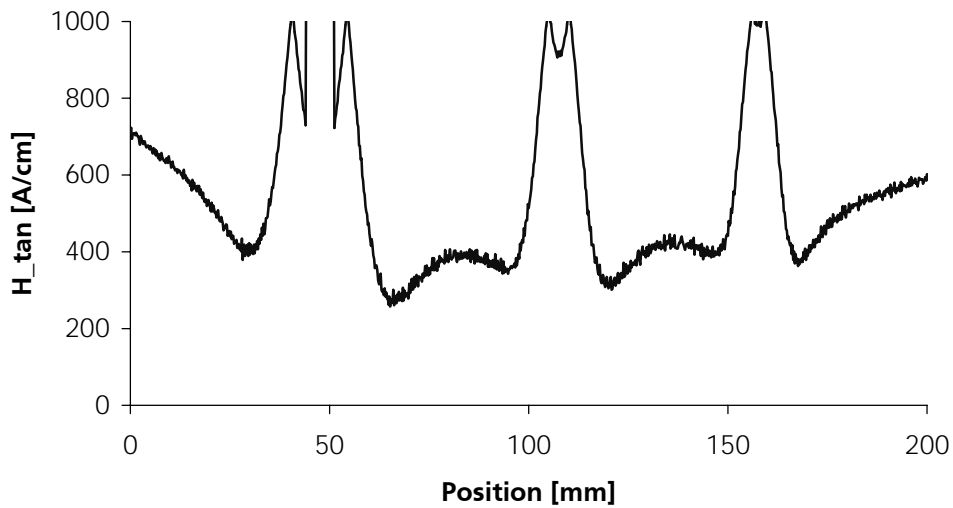


Abbildung 12.34 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

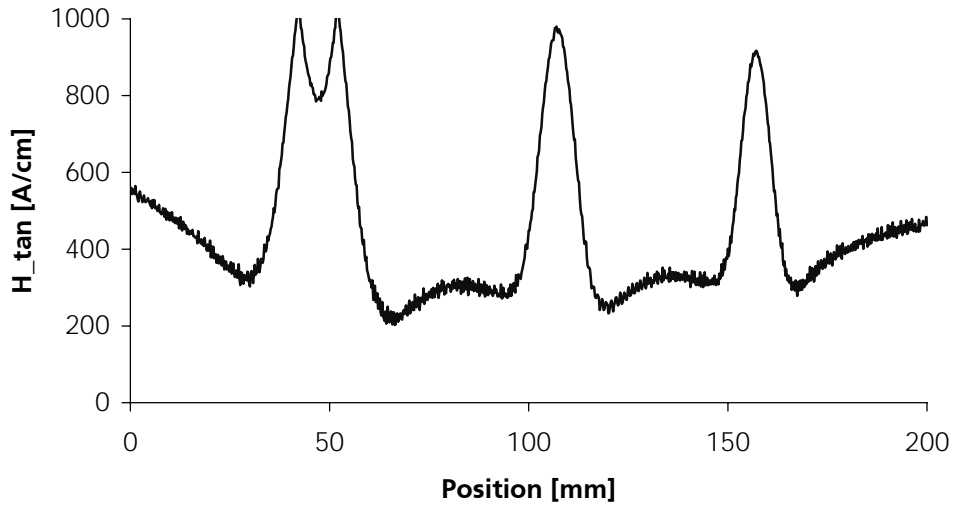


Abbildung 12.35 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

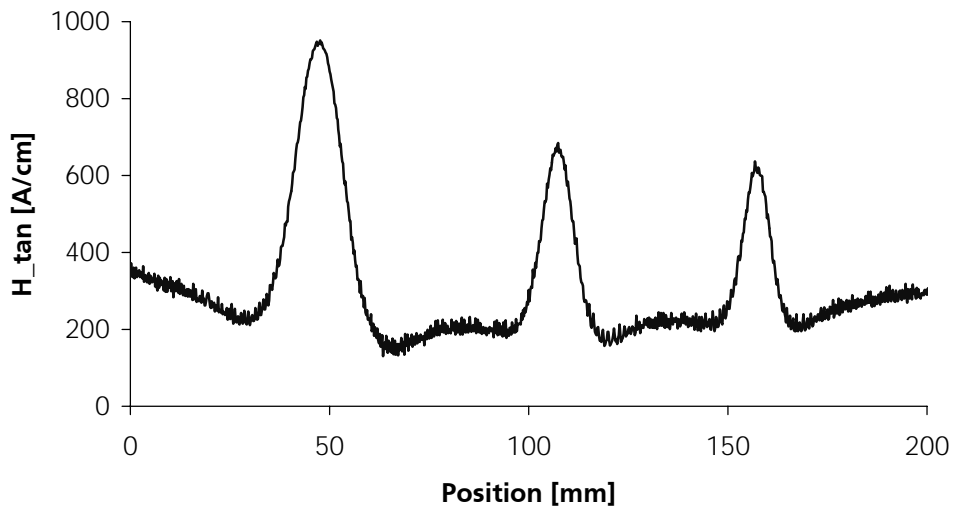


Abbildung 12.36 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

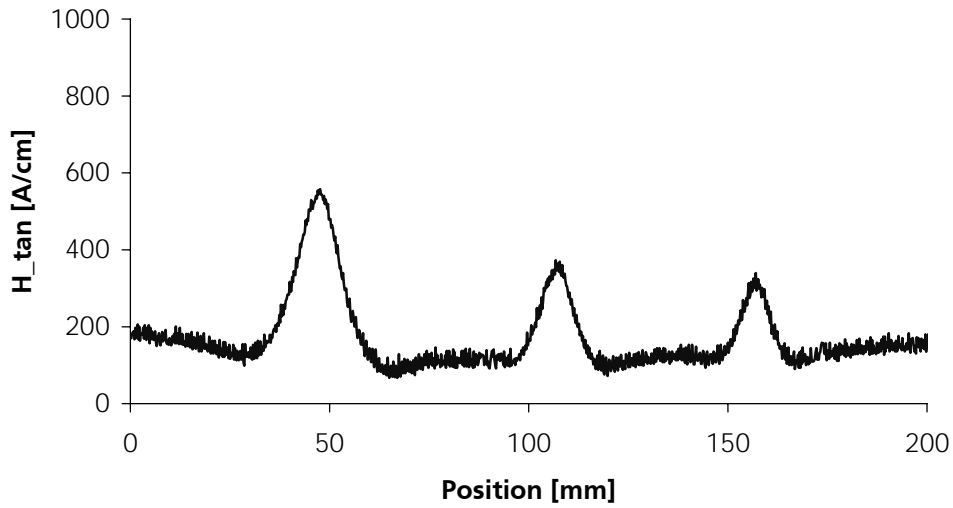


Abbildung 12.37 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

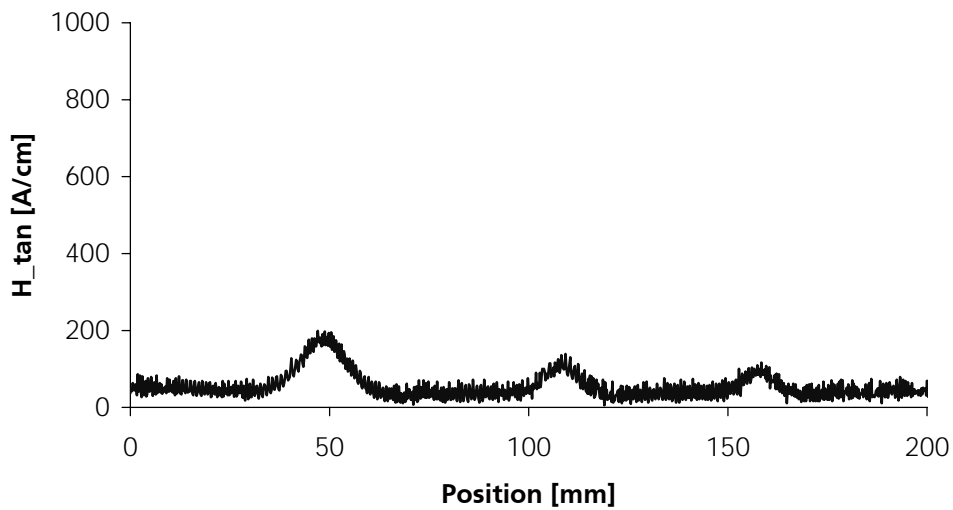


Abbildung 12.38 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-70% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

