

Kompakte Induktionsspulen als berührungslose elektromagnetische Ultraschallwandler

**Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Duisburg-Essen**

**zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften**

genehmigte Dissertation

von

Kai Rieger

aus

Berlin

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni,

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dirk Rueter

Tag der mündlichen Prüfung:

12.01.2023

Kompakte Induktionsspulen als berührungslose elektromagnetische Ultraschallwandler

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
vorgelegte Dissertation

von

Kai Rieger, M.Sc.

geboren am 06.11.1991 in Berlin

Datum der Einreichung: 11.05.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 12.01.2023

Gutachter und Betreuer der Promotion:

Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni

Fachgebiet Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE),
Universität Duisburg-Essen

Gutachter und Betreuer der Promotion:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Rueter

Institut für Mess- und Sensortechnik (MST),
Hochschule Ruhr West

Abstract

Compact induction coils as non-contact electromagnetic ultrasound transducers

In this thesis, compact induction coils are investigated as non-contact electromagnetic acoustic transducers (EMATs) without added magnets. In comparison, classic commercially available EMATs rely on the use of bulky permanent magnets or separate electromagnets. The advantages of EMATs without additional magnets are higher magnetic flux densities locally at the point of operation, no interfering attraction of ferromagnetic foreign objects, and significantly smaller sensor heads, the latter of which is an important prerequisite for the fabrication of compact EMAT phased arrays.

The realization of such EMATs is challenging because the electronics for ultrasound generation must handle voltages and currents in the kV and kA range. Due to the generally low efficiency of EMATs, signals in the lower μV range must be detected during ultrasound reception. At the same time, there must be no interference from pulse-like kA currents, and the relatively small EMAT inductors that serve as sensor heads must withstand frequent kA impulses.

The magnetic and acoustic fields for EMATs without added magnets were modeled. As a demonstration scenario, a 3D localization of an inhomogeneity in a liquid-filled thick-walled metal container without mechanical contact with the container (1-mm air gap) was successfully performed. Furthermore, a non-contact edge scanning of a ferromagnetic steel plate with unidirectional Lamb waves is presented. The Lamb waves are transmitted and received unidirectionally, with controlled interference effects. The compact design of the phase-accurate dual EMAT confirms the feasibility of phased arrays.

Moreover, ultrasound reception with an EMAT on a ferromagnetic test specimen without active magnetization (bias magnetic field) is demonstrated. Thus, the issue with the time-limited (μs -range) magnetic bias field will be solved, allowing for significantly longer (ms- to s-range) reception windows. Without active magnetization, problems such as the occurrence of Barkhausen noise or signal interference caused by switching diodes to protect against the reverse polarity of the electrolytic capacitor banks are also omitted. As more degrees of freedom are created, novel EMAT concepts that use flat coils and ferrite backplates with high relative permeability numbers can be designed.

Kurzfassung

Kompakte Induktionsspulen als berührungslose elektromagnetische Ultraschallwandler

In dieser Arbeit werden kompakte Induktionsspulen als berührungslose elektromagnetische Ultraschallwandler (EMATs) ohne zusätzliche Magnete untersucht. Im Vergleich dazu sind klassische, kommerziell verfügbare EMATs auf die Verwendung von voluminösen Permanentmagneten oder separaten Elektromagneten angewiesen. Die Vorteile der EMATs ohne zusätzliche Magnete sind höhere magnetische Flussdichten lokal am Wirkungsort, keine störende Anziehung von ferromagnetischen Fremdobjekten und deutlich kleinere Sensorköpfe, was eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung von kompakten EMAT-Phased-Arrays ist.

Die Umsetzung solcher EMATs stellt eine Herausforderung dar, weil die Elektronik für die Ultraschallerzeugung mit Spannungen und Strömen im kV- und kA-Bereich umgehen muss. Aufgrund des bei EMATs generell geringen Wirkungsgrads müssen beim Ultraschallempfang Signale im unteren μV -Bereich detektiert werden. Gleichzeitig dürfen keine Störungen durch die impulsartigen kA-Ströme entstehen und die relativ kleinen EMAT-Induktoren, die als Sensorköpfe dienen, müssen den oft wiederholten kA-Impulsen standhalten.

Für die Auslegung von EMATs ohne zusätzliche Magnete werden Modellbildungen für die Magnetfeld- und Schallfeldberechnung gezeigt. Als Demonstrationsszenario wird eine 3D-Lokalisierung einer Inhomogenität im Inneren eines mit Flüssigkeit gefüllten dickwandigen Metallbehälters ohne mechanischen Kontakt zum Behälter (1 mm Luftspalt) erfolgreich durchgeführt. Weiterhin wird eine berührungslose Kantenabstastung einer ferromagnetischen Stahlplatte mit unidirektionalen Lamb-Wellen präsentiert. Die Lamb-Wellen werden mit kontrollierten Interferenzeffekten unidirektional ausgesendet und empfangen. Der kompakte Aufbau des phasengenauen Doppel-EMATs bestätigt die Machbarkeit von Phased-Arrays.

Des Weiteren wird gezeigt, wie der Ultraschallempfang mit einem EMAT auf einem ferromagnetischen Prüfkörper ohne eine aktive Magnetisierung (Bias-Magnetfeld) möglich ist. Somit wird die Problematik des zeitlich begrenzten (μs -Bereich) Bias-Magnetfeldes gelöst, wodurch sich deutlich längere (ms- bis s-Bereich) Empfangszeitfenster realisieren lassen. Ohne die Verwendung einer aktiven Magnetisierung entfallen auch Probleme wie das Auftreten von Barkhausenrauschen oder Signalstörungen durch Schaltvorgänge von Dioden zum Schutz vor Polaritätsumkehr der Elektrolytkondensatorbänke. Es entstehen mehr Freiheitsgrade, wodurch neuartige EMAT-Konzepte vorstellbar sind, die flächige Induktoren und Ferritrückplatten mit hohen relativen Permeabilitätszahlen verwenden.

Vorwort

Die vorgelegte Dissertation wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Hochschule Ruhr West durchgeführt und als externe Promotion an der Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Fachgebiet für Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE) vorgelegt. Finanziert wurde das Forschungsprojekt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)), die Förderkennziffer lautet: RU 2120/4-1.

Für die technische Umsetzung des Forschungsprojektes konnte ein gut ausgestatteter Laborarbeitsplatz von der Hochschule Ruhr West genutzt werden. Des Weiteren wurden notwendige Laborgeräte wie ein Hochspannungslabornetzteil sowie diverse Messgeräte bereitgestellt.

Betreut wurde die Promotion von Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni von der Universität Duisburg-Essen und Prof. Dr.-Ing. Dirk Rüter von der Hochschule Ruhr West. Das DFG-Projekt basiert auf Vorarbeiten von Prof. Dr.-Ing. Dirk Rüter.

Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Betreuern und Gutachtern dieser Dissertation Herrn Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni (Universität Duisburg-Essen) und Herrn Prof. Dr. Dirk Rüter (Hochschule Ruhr West), die es mir ermöglicht haben, im Rahmen einer kooperativen Promotion diese Dissertation durchzuführen. Vielen Dank für die gute Betreuung dieser Arbeit. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Prof. Dr. Dirk Rüter auf dessen Initiative ich diese Arbeit beginnen konnte. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dirk Rüter für die vielen fachlichen Gespräche bedanken.

Ich möchte mich bei der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni an der Universität Duisburg-Essen für die vielen thematischen Diskussionen und hilfreichen Verbesserungsvorschläge im Rahmen eines wöchentlichen PhD-Meetings bedanken.

Auch gilt mein Dank der Arbeitsgruppe am Institut Mess- und Sensortechnik der Hochschule Ruhr West für die Unterstützung meiner Arbeit und die herzliche Aufnahme.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung des Forschungsprojekts, wodurch diese Dissertation möglich wurde.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, die mich immer ermutigt und unterstützt haben und mir somit die Durchführung dieser Dissertation ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Stand der Technik	5
1.4	Kapitelübersicht	6
1.5	Publikationen aus dieser Arbeit	7
2	Grundlagen von EMATs	8
2.1	Funktionsmechanismen	8
2.2	Magnetisierung	10
2.3	Kräfte	11
2.3.1	Lorenzkraft	13
2.3.2	Magnetisierungskraft	15
2.3.3	Magnetostriktion	16
2.4	Unterschiedliche EMAT-Konfigurationen	17
2.4.1	Longitudinaler Ultraschall	19
2.4.2	Lamb-Wellen	20
2.4.3	Rayleigh-Wellen	23
2.4.4	Scherwellen	23
2.5	Barkhausenrauschen	25
2.6	EMAT bestehend aus nur einem Induktor	25
3	Modellbildung und Rechnung	30
3.1	Magnetfelder	30
3.1.1	Felder und Kopplung	31
3.1.2	Stromimpuls	33
3.1.3	Methode nach Dodd und Deeds	34
3.1.4	FEM-Modell	37
3.2	Schallfelder	38
3.2.1	Unidirektionale Lamb-Wellen	38
3.2.2	Lamb-Wellenfelder	42
3.2.3	Ultraschallübertragungsverhalten von Metallwänden	44
3.2.4	Modellierung von projizierten Ultraschallfeldern	49
3.3	Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld	51
4	Experimentelle Aufbauten	54
4.1	Treiberschaltung und Zielsetzung	54
4.2	Leistungs- und Signalelektronik	55

4.3	Schaltungssimulation	58
4.4	Induktoren	61
4.5	2D-Schallfeldcharakterisierung	62
4.6	Berührungslose 3D-Echolokalisierung in einem dickwandigen Metalltank	65
4.7	Phasengenauer Doppel-EMAT für Lamb-Wellen	68
4.8	Aufbau Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld	69
5	Experimentelle Ergebnisse und Auswertung	72
5.1	Allgemeine Ergebnisse	72
5.1.1	Messung von Barkhausenrauschen	72
5.1.2	Variation des Empfangszeitpunkts	73
5.1.3	Variation des MHz-Bursts und des Bias-Magnetfeldes	75
5.2	Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall	76
5.2.1	Puls-Echo-Betrieb	76
5.2.2	2D-Schallfeldvermessung	78
5.2.3	3D-Lokalisierung	80
5.3	Lamb-Wellen in Metallplatten	83
5.3.1	Unidirektionale Schallaussendung	83
5.3.2	Unidirektionaler Echo-Empfang	85
5.3.3	Kombinationen	86
5.3.4	Schallfeld	88
5.3.5	Automatische Kantenabtastung	88
5.4	Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld	90
6	Zusammenfassung	94
7	Ausblick	99
	Literaturverzeichnis	101
	Publikationen aus dieser Arbeit	110
	Abbildungsverzeichnis	111
	Tabellenverzeichnis	118
	Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	119
	Schaltpläne und Platinen	121

1 Einleitung

Innerhalb der Einleitung wird zunächst die Motivation dieser Arbeit und dann die Zielsetzung vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung des Stands der Technik im Hinblick auf kommerziell verfügbare EMATs. Im letzten Teil dieses Kapitels wird eine kurze Übersicht über die weiteren Kapitel in dieser Arbeit gegeben.

1.1 Motivation

Elektromagnetische Akustikwandler (im englischen „**E**lectro**M**agnetic **A**coustic **T**ransducer“ (EMAT)) eignen sich für die zerstörungsfreie und insbesondere berührungslose Prüfung von Metallteilen in industriellen Umgebungen [1]. Mit EMATs lassen sich Strukturen und Defekte von Bauteilen detektieren und untersuchen. Gründe für berührungslose Prüfungen (kein mechanischer Kontakt) können sein, dass das Prüfobjekt verpackt oder beschichtet/korrodiert ist, sich bewegt oder eine sehr hohe Oberflächentemperatur besitzt. Die Kopplung zwischen EMAT und Prüfobjekt findet via Magnetfeld statt, weswegen die Oberfläche des Prüfobjekts eine hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen oder ferromagnetisch sein muss. Der mit Ultraschall zu untersuchende Bereich hingegen muss diese Eigenschaften nicht besitzen. Zum Beispiel können auch Flüssigkeitsvolumen, die sich in Metallbehältern befinden, untersucht werden. Ein solches Szenario ist in der Industrie interessant, da dort verschiedenste Arten an Flüssigkeiten für gewöhnlich in Metallrohren oder -behältern transportiert oder gelagert werden. Eine Ultraschalluntersuchung des Flüssigkeitsvolumens von außen kann notwendig sein, um innere Strukturen zu erkennen oder zu lokalisieren, wie z. B. Sonden, Verstrebungen, kleinere Rohre, Kabel, Gasblasen oder unerwünschte Fremdkörper. Allerdings sind die Oberflächen der Metallgehäuse oft beschichtet oder uneben, wodurch ein direkter mechanischer Kontakt für die Ultraschallprüfung mittels piezoelektrischer Elemente [2, 3] erschwert wird. Der große Vorteil von EMATs gegenüber den gegenwertig weit verbreiteten Piezoelementen ist, dass die Ultraschallübertragung von EMATs keinen mechanischen Kontakt mit dem Prüfobjekt erfordert.

Neben EMATs gibt es mehrere Methoden zur berührungslosen Prüfung (ZfP) für Metallobjekte, z. B. die Wirbelstromprüfung (ECT) [4, 5], die Röntgenprüfung [6] und die magnetische Streuflussprüfung (MFL) [7, 8]. Röntgenuntersuchungen sind jedoch aufgrund des Strahlenschutzes und baulichen Einschränkungen (Zugänglichkeit des zu untersuchenden Bereichs) problematisch [7]. ECT- und MFL-Untersuchungen haben den Nachteil, dass sich der Sensor in der Nähe des zu untersuchenden Bereichs befinden muss. Ultraschall hingegen kann große Entfernungen im Material zurücklegen, so dass auch entfernte und sonst unzugängliche Bereiche geprüft werden können.

In dieser Arbeit wird Ultraschall im Frequenzbereich von 500 kHz bis 2 MHz un-

tersucht. In der Literatur gibt es unterschiedliche EMAT-Konzepte für verschiedene Ultraschallmodalitäten, z. B. longitudinale Ultraschallwellen [9, 10], Scherwellen [11, 12, 13], Lamb-Wellen [14, 15, 16, 17] und Rayleigh-Wellen [18, 19, 20], die Spezialfälle von Lamb-Wellen sind. Welche Ultraschallmodalität erzeugt wird, hängt vom EMAT-Konzept und somit vom Aufbau und Betrieb sowie vom Metalltyp ab.

Die klassischen EMATs bestehen aus einem oder mehreren Permanentmagneten und einem Induktor. Teilweise werden auch separate Elektromagnete anstatt der Permanentmagnete verwendet. Während die Permanentmagnete ein statisches Magnetfeld (Bias-Magnetfeld) erzeugen, fließt durch den Induktor ein sich zeitlich ändernder Strom, der ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld generiert. Zusammen erzeugen die beiden Magnetfelder Ultraschall im Prüfkörper. Die physikalischen Wirkmechanismen für ferromagnetische Metalle sind die Lorentzkraft, die Magnetisierungskraft und Magnetostraktion. Bei welcher der drei Kräfte es sich um die dominante Kraft handelt, hängt vom Material und dem EMAT-Konzept bzw. dem Arbeitspunkt ab.

Eine generelle Problematik bei EMATs ist der geringe Schallpegel aufgrund des geringen Wirkungsgrads [21]. Die gesamte Signalkette in dieser Arbeit weist eine geschätzte Dämpfung von -160 dB von der Emission im MHz-Bereich (1 kV) bis zur Ultraschall-echodetektion im Induktor (10 μ V) auf. Der Grund liegt in der Funktionsweise, da immer eine erhebliche Fehlanpassung zwischen dem EMAT mit einem niedrigen Verhältnis zwischen Schalldrücken und möglichen Schallschnellen und der hohen akustischen Impedanz des Metallkörpers vorliegt [22].

Ein Nachteil der klassischen EMATs gegenüber EMATs ohne zusätzliche Magnete sind die voluminösen Sensorköpfe, da Permanent- oder Elektromagnete für den Betrieb notwendig sind. Problematisch bei der Verwendung von Permanentmagneten ist zusätzlich, dass ferromagnetische Teile (wie Eisenspäne oder das Prüfobjekt) anhaften und es somit in der Praxis (z. B. bei bewegten Prüfkörpern) zu Beschädigung oder Zerstörung von EMAT und/oder Prüfkörper kommen kann. Außerdem ist die maximale magnetische Flussdichte des Bias-Magnetfeldes durch das Material der Permanentmagneten limitiert.

Trotz des hohen Potenzials von EMATs ohne zusätzliche Magnete existieren verhältnismäßig nur wenige publizierte Forschungsarbeiten im Vergleich zu den etablierten klassischen EMATs mit Permanentmagneten. Daher liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Erforschung und Weiterentwicklung von EMATs ohne zusätzliche Magnete. In der Literatur werden diese EMATs auch als „coils-only EMATs“ bezeichnet. Coils-only EMATs bestehen nur aus einem Induktor, weshalb sich deutlich kleinere Sensorköpfe herstellen lassen. Auch entfällt aufgrund der Arbeitsweise das Problem der permanenten magnetischen Anziehung von ferromagnetischen Fremdkörpern. Des Weiteren gibt es keine Limitierung der magnetischen Flussdichte durch einen Permanentmagneten, da die Flussdichte durch die Stromstärke und Geometrie des EMAT-Induktors und des Prüfzenarios bestimmt wird. Die magnetische Flussdichte im Eisen kann sogar größer sein als die Flussdichte im Außenraum um den Erreger, was an der Kompression in den dünnen Oberflächenschichten im Eisenmaterial liegt und bei statischen Feldern, erzeugt von Permanentmagneten, nicht der Fall ist. Ohne zusätzliche Magnete bestehen mehr Freiheitsgrade bei der Konstruktion der EMATs.

Innerhalb dieser Arbeit werden zwei Referenzanwendungen vorgestellt, welche die Ein-

satzmöglichkeiten aufzeigen sollen. Eine Referenzanwendung ist die berührungslose Untersuchung einer nicht zugänglichen Kante einer ferromagnetischen Stahlplatte mittels Lamb-Wellen, die mit kontrollierten Interferenzeffekten unidirektional ausgesendet und empfangen werden. Dabei wird ein Doppel-EMAT im Puls-Echo-Betrieb mittig über der Stahlplatte schrittweise parallel zur Kante bewegt. Bei jedem Schritt wird der Abstand zur Kante durch eine Ultraschalllaufzeitmessung ermittelt. Es besteht kein mechanischer Kontakt zwischen EMAT-Induktor und Metallplattenoberfläche – der Luftspalt beträgt 1 mm bei der Messung. Möglichkeiten warum die Metalloberfläche nicht direkt zugänglich ist, können in einer realen Anwendung Verpackungsfolie, Rost, abblätternde Farbe oder eine hohe Temperatur der Stahlplatte sein. Ein Abstand von 1 mm ist dann ausreichend, um den EMAT-Induktor zu kühlen oder ein Hindernis wie eine Verpackungsfolie zu überwinden.

Die andere Referenzanwendung ist die 3D-Lokalisierung einer Kugel mit 10 mm Durchmesser mittels longitudinalen Ultraschalls in einem metallischen Flüssigkeitsbehälter. Die Schwierigkeit liegt in der schlechten Kopplung zwischen dicker Metallwand und Flüssigkeit, die für Ultraschall im Puls-Echo-Betrieb zwei Mal zum Tragen kommt. Auch ist sicherzustellen, dass das Array aus EMAT-Induktoren nicht untereinander durch sich im Metall lateral ausbreitende Ultraschallwellen koppelt. Überkoppelnde Schallsignale zwischen den EMAT-Induktoren haben die gleiche Frequenz wie die erwünschten Ultraschallwellen, wodurch es zu Überlagerungen der Signale von Überkoppelungen und empfangenen Ultraschallwellen kommen kann. Die Folge sind unbrauchbare Empfangssignale und Fehlinterpretationen.

Um diese Referenzanwendungen mit EMATs ohne zusätzliche Magnete zu lösen, muss ein breites Wissen und Verständnis über die magneto-mechanischen Wirkmechanismen aufgebaut werden. Daher beschäftigt sich diese Arbeit ausgiebiger mit dem Kopplungsverhalten zwischen EMAT und Metalloberfläche und der daraus resultierenden Ultraschallausbreitung. Die Ultraschallausbreitung im Material bleibt jedoch konventionell, d. h. ohne die Vertiefung im Ultraschall. Auch wird die notwendige Leistungs- und Signalelektronik entwickelt und entsprechende EMAT-Induktoren ausgelegt.

Bei EMATs ohne zusätzliche Magnete muss ein starker Strom zur Erzeugung des Bias-Magnetfeldes für die Dauer fließen, in der der Empfang von Ultraschall möglich sein soll (Empfangszeitfenster). Das ist jedoch auch ein Nachteil, da das Empfangszeitfenster somit zeitlich sehr limitiert ist. Der Grund liegt in den hohen Strömen, die zur Erzeugung eines ausreichend starken Bias-Magnetfeldes notwendig sind und zeitlich nur kurz fließen dürfen. Andernfalls kommt es zur thermischen Zerstörung des EMATs. In dieser Arbeit wird eine vielversprechende Lösung für dieses Problem bei ferromagnetischen Prüfkörpern vorgestellt. Dafür wird der Remanenzeffekt genutzt, der bereits in der residual MFL-Methode bei ferromagnetischen Metallen bekannt, jedoch neu im Bereich der EMATs ist. Somit lassen sich neue kompakte EMAT-Induktoren ohne zusätzliche Magnete bauen, die kein aktives externes Bias-Magnetfeld für den Ultraschallempfang brauchen. Stattdessen wird mit einem kurzen gepulsten Strom im EMAT-Induktor gearbeitet, wodurch sich ein langes Empfangszeitfenster ergibt. Dafür verantwortlich ist ein unerwartet langanhaltender magnetischer Abdruck im Inneren des Metalls, welcher bei weichmagnetischen Eisenwerkstoffen normalerweise nicht erwartet wird. Dieser Effekt trägt zu neuen Anwendungen von EMATs bei, die nur aus kompakten Induktoren ohne zusätzliche Magnete bestehen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit sind die Erforschung und Weiterentwicklung von berührungslosen Ultraschallwandlern in kompakter Bauart und somit ohne zusätzliche Magnete. Es sollen deutlich kleinere Sensorköpfe erreicht, die störende Anziehung von ferromagnetischen Fremdobjekten behoben und lokal höhere magnetische Flussdichten ermöglicht werden. Die Arbeit lässt sich in vier Bearbeitungsfelder einteilen:

1. Konzeptionierung und Inbetriebnahme einer geeigneten EMAT-Treiber- und Empfangsschaltung. Die Problematik dabei liegt in der Isolation zwischen den sehr hohen Strömen aus der Treiberschaltung im kA-Bereich und dem verhältnismäßig geringen Messbereich der Empfängerschaltung im μV -Bereich, die sich zeitlich überschneiden. Außerdem muss sich der Empfänger innerhalb von wenigen μs nach einem MHz-Sendeimpuls (kV-Bereich) von dem Impuls erholen.
2. Generierung und Empfang von longitudinalem Ultraschall mittels EMAT-Arrays ohne zusätzliche Magnete. Als Referenzanwendung soll ein Fremdobjekt innerhalb des Metallbehälters detektiert und anschließend lokalisiert werden. Zwischen dem EMAT und der Metalloberfläche des Behälters soll kein mechanischer Kontakt (Abstand ≥ 1 mm) bestehen. Hierbei stellt der hoch reflektive akustische Übergang zwischen Metallwand und Flüssigkeit eine Herausforderung dar.
3. Untersuchung von EMATs ohne zusätzliche Magnete, welche in der Lage sind, Ultraschall Lamb-Wellen unidirektional gerichtet in einer Metallplatte (Zielmetall: Stahl, Eisen) zu erzeugen und zu empfangen. Als Referenzanwendung dient eine Kantenabtastung einer 1 mm dicken ferromagnetischen Stahlplatte. Auch hier soll kein mechanischer Kontakt zwischen EMAT und Oberfläche (Abstand ≥ 1 mm) bestehen. Des Weiteren muss der Ultraschall gerichtet ausgesendet und empfangen werden.
4. Analyse der permanenten Magnetisierung von weichmagnetischen Oberflächen, um Ultraschall mit einem EMAT zu empfangen, ohne ein aktives externes Bias-Magnetfeld zu nutzen. Bei diesen EMATs wird ein aus der residual MFL bekannter Effekt ausgenutzt, um Ultraschall zu empfangen.

Um die vier Bearbeitungsfelder zu erfüllen, müssen Modelle für die Kopplung via Magnetfeld zwischen EMAT und Metalloberfläche erstellt werden. Darüber hinaus ist es erforderlich, Modelle zum Ultraschallfeldbild zu erarbeiten, um Auswirkungen des EMAT-Konzepts auf das Schallfeld aufzuzeigen. Der Fokus der Arbeit liegt jedoch auf der Kopplung des EMATs mit der Metalloberfläche und somit auf dem Magnetfeldbild. Abschließend müssen experimentelle Aufbauten konzeptioniert, gebaut und in Betrieb

genommen werden, mit deren Messergebnissen die Modelle verifiziert werden sollen. Da es keine kommerziell zu erwerbende EMAT-Treiberschaltung gibt, die die hier gestellten Anforderungen erfüllt, soll die Leistungs- und Signalelektronik eigenständig entwickelt werden. Die hier entwickelte EMAT-Treiberschaltung baut auf ein Konzept auf, das von Rüter [23] vorgestellt wurde.

1.3 Stand der Technik

In den späten 1970er Jahren begann die EMAT-Forschung sich rasant zu entwickeln [21], wodurch es mittlerweile viele Publikationen zu EMATs gibt. Im kommerziellen Bereich gibt es EMATs und Dienstleistungen mit EMATs von diversen Unternehmen zu erwerben.

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über dieser Unternehmen/Firmen gegeben, wobei als Informationsquelle ausschließlich deren Internetseiten verwendet werden. Bei den in dieser Recherche gefundenen Unternehmen handelt es sich um die Unternehmen: ALS Limited [24], Applus Services S.A. (Applus+) [25], Arora Technologies (P) Limited [26], BFI Betriebstechnik GmbH [27], Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG [28], Innerspec Technologies Inc. [29], Nordinkraft AG [30], Olympus Corporation [31], OPTIMESS Engineering GmbH [32], PIPECARE Group [33], ROSEN Group [34], Sonemat Ltd. [35], STARMANS electronics S.R.O. [36] und T.D. Williamson Inc. [37]. Das in Australien ansässige Unternehmen ALS hat auf seiner Website unter ZfP-Methoden auch EMATs aufgelistet. Als Beispielanwendungen für EMATs werden in der Industrie die Probleme mit der Erkennung von Korrosion unter Rohrleitungsstützen und von Lochfraßkorrosion genannt [24]. Aus der ALS Website geht nicht hervor, ob ALS neben Inspektionen mit EMATs auch selbst EMATs entwickelt oder diese zukaufte. Das spanische Unternehmen Applus+ bietet als Dienstleistung Inspektionen mit EMATs bei „extremen“ Temperaturen an [25]. Das indische Unternehmen Arora, welches auf die Herstellung und den Vertrieb von ZfP-Produkten und Zubehör spezialisiert ist, zeigt auf der eigenen Website die EMAT-Produkte von Innerspec [26]. Das deutsche Messtechnikunternehmen BFI hat das Ultraschallprüfsystem „FIDUS“ (Fehleridentifikation an Stäben und Drähten mittels Ultraschalls) entwickelt [27]. „FIDUS“ dient zur Stabprüfung und basiert auf der EMAT-Technologie [27]. Die in Deutschland ansässige Foerster Group, listet auf ihrer Website unter „Ultraschallprüfung“ auch EMATs für die Wanddickenmessung von ferromagnetischen nahtlosen Stahlrohren mit einer Genauigkeit von $\pm 50 \mu\text{m}$ auf [28].

Das Unternehmen Innerspec mit Hauptsitz in der USA und Spanien bezeichnet sich als Pionier bei der kommerziellen Anwendung von EMATs seit den 90er Jahren [38]. Auf der Website werden bei der Beschreibung von EMATs diverse Anwendungen wie z.B. Schweißnahtprüfung, Fehlererkennung, Korrosions- und Erosionsmessungen und Dickenmessungen aufgezählt [29]. Die in Deutschland ansässige Nordinkraft bietet verschiedene ZfP-Systeme an z.B. EMAT-Wanddickenmessung, Ultraschallprüfungen von Volumenkörpern und Kanten bei Platten, Rohren, Schienen und Stangen [30]. Es wird jedoch nicht beschrieben, mit welcher Technologie jeweils gemessen wird.

Das Unternehmen Olympus bietet in seiner Produktpalette auch EMATs an. Als Anwendung wird die Wanddickenmessung von Dampfkesselrohren aufgeführt [31]. Das Unternehmen OPTIMESS verkauft verschiedene EMAT-Ultraschallprüfgeräte [32]. Als verwendbare Ultraschallmodalitäten werden auf der OPTIMES Website Oberflächenwellen, Lamb-Wellen und Scherwellen aufgezählt. Als Anwendungen werden Dickenmessung, Rissprüfung, Schweißnahtprüfung, Oberflächenprüfung und Korrosionsprüfung genannt [39].

Die PIPECARE Group mit Hauptsitz in der Schweiz bietet ein EMAT-System zur Inspektion von Pipelines mit einer 360-Grad-Prüfung und 100-prozentiger Leitungsabdeckung an [33]. Auf der Website der ROSEN Group wird unter der Kategorie „Technologien“ auch das Prinzip des EMATs vorgestellt [34]. Als Anwendungsbeispiele werden die Detektion von Rissen, die Erkennung von Beschichtungsablösungen, die Identifizierung verschiedener Beschichtungsarten und die Wanddickenmessung aufgelistet [34].

Das britische Unternehmen Sonemat, welches 2005 als Spin-Out der Universität Warwick entstanden ist [40], bezeichnet sich als Experte im Bereich der EMATs [35]. Folgende Anwendungen werden genannt: Schweißnahtprüfung, Dickenmessung, Spannungs- und Texturmessungen, Hochtemperaturprüfung, Scannende Inspektionen, Prüfung von Rohrleitungen, Ultraschall mit geführten Wellen, Dünnschicht- und Füllstandsmessungen [35].

Das tschechische Unternehmen STARMANS verkauft auf seiner Website einen EMAT zur Dickenmessung im Bereich von 1 bis 150 mm [36]. Das Unternehmen T.D. Williamson stellt auf seiner Website den „SpirALL“ EMAT zur Inline-Inspektion von Pipelines vor [37]. Mit dem „SpirALL“ EMAT lassen sich Defekte erkennen wie Anomalien in der Beschichtung, Schweißnahtfehler und Risse durch Korrosion oder in Folge von Materialermüdungen [37].

Insgesamt lässt sich feststellen, dass es einige Unternehmen weltweit gibt, die die EMAT-Technologie anbieten und benutzen. Bis zu welchem Grad die EMAT-Technologie jeweils zum Einsatz kommt, lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht feststellen. Auch liegen keine Daten über die Kunden der Unternehmen vor. Auffällig ist jedoch, dass in der Industrie nur EMATs mit zusätzlichen Magneten (entweder Permanent- oder Elektromagneten) verwendet werden, wodurch die EMATs die typischen Nachteile wie die limitierte magnetische Flussdichte, die voluminösen Sensorköpfe und das störende Anhaften von ferromagnetischen Teilen (Einklemmung/Zerkratzen der Oberfläche) besitzen. Somit ist die Erforschung und Weiterentwicklung von EMATs in kompakter Bauart und ohne zusätzliche Magnete von Bedeutung.

1.4 Kapitelübersicht

In Kapitel 2 dieser Arbeit werden die Grundlagen von EMATs vorgestellt. Dabei wird besonders auf die unterschiedlichen auftretenden Kräfte eingegangen. Es werden verschiedene EMAT-Konfigurationen für unterschiedliche Ultraschallarten gezeigt. Barkhausenrauschen (diskrete Magnetisierungssprünge im Material) und EMATs bestehend aus einem einzelnen Induktor sind ein weiteres Thema im Kapitel 2.

Im darauffolgenden Kapitel 3 werden die relevanten Modelle und Rechnungen zum Verständnis der Magnetfelder und der daraus resultierenden Schallfelder erläutert. Bei den Schallfeldern wird auf die Berechnung von unidirektionalen Lamb-Wellenfeldern eingegangen. Ein weiteres Thema ist die Untersuchung der Ultraschallübertragung durch die dicken Metallwände eines mit Flüssigkeit gefüllten Metallbehälters und die daraus resultierenden Schallfelder in der Flüssigkeit. Zudem findet in Kapitel 3 eine Erläuterung der Grundlagen für den Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld statt. In Kapitel 4 werden die experimentellen Aufbauten präsentiert. Zuerst werden die EMAT-Treiber- und Empfangsschaltungen präsentiert, dabei wird das Konzept vorgestellt und an zwei Schaltungssimulationen erklärt. Weiterhin werden die verwendeten EMAT-Induktoren vorgestellt. Neben den Aufbauten werden auch die Messbedingungen für longitudinalen Ultraschall an einem flüssigkeitsgefüllten Metallbehälter, mit Lamb-Wellen in einer Metallplatte und der Messung des Ultraschallempfangs ohne aktives Bias-Magnetfeld erläutert.

In Kapitel 5 werden die Messergebnisse vorgestellt und diskutiert, die mit Hilfe der Versuchsaufbauten in Kapitel 4 generiert wurden.

Kapitel 6 beinhaltet die Zusammenfassung der vorangegangenen Ergebnisse und in Kapitel 7 wird ein Ausblick für anschließende Forschungsprojekte gegeben.

Da wesentliche Teile dieser Arbeit bereits einschlägig veröffentlicht wurden (siehe 1.5), wird ein Großteil der Inhalte aus den eigenen Veröffentlichungen innerhalb dieser Arbeit wiedergegeben. Alle Abbildungen aus bisherigen Veröffentlichungen sind mit Quellenangaben gekennzeichnet.

1.5 Publikationen aus dieser Arbeit

1. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “A compact and powerful EMAT design for contactless detection of inhomogeneities inside the liquid volume of metallic tanks,” *TM. Tech. Mess.*, vol. 87, no. 5, pp. 349–359, **2020**, doi: 10.1515/teme-2019-0124.
2. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Examination of the liquid volume inside metal tanks using noncontact EMATs from outside,” *IEEE Trans Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 68, no. 4, pp. 1314–1327, **2021**, doi: 10.1109/TUFFC.2020.3022946.
3. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT,” *NDT E Int.*, vol. 122, p. 102492, **2021**, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102492.
4. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs,” *NDT E Int.*, vol. 125, p. 102569, **2022**, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102569.

2 Grundlagen von EMATs

In diesem Kapitel werden die Funktionsmechanismen von EMATs in Hinsicht auf die auftretenden Kräfte und daraus resultierenden Schallmodalitäten erläutert. Dafür werden verschiedene EMAT-Konfigurationen für unterschiedliche Ultraschallmodalitäten vorgestellt. Ein eigenes Unterkapitel wird den EMATs ohne zusätzliche Magneten gewidmet, auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt. Auf das Hystereseverhalten von ferromagnetischen Prüfkörpern und das mögliche Auftreten von Barkhausenrauschen wird eingegangen.

2.1 Funktionsmechanismen

Die Funktionsweise von klassischen EMATs wird in diesem Abschnitt an einem beispielhaften EMAT-Konzept (Abbildung 2.1) vorgestellt. Klassische EMATs bestehen aus einem oder mehreren Permanentmagneten und einem Induktor [41]. Alternativ zu Permanentmagneten kommen auch quasi-statische Elektromagneten zum Einsatz. Grundsätzlich verwenden EMATs zum Erzeugen von Ultraschall zwei unterschiedliche Magnetfelder. Ein sogenanntes Bias-Magnetfeld wird meistens mittels Permanentmagneten erzeugt, wodurch es sich um ein statisches Magnetfeld handelt. Zusätzlich wird ein hochfrequentes Magnetfeld mit Hilfe eines sich zeitlich ändernden Stromes im Induktor generiert. Zusammen erzeugen das Bias-Magnetfeld und das hochfrequente Magnetfeld hochfrequente Kräfte in der Metalloberfläche (berührungslose Ultraschallanregung). Je nach Material des Prüfkörpers geschieht dies mittels Lorentzkraft, Magnetisierungskraft oder Magnetostriktion. Ein Nachteil von EMATs ist die Limitierung auf Objekte, die zumindest eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen oder ferromagnetisch sind [41].

Für den Empfang ist beim klassischen EMAT ebenfalls ein Bias-Magnetfeld notwendig, da der zu empfangende Ultraschall im Prüfkörper zusammen mit dem Bias-Magnetfeld ein Spannungssignal im EMAT-Induktor induziert, welches dann wiederum detektiert wird [41]. Auch beim Empfang wirken die Effekte der Lorentzkraft, Magnetisierungskraft und Magnetostriktion. Die aus der Literatur bekannten EMATs arbeiten überwiegend mit der Lorentzkraft oder Magnetostriktion.

EMATs sind in der Lage verschiedene Ultraschallwellenmodalitäten zu erzeugen. Die EMAT-Induktorgeometrie und die Anordnung von Induktor und Permanentmagneten sind für die Ultraschallmodalität entscheidend. In Abbildung 2.1 ist eine schematische Darstellung von einem EMAT zum Erzeugen von longitudinalen Ultraschallwellen dargestellt. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte EMAT-Konfiguration und soll an dieser Stelle zur Verdeutlichung der EMAT-Funktionsweise dienen. Als Induktor wird ein geradliniger Stromleiter verwendet, der von einem sich zeitlich ändernden Strom

durchflossen wird, wodurch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt wird, das wiederum einen Wirbelstrom in die Metalloberfläche induziert. Der Wirbelstrom fließt mit der gleichen Frequenz in der Metalloberfläche wie der Strom im Induktor. Der Wirbelstrom ist jedoch gegenphasig (180°) zum Strom im Induktor mit einer kleinen zusätzlichen Phasenverschiebung, welche von den Materialeigenschaften des Metallobjekts abhängt. Einfachheitshalber wird in Abbildung 2.1 von einem nicht ferromagnetischen Metallobjekt (z.B. Kupfer oder Aluminium) ausgegangen, wodurch keine Magnetisierungskräfte und Magnetostriktion auftreten.

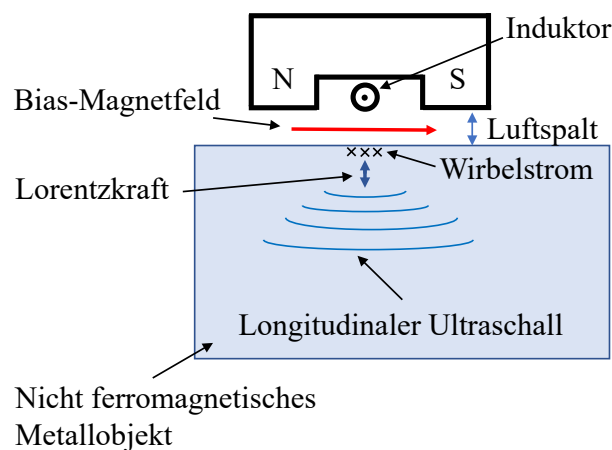


Abbildung 2.1: Schematische Funktionsweise eines EMATs basierend auf Lorentzkräften zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall.

Das Bias-Magnetfeld ist statisch und verläuft hier überwiegend parallel zur Metalloberfläche. Zur Erzeugung des Bias-Magnetfeldes könnte beispielsweise ein U-förmiger Permanentmagnet dienen. Die Bias-Magnetfeldlinien und die Wirbelströme sind orthogonal, wodurch die entstehenden Lorentzkräfte als Drücke senkrecht in der Oberfläche wirken. Die Lorentzkräfte erzeugen Schwingungen in derselben Frequenz wie der anregende Strom im Induktor, wodurch in der Schicht an der Metalloberfläche longitudinaler Ultraschall entsteht, welcher sich in die Tiefe des Materials hin ausbreitet.

Handelt es sich bei dem Metallobjekt um ein ferromagnetisches Metall, dann treten neben den Lorentzkräften auch Magnetostriktion und Magnetisierungskräfte auf. Als Induktorform werden typischerweise runde Flachspulen, mäander- oder rennbahnförmige Induktoren verwendet. Es existieren auch noch weitere Geometrien wie z.B. butterflyförmige Induktoren [42, 43]. In Abhängigkeit vom Einsatz wird die Induktorform gewählt. Es ist auch möglich Induktor-Arrays aus mehreren EMAT-Induktoren zu bilden.

Der Wirkungsgrad von EMATs ist aufgrund der schlechten Effizienz der elektroakustischen Kopplung via Magnetfeld allgemein gering. Der Grund liegt in der erheblichen Fehlanpassung zwischen EMAT (wenig Druck, viel Schnelle) und Metallen mit vergleichsweise hoher akustischer Impedanz [22].

Die Eindringtiefe von dynamischen Magnetfeldern in Metalle wird durch die Skintiefe beschrieben [44]:

Material	Frequenz [kHz]	Skintiefe [μm]
Aluminium	10	827
Aluminium	100	262
Aluminium	1.000	83
Eisen	10	47
Eisen	100	15
Eisen	1.000	5

Tabelle 2.1: Skintiefen für Eisen ($\sigma = 11,7 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1000$) und Aluminium ($\sigma = 37 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1$) bei verschiedenen Frequenzen.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (2.1)$$

Bei μ_0 handelt es sich um die magnetische Feldkonstante und μ_r ist die relative Permeabilitätskonstante. Die Skintiefe ist die frequenzabhängige Eindringtiefe von elektrischen und magnetischen Feldern, bei der sich die Amplitude der Felder auf $1/e$ ($\approx 37 \%$) verringert hat [44].

In der Tabelle 2.1 sind die Skintiefen für die Materialien Aluminium und Eisen bei unterschiedlichen Frequenzen angegeben. Die Tabelle soll verdeutlichen, wie gering die Eindringtiefe der Magnetfelder bei höheren Frequenzen ist. Im Gegensatz dazu liegt die Wellenlänge von Ultraschall bei 1 MHz in typischen Metallen je nach Ultraschallmodalität etwa zwischen 3-6 mm. Somit ist die Skintiefe bei 1 MHz bei Eisen und Aluminium so gering gegenüber der Wellenlänge, dass von einer Entstehung des Ultraschalls in einer dünnen Oberflächenschicht des Prüfobjekts ausgegangen werden kann.

2.2 Magnetisierung

Die Magnetisierung M beschreibt den magnetischen Zustand eines Materials.

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H} \quad (2.2)$$

Ferromagnetische Materialien sind Materialien mit einer relativen Permeabilitätskonstante μ_r deutlich größer als eins [44]. Die magnetische Flussdichte ergibt sich im Material zu [44]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\mu_r\vec{H} \quad (2.3)$$

In Abbildung 2.2 ist die typische Hystereseurve (B - H -Kennlinie) eines weichmagnetischen Metalls wie Eisen dargestellt. Zum Zeitpunkt 1 ist kein externes H -Feld vorhanden, das Material ist unmagnetisiert, somit ist auch das B -Feld gleich null.

Mit Erhöhung der magnetischen Feldstärke H steigt das B -Feld im Material zuerst steil und dann nur noch flach an (Steigung μ_0), bis das Material in magnetische Sättigung geht. Zum Zeitpunkt 2 ist das Material vollständig gesättigt. Wird das H -Feld reduziert, wird das B -Feld auch geringer, wie zum Zeitpunkt 3 dargestellt.

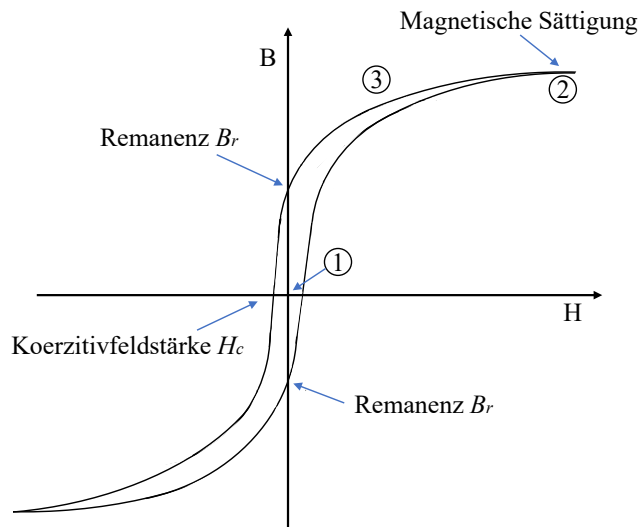


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der magnetischen Hysteresekurve eines weichmagnetischen Metalles wie Eisen oder Baustahl. Die Zahlen beziehen sich auf Abbildung 4.16. [45]

Die Remanenzflussdichte B_r ist die Flussdichte, die nach Abschalten des H -Feldes im Material erhalten bleibt [44]. Um B_r im Material zu neutralisieren, muss ein entgegengesetztes H -Feld mit Koerzitivfeldstärke H_c angelegt werden [44].

2.3 Kräfte

In der EMAT-Literatur wird häufig von einer dominanten Kraft bei der Erzeugung von Ultraschall gesprochen. Entweder wird als dominanter Mechanismus die Lorentzkraft (siehe 2.3.1) oder die Magnetostriktion (siehe 2.3.3) genannt. Welche der Kräfte dominant ist, hängt vom Material des Prüfkörpers, der EMAT-Induktorgeometrie und dem Arbeitspunkt ab. Bei nicht ferromagnetischen Metallen wie Aluminium oder Kupfer, bei denen μ_r etwa eins ist, können nur Lorentzkräfte auftreten, wodurch ein einfaches lineares Verhalten zwischen Lorentzkraft, Wirbelstrom und Bias-Magnetfeld besteht [46]. Bei ferromagnetischen Metallen ist der Zusammenhang komplizierter, da die dominante Kraft zusätzlich vom Arbeitspunkt des EMATs abhängt.

In diesem Abschnitt geht es um die Lorentzkraft und die Magnetostriktion bei unterschiedlichen Arbeitspunkten. In Abbildung 2.3 sind die Ultraschallamplituden für die Lorentzkraft und den Magnetostruktionsmechanismus in Eisen nach Thompson schematisch dargestellt [46].

Als EMAT-Konfiguration nutzt Thompson einen Lamb-Wellen-EMAT (Abbildung 2.10), bestehend aus einem mäanderförmigen Induktor und einem separat erzeugten statischen Bias-Magnetfeld. Durch den mäanderförmigen Induktor fließt ein sich zeitlich ändernder Strom, welcher Lamb-Wellen im Material erzeugt [46]. Das Bias-Magnetfeld wird von Thompson im Bereich zwischen 0,01 bis 10 kOe angegeben [47], was 0,8 bis 796 A/m entspricht.

Der doppelte Peak bei der Magnetostriktion in Abbildung 2.3 ist eine Folge der ungewöhnlichen magnetostriktiven Eigenschaften von Eisen, da sich Eisen und Stahl 1018 während der Magnetisierung zunächst in Feldrichtung verlängern und dann verkürzen [47] (Abbildung 2.4).