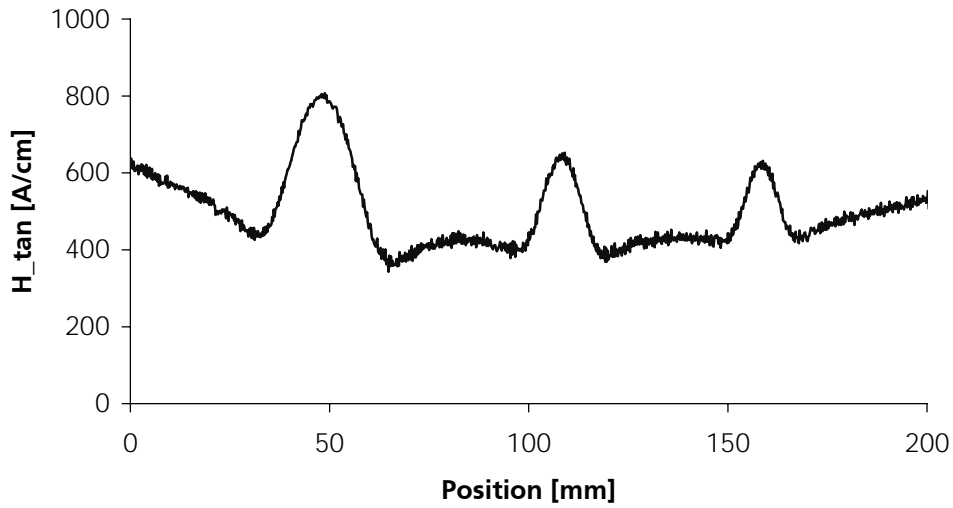


Abbildung 12.39 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

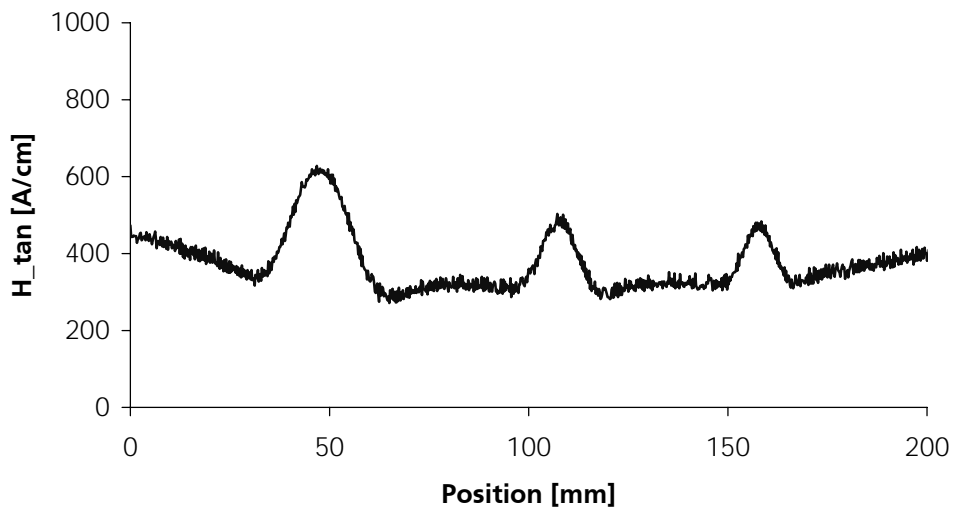


Abbildung 12.40 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

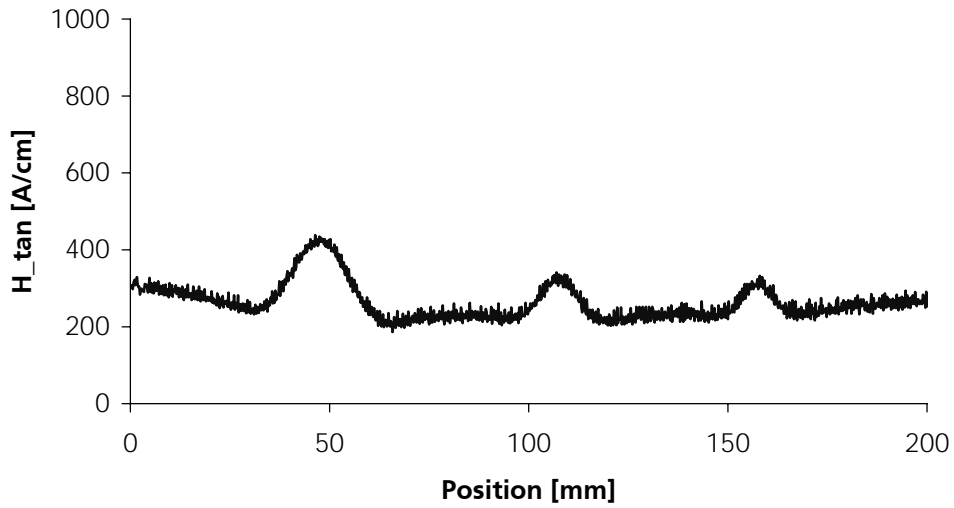


Abbildung 12.41 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

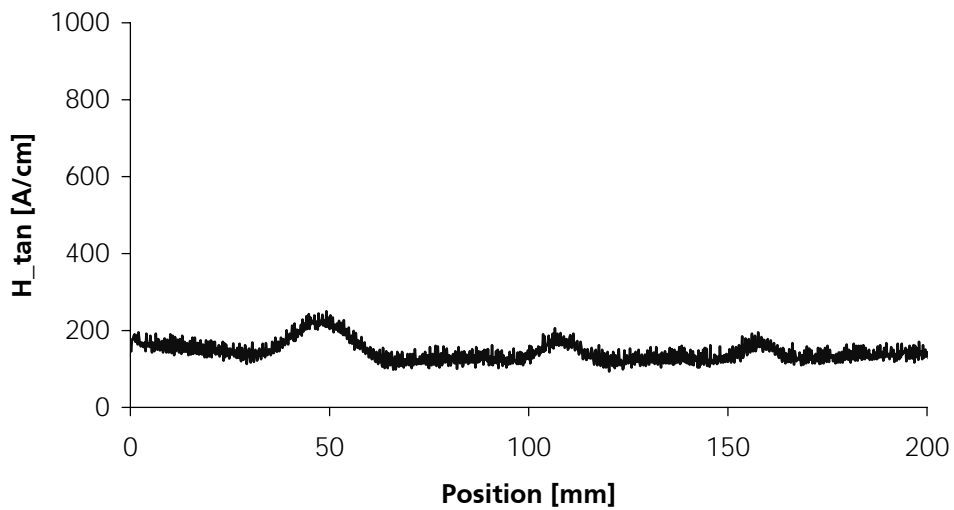


Abbildung 12.42 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

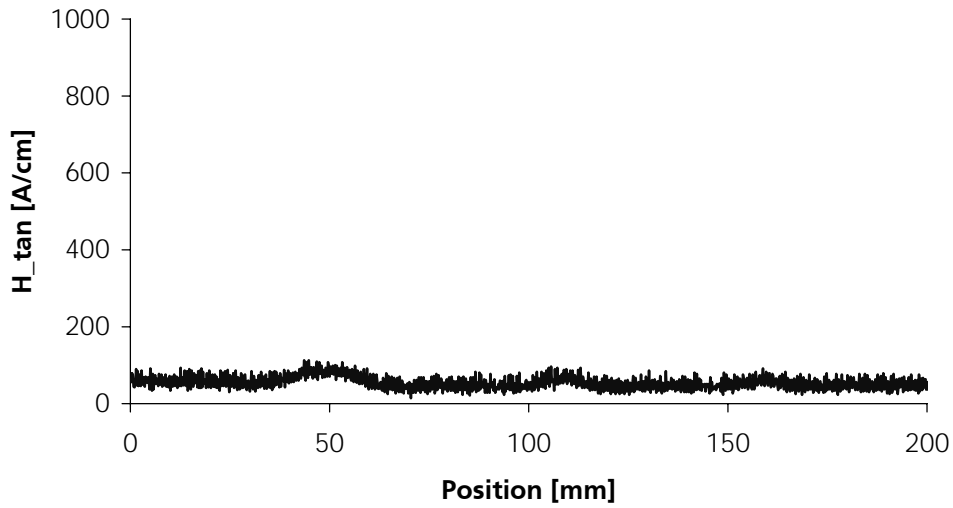


Abbildung 12.43 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-30% (nominelle Wanddicke 15 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