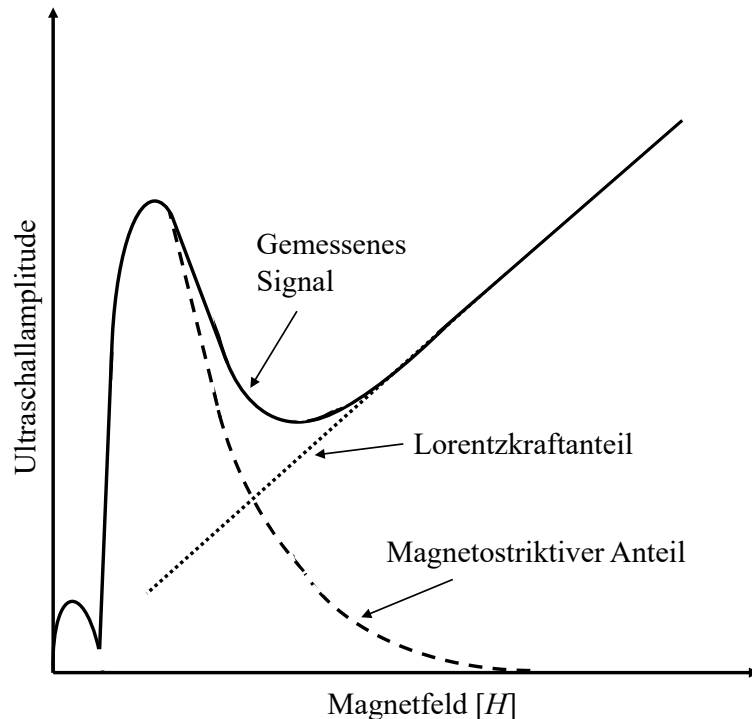


Abbildung 2.3: Schematisch dargestellt ist die Abhängigkeit der Ultraschallamplitude für Lorentzkraft und Magnetostriktion in Eisen für Lamb-Wellen (nach Thompson [46]).

Die Amplitude im magnetostriktiven Bereich ist mit der Steigung der Magnetostriktionskurve verbunden [47]. Das erste lokale Maximum entsteht im steilen Anstieg der Magnetostriktionskurve während der anfänglichen Verlängerung des Eisens [47]. Das zweite Maximum entsteht während der Verkürzung des Eisens im Abfall der Magnetostriktionskurve [47]. Die Phasenlage ändert sich um 180° zwischen dem ersten und dem zweiten Maximum [47]. Im Übergang zum dritten Maximum findet eine Phasenverschiebung von -45° für antisymmetrische und 135° für symmetrische Lamb-Wellen statt [47]. Thompson begründet die 45° Phasenverschiebung mit der Tatsache, dass die induzierten Wirbelströme, die für die Erzeugung der Lorentzkräfte verantwortlich sind und die dynamischen Magnetfelder, die die magnetostriktive Erzeugung antreiben, um 45° phasenverschoben sind [47]. Die symmetrischen und antisymmetrischen Moden haben einen Phasenunterschied von 180° [47], wodurch die Phasenverschiebung von 135° für symmetrische Lamb-Wellen beim Übergang zur Lorentzkraft zu erklären ist. Thompson zeigt, dass die Lorentzkraft die dominante Kraft ist, wenn Eisen und Stahl 1018 in magnetischer Sättigung sind [47]. Bei geringem Bias-Magnetfeld ist Magnetostriktion die dominante Kraft. Dies gilt für das EMAT-Konzept von Thompson, jedoch

können bei anderen EMAT-Konfigurationen andere Zusammenhänge bestehen.

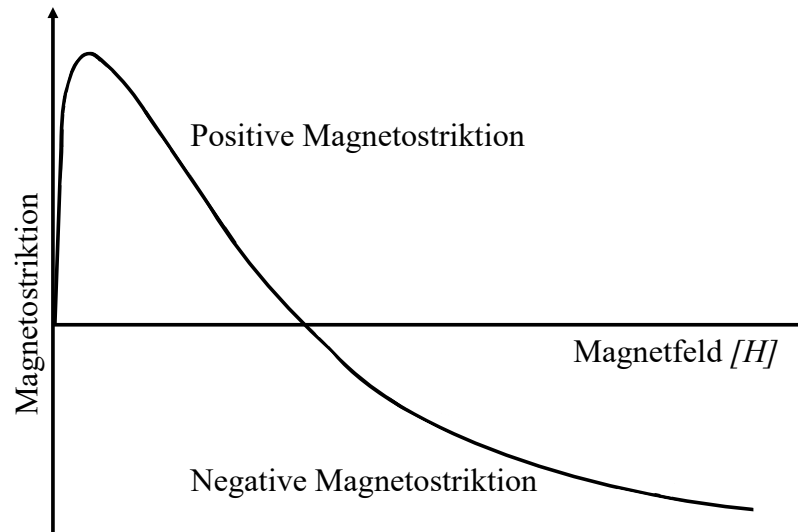


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Magnetostriktionskurve von ferromagnetischem Stahl (nach Thompson, Hirao und Ogi [47, 1]).

Bei der schematischen Darstellung nach Thompson in Abbildung 2.3 wird die Magnetisierungskraft nicht berücksichtigt. Die Magnetisierungs- und die Lorentzkraft löschen sich zum Teil gegenseitig aus [41]. Seher und Nagy beschreiben die Lorentzkraft als die asymptotische Grenze der elektromagnetischen Transduktionskraft, wenn die magnetische Suszeptibilität des Materials verschwindet [41]. Die Magnetisierungskraft wird von den Autoren als die asymptotische Grenze der elektromagnetischen Transduktionskraft bezeichnet, wenn die elektrische Leitfähigkeit des Materials verschwindet [41]. Zwischen diesen extremen Grenzen, in die fast alle magnetisierbaren Materialien mit der Ausnahme von Ferriten fallen, ist der Unterschied zwischen Lorentz- und Magnetisierungsmechanismen unscharf [41]. Diese Beschreibung von Seher und Nagy passt mit der schematischen Darstellung von Thompson (Abbildung 2.3) überein, da bei einem starken Magnetfeld das Material in magnetische Sättigung geht und somit nur die Lorentzkraft wirkt.

2.3.1 Lorentzkraft

Die Lorentzkraft F_L ist eine der wichtigsten Mechanismen im Bereich der EMATs, da sich in allen elektrisch leitfähigen Materialien Wirbelströme J_e induzieren lassen. Die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter mit dem Strom i und der Länge l ist:

$$\vec{F}_L = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

Die Wirbelströme J_e werden hier aufgrund der geringen Skintiefe als Strombelag J (A/m) angenommen. Der Druck durch die Lorentzkraft p_L auf die Metalloberfläche

ergibt sich somit zu:

$$\vec{p}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.5)$$

Die Wirkungskette funktioniert auch in die umgekehrte Richtung. Trifft eine Bewegung im Metall auf einen Materialbereich, der von einem Magnetfeld durchflutet ist, entsteht ein elektrischer Strom im Material, der vom EMAT-Induktor detektiert werden kann [1]. Somit ist es mit dem Lorentzkraftmechanismus möglich, Ultraschall mit einem EMAT zu empfangen.

In Abbildung 2.5(a) ist ein unendlich langer Leiter dargestellt, der von einem sich zeitlich ändernden Strom durchflossen wird und über einem ideal elektrisch leitfähigen Metall positioniert ist ($\mu_r = 1, \sigma = \infty$). Durch den sich zeitlich ändernden Strom wird ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt, welches einen Wirbelstrom in die Oberfläche induziert. Der Wirbelstrom fließt entgegengesetzt zum Strom im Leiter, wodurch es zu einer Abstoßung zwischen Leiter und Metalloberfläche kommt. Abbildung 2.5(b) zeigt die magnetische Flussdichte oberhalb des Metallobjekts. Zwischen dem Leiter und der Metalloberfläche findet eine Kompression des magnetischen Flusses statt, wodurch die magnetische Flussdichte B in dem Bereich steigt. Die Abstoßung zwischen Leiter und Metallobjekt lässt sich mit Hilfe des Magnetfeldbildes auch über den magnetischen Druck p beschreiben:

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2.6)$$

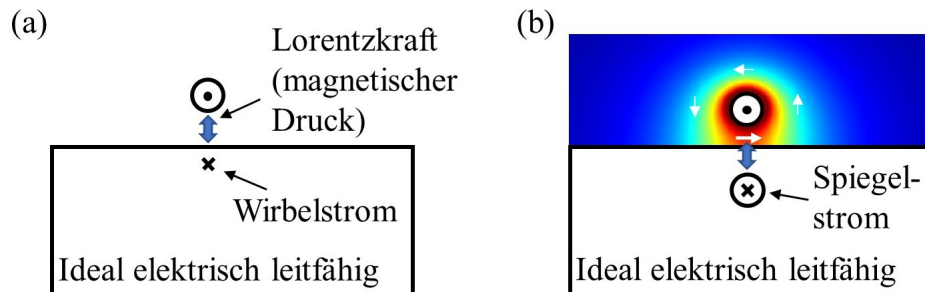


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Leiters, der von einem sich zeitlich ändernden Strom durchflossen wird und über einem ideal elektrisch leitfähigen Material positioniert ist. (a) Skizze der Anordnung mit eingezeichneter Kraftwirkung. (b) Magnetische Flussdichte B berechnet mittels Spiegelstrommethode. Die weißen Pfeile zeigen die magnetische Flussrichtung.

Lorentzkräfte treten auch in nicht gewollten Bereichen im gesamten EMAT-System auf. Besonders kritisch kann das bei high power EMATs (Ströme im kA-Bereich) in den Kabeln zum Induktor und im Induktor selbst sein. Durch hohe Stromimpulse und in Folge hoher Lorentzkräfte zwischen Induktorwindungen kann es im EMAT-Induktor sogar zu mechanischen Beschädigungen kommen.

Ein wichtiger Effekt bei EMATs stellt die Verdopplung der Ultraschallfrequenz zur

anregenden Frequenz im EMAT-Induktor dar, wenn kein Bias-Magnetfeld aktiv ist. Nach Rouge et al. [48] lässt sich die Verdoppelung mathematisch wie folgt erklären. Die meisten EMATs haben ein statisches (oder quasistatisches Magnetfeld) H_S und ein dynamisches Magnetfeld H_D . Die magnetische Flussdichte ergibt sich somit zu [48]:

$$\vec{B} = \vec{B}_S + \vec{B}_D e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

Wird Gleichung 2.7 in Gleichung 2.5 eingesetzt, ergibt sich:

$$\vec{p}_L = \vec{J} e^{i\omega t} \times (\vec{B}_S + \vec{B}_D e^{i\omega t}) = \vec{J} \times \vec{B}_S e^{i\omega t} + \vec{J} \times \vec{B}_D e^{i2\omega t} \quad (2.8)$$

Der Strombelag J ist eine rein dynamische Größe, die sich aus der induzierten Spannung in der Metalloberfläche ergibt. In Gleichung 2.8 zeigt sich, dass der Doppelfrequenz-Effekt vernachlässigbar ist, wenn das statische Magnetfeld deutlich stärker ist als das dynamische Magnetfeld [48]. Existiert kein statisches Magnetfeld H_S , dann entfällt der erste Term und es findet eine Verdoppelung der Ultraschallfrequenz statt.

2.3.2 Magnetisierungskraft

Die Magnetisierungskraft kann als Kraft gesehen werden, die auf magnetische Momente in einem räumlich veränderlichen Magnetfeld wirkt [1]. Die Voraussetzung für das Auftreten von Magnetisierungskräften ist, dass die Metalloberfläche des zu untersuchenden Objekts ferromagnetisch ist, also eine relative Permeabilitätskonstante $\mu_r > 1$ besitzt. Der Druck/Zug durch die Magnetisierungskraft pro Volumeneinheit f_M auf das Metallobjekt ergibt sich zu:

$$\vec{f}_M = (\nabla \vec{H}) \vec{M}_0 \quad (2.9)$$

In Abbildung 2.6(a) ist ein unendlich langer stromdurchflossener Leiter dargestellt, der über einem idealen Ferrit ($\mu_r = \infty, \sigma = 0$) positioniert ist.

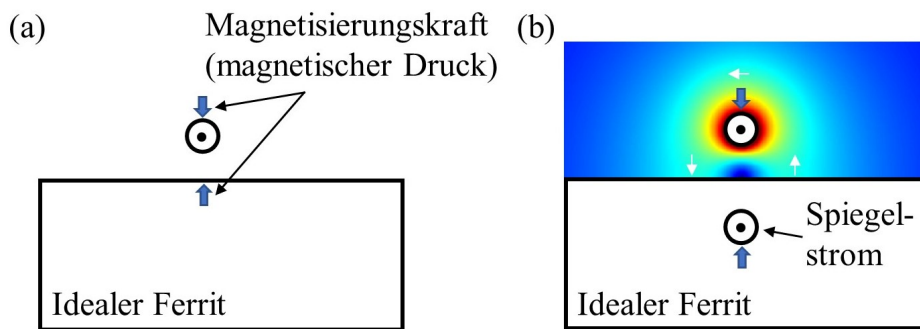


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines stromdurchflossenen Leiters über einem idealen Ferrit. (a) Skizze der Anordnung mit eingezeichneter Kraftwirkung. (b) Magnetische Flussdichte B berechnet mittels Spiegelstrommethode. Die weißen Pfeile zeigen die magnetische Flussrichtung.

Aufgrund der Magnetisierungskraft kommt es zur Anziehung zwischen Leiter und dem Ferrit. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass bei tangentialen Bias-Magnetfeldern

(wie in Abbildung 2.6) die Magnetisierungs- und Lorentzkraft in entgegengesetzte Richtung wirken [1]. Abbildung 2.6(b) zeigt die magnetische Flussdichte oberhalb des Ferrits berechnet mit der Spiegelmethode. Zwischen dem Leiter und der Ferritoberfläche befindet sich nur noch sehr wenig magnetischer Fluss, da dieser durch den idealen Ferrit fließt. Die Anziehung zwischen Leiter und Metallobjekt lässt sich mit Hilfe des Magnetfeldbildes auch über den magnetischen Druck p (Gleichung 2.6) beschreiben. Auch bei der Magnetisierungskraft kann es zu einer Verdoppelung der anregenden Frequenz kommen. Durch die Aufteilung der Komponenten in statisch und dynamisch ergibt sich aus Gleichung 2.9:

$$\begin{aligned} f_M &= (\nabla \vec{H}_S + \nabla \vec{H}_D e^{i\omega t}) \cdot (\vec{M}_S + \vec{M}_D e^{i\omega t}) \\ &= \nabla \vec{H}_S \cdot \vec{M}_S + (\nabla \vec{H}_S \cdot \vec{M}_D + \nabla \vec{H}_D \cdot \vec{M}_S) e^{i\omega t} + \nabla \vec{H}_D \cdot \vec{M}_D e^{i2\omega t} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Bei der Magnetisierungskraft ist der Gradient des Erregungsfeldes von Bedeutung [48]. Wenn das statische Magnetfeld als homogen angesehen werden kann, was bei den meisten EMATs der Fall ist, kann Gleichung 2.7 reduziert werden [48]:

$$f_M = \nabla \vec{H}_D \cdot \vec{M}_S e^{i\omega t} + \nabla \vec{H}_D \cdot \vec{M}_D e^{i2\omega t} \quad (2.11)$$

Ist keine statische Magnetisierung M_S (Bias-Magnetfeld) vorhanden, entfällt der erste Term und es findet eine Verdoppelung der Ultraschallfrequenz statt. Wenn die Amplitude des statischen Magnetfeldes H_S deutlich größer ist als die des dynamischen Magnetfeldes H_D , kann der zweite Term in Gleichung 2.11 vernachlässigt werden, wodurch die anregende Frequenz auch die Ultraschallfrequenz ist [48].

2.3.3 Magnetostriktion

Handelt es sich bei dem Prüfkörper um ein ferromagnetisches Material, dann liegen magnetostriktive Eigenschaften vor [21]. Wenn sich der Magnetisierungszustand ferromagnetischer Materialien ändert, rotieren die magnetischen Domänen (weiße Bezirke) (Abbildung 2.7), was eine kleine Änderung der Länge oder des Volumens des Materials bewirkt [21].

Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes an ein ferromagnetisches Material kommt es je nach Größe und Richtung des Magnetfeldes zu einer Längenänderung des Materials [1]. Dieses Phänomen wird als „magnetostriktiver Effekt“ bezeichnet [21]. Wenn kein äußeres Magnetfeld vorhanden ist, sind die magnetischen Domänen (weiße Bezirke) ungeordnet und die effektive Magnetisierung des Materials ist gleich null [21].

Führt der magnetostriktive Effekt zu einer Längenänderung des Materials, dann wird diese auch als „Joule-Magnetostriktion“ bezeichnet. Es existiert auch eine Volumenmagnetostriktion, die jedoch für EMATs zu vernachlässigen ist [21]. Tritt eine Verlängerung der Materialdehnung durch das externe Magnetfeld auf, dann wird von positiver Magnetostriktion bzw. bei einer Verkürzung von negativer Magnetostriktion gesprochen [21]. Ob die Magnetostriktion positiv oder negativ ist, hängt von vom Material und bei manchen Materialien von der Magnetfeldstärke ab [21]. Die Magnetostriktion,

deren Ausdehnung sich entlang der Richtung des äußeren Magnetfeldes ändert, wird „longitudinale Magnetfeldausdehnung“ genannt. Die Magnetostriktion, deren Ausdehnung sich senkrecht zur Richtung des äußeren Magnetfeldes ändert, wird als „transversale Magnetfeldausdehnung“ bezeichnet [21].

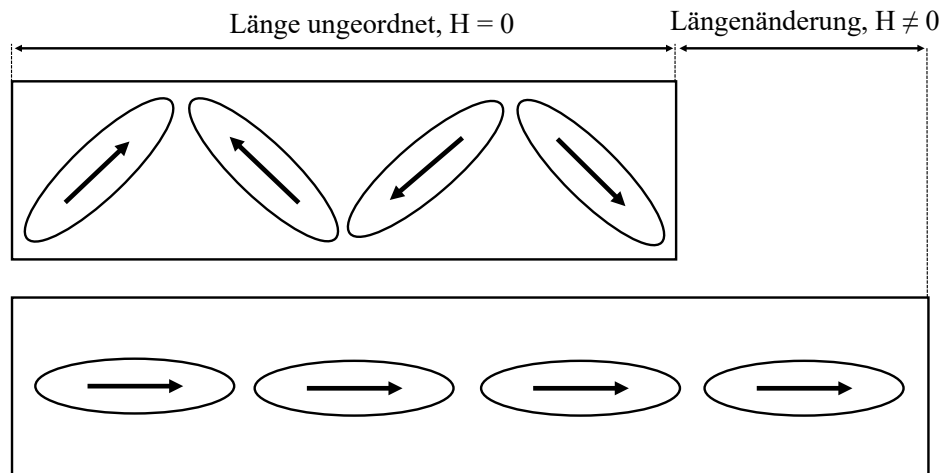


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Magnetostriktion bei ferromagnetischen Materialien in Anlehnung an [21].

Im Gegensatz zur magnetostriktiven Eigenschaft kommt es bei einer Dimensionsänderung des ferromagnetischen Materials zu einer Bewegung und Drehung der magnetischen Domänen (weißsche Bezirke), wodurch die magnetische Wirkung im Material erzeugt wird [21]. Dieses Phänomen wird als „inverser magnetostriktiver Effekt“ bezeichnet. Huang et al. bezeichnen den magnetostriktiven Effekt des ferromagnetischen Materials und den inversen magnetostriktiven Effekt als die Hauptprinzipien für die Anregung und den Empfang von Ultraschallwellen in ferromagnetischen Materialien [21].

Im Vergleich zur piezomagnetischen Eigenschaft hat die im magnetostriktiven Material erzeugte Dehnung keinen Zusammenhang mit der Polarität des angelegten Magnetfeldes. Es besteht eine quadratische Beziehung zwischen Magnetostriktion und Magnetfeld, die dem quadratischen Effekt der elektromagnetischen Ausdehnung ähnelt [21]. Bei Materialien wie Eisen und ferromagnetischen Stahl existiert die Besonderheit, dass die Magnetostriktion mit steigendem Magnetfeld erst positiv und dann negativ wird [1, 47].

2.4 Unterschiedliche EMAT-Konfigurationen

Ein großer Vorteil von EMATs ist die Fähigkeit zur Erzeugung von verschiedensten Ultraschallmodalitäten. In Abhängigkeit der zu erzeugenden Ultraschallmodalität sind unterschiedliche EMAT-Konfigurationen notwendig. Entscheidend für die Ultraschallmodalität ist die Anordnung des (quasi-)stationären Bias-Magnetfeldes und des hochfrequenten Magnetfeldes, sowie Induktorgeometrie, Anregungsfrequenz und das Material

des Prüfobjekts.

In diesem Abschnitt wird auf die Erzeugung und den Empfang von longitudinalem Ultraschall, Lamb und Rayleigh-Wellen und auf Scherwellen eingegangen. Darüber hinaus gibt es noch weitere Wellenformen, die bei EMATs eingesetzt werden wie die Torsionswellen [49, 50], die jedoch in der EMAT-Literatur nur selten vorkommen. Torsionswellen werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

In Abhängigkeit von der EMAT-Konfiguration können mehrere Ultraschallmodalitäten gleichzeitig angeregt werden, was zu Fehlinterpretationen führen kann. Da der Effekt des Empfangs reversibel ist, wie es typisch für elektrodynamische Transduktionsprinzipien ist, kann ein EMAT, der mehrere Ultraschallmodalitäten aussendet diese auch empfangen. Zum Beispiel berichteten Ho et al., dass bei ihrer EMAT-Anwendung neben den gewünschten longitudinalen Ultraschallwellen auch Lamb-Wellen entstanden, die an der Behälterwand entlangliefen und ebenfalls detektiert wurden [51].

Eine Möglichkeit der Optimierung von EMATs besteht in der Verwendung von Ferrit- oder Eisenrückplatten für die EMAT-Induktoren [52, 53]. In dieser Arbeit werden ausschließlich Luftspulen als Induktoren verwendet, da Luftspulen ein lineares Verhalten haben und somit zusätzliche Freiheitsgrade und potenzielle Störquellen reduziert werden.

Eine bei manchen EMATs wichtige Anforderung ist eine Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen des Prüfkörpers. So zeigen beispielsweise Hernandez-Valle und Dixon einen EMAT ohne aktive Kühlung, der anstelle von Permanentmagneten einen gepulsten Elektromagneten verwendet, um das Problem der maximalen Betriebstemperatur von Permanentmagneten zu umgehen, die unterhalb der Curie-Temperatur des jeweiligen Permanentmagneten liegt [54].

Lunn et al. präsentierten einen EMAT für die Dickenmessungen, der im Dauerbetrieb mit bis zu 450°C ohne Kühlung arbeiten kann [55]. Die Autoren zeigen, dass bei einem Prüfkörper aus Aluminium der Lorentzkraftmechanismus mit steigender Temperatur nachlässt [55]. Hingegen zeigen die Autoren, dass sich das Signal-Rausch-Verhältnis bei einem mit Magnetit beschichtetem kohlenstoffarmen Stahlprüfkörper mit einer Temperatur von 450°C besser ist als bei 25°C [55]. Der Grund könnte laut Lunn et al. in der nichtlinearen Beziehung zwischen der Signalamplitude und dem angelegten Magnetfeld für den auf Magnetostraktion basierenden EMAT zurückzuführen sein [55].

Burrows et al. präsentierten einen Laser-EMAT für die Dickenmessung von Prüfkörpern aus Edelstahl und kohlenstoffarmen Stahl mit Temperaturen von bis zu 900°C [56]. Der Laser-EMAT arbeitet im Puls-Echo-Betrieb, dabei erzeugt der Laser Ultraschall und der EMAT empfängt die Ultraschallechos [56]. Die Autoren stellen einen zweiten EMAT vor, der Ultraschall bei Temperaturen erzeugen und empfangen kann, die sich der Curie-Temperatur für ferromagnetischen Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (770°C) nähern [56].