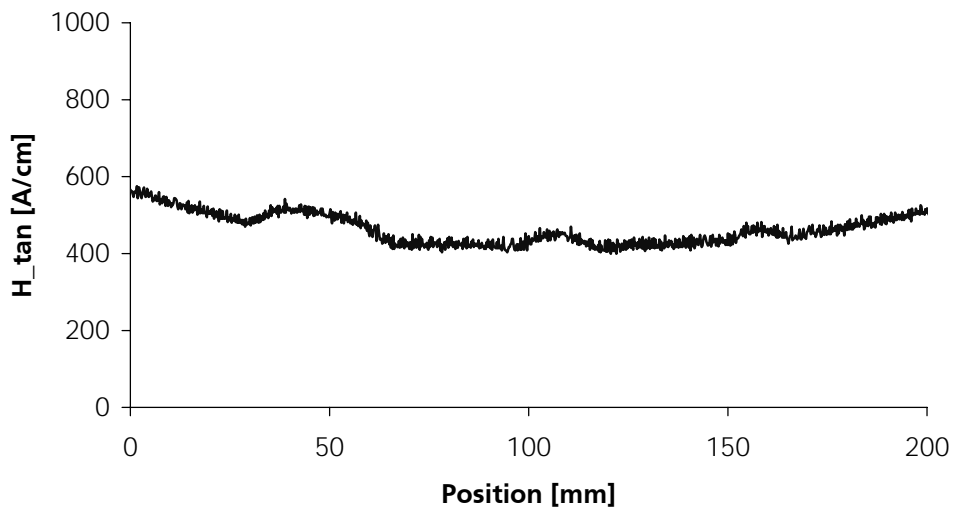


Abbildung 12.44 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

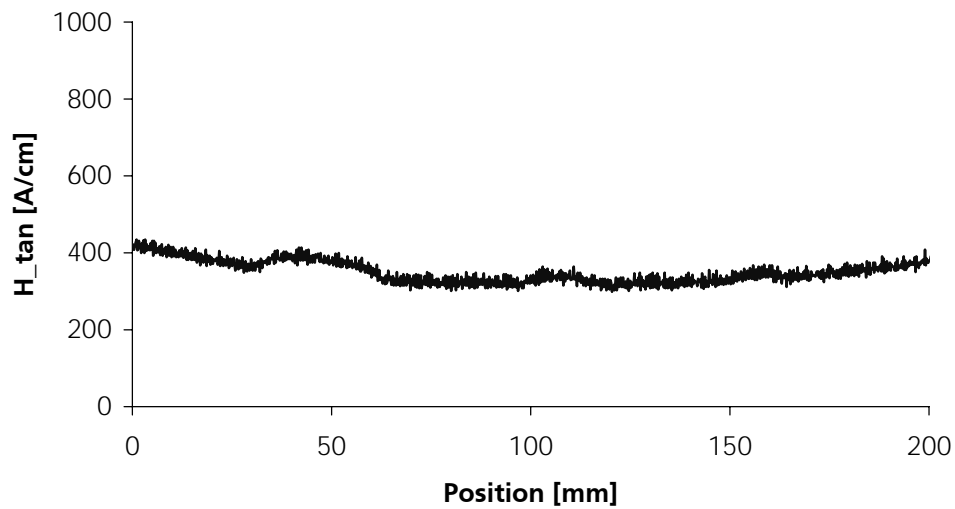


Abbildung 12.45 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

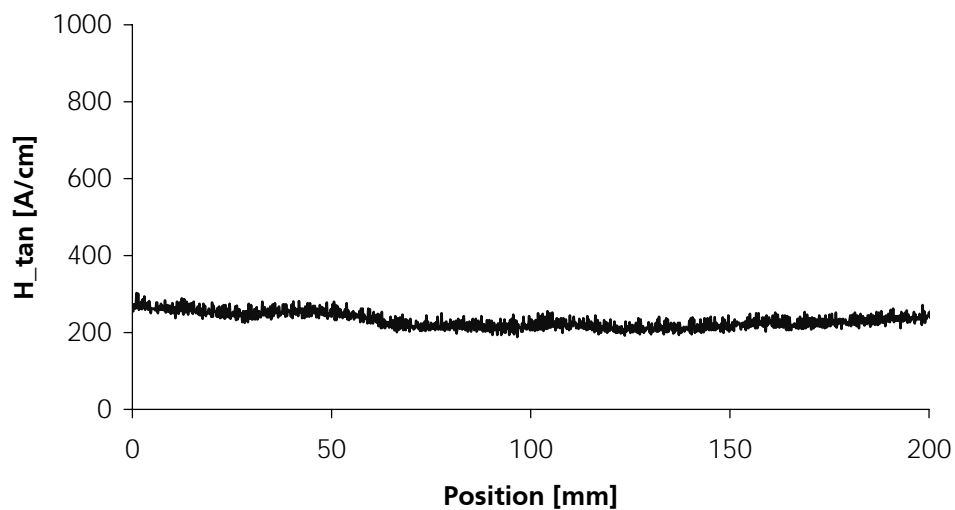


Abbildung 12.46 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

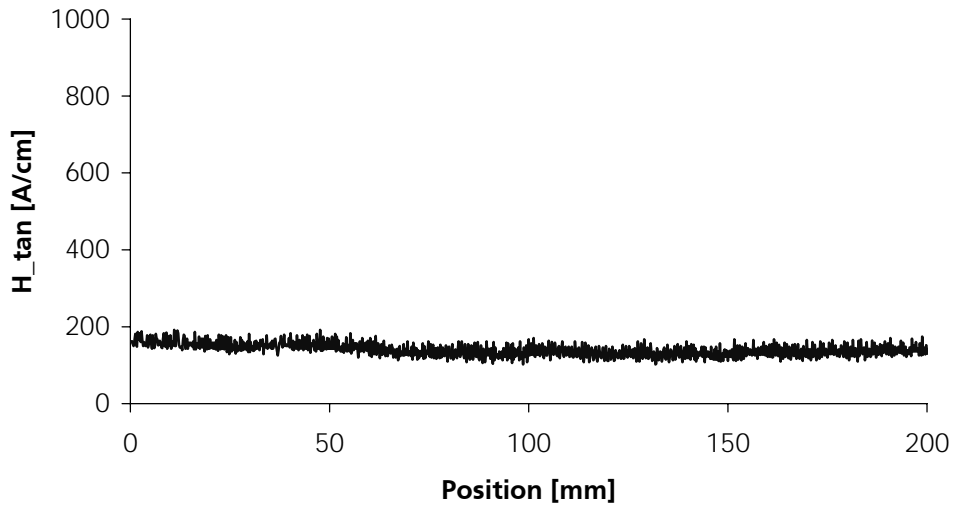


Abbildung 12.47 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

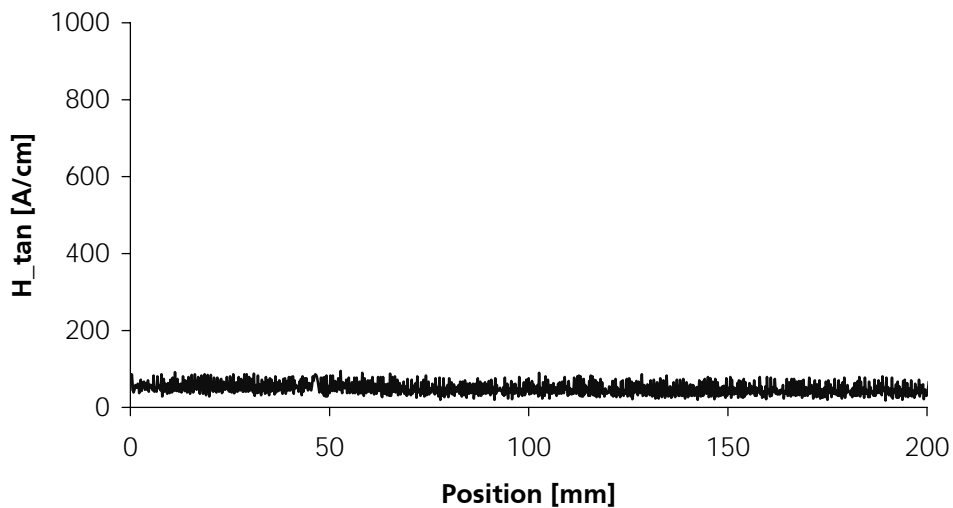


Abbildung 12.48 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 15-05 (nominelle Wanddicke 15 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