Saillant et al. zeigen, dass ihr EMAT eingetaucht in flüssiges Natrium (200°C) immer noch ausreichend gute akustische Eigenschaften für die Durchführung grundlegender zerstörungsfreier Prüfungen aufweist [57].

In dieser Arbeit ist die Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen kein Kriterium, daher werden die hier vorgestellten EMAT-Konzepte nicht auf die Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen optimiert oder getestet.

2.4.1 Longitudinaler Ultraschall

Bei longitudinalen Wellen handelt es sich um elastische Wellen mit Schallschnelle und Druckgradient in Ausbreitungsrichtung. Longitudinale Wellen können sich neben Festkörpern auch in Flüssigkeiten und Gasen ausbreiten [2]. In Abbildung 2.8 ist ein EMAT zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall schematisch dargestellt. Das Bias-Magnetfeld wird durch drei Permanentmagnete erzeugt und verläuft parallel zur Metalloberfläche. Der Induktor erzeugt ein hochfrequentes Magnetfeld, welches Wirbelströme in die Metalloberfläche induziert. Die Lorentzkräfte stehen senkrecht auf der Metalloberfläche, da die Lorentzkräfte aus dem Bias-Magnetfeld und den Wirbelströmen resultieren (Gleichung 2.4).

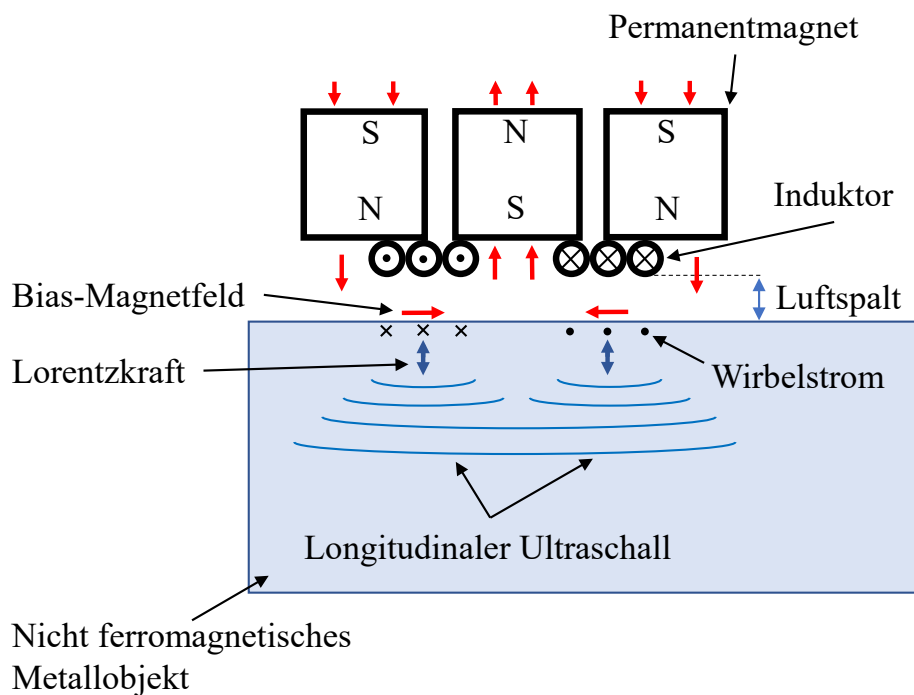


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines EMATs mit Permanentmagneten zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall.

In der EMAT-Literatur sind nur wenige Veröffentlichungen zu EMATs für longitudinalen Ultraschall zu finden. Eine Beispielanwendung mit longitudinalem Ultraschall zur zerstörungsfreien Prüfung eines Stahlblocks im Rohzustand mittels eines Hochleistungs-Phased-Array-EMATs stellen Tkocz et al. vor [9]. Die Autoren demonstrierten die Erkennung eines seitlich gebohrten Lochs mit einem Durchmesser von 6 mm in einem massiven Stahlblock [9]. Für das Erzeugen von longitudinalem Ultraschall nutzen Tkocz et al. ein EMAT-Phased-Array ohne zusätzliche Magnete [9]. Für den Empfang von Ultraschall wird ein EMAT verwendet, der die gleiche Anordnung wie in Abbildung 2.8 aufweist [9].

Innerhalb dieser Arbeit wird ein EMAT-Array für die Lokalisierung von einer Inhomogenität in einem mit Flüssigkeit gefüllten Metallbehälter untersucht. Daher wird an

dieser Stelle auf zwei Beispiele für EMAT-Anwendungen mit Flüssigkeiten eingegangen: Ho et al. [51] stellen ein EMAT-System mit einer Bandbreite von 0,2 bis 2 MHz zur Untersuchung dünnwandiger Getränkedosen vor. Dabei dienen Kupferstäbe als Fremdobjekt, die sich irgendwo innerhalb des Flüssigkeitsvolumens befinden und detektiert werden sollen. Von den Autoren wird eine 2D-Rekonstruktion des Querschnitts durchgeführt. Die Wandstärke des Aluminiumbehälters beträgt jedoch nur 0,15 mm, was vergleichsweise zu den 3 mm Wandstärken in dieser Arbeit sehr gering ist. Auch der Luftspalt zwischen dem EMAT und der Metalloberfläche betrug bei Ho et al. nur 0,3 mm [51], was im Vergleich zu dem 1 mm hier gering ist. Die Betriebsfrequenzen konnten bei dem EMAT-System von Ho et al. durch die geringe Wanddicke als niederfrequent angesehen werden. Darüber hinaus und im Gegensatz zum hier untersuchten EMAT-System, das im Puls-Echo-Betrieb arbeitet, verwenden die Autoren einen EMAT zum Senden und einen separaten zum Empfangen [51]. In der Untersuchung befand sich die Getränkedose zwischen den zwei gegenüberliegenden EMATs [51].

Als weiteres Beispiel für EMAT-Anwendungen mit Flüssigkeiten haben Le Bourdais et al. [58] und Pucci et al. [10] EMAT-Phased-Arrays für die Inspektion eines Flüssig-Natrium-Reaktors vorgestellt. Diese EMATs koppelten direkt an das flüssige Natrium, wodurch die Autoren nicht die Problematik mit einer zusätzlichen Metallwand hatten. Des Weiteren sind in der EMAT-Literatur EMAT-Anwendungen mit geführten longitudinalen Ultraschallwellen zu finden. Beispielsweise stellen Cong et al. einen EMAT für die Untersuchung von Metallrohren mit Hilfe von geführten longitudinalen Ultraschallwellen vor [59]. Der EMAT verwendet Permanentmagnete, arbeitet bei einer Frequenz von 100 kHz und basiert auf dem Magnetostruktionsmechanismus [59]. Geführte longitudinale Schallwellen weisen ein dispersives Verhalten auf [59]. Im Rahmen dieser Arbeit werden keine solche EMATs betrachtet, daher wird an dieser Stelle nicht weiter auf diesen EMAT-Typ eingegangen.

2.4.2 Lamb-Wellen

Bei Lamb-Wellen handelt es sich um gemischte Wellen aus Druck- und Scherkomponenten. Die Wellen sind geführt und verhalten sich dispersiv in Abhängigkeit von der Frequenz und der Plattendicke [21].

Horace Lamb hat im Jahr 1917 eine analytische Lösung für Lamb-Wellen entwickelt und veröffentlicht [60]. Unterschieden werden Lamb-Wellen in symmetrische („S“) und antisymmetrische („A“) Lamb-Wellen. Auch gibt es verschiedene Moden innerhalb der anti- und symmetrischen Lamb-Wellen, die angefangen bei null aufsteigend nummeriert werden. In der Abbildung 2.9 ist die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit von S0-, S1-, A0- und A1-Lamb-Wellen über die Frequenz dargestellt.

In Abbildung 2.10(a) ist ein EMAT zur Erzeugung von Lamb-Wellen skizziert. Der EMAT-Induktor ist in diesem Beispiel mäanderförmig, üblich sind in der Literatur neben mäanderförmigen Induktoren auch rennbahnförmige oder ringförmigen Induktoren für Lamb-Wellen EMATs.

Bei mäander- und rennbahnförmigen Induktoren werden die Lamb-Wellen bidirektional erzeugt. Das Bias-Magnetfeld in Abbildung 2.10(a) verläuft in die gleiche Richtung wie das dynamische Magnetfeld, wodurch sich diese Anordnung für EMATs eignet, die

nur aus einem Induktor ohne zusätzliche Permanentmagnete bestehen.

In Abbildung 2.10(b) ist ein EMAT mit einem rennbahnförmigen Induktor dargestellt. Das Bias-Magnetfeld wird durch einen U-förmigen Permanentmagneten erzeugt. Die Magnetostriktion ist die dominante Kraft, welche parallel zur Oberfläche gerichtet ist [61]. Die Anordnung eignet sich daher, um Lamb-Wellen in ferromagnetischen Metallplatten zu erzeugen, da die Magnetostriktion in Richtung der Lamb-Wellen gerichtet ist.

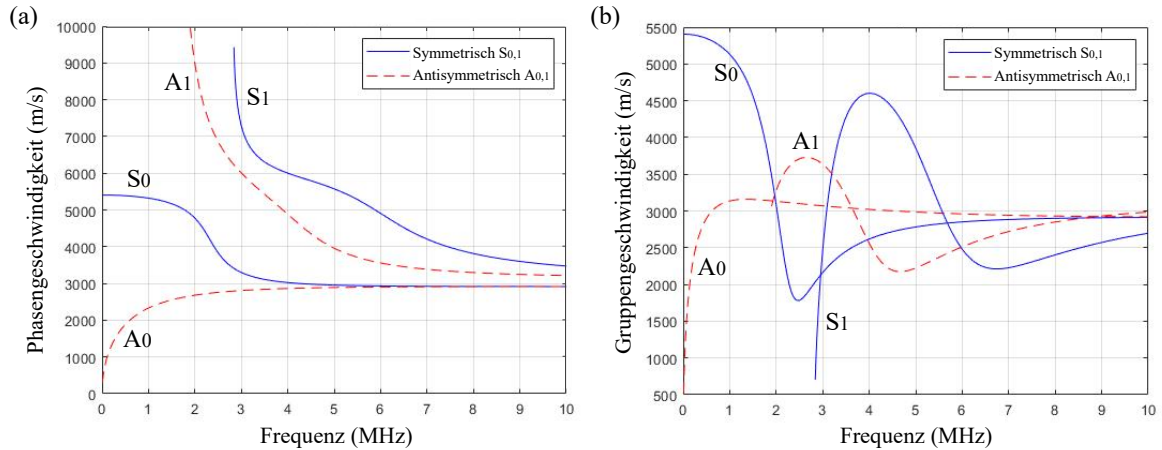


Abbildung 2.9: Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit von A0-, A1-, S0- und S1-Lamb-Wellen in einer Aluminiumplatte mit der Dicke von 1 mm. Berechnet wurden beide Grafiken mit der Matlab Bibliothek von Haider [62]. (a) Phasengeschwindigkeit über die Frequenz. (b) Gruppengeschwindigkeit über die Frequenz.

Lee et al. stellen eine ähnliche EMAT-Anordnung zur Erzeugung von omnidirektionalen Lamb-Wellen mit einem ringförmigen Induktor vor, bei dem das Bias-Magnetfeld auch parallel zur Oberfläche verläuft, jedoch mit einem stabförmigen Permanentmagnet erzeugt wird [63].

Die Abbildung 2.10(c) zeigt ein EMAT-Konzept, bei dem das Bias-Magnetfeld senkrecht auf der Oberfläche der Metallplatte steht. Ein sich zeitlich ändernder Strom im Induktor induziert Wirbelströme in der Metallplattenoberfläche mittels eines sich zeitlich ändernden Magnetfeldes. Die entstehenden Lorentzkräfte verlaufen auch parallel zur Metallplatte [64]. Somit lassen sich in nicht ferromagnetischen Metallplatten Lamb-Wellen erzeugen. Ein Anordnung wie in Abbildung 2.10(c) wird von Wang et al. verwendet, um mit einem ringförmigen Induktor omnidirektionale Lamb-Wellen in einer Aluminiumplatte zu erzeugen.

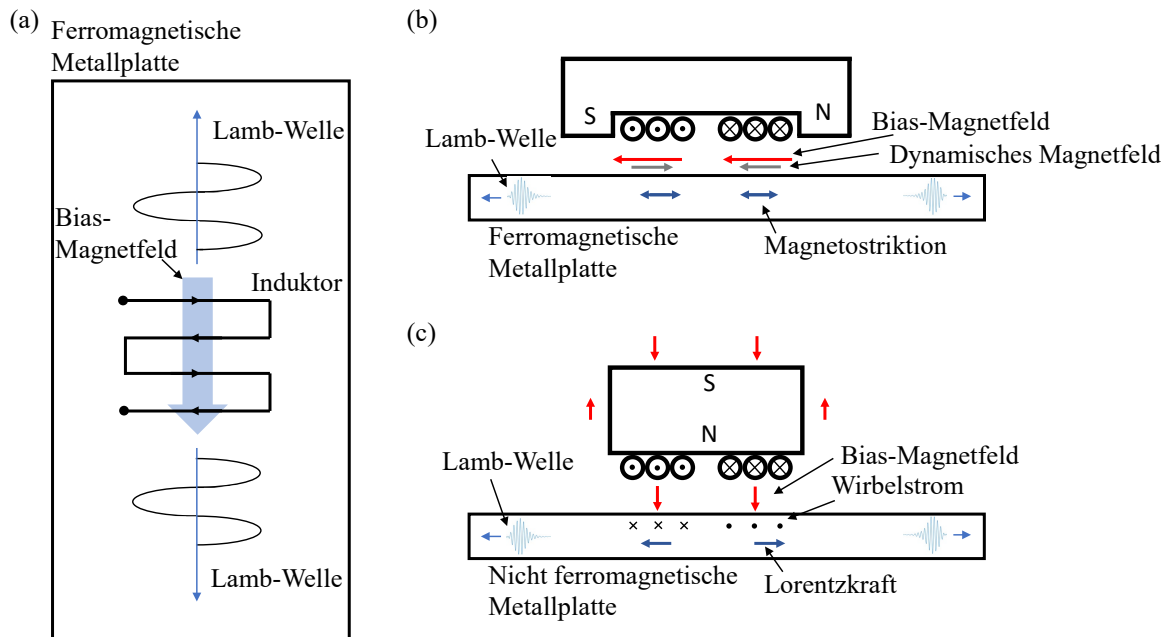


Abbildung 2.10: Schematisch dargestellt sind zwei unterschiedliche EMAT-Konfigurationen zur Erzeugung von Lamb-Wellen. (a) Draufsicht einer EMAT-Konfiguration mit Magnetostriktion als dominanter Mechanismus. (b) Querschnitt eines EMAT-Konzepts für Magnetostriktion als dominanter Mechanismus. (c) Querschnitt eines EMAT-Konzepts für Lorentzkraft als dominanter Mechanismus.

2.4.3 Rayleigh-Wellen

Bei Rayleigh-Wellen handelt es sich um Oberflächenwellen bei denen die Wellenlänge sehr viel kleiner als die Materialtiefe ist [65]. Rayleigh-Wellen sind durch ihre Ausbreitungseigenschaft an die Oberfläche des Materials beschränkt, wodurch sich Rayleigh-Wellen für das Detektieren von Oberflächendefekten oder oberflächennaher Defekte eignen [66]. In Abbildung 2.9 sind die Dispersionkurven für eine Plattendicke von 1 mm dargestellt. Die Plattendicke, die Materialeigenschaften und die Frequenz entscheiden darüber ob es sich um eine Lamb-Welle oder Rayleigh-Welle handelt, weswegen die Rayleigh-Welle auch als ein Spezialfall der Lamb-Wellen gesehen werden kann. Wenn sich beispielsweise das Verhältnis von Materialtiefe zu Wellenlänge ändert, werden aus Lamb-Wellen Rayleigh-Wellen und umgekehrt.

Die EMATs zur Erzeugung von Rayleigh-Wellen entsprechen vom Aufbau den EMATs für Lamb-Wellen. Interessant sind Rayleigh-Wellen zur Untersuchung der Oberfläche von voluminösen Metallkörpern auf Risse. Beispielsweise beschäftigten sich Petcher et al. mit dem kontaktlosen Scannen von Eisenbahnschienen mittels eines Rayleigh-Wellen EMAT [67].

Yin et al. stellen einen EMAT bestehen aus einem Permanentmagneten und einem mäanderförmigen Induktor vor [68]. Als Prüfkörper dient eine Aluminiumplatte. Die Autoren konnten eine Übereinstimmung zwischen experimentellen Messungen und ihren analytischen Rechnungen und dem FEM-Model zeigen [68].

Thring et al. präsentieren ein EMAT-System, das mit fokussierten Rayleigh-Welle bei einer Frequenz von 2 MHz arbeitet [69]. Als Prüfkörper diente eine Aluminiumplatte, wodurch Lorentzkräfte als Wirkmechanismus dienten.

Innerhalb dieser Arbeit werden Rayleigh-Wellen nicht adressiert, da hier die Untersuchung von 1 mm dicken Metallplatten im Vordergrund steht und somit Lamb-Wellen besser geeignet sind. Jedoch ist es möglich, mit den hier vorgestellten EMAT-Konzepten Rayleigh-Wellen zu erzeugen und zu empfangen.

2.4.4 Scherwellen

Weiterhin sind häufig in der Literatur EMATs zum Erzeugen von Ultraschall Scherwellen (Transversalwellen) zu finden. Bei Scherwellen schwingt das Material senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [2]. Scherwellen können sich nur in Feststoffen und nicht in Flüssigkeiten oder Gasen ausbreiten, weswegen an der Grenzfläche zu Flüssigkeiten und Gasen bei senkrechten Einfall eine nahezu vollständige Reflektion stattfindet [2]. In Abbildung 2.11 ist eine schematische Darstellung von einem EMAT zum Erzeugen von geführten horizontalen Scherwellen dargestellt. Geführte horizontale Scherwellen sind beispielsweise geeignet um Schweißnahtfehler [70] oder andere Defekte wie Wandausdünnungen durch Rost [71] zu erkennen. Bei dem EMAT in Abbildung 2.11 handelt es sich um eine von vielen EMAT-Konfigurationen, die an dieser Stelle zur Verdeutlichung der EMAT-Funktionsweise dient. Die zwei Permanentmagneten erzeugen ein statisches Bias-Magnetfeld, welches senkrecht auf der Metalloberfläche steht. Durch den Induktor unterhalb der Permanentmagnete fließt ein sich zeitlich ändernder Strom, wodurch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt wird, das wiederum Wirbelströ-

me in die Metalloberfläche induziert. Statt einem rennbahnförmigen Induktor lassen sich auch andere Formen verwenden.

Ein EMAT wie in Abbildung 2.11 erzeugt an einem nicht ferromagnetischen Metallblock neben Scherwellen auch longitudinale Wellen, die sich in die Tiefe des Materials ausbreiten [72]. Beispielsweise zeigten Li et al. fokussierbare Scherwellen-EMATs zur Untersuchung von Defekten in der Tiefe in Eisenbahnschienen [73]. Die EMATs der Autoren bestand aus jeweils einem Permanentmagneten und zwei mäanderförmigen Induktoren [73]. Die Induktorform ist anderes als in Abbildung 2.11, jedoch ist die Magnetfeldanordnung gleich [73].

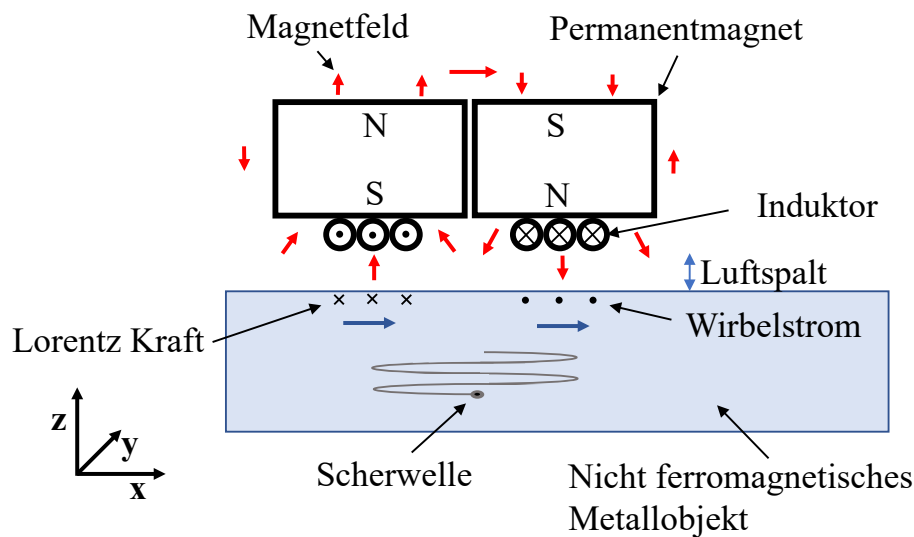


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines EMATs mit Permanentmagneten zur Erzeugung von sich transversal ausbreitenden Ultraschall.

Scherwellen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit untersucht. Eine Magnetfeldanordnung wie in Abbildung 2.11 ist mit nur einem Induktor nicht möglich, da sowohl das hochfrequente Magnetfeld als auch das Bias-Magnetfeld parallel zueinander und überwiegend horizontal zur Metalloberfläche verlaufen. Die Erzeugung von Scherwellen mit EMATs ohne zusätzliche Magnete ist realisierbar mit anderen EMAT-Anordnungen. Im Rahmen einer anschließenden Forschungsarbeit ist ein solcher EMAT ohne zusätzliche Magnete zur Erzeugung von Scherwellen interessant, da die EMATs aus der Literatur (die dem Autor vorliegen) mit Permanentmagneten [74, 75, 76, 77, 78, 79] arbeiten.

Die Autoren Kim und Kwon zählen in ihrem Review zu magnetostriktiven EMATs für geführte Wellen drei Möglichkeiten zur Erzeugung des Bias-Magnetfeldes auf: Permanentmagnete, andere Induktoren (wie Elektromagnet) oder Vormagnetisierung (Restmagnetisierung) [80]. Bei der Vormagnetisierung wird jedoch nicht die Oberfläche des Prüfkörpers an der Messstelle vormagnetisiert. Stattdessen wird ein separater ferromagnetischer Streifen aus hartmagnetischen Material, der sich zwischen EMAT und dem Prüfkörper befindet, vorab magnetisiert [80, 81]. Die Ultraschallerzeugung findet in dem separaten Magnetstreifen statt und koppelt dann rein mechanisch in den Prüfkörper über [80, 81].

2.5 Barkhausenrauschen

Bei Barkhausenrauschen handelt es sich um diskrete Sprünge der Magnetisierung im ferromagnetischen Material. Die Änderung der Magnetisierung erfolgt nicht kontinuierlich sondern in diskreten Schritten [82]. Die direkten Domänenbeobachtungen zeigen, dass es sich bei den Barkhausenimpulsen um Domänenwandsprünge handelt [82].

Barkhausenrauschen kann bei EMATs mit zeitlich veränderlichen Bias-Magnetfeldern auftreten. Boyd und Sperline erzeugen mit einem gepulsten EMAT gezielt Barkhausenrauschen [83]. Oberhalb der Curie-Temperatur verschwindet das Barkhausenrauschen [83].

Barkhausenrauschen ist für diese Arbeit ein wichtiges Phänomen, da EMATs ohne zusätzliche Magnete auf zeitlich veränderliche Ströme zur Erzeugung eines Bias-Magnetfeldes angewiesen sind. Bei einem falsch konzeptionierten EMAT mit einem zeitveränderlichen Bias-Magnetfeld kann es zu einer zeitlichen Überschneidung des Barkhausenrauschens und dem Empfang von Ultraschall kommen, wodurch die Ultraschallsignale im Rauschen verschwinden können. Barkhausenrauschen kann neben dem Prüfkörper auch in Ferrit- oder Eisenrückplatten auftreten, die zur Erhöhung der Induktivität des EMAT-Induktors verwendet werden können. Daher sollte Barkhausenrauschen als eine Störquelle bei der Auslegung eines EMATs berücksichtigt werden.