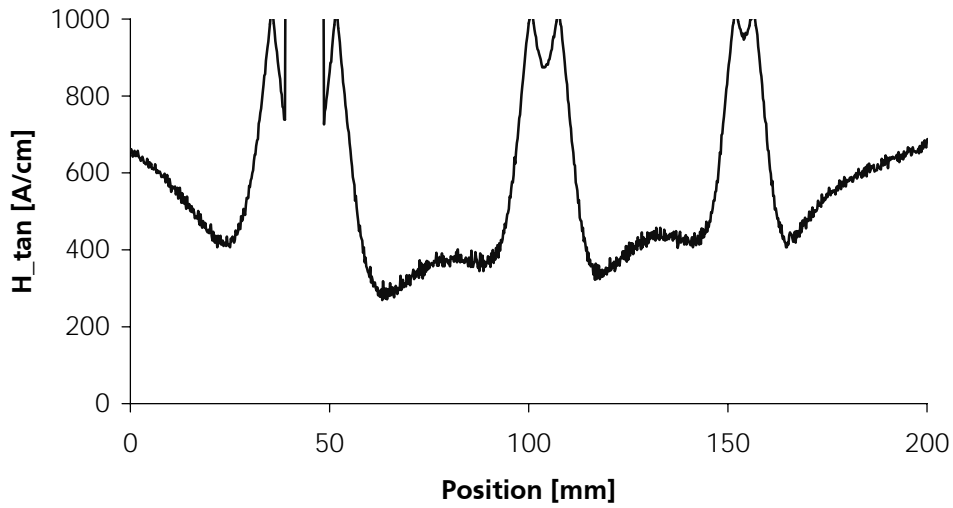


Abbildung 12.49 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

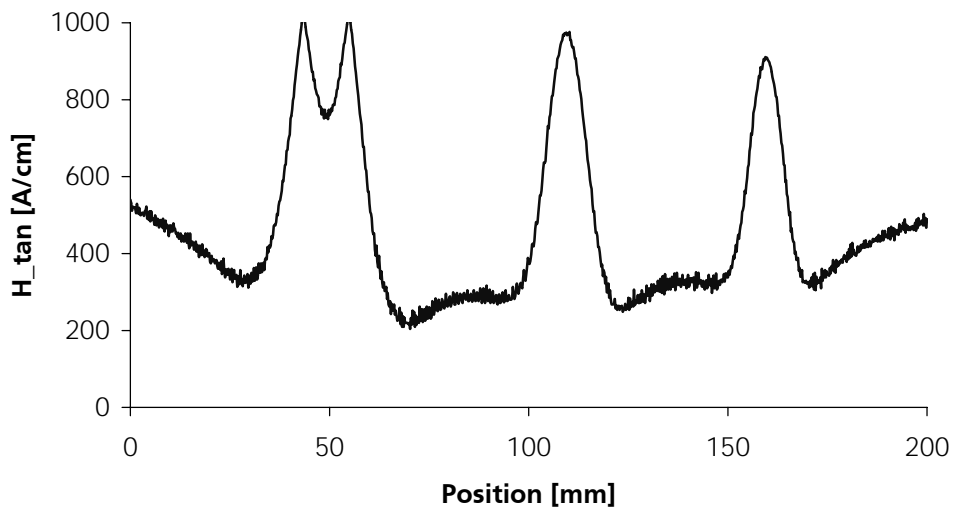


Abbildung 12.50 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

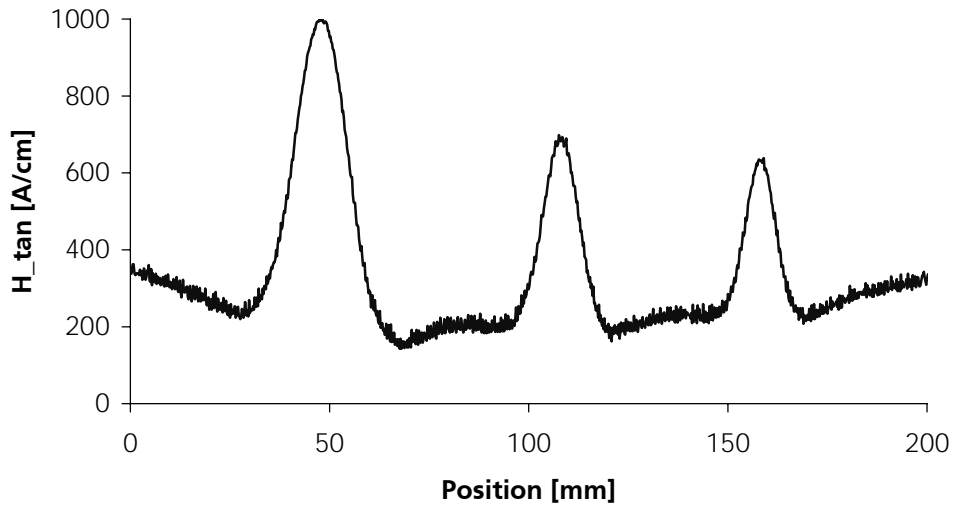


Abbildung 12.51 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

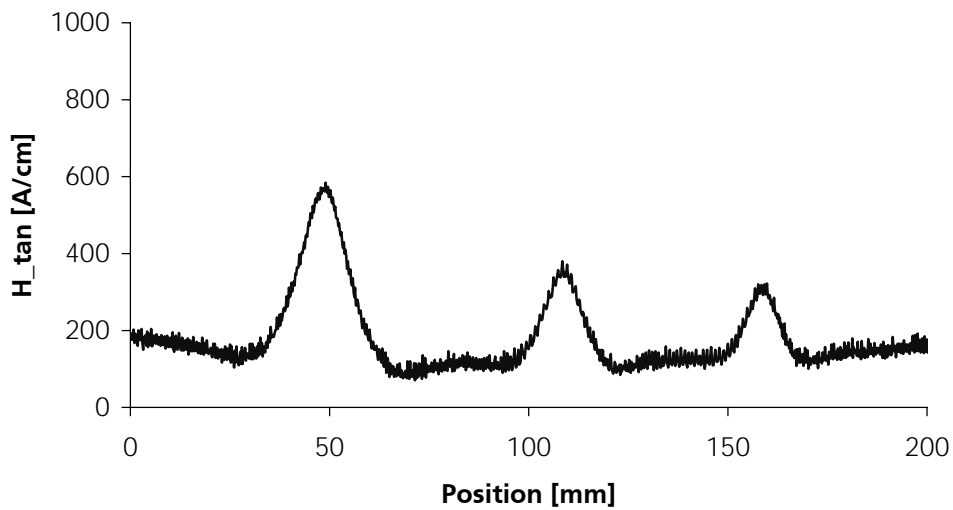


Abbildung 12.52 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

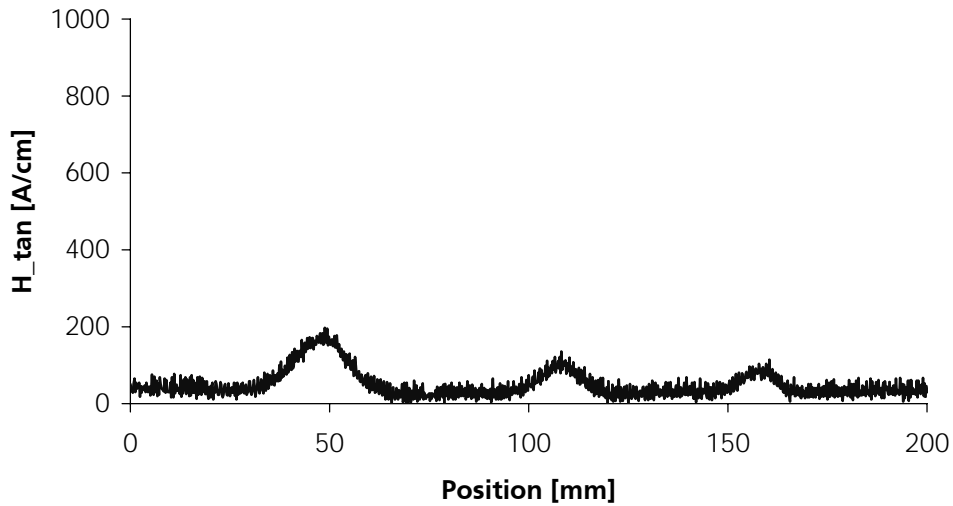


Abbildung 12.53 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-70% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 70% tief)

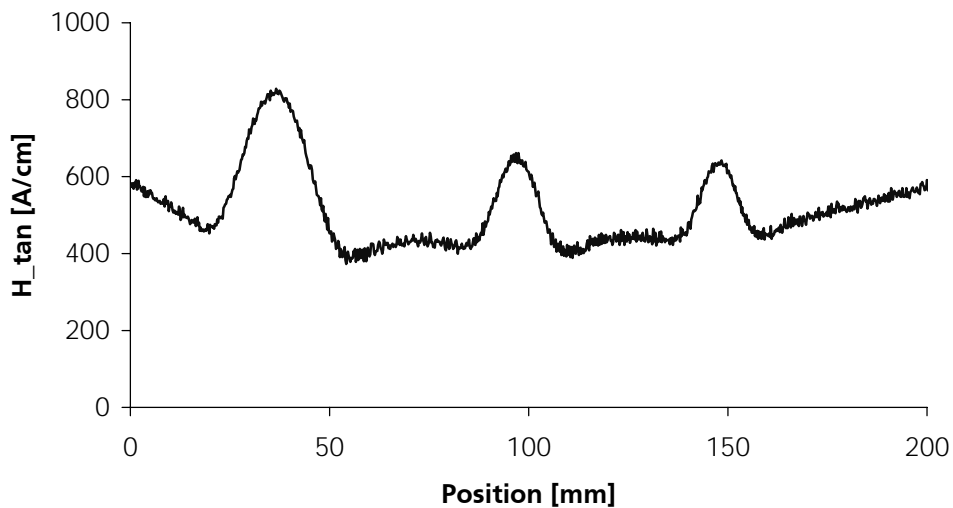


Abbildung 12.54 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

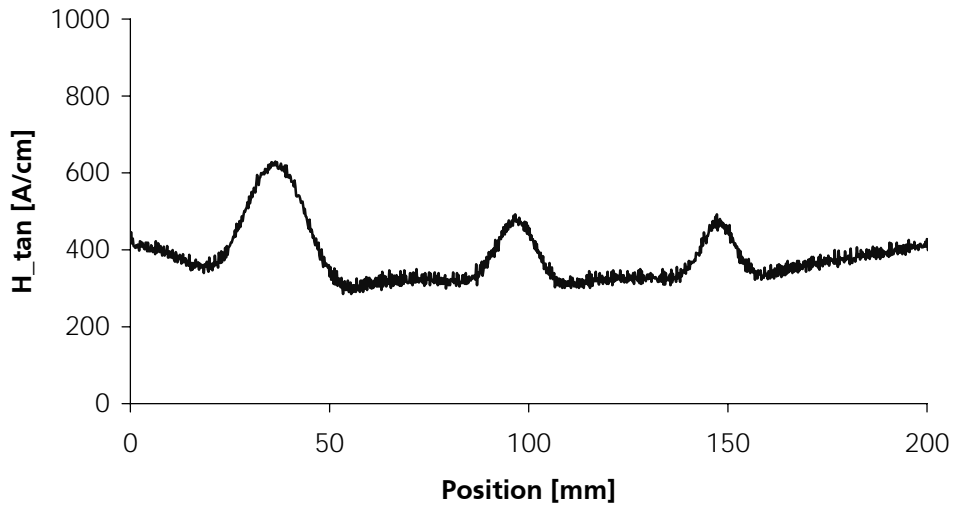


Abbildung 12.55 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

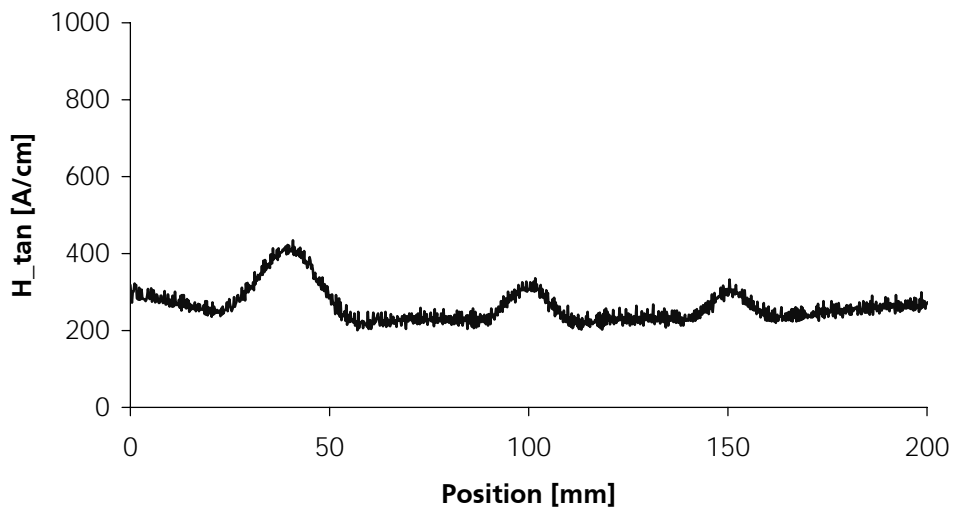


Abbildung 12.56 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