2.6 EMAT bestehend aus nur einem Induktor

EMATs ohne zusätzliche Magnete bestehen nur aus einem oder mehreren Induktoren. In der Literatur werden diese EMATs auch als sogenannte „coils-only EMATs“ (manchmal auch als „coil-only EMAT“) bezeichnet. Es gibt keine allgemeingültige Definition was als „coils-only EMAT“ gilt, beispielsweise bezeichnen Liu et al. ihren EMAT als „coils-only EMAT“ [84]. Der EMAT von Liu et al. besteht aus zwei übereinanderliegenden flexiblen folienartigen Induktoren [84]. Der hintere Induktor dient dabei strenggenommen als separater Elektromagnet.

Durch das Weglassen der meist voluminösen Permanentmagnete ergeben sich viele Vorteile, jedoch auch Nachteile auf die in diesem Abschnitt eingegangen wird. Die Vorteile von EMATs ohne zusätzliche Magnete sind:

- Deutlich kleinere Sensorköpfe
- Keine Anziehung von Metallspähnen oder des Prüfobjekts
- Mehr Freiheitsgrade für Geometrien
- Kein Festhaften des EMATs auf ferromagnetischen Oberflächen
- Höhere magnetische Flussdichten lokal am Wirkungsort
- Freie Wahl einer Rückplatte zur ferromagnetischen Verstärkung
- Bessere Überlappung von statischen und dynamischen Magnetfeldern

Mit der besseren Überlappung der erzeugten Magnetfelder ist gemeint, dass das MHz-Induktionsfeld und das niederfrequenten Bias-Magnetfeld parallel oder annähernd parallel verlaufen, was bei herkömmlichen EMATs mit separaten Magneten nicht der Fall ist. Dadurch wird am Wirkungsort die Kopplungseffizienz erhöht.

Ein großer Nachteil der EMATs ohne zusätzliche Magnete ist das fehlende statische Bias-Magnetfeld, wodurch eine komplexere EMAT-Treiberschaltung notwendig ist. Die magnetischen Flussdichten eines Permanentmagneten liegen bei bis zu etwas über 1 T. Um solche hohen magnetischen Flussdichten bei den geringen Induktivitäten der EMAT-Induktoren zu erzeugen, sind Ströme im kA-Bereich notwendig. Solche hohen Stromamplituden sind nur kurzzeitig möglich, da andernfalls die EMAT-Induktoren thermisch zerstört werden würden. Auch für den Empfang von Ultraschall ist ein Bias-Magnetfeld notwendig (auf eine Ausnahme wird in dieser Arbeit in Kapitel 3.3 eingegangen). Daher muss für den Empfang weiterhin ein Strom durch den Induktor fließen, um ein Bias-Magnetfeld aufrecht zu erhalten. Die Umsetzung ist von zentraler Bedeutung, da das Empfangszeitfenster aufgrund der thermischen Belastung zeitlich sehr limitiert ist. Auch können Änderungen in der Stromamplitude zu Störverhalten wie Barkhausenrauschen führen.

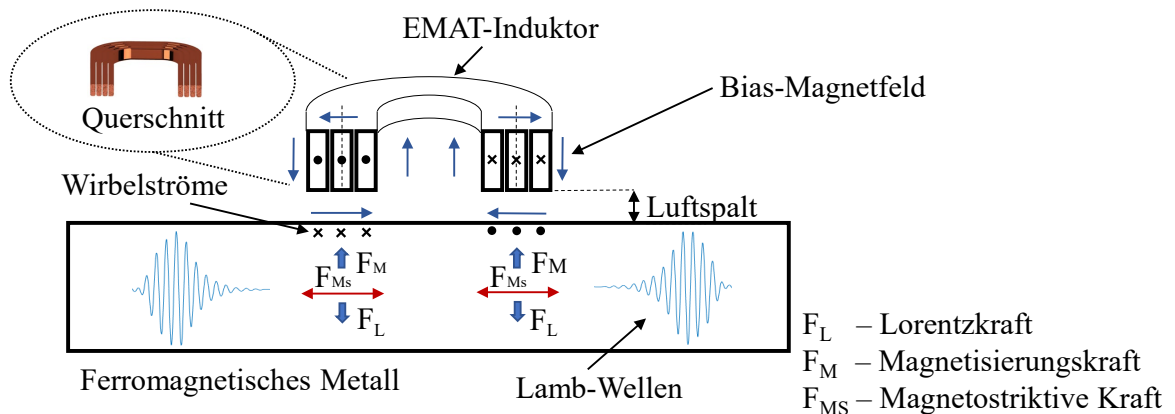


Abbildung 2.12: Lamb-Wellen EMAT über einer ferromagnetischen Metallplatte, der aus einem rennbahnförmigen Induktor besteht.

In Abbildung 2.12 ist ein Beispiel für ein EMAT-Konzept ohne zusätzliche Magnete abgebildet. Der EMAT besteht aus nur einem rennbahnförmigen Induktor und dient zur Erzeugung von Lamb-Wellen. Der Induktor befindet sich über einer ferromagnetischen Metallplatte, wodurch Lorentzkräfte, Magnetisierungskräfte und Magnetostraktion auftreten. Sowohl das Bias-Magnetfeld als auch das hochfrequente Magnetfeld werden aus einem Induktor erzeugt. Die Magnetisierungskräfte und die Lorentzkräfte zeigen in entgegengesetzte Richtungen und heben sich zum Teil auf [1]. Durch den Magnetostruktionsmechanismus werden Lamb-Wellen erzeugt, die sich in der Abbildung 2.12 nach links und rechts gleichermaßen ausbreiten.

In der Literatur lassen sich im Vergleich zu den klassischen EMATs nur wenige EMATs finden, die keine zusätzlichen Magnete verwenden. Beispielsweise zeigt Rüter durch ex-

Autor(en)	Coils -only	Luftspalt [mm]	Puls-Echo fähig	Ferromagnetischer Prüfkörper	Direktionaler Ultraschall	Solid- State	mm Wellenlänge/ MHz Frequenz
Liu et al. [86]	✓	4	✗	✓	✗	✗	✗
Chen et al. [87]	✗	klein	✗	✗	✓	✓	✓
Wang et al. [88]	✗	0,1	✓	✗	✓	✓	✗
Wang et al. [89]	✗	?	✓	✗	✓	✓	✗
Liu et al. [84]	✗	klein	✓	✓	✗	✓	✗
He et al. [90]	✓	5	✗	✓	✗	?	✗
Ren et al. [91]	✓	10	✗	✓	✗	✓	✗
Kubrusly [92]	✗	klein	✗	✗	✓	✓	✗
Rieger et al. [93]	✓	1,5	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 2.2: Erläuterung: „Coils-only“ bedeutet, dass kein Permanentmagnet oder zusätzlicher Elektromagnet verwendet wird; „Luftspalt“ ist der Abstand zwischen dem EMAT-Induktor und der Oberfläche des Prüfkörpers; „Puls-Echo fähig“ bedeutet, dass ein einzelner Induktor in der Lage ist, einen Ultraschallimpuls auszusenden und fast augenblicklich ein entsprechendes Echo zu empfangen; „Ferromagnetischer Prüfkörper“ bedeutet, dass der EMAT mit ferromagnetischem Stahl (zusätzlich zu anderen Metallen wie Aluminium) ausreichend funktioniert; „Direktionaler Ultraschall“ bedeutet, dass die Lamb-Welle effektiv in eine bestimmte Richtung gesendet und empfangen wird; „Solid-state“ bedeutet, dass die leistungsstarke Schaltung auf wartungsfreien Halbleitern basiert, anstatt auf unzuverlässigen Funkenstrecken oder Vakuumröhren wie Thyratrons; und mm Wellenlänge / MHz Frequenz“ bedeutet, dass die Ultraschall-Lamb-Wellen bei MHz-Frequenzen auftreten und nicht bei längeren Wellenlängen (cm) bei niedrigeren kHz-Frequenzen. [93]

perimentelle Messungen und modellhafte Berechnungen die Erzeugung und den Empfangen von longitudinalem Ultraschall in einer Aluminiumstange mit einem gepulsten EMAT, der aus einem ringförmigen Induktor besteht [85, 23, 22].

Ein Themenschwerpunkt dieser Arbeit ist die Untersuchung von EMATs ohne zusätzliche Magnete, welche in der Lage sind, Ultraschall Lamb-Wellen direktional gerichtet in einer Metallplatte zu erzeugen und zu empfangen. Als exemplarische Beispielaufgabe wird eine Kantenabtastung einer 1 mm dicken ferromagnetischen Stahlplatte angeführt. In Tabelle 2.2 sind in der obersten Zeile die EMAT-Eigenschaften aufgelistet, die für diese Aufgabe notwendig sind. Die Tabelle gibt einen Überblick über in der Literatur vorgestellte EMATs, die mehrere der Kriterien erfüllen.

In den meisten vorhandenen Veröffentlichungen werden keine Werte für die maximalen Luftspalte zwischen EMATs und Prüfobjekten angegeben; daher kann davon ausgegangen werden, dass diese relativ klein (<1 mm) oder fast kontaktierend sind. Ein größerer Luftspalt verringert die Kopplungseffizienz drastisch, da elektromagnetische Felder mit zunehmender Entfernung stark abnehmen. Die Möglichkeit einen EMAT mit einem größeren Luftspalt zu verwenden, macht den EMAT-Messaufbau flexibler und damit potenziell interessanter für verschiedene Anwendungen.

Liu et al. demonstrierten einen gepulsten EMAT ohne zusätzliche Permanentmagnete, der Lamb-Wellen über einen Luftspalt von bis zu 4 mm in einer Stahlplatte erzeugen kann [86]. Der vorgestellte EMAT war jedoch nur in der Lage Ultraschall zu erzeugen,

weswegen der Ultraschallempfang mit einer separaten, kontaktierenden Empfangssonde erfolgte [86]. Insofern arbeitet der EMAT nur bedingt berührungslos.

Chen et al. präsentierten einen unidirektionalen EMAT für Rayleigh-Wellen, der aus zwei mäanderförmigen Induktoren besteht [87]. Das Bias-Magnetfeld wird durch einen voluminösen Permanentmagneten erzeugt und der Prüfkörper ist eine Aluminiumplatte [87].

Ein unidirektionaler Rayleigh-Wellen EMAT wurde von Wang et al. vorgestellt, der aus zwei mäanderförmigen Induktoren besteht, die $\lambda/4$ zueinander versetzt angeordnet sind [88]. Die Autoren verwendeten ebenfalls einen Permanentmagneten und der Prüfkörper war aus Aluminium [88]. Sowohl die Arbeit von Chen et al. [87] als auch die von Wang et al. [88] zeigten eine gute Unidirektionalität, aber beide verwendeten Permanentmagnete und die verwendeten Luftspalte waren vergleichsweise gering.

Ein EMAT für die Erzeugung von ringförmigen Lamb-Wellen wurde von Wang et al. vorgestellt, bei dem der EMAT eine fächerförmige Struktur hatte und der Ultraschall durch eine Phasendifferenz von einem Induktorstrang zum anderen Induktorstrang überlagert wurde [89]. Die Autoren verwendeten ebenfalls Permanentmagnete und es war fast kein Luftspalt vorhanden [89].

Ein coils-only EMAT für die Inspektion von ferromagnetischen Rohren wurde von Liu et al. vorgestellt [84]. Der EMAT bestand aus zwei gestapelten folienartigen Induktoren, einem mäanderförmigen Induktor für die Erzeugung eines hochfrequenten Bursts (260 kHz) und einem rennbahnförmigen Induktor zur Erzeugung eines quasi-statischen Bias-Magnetfeldes [84].

Der rennbahnförmige Induktor agiert bei dem EMAT-Konzept wie ein Elektromagnet, wodurch es sich nicht wirklich um einen coils-only EMAT gemäß der Definition in Tabelle 2.2 handelt. Die Verwendung von zwei flachen gestapelten Induktoren anstelle von nur einem Induktor hat den Nachteil, dass ein Induktor einen größeren Abstand zur Metalloberfläche hat, wodurch die Effizienz geringer ist und die beiden erzeugten Magnetfelder überlappen sich deutlich schlechter. Auch war der Luftspalt vermutlich gering, da die beiden flachen flexiblen Induktoren in Referenz [84] eng um ein Metallrohr gewickelt waren. Der EMAT arbeitet im Puls-Echo-Betrieb. Die Lamb-Wellen wurden nicht direktional ausgesendet, weswegen gleichzeitige Echos von beiden Seiten des Rohrs entstanden.

Ein coils-only EMAT für die Erzeugung von S₀-Lamb-Wellen in einer ferromagnetischen Stahlplatte wurde von He et al. gezeigt [90]. Allerdings war ein Permanentmagnet für den Echoempfang mit einem separaten EMAT erforderlich [90]. Der empfangende EMAT wurde mit einem Abstand von 5 mm zur Stahloberfläche betrieben.

Ein EMAT für S₀-Lamb-Wellen auf der Grundlage von Magnetostriktion zur Messung der mechanischen Spannung in einer Stahlplatte wurde von Ren et al. demonstriert [91]. Der Aufbau umfasste zwei getrennte EMATs. Der sendende EMAT bestand nur aus einem Induktor, während der empfangende EMAT auf Permanentmagnete angewiesen war [91]. Der sendende EMAT hatte einen Abstand zur Stahloberfläche von 10 mm, während der empfangende EMAT einen Abstand von 1 mm hatte [91].

Kubrusly et al. stellten einen EMAT für die direktionale Erzeugung von horizontalen Scherwellen vor [92]. Der EMAT bestand aus einem Array aus zwei zueinander verschobenen rennbahnförmigen Induktoren. Die Autoren testeten den EMAT an einer

Aluminiumplatte und zeigten ein Verhältnis zwischen den beiden Ausbreitungsrichtungen des Ultraschalls von über 20 dB [92].

Es lässt sich feststellen, dass keiner der vorgestellten EMATs aus der Literatur in der Lage ist, die hier geforderte Aufgabe einer Kantenabtastung einer ferromagnetischen Stahlplatte zu bewältigen. Somit bestätigt sich die Relevanz des hier vorgestellten EMAT-Konzepts.

3 Modellbildung und Rechnung

In diesem Kapitel werden verschiedene Magnetfeldberechnungen unter anderem mit der Spiegelungsmethode vorgestellt. Es wird gezeigt wie sich die magnetische Flussdichte bei einem Stromimpuls berechnen lässt. Mittels einer Finite-Elemente-Methode (FEM) werden die Ergebnisse verglichen. Anschließend werden Schallfeldberechnungen für Lamb-Wellen und Schallfeldsimulationen für longitudinalen Ultraschall mit der Software k-Wave präsentiert. Es wird mit Hilfe einer FEM-Simulation gezeigt, wie der Empfang von Ultraschall ohne ein aktives Bias-Magnetfeld möglich ist.

3.1 Magnetfelder

Vorweg sollen an dieser Stelle nochmal die elektrodynamischen Wechselwirkungen aufgeführt werden, die für die nachfolgenden Modelle wichtig sind. Beschrieben sind diese elektrodynamischen Wechselwirkungen durch die Maxwell Gleichungen.

In Abschnitt 2.2 wurde bereits der Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte \vec{B} , der magnetischen Feldstärke \vec{H} und der Magnetisierung \vec{M} erläutert. Die Quellenfreiheit des magnetischen Felds in differentieller Form lautet [44]:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.1)$$

Somit sind die B -Feldlinien in sich geschlossen und es gibt keine Quellen oder Senken. Das Ampèresche Gesetz (auch Durchflutungsgesetz genannt) beschreibt die Entstehung von magnetischen Wirbelfeldern durch elektrische Ströme [44]:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (3.2)$$

Dargestellt ist das Ampèresche Gesetz hier in vereinfachter Form ohne Verschiebungsstrom, da der Verschiebungsstrom aufgrund der hohen spezifischen Leitfähigkeit κ gegenüber der Leitungsstromdichte vernachlässigt werden kann [44].

Das Induktionsgesetz:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

beschreibt, dass ein zeitabhängiges Magnetfeld ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt [44]. Eine simple Methode zum Berechnen von Magnetfeldern stellt das Gesetz von Biot-Savart dar:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (3.4)$$

Eine Nachbildung von komplexeren Geometrien lässt sich durch die Superposition aller Leiterstücke realisieren [44]. Die Berechnung des B -Felds um einen Linienstrom kann auch ohne Integral in Abhängigkeit von den Winkeln erfolgen [44]. Die Berechnungszeit wird durch das Weglassen des Integrals deutlich verkürzt, da bei der Berechnung von vielen Feldpunkten und einer komplexen Induktorgeometrie die Berechnung der B -Werte sehr oft erfolgt.

$$B(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{\mu I}{4\pi r} (\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2)) \quad (3.5)$$

In Abbildung 3.1 ist eine schematische Darstellung der Berechnung des B -Felds in Abhängigkeit der Winkel α_1 und α_2 dargestellt. Bei r handelt es sich um den Radialabstand.

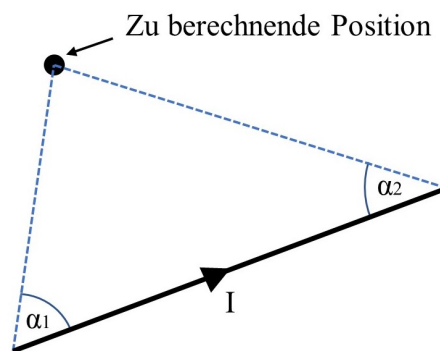


Abbildung 3.1: Schematisch dargestellt ist die winkelabhängige Berechnung der magnetischen Flussdichte um ein Linienleitersegment.

Die Energie im Magnetfeld W_M lässt sich entweder über die magnetische Flussdichte oder über die Induktivität L berechnen (nur für Luftspulen):

$$W_M = \frac{1}{2} L I^2 = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (3.6)$$

Nach der Induktivität L umgestellt ergibt sich:

$$L = \frac{2W_M}{I^2} \quad (3.7)$$

Die Induktivität eines Induktors abzuschätzen ist wichtig für die Schaltungssimulation oder Schaltungsauslegung.

3.1.1 Felder und Kopplung

Um mit dem Gesetz von Biot-Savart den Einfluss von ideal elektrisch leitfähigen Materialien oder idealen Ferriten zu berücksichtigen, kann die Spiegelungsmethode bezüglich der Ströme verwendet werden. An dieser Stelle soll der einfache 2D-Fall (Abbildung 3.2) eines unendlich langen stromdurchflossenen Leiters betrachtet werden.

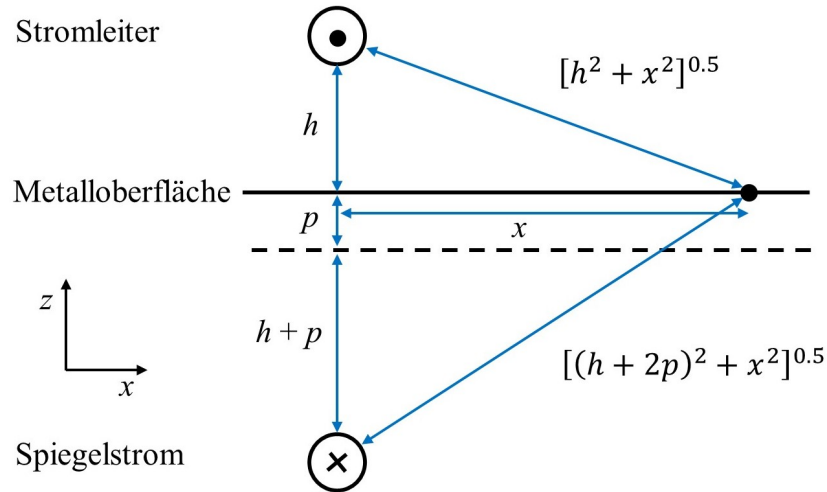


Abbildung 3.2: Dargestellt ist die komplexe Spiegelungsmethode nach Boteler und Pirojola [94].

Die Stromlinie in Abbildung 3.2 befindet sich im Abstand h über einem Halbraum. Ist der Halbraum mit Luft gefüllt, lässt sich die magnetische Flussdichte an der Oberfläche folgendermaßen berechnen:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{h}{h^2 + x^2} \right) \quad (3.8)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{x}{h^2 + x^2} \right) \quad (3.9)$$

Besteht der Halbraum aus einem ideal elektrisch leitfähigen Material, wird der Stromleiter an der Metalloberfläche gespiegelt. Die Richtung des Spiegelstroms zeigt in die entgegengesetzte Richtung zum Strom im Stromleiter. Das sich außerhalb des Metalls befindende Magnetfeld entspricht bei der Spiegelungsmethode dem realen Magnetfeld. Für die Betrachtung des Magnetfelds im Metall ist die Spiegelungsmethode ungeeignet. Handelt es sich um einen idealen Ferrit, muss der Spiegelstrom in dieselbe Richtung wie der Strom im Stromleiter laufen. Der Vorteil der Spiegelungsmethode liegt in der einfachen analytischen Berechnung. Neben der geringeren Rechenzeit liefert die Spiegelungsmethode eine gute Modellvorstellung des Magnetfeldbildes. Um Materialien mit nicht idealer elektrischer Leitfähigkeit zu berücksichtigen, erweitern Boteler und Pirojola die Spiegelungsmethode um eine Verschiebung des Spiegelstroms um die doppelte komplexe Skintiefe [94]:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h + 2p}{(h + 2p)^2 + x^2} \right) \quad (3.10)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{x}{h^2 + x^2} + \frac{x}{(h + 2p)^2 + x^2} \right) \quad (3.11)$$

Der komplexe Abstand p berechnet sich wie folgt [94]:

$$p = \frac{Z}{j\omega\mu_0} \quad (3.12)$$

Bei Z handelt es sich um die Oberflächenimpedanz [94].

$$Z = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad (3.13)$$

3.1.2 Stromimpuls

Mit der Spiegelungsmethode aus Abschnitt 3.1.1 soll die magnetische Flussdichte an der Oberfläche einer Aluminiumplatte berechnet werden. Erzeugt wird das Magnetfeld durch einen Stromimpuls in einem Stromleiter über der Aluminiumplatte. In Abbildung 3.3(a) ist die Anordnung des Stromleiters und der Aluminiumplatte dargestellt.