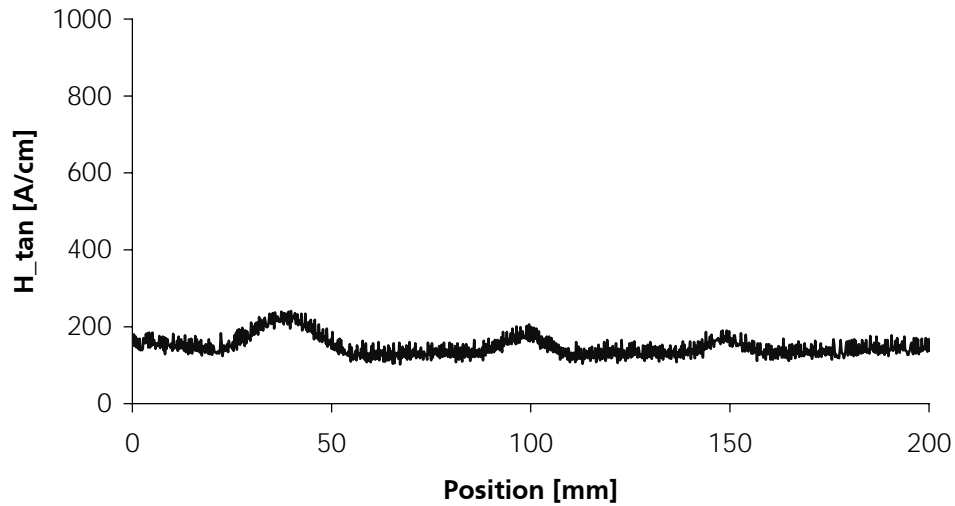


Abbildung 12.57 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

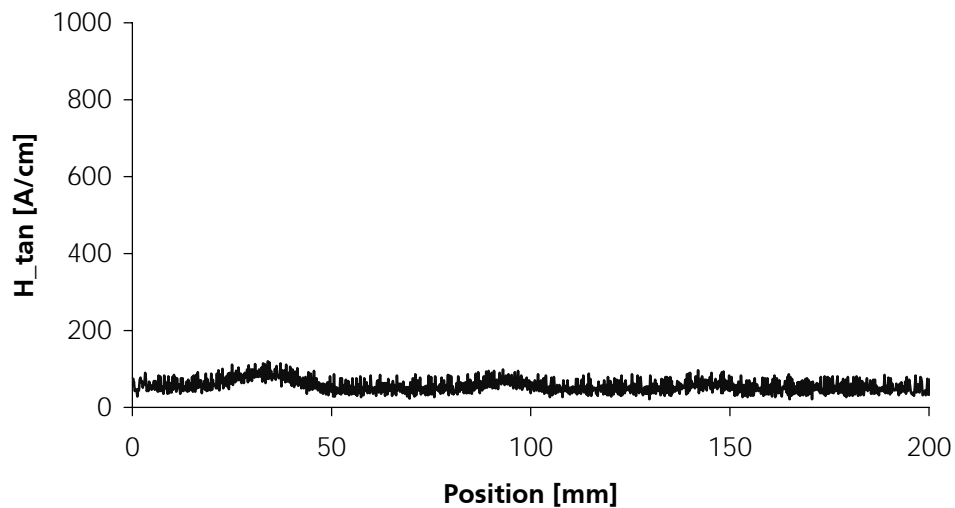


Abbildung 12.58 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-30% (nominelle Wanddicke 20 mm, mit kalottenförmigen Testfehlern, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 30% tief)

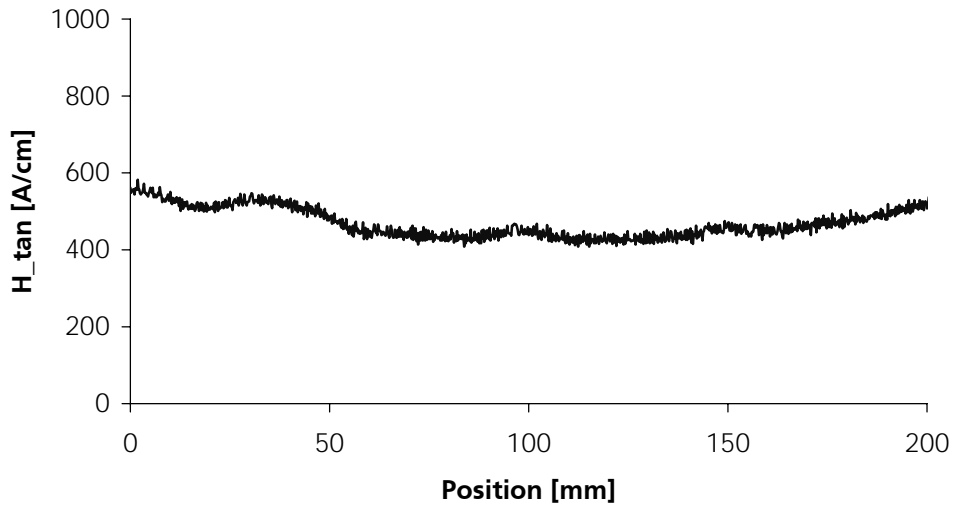


Abbildung 12.59 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

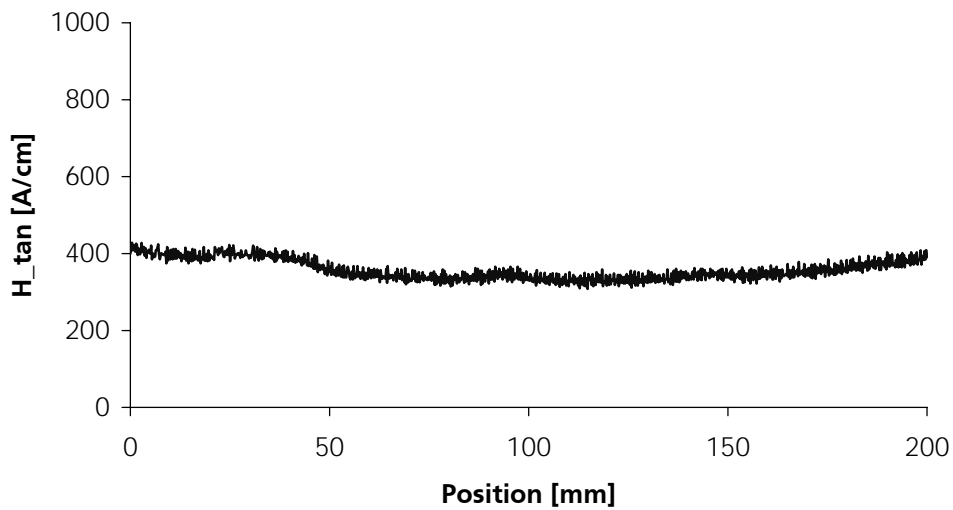


Abbildung 12.60 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

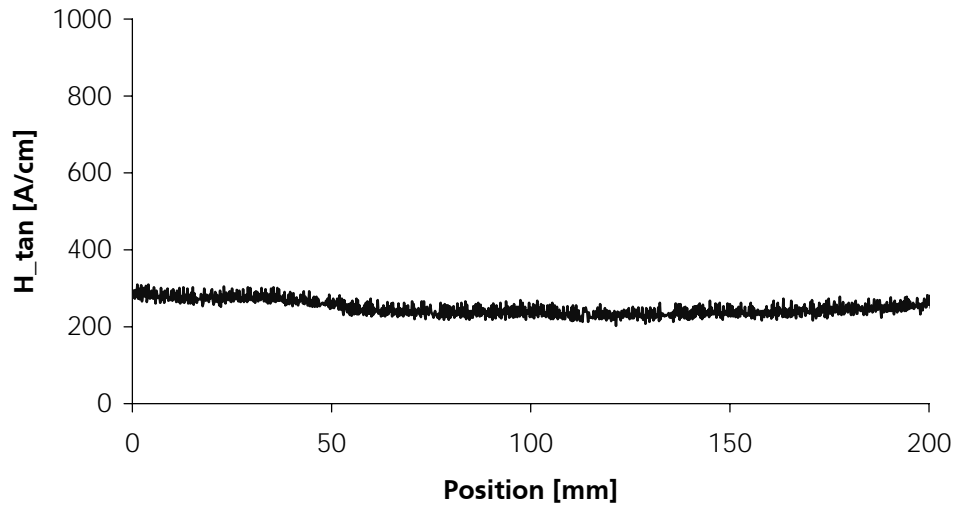


Abbildung 12.61 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