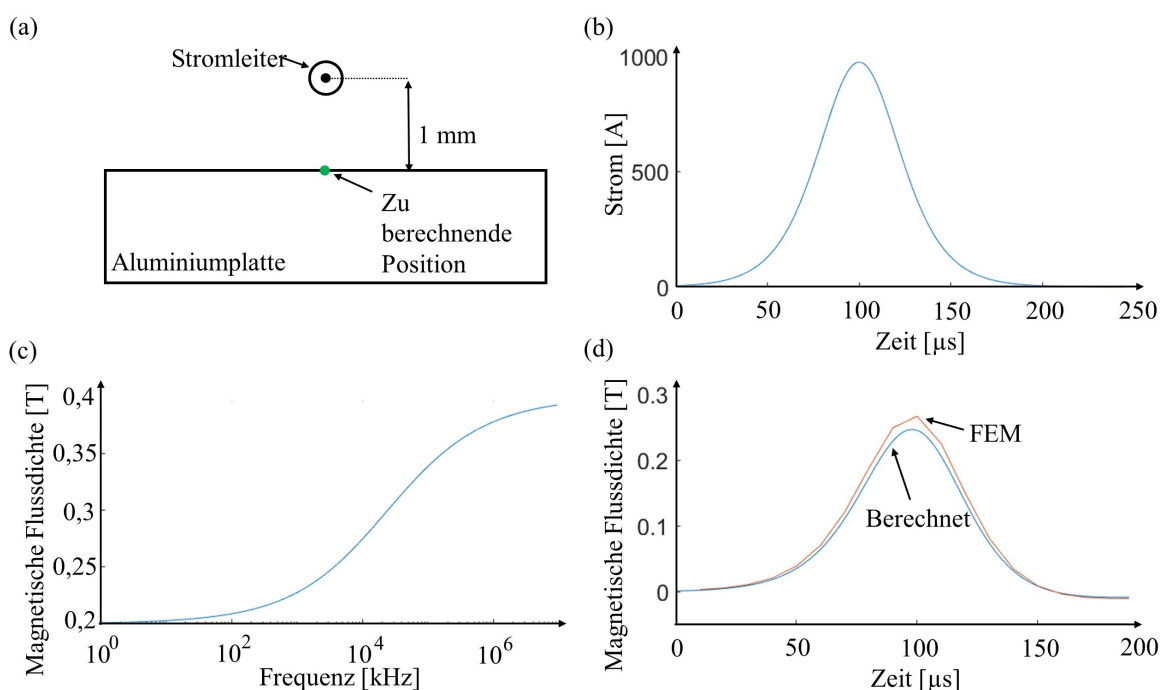


Abbildung 3.3: Berechnung der magnetischen Flussdichte im Zeitbereich bei einem impulsartigen Strom. (a) Aufbau bestehend aus einem Leiter über einer Aluminiumplatte. (b) Dargestellt ist ein gaußähnlicher Stromverlauf durch den Leiter über die Zeit. (c) Frequenzverhalten der magnetischen Flussdichte an der zu berechnenden Position. (d) Magnetische Flussdichte dargestellt im Zeitbereich, die Werte aus der FEM-Simulation dienen als Referenz.

Das gaußähnliche Stromsignal ist in Abbildung 3.3(b) abgebildet und kann mit:

$$I(t) = \frac{I_0}{1 + e^{-\frac{(t-t_{d1})}{\tau_1}}} \frac{I_0}{1 + e^{-\frac{(t-t_{d2})}{\tau_2}}} \quad (3.14)$$

modelliert werden. Mit den Zeitverschiebungen t_{d1} und t_{d2} und den Parametern τ_1 und τ_2 lässt sich der Stromimpuls formen. Die Exponentialterme sind der Fermi-Verteilungen nachempfunden. Bei t handelt es sich um die Zeit. Das Eingangssignal $I(t)$ wird mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert und anschließend jeweils mit den Gleichung 3.10 und 3.12 multipliziert. Da sich die zu berechnende Position bei $x = 0$ befindet ist $B_z = 0$. In der Abbildung 3.3(c) ist die Gleichung 3.10 bei einer Stromstärke von 1.000 A für die zu berechnende Position (eingezeichnet in Abbildung 3.3(a)) über der Frequenz dargestellt.

Um die Plausibilität des Verlaufs in Abbildung 3.3(c) zu prüfen, kann ein Gleichstrom (0 Hz) im Stromleiter angenommen werden. Mit der Gleichung 3.15 lässt sich B berechnen.

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (3.15)$$

Da die Frequenz 0 Hz beträgt, geht die Skintiefe gegen unendlich und die Aluminiumplatte verhält sich wie ein leerer Raum. Bei einem Strom $I = 1.000$ A und einem Abstand $r = 1$ mm beträgt $B = 0,2$ mT. Geht die Frequenz gegen unendlich, wirkt die Aluminiumplatte wie ein idealer Spiegel und B verdoppelt sich zu 0,4 mT. Die Grenzwerte von 0,2 mT und 0,4 mT stimmen mit Abbildung 3.3(c) überein.

Um das Zeitsignal der magnetischen Flussdichte in Abbildung 3.3 zu erhalten, wird das Produkt bestehend aus dem fouriertransformierten Stromsignal und der Übertragungsfunktion mittels der inversen Fast Fourier Transformation (IFFT)) zurück in den Zeitbereich transformiert. Als Vergleich ist das Ergebnis aus der FEM-Simulation geplottet. Die Abweichung beider Ergebnisse ist nur geringfügig. Ein Grund für die Abweichung könnten die angenommenen Durchmesser des Stromleiters sein. In der Berechnung wird dieser als unendlich dünn angenommen, während in der FEM-Simulation die Leiterdicke 0,1 mm beträgt.

3.1.3 Methode nach Dodd und Deeds

Eine weitere Möglichkeit das Magnetfeld zu berechnen, stellen die analytischen Lösungen von Dodd und Deeds [95] dar (siehe 3.16). In der EMAT-Literatur sind die Lösungen von Dodd und Deeds weit verbreitet und können als allgemein anerkannt betrachtet werden.

Dodd und Deeds wenden unter anderem ihr analytisches Modell zur Berechnung des magnetischen Vektorpotential \vec{A} auf einen kreisrunden Induktor über einer Metallplatte an [95]. Es werden vier Gleichungen aufgestellt, jeweils eine Gleichung für den Bereich über und unter dem Induktor, sowie in der Metallplatte und unter der Metallplatte [95]. Mit diesen vier Gleichungen lässt sich A in jedem Raumpunkt berechnen. Für diese Arbeit sind nur zwei der vier Gleichungen wichtig, da hier der Bereich zwischen EMAT-Induktor und Metallplatte und in der Metallplatte interessant ist. Ab-

bildung 3.4(a) zeigt die schematische Darstellung der EMAT-Induktoranordnung. Die Dicke der Metallplatte wird als sehr groß gegenüber der Skintiefe angenommen. Beim Induktor handelt es sich um einen ringförmigen Induktor mit sieben Windungen. Bei $r = 0$ befindet sich der Mittelpunkt des Induktors. Der Innenradius des Induktors beträgt 3 mm, der Außenradius beträgt 5,5 mm und es existiert ein Luftspalt von 1 mm zwischen Metalloberfläche und Induktor. Die Maße entsprechen den hier verwendeten EMAT-Induktoren.

Die Gleichung 3.16 beschreibt den Bereich zwischen dem Induktor und der Metallwand ($0 < z < l$), während die Gleichung 3.17 in der Metallwand ($-c < z < 0$) gilt. Der Luftspalt zwischen dem Induktor und der Metalloberfläche wird als l bezeichnet, während c die Dicke der Metallplatte und ω die Kreisfrequenz darstellt. Die Position der jeweiligen Induktorwicklung wird mit r_0 angegeben und I bezeichnet den Strom, der im Induktor fließt.

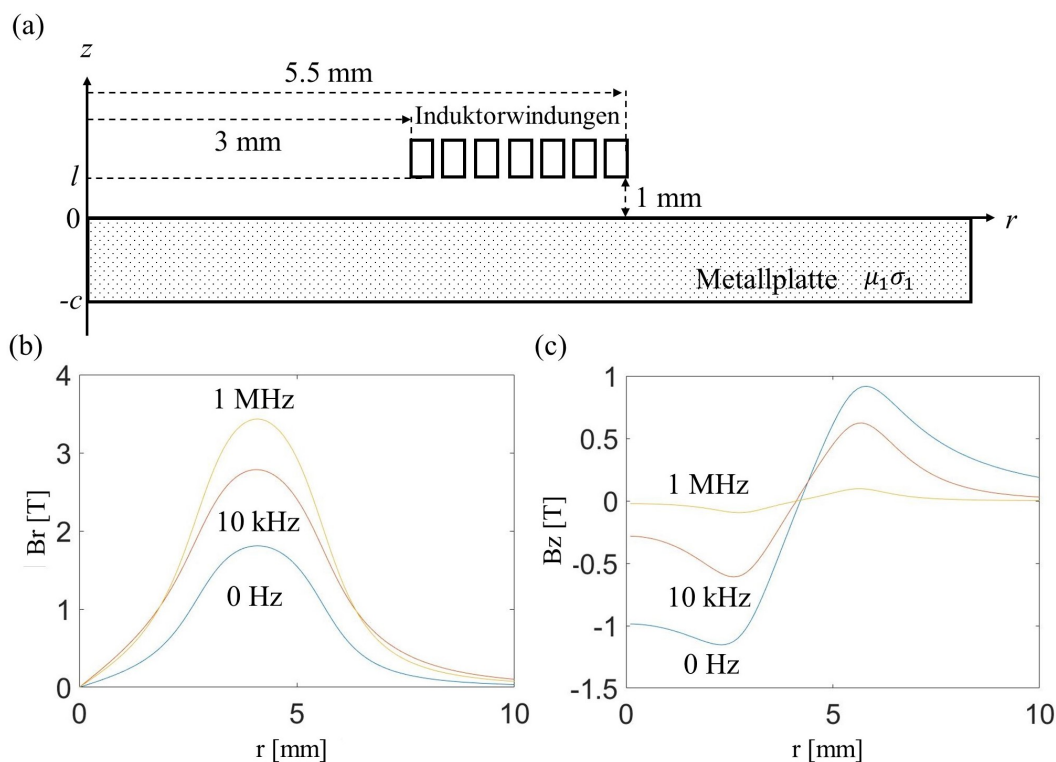


Abbildung 3.4: Analytische Berechnungen des Magnetfelds eines ringförmigen Induktors über einer Aluminiumplatte. (a) Dargestellt ist die schematische Anordnung für die Magnetfeldberechnung. (b) Die r -Komponenten der magnetischen Flussdichte bei $z = 0$ sind für verschiedene Frequenzen abgebildet. (c) Die z -Komponenten der magnetischen Flussdichte bei $z = 0$ sind für verschiedene Frequenzen dargestellt. [96]

Die relativ Permeabilitätskonstante der Metallwand ist μ_1 ($= 1$ für nichtmagnetische Metalle) und die elektrische Leitfähigkeit ist σ_1 . Die Terme $J_1(\alpha r_0)$ und $J_1(\alpha r)$ sind Besselfunktionen erster Art und α stellt die Ortsfrequenz dar.

$$A^{(1)}(r, z) = \frac{1}{2}\mu_0 I r_0 \int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha l} \times \left\{ e^{\alpha z} + \left[\frac{(\alpha - \alpha_1) 2\alpha_1 e^{2\alpha_1 c}}{(\alpha + \alpha_1) 2\alpha_1 e^{2\alpha_1 c}} \right] e^{-\alpha z} \right\} d\alpha \quad (3.16)$$

$$A^{(2)}(r, z) = \mu_0 I r_0 \int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha l} \times \alpha \left[\frac{(2\alpha_1 e^{2\alpha_1 c} e^{\alpha_1 z})}{(\alpha + \alpha_1) 2\alpha_1 e^{2\alpha_1 c}} \right] d\alpha \quad (3.17)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu_0\mu_1\sigma_1} \quad (3.18)$$

Das resultierende magnetische Vektorpotential des gesamten Induktors lässt sich durch Überlagerung ausrechnen:

$$\vec{A}_{total}(r, z) = \sum_{i=r_0}^n \vec{A}_i(r, z, r_0) \quad (3.19)$$

Wobei n die Anzahl der Induktorwicklungen ist und die magnetische Flussdichte $\vec{B}(r, z)$ aus der Rotation des magnetischen Vektorpotentials $\vec{A}(r, z)$ (Gleichung 3.20) gewonnen werden kann.

$$\vec{B}(r, z) = \text{rot} \vec{A}(r, z) \quad (3.20)$$

Abbildung 3.4(b) und (c) zeigen die B_r - und B_z -Komponenten der magnetischen Flussdichten über dem Radius r an der Metalloberfläche ($z = 0$) bei verschiedenen Frequenzen. Der Strom I im Induktor beträgt für die Ergebnisse 2 kA. Die Abbildung 3.4 zeigt, dass die hier gewünschte B_r -Komponente (für die Erzeugung von longitudinalen Ultraschallwellen) mit höheren Frequenzen zunimmt, während die unerwünschte B_z -Komponente abnimmt. Die 0 Hz Kurven stellen das Verhalten eines Permanentmagneten dar, während die 10 kHz Kurven dem Strom I_U zur Erzeugung des Bias-Magnetfelds entsprechen. B_r bei 10 kHz ist im Vergleich zu 0 Hz um das 1,5-fache erhöht, während B_z bei 10 kHz fast halbiert ist. Daher ist zu erwarten, dass das Verhältnis von longitudinaler Ultraschallanregung zu transversaler Ultraschallanregung bei dem dynamischen Strom I_U im Vergleich zu einem statischen Bias-Magnetfeld dreimal höher ist (etwa 10 dB). Ein rückseitiger Permanentmagnet würde noch schlechter abschneiden, da die Feldgeometrien nicht übereinstimmen und die B_z -Komponenten in der aktiven Kopplungszone relativ hoch sind. Kompliziertere und analytisch unlösbare Effekte treten bei ferromagnetischem Stahl auf, bedingt durch nichtlineare Magnetisierung und Sättigungseffekte bei stärkeren Feldern > 1 T. Unter der Annahme der magnetischen Sättigung, wie es hier mit den hohen Flussdichten angestrebt wird, werden die Felder letztlich den idealisierten Berechnungen ähnlich, wie in Abbildung 3.4 gezeigt.

Der Nachteil von den analytischen Lösungen von Dodd und Deeds ist, dass zusätzlich die Integrale gelöst werden müssen. Generell sind die Gleichungen 3.16 und 3.17 im Vergleich zu dem Ansatz in Abbildung 3.2 deutlich komplizierter. Daher stellt sich die Frage, ob eine FEM-Simulation notwendig ist, besonders da eine FEM-Simulation das Hystereseverhalten von ferromagnetischem Material berücksichtigen kann.

3.1.4 FEM-Modell

Zusätzlich zu den analytischen Magnetfeldberechnungen wird in dieser Arbeit ein FEM-Modell verwendet. Das FEM-Modell soll so übersichtlich wie möglich sein, um die Rechenzeit gering zu halten und um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Als Software wird *COMSOL Multiphysics* eingesetzt. Die FEM-Simulation dient als Referenz zu den analytischen Rechnungen und als Plausibilitätsprüfung der experimentellen Messergebnisse.

Außerdem kann die FEM-Simulation auch für ferromagnetische Prüfkörper verwendet werden, da im Gegensatz zu den analytischen Rechnungen eine Hysteresekurve hinterlegt werden kann und Magnetisierung und Remanenz abgebildet werden können.

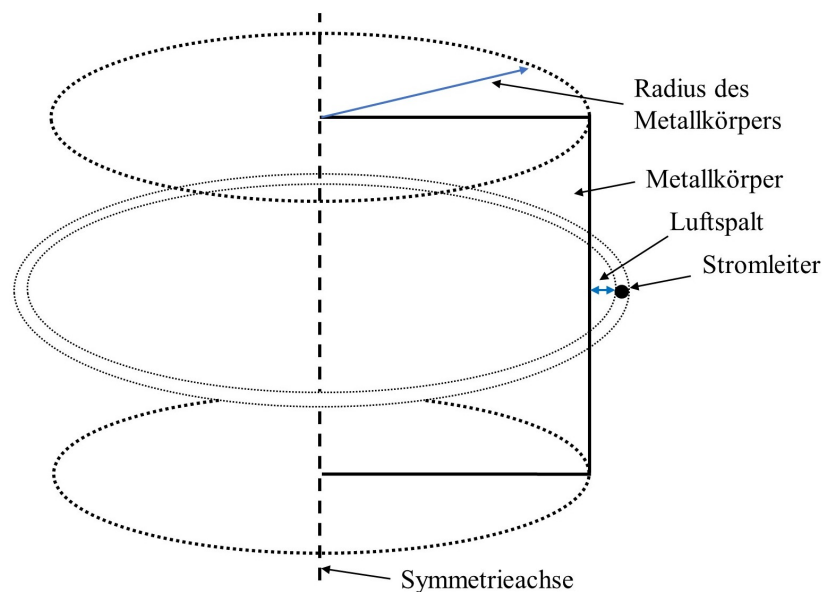


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der geometrischen Anordnung des FEM-Modells.

Als Modell wird ein 2D-achsensymmetrische Darstellung (3.5) verwendet, da die Rechenzeit deutlich geringer ist als bei einem 3D-Modell. In Abbildung 3.5 ist die geometrische Anordnung des FEM-Modells dargestellt. Zum Abgleich der analytischen Magnetfeldberechnungen soll ein geradliniger stromdurchflossener Leiter simuliert werden. In der FEM-Simulation muss der Stromfluss geschlossen sein, weswegen ein kreisrunder Leiter mit einem sehr großen Radius um einen runden Metallkörper gewählt wird. Wichtig ist, dass der Radius des Metallkörpers deutlich größer als der Luftspalt ist. In Abbildung 3.3(d) wird gezeigt, dass das Feldbild von den analytischen Rechnungen und dem FEM-Modell für einen nicht ferromagnetischen Prüfkörper nahezu übereinstimmen.

3.2 Schallfelder

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie sich die Schallfelder mit Lamb-Wellen in einer Metallplatte und mit longitudinalem Ultraschall in einer Flüssigkeit berechnen lassen. Bei den Lamb-Wellen wird auf das directionale Aussenden und den selektiven Empfang eingegangen. Während bei longitudinalem Ultraschall besonders der Einfluss der Metallwände des Flüssigkeitsbehälters berücksichtigt werden muss.

3.2.1 Unidirektionale Lamb-Wellen

Zur Erzeugung von Lamb-Wellen werden üblicherweise rennbahn- oder mäanderförmige EMAT-Induktoren verwendet. Die Ausbreitung der Lamb-Wellen findet bei diesen Induktorgeometrien bidirektional statt. Im Puls-Echo-Betrieb hat die bidirektionale Ausbreitung den Nachteil, dass nicht klar ist, aus welcher Richtung das Echo kommt, da in zwei Richtungen Ultraschall ausgesendet wird.

In Abbildung 3.6 ist ein EMAT dargestellt, der aus zwei rennbahnförmigen Induktoren besteht. Ziel ist es, durch Überlagerungen die Lamb-Wellen unidirektional auszusenden. Somit ist die Ausbreitungsrichtung bekannt und die Ultraschallamplitude kann durch die Überlagerung erhöht werden. Die rennbahnförmigen Induktoren sind um $\lambda/4$ gegeneinander versetzt, wodurch der Abstand zwischen den Mittellinien der beiden Induktoren $5/4 \lambda$ beträgt. Bei einer Frequenz von 1 MHz und einer Plattendicke von 1 mm beträgt die Wellenlänge λ einer S₀-Lamb-Welle etwa 5,2 mm. Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten von Lamb-Wellen können Abbildung 2.9 entnommen werden.

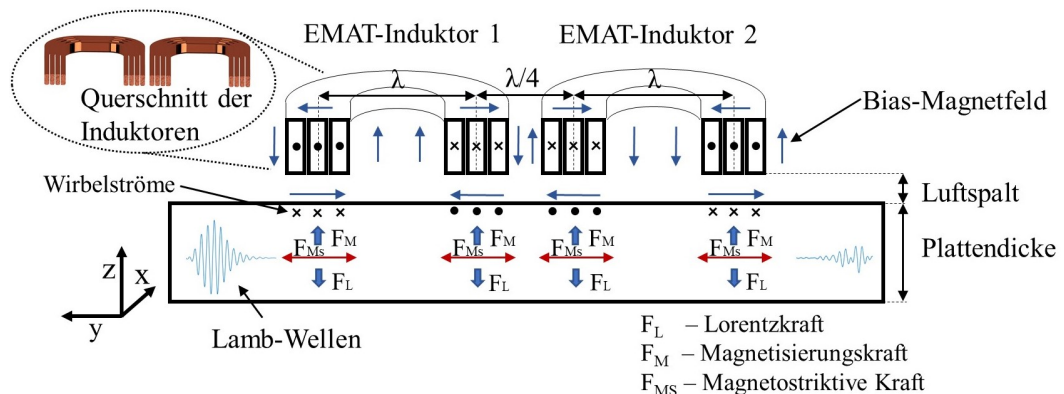


Abbildung 3.6: Gerichtete Lamb-Wellenemission in einer ferromagnetischen Metallplatte. Zwei unabhängig voneinander sendende EMAT-Induktoren erzeugen ein interferierendes Wellenfeld. Die sich in Richtung der rechten Seite ausbreitende Welle wird verringert, während die Welle in Richtung der linken Seite verstärkt wird. [93]

Die Ausbreitung des Ultraschalls kann hier als verlustfrei angenommen werden, wodurch die Signalgeschwindigkeit gleich der Gruppengeschwindigkeit ist. Der Lamb-Wellenimpuls (bei 1 MHz) erfährt in der 1 mm dicken Stahlplatte für die hier betrachteten Entfernungen nur eine geringe Dispersion. Da der Unterschied zwischen der

Gruppengeschwindigkeit und der Phasengeschwindigkeit relativ gering ist, wird die Phasengeschwindigkeit im Weiteren verwendet.

Die schnellere S0-Lamb-Welle ist hier vorteilhaft anstelle der langsameren A0-Welle, weil die größere Wellenlänge bei höherer Geschwindigkeit in der Umsetzung größere Induktorabmessungen ermöglicht. Bei einer gegebenen Frequenz von 1 MHz lassen sich die Induktoren somit leichter herstellen. Die Stromimpulse in den beiden EMATs in Abbildung 3.6 haben die gleiche Polarität und Impulsform. Beide Stromimpulse können unabhängig voneinander zu genau definierten Zeiten ausgelöst werden.

Die Skizze in Abbildung 3.7(a) ist eine Erweiterung von Abbildung 3.6, bei der die zusätzlich eingeführten EMATs 3 und 4 verwendet werden, um die Richtungseffekte der erzeugten Ultraschallwellen von der zentralen EMAT-Struktur 1 und 2 experimentell zu erfassen.

Die Berechnung des 2D-Lamb-Wellenfelds lässt sich mit der Gleichung 3.21 unter der Voraussetzung eines linearen Verhaltens in der Metallplatte darstellen. Bei der 1D-Betrachtung wie in Abbildung 3.7(a) wird jeder Induktor durch zwei deutlich voneinander getrennte Punktquellen dargestellt. Angeregt werden die Punktquellen durch kurze Impulse, die in der gleichen Phasenlage eingepreßt sind. Die Anzahl der Impulse führt zu einer insgesamt (= integralen) doppelten Ultraschalleistung in der Metallplatte (praktisch zwei inkohärente Signale), während zwei eng benachbarte Quellenpunkte eine insgesamt vierfache Leistung ergeben (kohärente Überlagerung).

Bei der 2D-Berechnung wird ein Induktorstrang aus mehreren eng benachbarten Quellenpunkten aufgebaut. Eng benachbart bedeutet hier, dass eine Wellenlänge viel größer ist als der Abstand. Eine Überlagerung aller einzelnen Wellenringe, die von mehreren Quellenpunkten unterhalb der EMAT-Induktorstränge ausgehen, ergibt dann das gewünschte Gesamtmuster des Ultraschallfelds $A_U(x, y, t)$. Die Überlagerung der einzelnen Wellenfelder erfolgte in MATLAB mit einer Summation über n diskretisierte Quellenpunkte, die jeweils eine kurze Schwingung oder einen Burst mit der Kreisfrequenz ω liefern. Die Amplitude A_s eines einzelnen Bursts ist eine Funktion der Zeit t und der relativen Position des Quellenpunkts. Für jeden Quellenpunkt muss eine entfernungsabhängige und phasenwirksame Verzögerungszeit t_{ds} berücksichtigt werden. t_{ps} ist der Einschaltzeitpunkt des Bursts.

$$A_U(x, y, t) = \sum_{s=1}^n A_s(x, y, t) e^{i\omega(t-t_{ps}-t_{ds}(x,y))} \quad (3.21)$$

Die Position eines Quellenpunkts der EMAT-Ultraschallquelle wird mit den Koordinaten x_s und y_s angegeben, wobei s der Quellenpunktindex ist; $r_s(x, y)$ ist der geometrische Abstand eines Quellenpunkts zu den berechneten Positionen x und y :

$$r_s(x, y) = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} \quad (3.22)$$

Die effektive Verzögerungszeit $t_{ds}(x, y)$ des Quellenpunktbursts an der jeweiligen Position ist:

$$t_{ds}(x, y) = \frac{r_s(x, y)}{c} \quad (3.23)$$

Dabei ist c die effektive Geschwindigkeit der Schallwelle. Die Funktion A_s in Glei-

chung 3.21 wird durch zwei Terme (Fermi-Verteilungen nachempfunden) erweitert, die den Ultraschallimpuls mit einem schnelleren Beginn und einem typischerweise langsameren Abklingen um den spezifischen Auslösezeitpunkt t_{ps} des emittierten Impulses modellieren. Dabei ist t_{ps} für die beiden hier betrachteten, unabhängig voneinander gestarteten EMAT-Schallquellen in der Regel unterschiedlich.

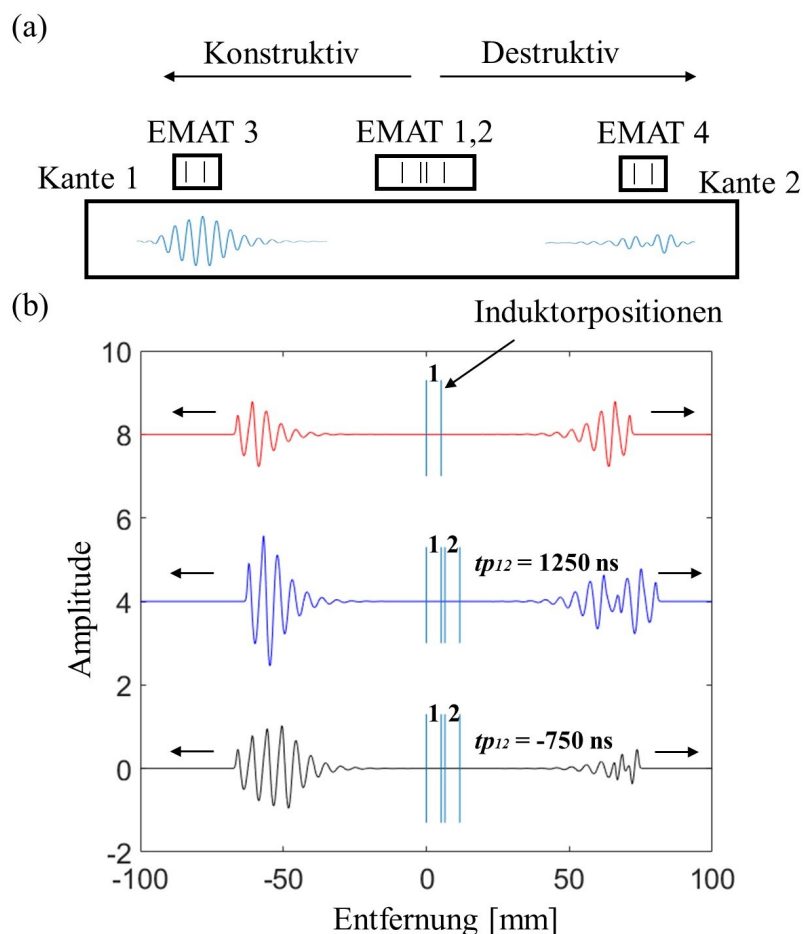


Abbildung 3.7: 1D-Berechnung der emittierten Welle mit konstruktiver und destruktiver Interferenz. (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Verifizierung der vorgestellten Berechnungen. (b) Analytische Ergebnisse für die Richtungsabhängigkeit von zwei EMAT-Strukturen. Eine einzelne EMAT-Struktur (rote Kurve) erzeugt bidirektional Lamb-Wellen. Zwei unabhängig voneinander emittierende EMAT-Strukturen haben einen Zeitversatz von 1250 ns (blaue Kurve) und -750 ns (schwarze Kurve). [93]

Die an die Fermi-Verteilung erinnernden Terme mit den Zeitkonstanten τ_{on} und τ_{off} definieren zeitlich kontinuierlich differenzierbare Ein- und Ausschaltfunktionen und können zur Gestaltung des asymmetrischen Impulsprofils verwendet werden. Der zweite Term mit τ_{off} kann das charakteristische exponentielle Abklingen eines MHz-Emissionsimpulses gut beschreiben, während ein kleineres τ_{on} das schnellere Anlaufen

der Oszillation gut abbildet. Die Funktion A_s in Gleichung 3.21 wird durch eine Konstante A_0 und eine zusätzlichen Dämpfung $1/\sqrt{r_s}$ erweitert, wodurch das auseinanderlaufen eines expandierenden Wellenrings berücksichtigt wird.

$$A_U(x, y, t) = A_0 \sum_{s=1}^n e^{i\omega(t-t_{ps}-t_{ds}(x,y))} \left(\frac{1}{1 + e^{-\frac{t-t_{ps}-t_{ds}}{\tau_{on}}}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{-\frac{t-t_{ps}-t_{ds}}{\tau_{off}}}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{r_s}} \right) \quad (3.24)$$

Durch die Addition (Gleichung 3.24) aller einzelnen Punktquellen von der EMAT-Schallquelle ergibt sich ein interferierendes Wellenmuster in der x - y -Ebene zu einem bestimmten Zeitpunkt t aufgrund des $e^{i\omega t}$ Terms mit den enthaltenen und phasenwirksamen t_{ps} und t_{ds} . Das Ultraschallfeld ist aufgrund der beiden Schaltterme und der Dämpfung über die zurückgelegte Strecke ebenfalls zeitlich und räumlich moduliert. Für die 1D-Wellenberechnung in Abbildung 3.7 wird die x -Koordinate in Gleichung 3.24 weggelassen. Der Dämpfungsterm $1/\sqrt{r_s}$ kann für die Veranschaulichung auf kurzen Distanzen vernachlässigt werden. Die vier Signale der vier EMAT-Stränge in Abbildung 3.7 werden überlagert, dabei wird die jeweilige Position und das Timing berücksichtigt. Abbildung 3.7(b) zeigt die Realteile der berechneten Ultraschallamplituden nach Gleichung 3.24, so wie diese prinzipiell von idealen Ultraschallquellen in den Positionen der EMATs 3 und 4 erzeugt werden. Die Frequenz f in Abbildung 3.7 beträgt 1 MHz und die Ultraschallgeschwindigkeit liegt bei 5200 m/s. Das obere Signal in Abbildung 3.7(b) zeigt den Fall, wenn nur ein EMAT-Induktor aktiv ist. Daher erfolgt die Wellenausbreitung in beide Richtungen gleichermaßen. Das 1 MHz Signalmuster steigt mit τ_{on} an und klingt mit τ_{off} langsamer ab. Bei dem mittleren Signal werden beide Induktoren der EMATs verwendet. Der Zeitversatz t_{p12} beträgt 1250 ns, d. h. EMAT 1 ist um 1250 ns relativ verzögert. Wie bereits erwähnt, führt der Zeitversatz von 1250 ns (entsprechend $5/4 \mu\text{s}$, was dem $5/4 \lambda$ Abstand der beiden EMATs entspricht) zu einer konstruktiven Interferenz nach links, wodurch sich die Amplitude verdoppelt. Die Auslöschung des Ultraschallsignals in die entgegengesetzte Richtung ist jedoch nicht so effektiv wie die bessere Auslöschung durch Zeitversätze von ± 250 ns und ± 750 ns. Das untere Signal in Abbildung 3.7(b) hat einen Zeitversatz von $t_{p12} = -750$ ns. Das berechnete Verhältnis des quadratischen Mittelwerts (RMS) zwischen dem konstruktiv erhöhten Signal und dem destruktiv verringerten Signal beträgt 3,6, was fast 11 dB entspricht. Dies ist die maximale Richtwirkung bei den gegebenen μs -Impulsen (definiert durch τ_{on} und τ_{off}), die sich nach rechts hin nicht vollkommen auslöschung können (Abbildung 3.6 und 3.7). Die anfänglichen Emissionen von EMAT 2 (750 ns verzögert gegenüber EMAT 1) können von EMAT 1 mit einer zusätzlichen Laufzeit von 1250 ns nach rechts nicht eingeholt werden.

Die Gesamttrichtwirkung des Systems kann sogar mehr als verdoppelt werden (mindestens 22 dB), wenn zusätzlich eine zeitversetzte Überlagerung von zwei empfangenen Echosignalen durchgeführt wird. Aufgrund der gleichen Polarität der Sendeimpulse der Treiberelektronik ist für die Aussendung nur eine additive Überlagerung möglich. Die aufgezeichneten Empfangssignale können aber auch numerisch voneinander subtrahiert werden, was bei einer relativen Verzögerungszeit von 1250 ns und bei einer ebenen Wellenfront eines entfernten Reflektors zu einer Auslöschung in eine Richtung

führen würde.

Ferner ist zu beachten, dass eine bereits mäßige Fehlanpassung (z. B. eine Zeitunsicherheit von 100 ns) für das zeitversetzte Senden und Empfangen zu einer erheblichen Verringerung der Richtwirkung führt.

3.2.2 Lamb-Wellenfelder

Abbildung 3.8 zeigt die Amplitude $A_U(x, y)$ nach Gleichung 3.24 für eine Ultraschallquelle bestehend aus zwei bzw. vier Quelllinien und unterschiedlichen Verzögerungszeiten.

Die Länge der Quelllinien in x -Richtung beträgt für alle Anordnungen 10 mm und entspricht damit der Dimension der realen EMAT-Induktoren (Abbildung 4.9). Längere Induktorstränge würden aufgrund der elementaren Beugungstheorie die Öffnungswinkel der projizierten Schallkeulen reziprok verringern. Auch würde die begrenzte Energie für das Bias-Magnetfeld und den MHz-Impuls mit zunehmender Länge über eine größere Fläche verteilt werden, wodurch die elektroakustische Umwandlungseffizienz überproportional sinken würde. Die verstrichene Zeit t beträgt in dieser Darstellung 22 μ s. Die farblich dargestellten Amplituden sind in Abbildung 3.8 zur besseren Darstellung jeweils normiert worden, wodurch diese nicht direkt vergleichbar sind. Ein Vergleich der Amplituden ist in Abbildung 3.7(b) dargestellt.

Das Ziel ist die Aussendung des Ultraschalls in nur die positive y -Richtung. Die projizierten Amplituden sollten in die entgegengesetzte und alle anderen Richtungen schwächer sein. Abbildung 3.8(a) zeigt das normierte Schallfeldmuster für eine einzelne Quelllinie. In Abbildung 3.8(b) wird eine doppelte Quelllinie mit dem Abstand λ dargestellt, was einem einzelnen EMAT-Induktor entspricht, wodurch keine mögliche Verzögerung zwischen den beiden Induktorsträngen vorhanden ist. Abgesehen von der fehlenden unidirektionalen Emission in Abbildung 3.8(b) sind beide Hauptkeulen etwas stärker im Vergleich zu allen anderen Richtungen im Gegensatz zu nur einer Quellenlinie in Abbildung 3.8(a).

Bei den beiden kombinierten EMATs führt die Verzögerte um 750 ns (Abbildung 3.8(c)) zu einer besseren unidirektionalen Emission, wie es bereits in Abbildung 3.7(b) dargestellt ist. Der Zeitversatz in Abbildung 3.8(c) führt zu einem relativ langgezogenem (in y -Richtung) Ultraschallfeld bei $y = 310$ mm.

In Abbildung 3.8(d) sind die EMATs um 1250 ns verzögert, somit erfolgt die stärkste und auch kürzeste Emission in der positiven y -Richtung. Nachteilig ist die relativ starke Emission in die Gegenrichtung im Vergleich zu Abbildung 3.8(c).

Mit der Gleichung 3.24 lassen sich immer komplexere EMAT-Strukturen in beliebigen Geometrien mit verschiedensten Anordnungen und unabhängigen Signalformen ohne weiteres berechnen, wodurch auch fokussierbare Ultraschallwellenfelder möglich sind.

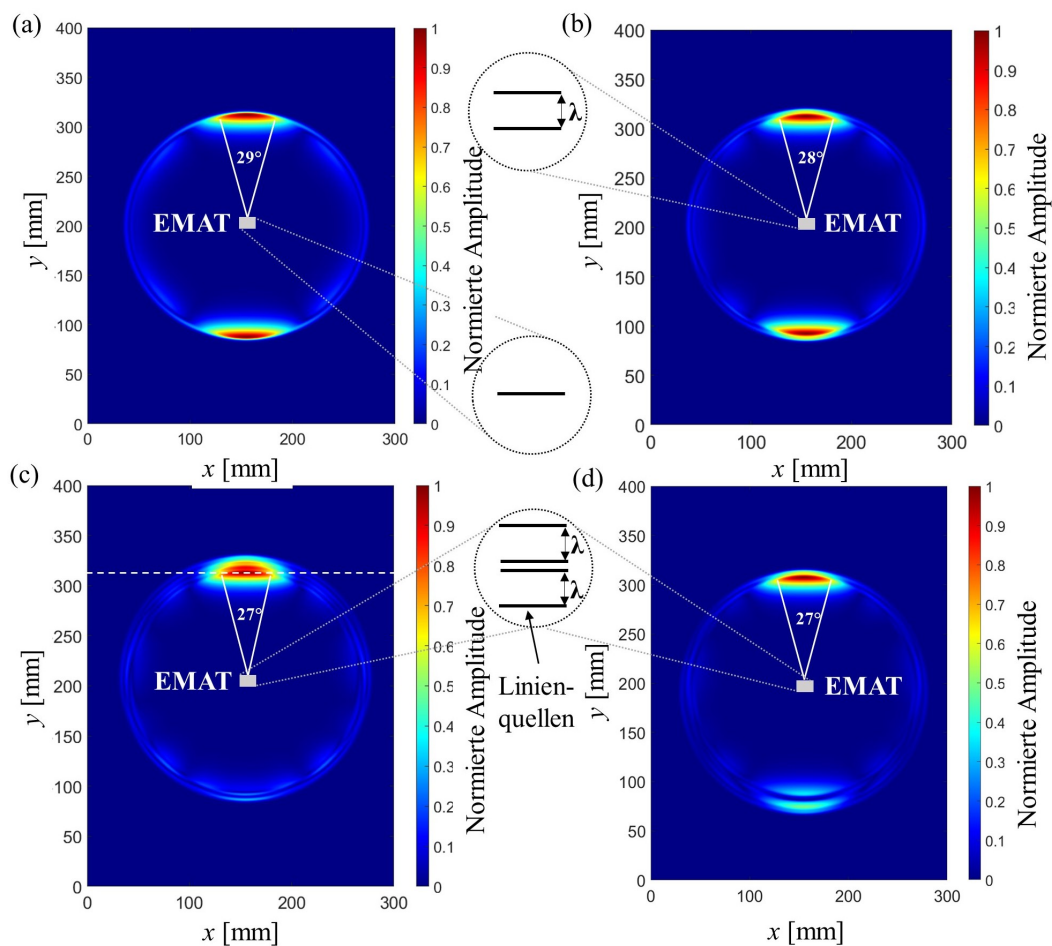


Abbildung 3.8: 2D-Berechnung: Ultraschallamplituden in einer Stahlplatte aus gepulsten (1 MHz) Quellenlinien. (a) und (b) bidirektionale Emission in positiver und negativer y -Richtung. (c) Ausgeprägte Unidirektionalität aufgrund einer Verzögerung von 750 ns für beide unteren Quellenlinien, destruktiv Überlagerung der unteren Ultraschallkeule (Auslöschung). Die gestrichelte weiße Linie zeigt den in Abbildung 5.12 erwähnten Bereich. (d) Verzögerung von 1250 ns für die beiden oberen Quellleitungen führt zur effektivsten Verstärkung der obere Ultraschallkeule. Weniger effektive Auslöschung der untere Ultraschallkeule. [93]

3.2.3 Ultraschallübertragungsverhalten von Metallwänden

In diesem Abschnitt geht es um die Kopplung zwischen EMAT und der Flüssigkeit in einem Metallbehälter. Dabei wird besonders auf das Ultraschallübertragungsverhalten von Metallwänden zur Flüssigkeit eingegangen. In Abbildung 3.9 sind zwei EMATs (EMAT A und B) dargestellt, die sich außen an einer Metallwand von einem mit Flüssigkeit gefüllten Metallbehälter befinden. Zwischen den EMATs und der Metallwand ist ein Luftspalt, wodurch kein mechanischer Kontakt besteht. Im Flüssigkeitsvolumen befindet sich eine Inhomogenität (z. B. eine Metallkugel oder -stab). Um diese zu detektieren, ist es notwendig, Ultraschall in das Flüssigkeitsvolumen zu senden und auftretende Echos von der Inhomogenität zu empfangen.

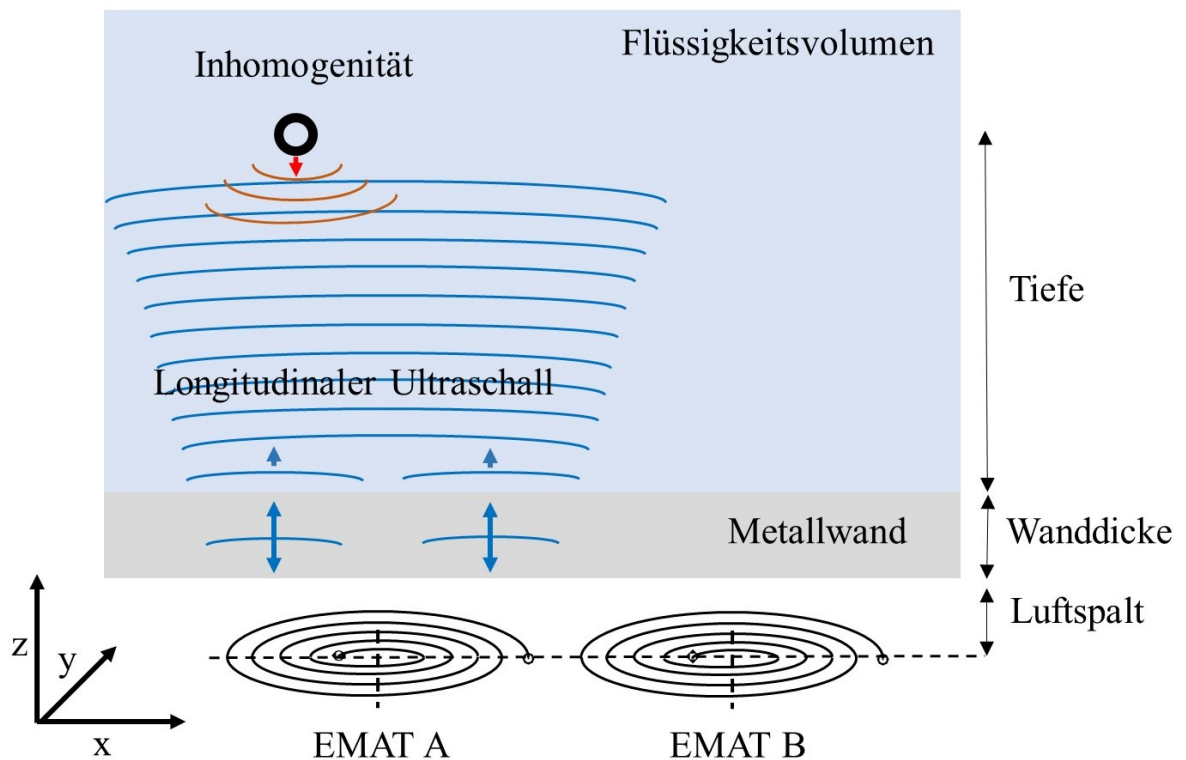


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung von zwei EMATs, die eine Inhomogenität mittels Ultraschall innerhalb eines Flüssigkeitsvolumens in einem Metallbehälter detektieren. [96]

Problematisch ist jedoch das Übertragungsverhalten von der Metallwand zur Flüssigkeit aufgrund des hohen akustischen Impedanzsprungs und der daraus resultierenden hohen Reflektivität zwischen der Metallwand und dem Flüssigkeitsbereich. Die typischerweise relativ dicke Metallwand muss dabei als Übertragungsleitung zwischen der Flüssigkeit und den oberflächlichen Ultraschalldrücken betrachtet werden. Die Probleme, die durch das Übertragungsverhalten entstehen, können nicht durch externe technische Maßnahmen überwunden werden. Stattdessen muss das EMAT-System angepasst werden.

Bei dem bereits in Kapitel 2.4.1 vorgestellten EMAT-Phased-Array von Le Bourdais et al. [58] und Pucci et al. [10] gab es die Problematik nicht, da die EMATs direkt an das flüssige Natrium ankoppelten. Auch haben die EMATs der Autoren keinen Luftspalt überwinden müssen, der die EMAT-Signale schwächt.

Das auch in Kapitel 2.4.1 vorgestellte EMAT-System von Ho et al. [51] zur Detektion von Fremdobjekten in dünnwandigen Getränkedosen hatte keine Probleme mit dem Übertragungsverhalten der Metallwand. Der Grund liegt in der vergleichsweise geringen Wandstärke des Aluminiumbehälters, wodurch die Ultraschallfrequenz als niederfrequent angesehen werden kann.

Ein qualitativ aufschlussreicher Ansatz für die Ultraschallübertragung vom EMAT durch die Grenzfläche von Metall zu Wasser lässt sich mit Hilfe eines elektrischen Ersatzschaltbilds auf der Grundlage von Übertragungsleitungen (z. B. Koaxialkabel) mit entsprechenden Längen und Impedanzen durchführen. Mit der Software LTspice [97] lässt sich das Impulsverhalten im Zeit- und Frequenzbereich in einem 1D-Aufbau (äquivalent zu ebenen Wellen, die senkrecht auf einen Metall-zu-Flüssigkeit-Übergang einfallen) als elektrisches Netzwerk abbilden.

Abbildung 3.10 zeigt eine qualitativ äquivalente Schaltung mit einer elektrischen Spannungsquelle U_1 als Erregerquelle und drei verschiedenen unabhängigen Kopplungsszenarien. Die Innereimpedanz der gewählten Impulsquelle ist niedrig (R_1 , R_2 , und R_3 liegen bei $0,1 \Omega$), da ein EMAT einer sehr niedrigen akustischen Impedanz im Vergleich zu einem Metall entspricht. Während EMATs nur geringe Schalldrücke (Spannungen im elektrischen Modell) aufweisen, ist die Änderung dieser (Ströme im elektrischen Modell) sehr hoch, da die elektromagnetischen Felder keine Trägheitsmasse besitzen. Dementsprechend ist die Metalloberfläche (Koaxialkabel in Abbildung 3.10) stark fehlangepasst an die EMAT-Quelle $U_1/R_{1,2,3}$. Es entsteht nahezu ein Kurzschluss mit dem EMAT (R_1 , R_2 und R_3 sind viel kleiner als die Impedanz des Metalls). Die Bewegung (elektrischer Strom) der Metalloberfläche zum EMAT ist ohne nennenswerte Drücke (elektrische Spannungen) möglich. Daher wird die verfügbare akustische Leistung des EMATs kaum vom Metall aufgenommen; dasselbe gilt umgekehrt.

Das oberste Szenario stellt eine $30 \mu\text{m}$ dünne Aluminiumfolie mit einer Impedanz von $Z_A = 16,9 \Omega$ dar ($16,9 \times 10^6 \text{Ns/m}^3$ ist die akustische Impedanz von Aluminium für longitudinale Ultraschallwellen [2]). Die Durchlaufzeit T_d beträgt 5ns für longitudinalen Ultraschall, was einer Schallgeschwindigkeit in der Größenordnung von $6 \text{mm}/\mu\text{s}$ entspricht und somit etwa für Stahl als auch Aluminium gilt. Das mittlere Szenario stellt eine 3mm dicke Aluminiumwand mit einer Durchlaufzeit von etwa 500ns dar. Das untere Szenario steht für eine 3mm dicke Stahlwand, welche eine höhere akustischer Impedanz besitzt (die akustische Impedanz von Stahl wird hier mit $45 \times 10^6 \text{Ns/m}^3$ angenommen).