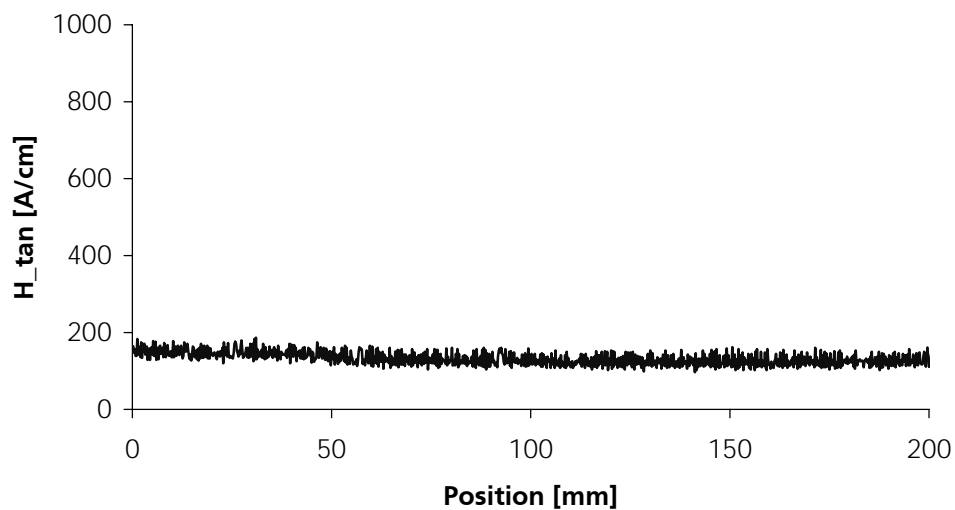


Abbildung 12.62 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)

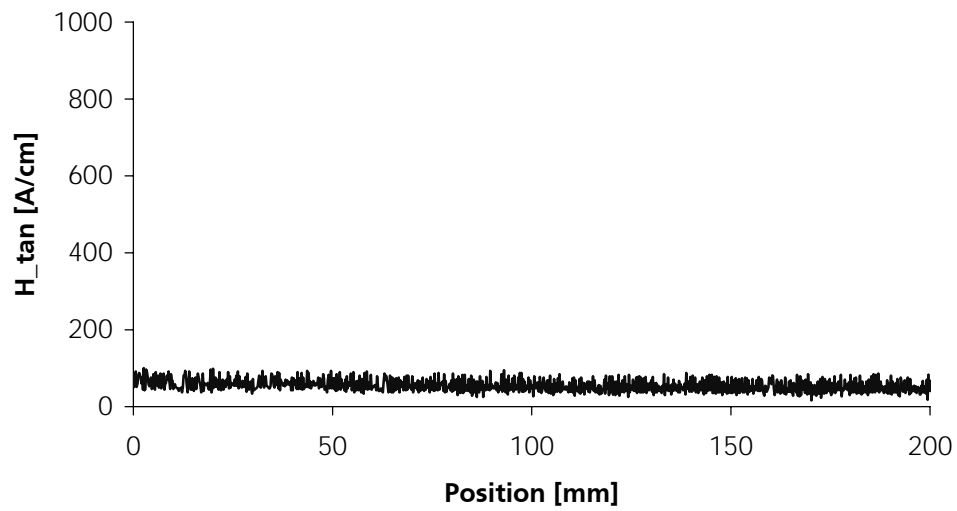


Abbildung 12.63 Horizontalfeldstärke entlang Testkörper TK 20-05 (nominelle Wanddicke 20 mm, mit Flachbodenbohrungen, 10, 15 und 30 mm Durchmesser, 0,5 mm tief)