An die Metallwand grenzt ein Wasservolumen an. Die Laufzeit der Wasserstrecke beträgt $T_d = 30 \mu\text{s}$, was einer Tiefe von etwa 45mm entspricht. Die Impedanz Z_A des Wassers liegt bei $1,5 \Omega$ ($1,5 \times 10^6 \text{Ns/m}^3$ ist die akustische Impedanz von Wasser [2]). Das Wasser wird schließlich durch einen 50Ω Widerstand abgeschlossen, der angesichts der niedrigen Impedanz von Wasser fast einen Leerlauf darstellt. Dieser Abschluss soll einen stark reflektierenden und massiven Stahlblock imitieren, wenn die Impedanzdiskontinuität in die Akustik übertragen wird.

Um vereinfacht den MHz-Burst zu modellieren, liefert die Erregungsquelle U_1 drei Perioden einer Sinuswelle, beginnend bei $t = 10 \mu\text{s}$, mit einer Frequenz von 1 MHz und einer Amplitude von 1 V. Andere Wandstärken lassen sich auch simulieren, indem die entsprechenden Betriebsfrequenzen gewählt werden.

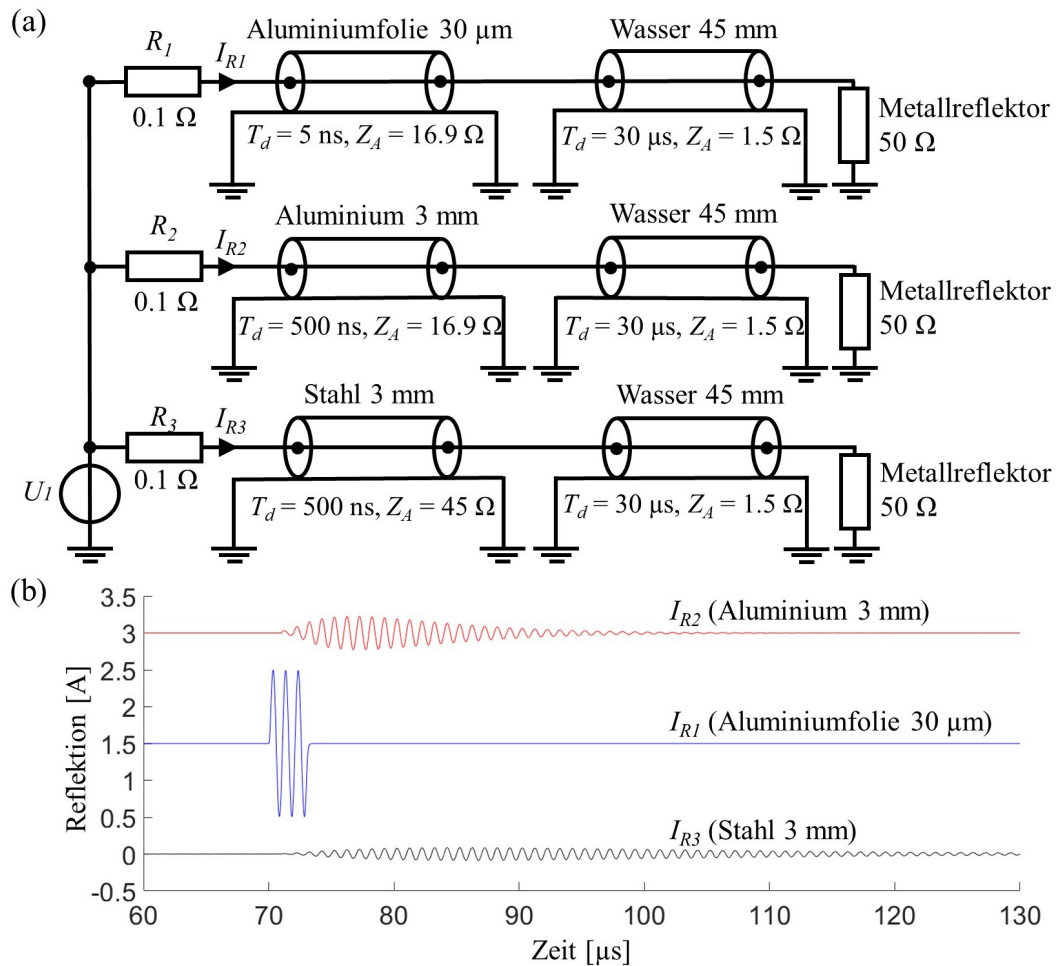


Abbildung 3.10: Elektrische Analogie der Ultraschallübertragung bei Übergängen von Materialien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen. (a) 1D-Echosimulation für drei verschiedene Szenarien der EMAT-Kopplung an Wasser. (b) Echos nach $70 \mu\text{s}$, die als Ströme durch R_1 , R_2 und R_3 erscheinen. Zur besseren Darstellung werden für I_{R1} und I_{R2} Offsets verwendet. [96]

Echos (siehe Abbildung 3.10) sind nach $70 \mu\text{s}$ zu erwarten, da der Emissionsburst bei $10 \mu\text{s}$ ausgelöst wird und die doppelte Laufzeit von $30 \mu\text{s}$ durch das Wasser hat. Für die dünne Aluminiumfolie werden drei sinusförmige Schwingungen I_{R1} erwartet. Somit reproduziert das Echosignal das ursprüngliche Anregungssignal von U_1 . Die dünne Folie stellt kein Problem dar, da die Wellenlänge, die mit einer Frequenz von 1 MHz verbunden ist, viel größer als die Dicke der Folie ist. Daher müssen die 1 MHz in diesem Fall als niedrige Frequenz angesehen werden.

Die 3 mm Aluminiumwand erzeugt jedoch ein schwächeres sowie in der Zeit verbreitertes Echo. Die Amplitude in dieser Einstellung beträgt nicht mehr als 228 mA, das sind nur 23 % in Bezug auf die Aluminiumfolie. Anstelle von nur drei Sinusperioden des Erregungsbursts sind nun etwa 20 Perioden zu erkennen. Diese Unschärfe rührt von mehrfachen internen Reflexionen innerhalb der 3 mm Wand, da beide Oberflächen schlecht an die umgebenden Medien gekoppelt sind. Die internen Reflexionen haben einen Verdopplungseffekt auf die zeitliche Verbreiterung - einmal für die Übertragung ins Wasser und erneut für das zurückkehrende Echo. Noch schwächere Amplituden (etwa 8,5 % in Bezug auf die Aluminiumfolie) und eine noch stärkere Verbreiterung (etwa 50 μ s) werden durch die 3 mm Stahlwand erzielt. Die Impedanzfehlanpassung zwischen Stahl und Wasser ist größer und interne Reflexionen sind somit effektiver und halten länger an.

Die Frequenzanalyse in Abbildung 3.11 zeigt die Kopplung an ein „unendliches“ Wasserbecken ohne Reflexion und in nur eine Richtung (d. h. die Impedanz des abschließenden Absorbers entspricht dem Wasservolumen und es tritt kein Echo auf). Die Spektren müssten quadriert werden, um diese mit den Spektren und der Bandbreite der empfangenen Echos zu vergleichen, da das System im Echobetrieb zweimal durchlaufen werden muss. Als Ergebnis für die dünne Aluminiumfolie (blaue Linie) dieser spektralen Simulation ergibt sich eine breitbandige Kopplung an das Wasser.

Bei den 3 mm Metallwänden wird die Kopplung für Aluminium knapp unterhalb von 50 kHz und für Stahl unter 10 kHz effizient. Bei beiden Metallen ist die Kopplung auch bei etwa 1 MHz effizient, was der Dickenresonanz entspricht, die durch die $\lambda/2$ Bedingung bei 1 MHz Ultraschall an einer 3 mm Metallwand gegeben ist. Die verfügbare Bandbreite für eine effiziente Kopplung ist die gleiche für die kHz-Frequenzen wie für die 1 MHz Dickenresonanz. Zusätzliche und identisch geformte Kopplungsmaxima würden periodisch bei 2, 3, 4, . . . MHz (höhere longitudinale Moden) auftreten. Jedoch sind die höheren Frequenzen technisch nicht vorteilhaft, da Leistungssignale bei höheren Frequenzen schwieriger zu erzeugen sind (Schaltung in Abbildung 4.1). Die verfügbare Bandbreite ist bei der Stahlwand durch die höhere akustische Impedanz stärker eingeschränkt. Die daraus resultierende Zeitunsicherheit (reziprok zur Bandbreite) und auch schwächere Signalamplituden (siehe Abbildung 3.10(b)) schränken letztlich die Detektionsfähigkeit und die Tiefenauflösung für die Detektion von Fremdobjekten ein. Statt einer Tiefenauflösung von z.B. einer viertel Wellenlänge bei 1 MHz Ultraschall in Wasser wird nur die viel langsamere Hüllkurve (oder der Beginn der Echohüllkurve in Einhüllende des Echos in Abbildung 3.10) in praktischen Messungen genutzt.

Das 1 MHz-Band liefert im Vergleich zu Frequenzbändern < 100 kHz ein gerichtetes Ultraschallfeld mit besserer lateraler Auflösung und größerer axialer Reichweite. Außerdem stellt die niederfrequente Kopplung eine nachteilige Tiefpassfilterung dar, während das Frequenzband um 1 MHz von der Elektronik besser unterschieden werden kann. Die relativen Frequenz- und Wellenlängenschwankungen sind im Niederfrequenzband viel höher und die niederfrequente Kopplung begünstigt sogar die niedrigsten Frequenzen bis hinunter zu 0 Hz (d. h. sehr langsame und langanhaltende Signale mit ungünstig langen Wellenlängen im Wasser). Daher ist die höherfrequente Dickenresonanz für diese Aufgabe besser geeignet als die kHz Frequenzen.

Als zusätzliches Problem der niedrigen Frequenzen kommt hinzu, dass der Strom I_U

(Abbildung 4.2) zur Erzeugung des Bias-Magnetfelds Frequenzanteile im kHz-Bereich enthält, die mit Echosignale unterhalb von 100 kHz interferieren würden. Außerdem würde eine einzige Halbwelle bei z. B. 50 kHz 10 μ s dauern, was zu einer zusätzlichen zeitlichen Unschärfe gegenüber dem kürzeren Sendepuls I_{RF} (Abbildung 4.2) beiträgt. Praktische Experimente haben bei den unteren kHz-Frequenzen nur vergleichsweise schlechte Ergebnisse gezeigt, obwohl hohe Sendeleistungen und Echoverstärkungen leicht zu erreichen sind. Es blieben Signalartefakte durch mechanische Nachschwingungen bei niedrigen kHz-Frequenzen stärker und länger bestehen als bei Verwendung eines 1 MHz Bursts. Daher werden Arbeitsfrequenzen im kHz-Bereich in dieser Arbeit nicht als praktikabel angesehen.

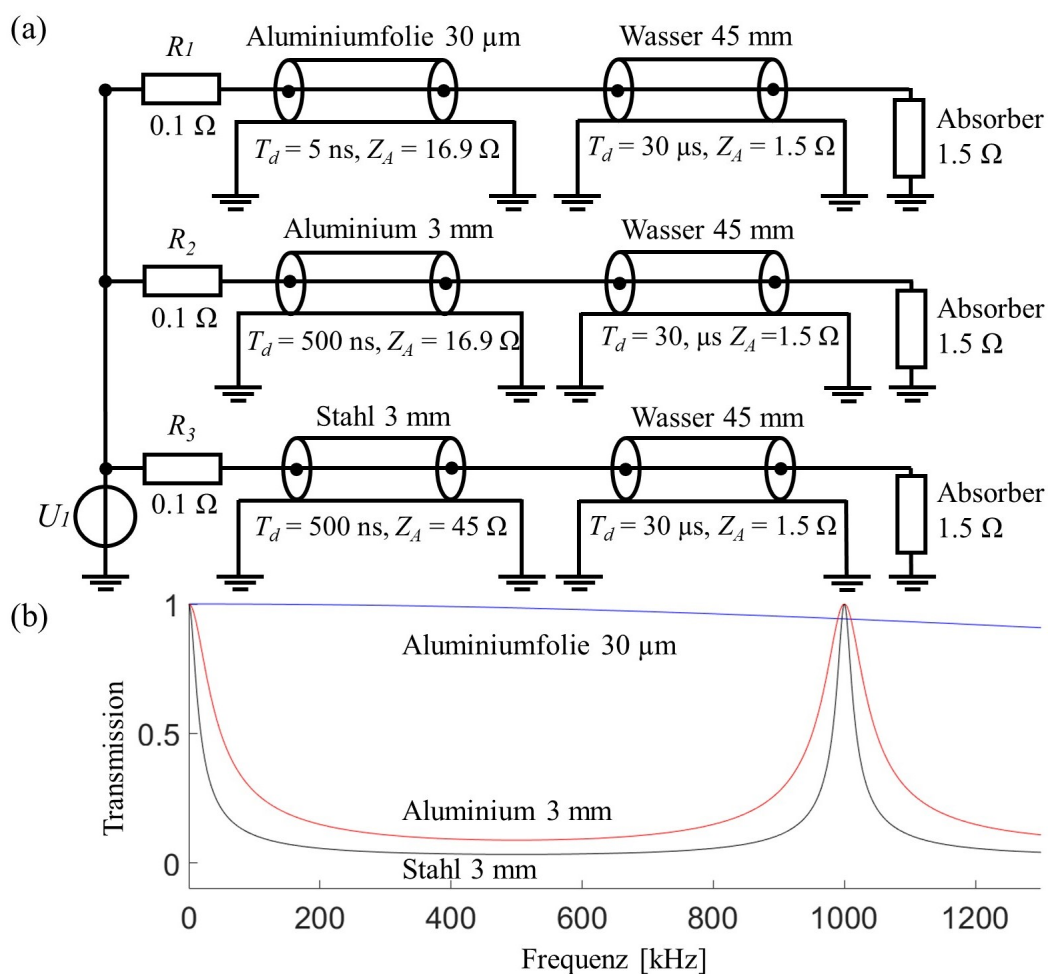


Abbildung 3.11: Spektralanalyse der elektrischen Analogie der Ultraschallübertragung bei Übergängen von Materialien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen. (a) 1D-Simulation für drei verschiedene Szenarien der EMAT-Kopplung an Wasser. (b) Transmissionsspektren der drei verschiedene Szenarien. [96]

3.2.4 Modellierung von projizierten Ultraschallfeldern

Um die Ultraschallausbreitung im Wasser für verschiedene Frequenzen und Wandstärken darzustellen, wird die MATLAB-Toolbox k-Wave verwendet [98]. In Abbildung 3.12 sind die maximalen Amplituden eines sich ausbreitenden Impulses für vier unterschiedliche Konfigurationen dargestellt. Für alle vier Konfigurationen wird Wasser als Medium angenommen.

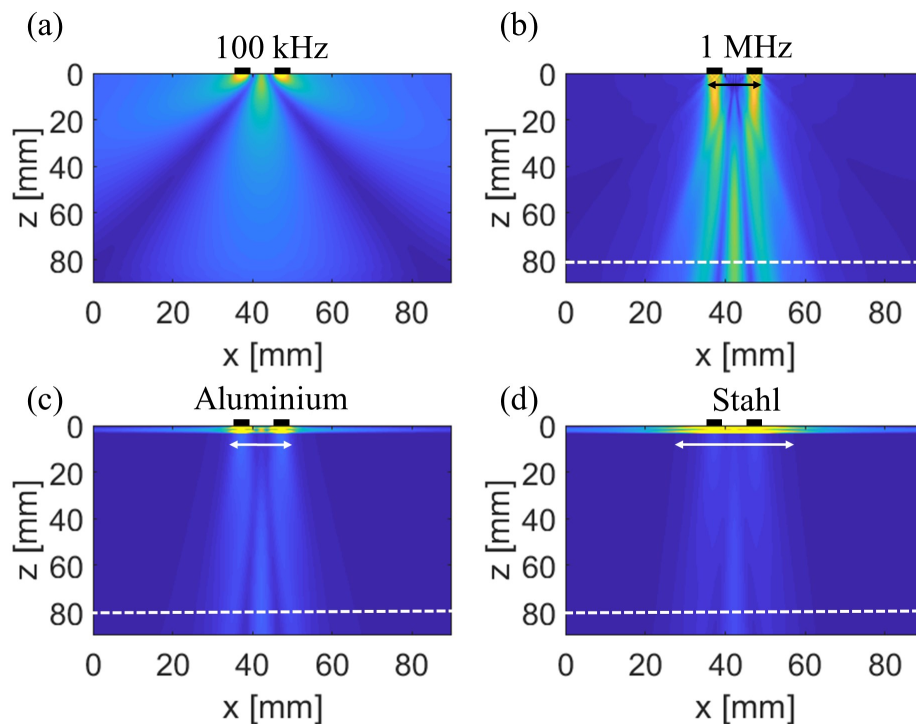


Abbildung 3.12: Simuliertes Ultraschallfeld. (a) Direkte Einkopplung in Wasser bei einer Frequenz von 100 kHz; (b) direkte Einkopplung in Wasser bei einer Frequenz von 1 MHz; (c) Einkopplung durch eine 3 mm dicke Aluminiumwand mit einem 1 MHz Impuls; (d) Einkopplung durch eine 3 mm dicke Stahlwand bei 1 MHz; eine seitliche Unschärfe des einfallenden Impulses innerhalb der Metallwand ergibt sich insbesondere in (d) (weißer Doppelpfeil) und ist wegen der direkten Einkopplung nicht vorhanden in (b) (schwarzer Doppelpfeil). Die gestrichelte weiße Linie bei $z = 80$ mm zeigt den Bereich, auf den sich Abbildung 3.13 bezieht. [96]

In Abbildung 3.12(a) und (b) wird ein normal wirksames Druckfeld mit lateraler Geometrie, die der praktischen Induktorgeometrie entspricht, direkt auf die Flüssigkeitsoberfläche aufgebracht. Eine solche Konfiguration lässt sich mit einem EMAT und einem Flüssigkeitsbehälter realisieren, indem die Metallwand deutlich dünner ist als die Ultraschallwellenlänge. Bei 1 MHz lässt sich dafür z.B. Alufolie verwenden (die

Dicke von Alufolie liegt bei etwa $35\ \mu\text{m}$ und die longitudinale Ultraschallwellenlänge in Aluminium beträgt bei $1\ \text{MHz}$ etwa $6\ \text{mm}$). Das resultierende Schallfeld ist für einen hochfrequenten Impuls ($1\ \text{MHz}$, drei Schwingungen, vgl. Abbildung 3.10(b)) schmaler und bietet relativ mehr Reichweite als ein niederfrequenter Impuls ($100\ \text{kHz}$).

In den Abbildung 3.12(c) und (d) ist zusätzlich im oberen Bereich eine $3\ \text{mm}$ dicke Metallplatte eingefügt. Die eingefügten Quellpunkte liegen in der Oberfläche der Metallplatte, so wie es auch in der Realität der Fall ist, da beim EMAT die Kräfte auf die Oberflächenschicht wirken.

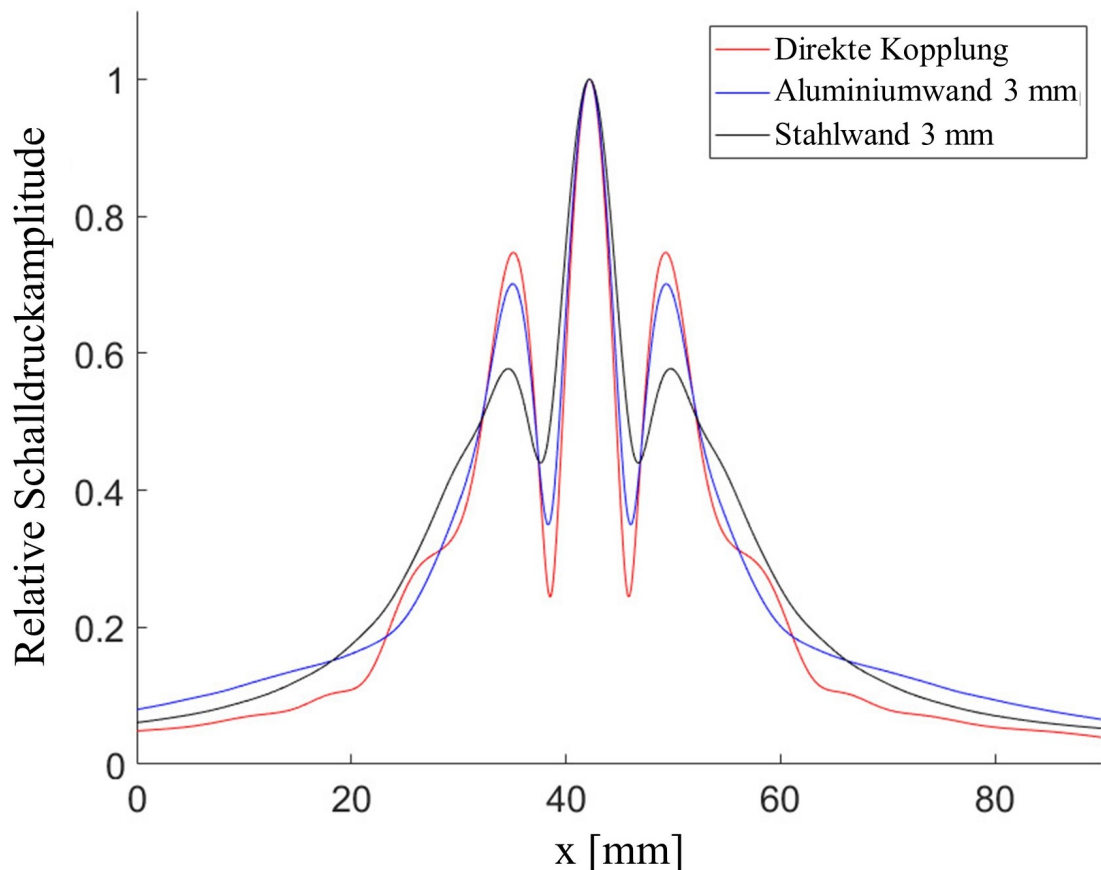


Abbildung 3.13: Relative $1\ \text{MHz}$ Schalldruckamplitude entlang der x -Koordinate in einer Tiefe von $z = 80\ \text{mm}$ (gestrichelte weiße Linie 3.12). Es werden drei verschiedene Ankopplungen verglichen: direkte Ankopplung an das Wasser, Ankopplung durch eine $3\ \text{mm}$ Aluminiumwand und Ankopplung durch eine $3\ \text{mm}$ Edelstahlwand. [96]

Die maximalen Amplituden werden aufgrund von Mehrfachreflexionen innerhalb des Metalls deutlich verringert bevor der Ultraschall in die Flüssigkeit gelangt, was einer unwirksamen Kopplung an die Flüssigkeit mit einer viel geringeren akustischen Impedanz entspricht. Aufgrund der Reziprozität wirkt sich diese Verringerung sogar quadratisch auf den Puls-Echo-Betrieb aus, da sowohl die Ultraschalleinkopplung in die Flüssigkeit als auch die Echodetektion aus der Flüssigkeit entsprechend vermindert wird. Der einfallende Impuls verbreitert sich seitlich (schwarze und weiße Pfeile in Abbildung

3.12(b), (c) und (d)) im Inneren des Metalls, was auf die verlängerte Schwingungsdauer in der Metallwand zurückzuführen ist. Die seitliche Ausbreitung der induzierten Schwingung kann von den benachbarten EMATs detektiert werden (vgl. Abbildung 3.9 und Abbildung 4.8), was nicht erwünscht ist, da es zu Fehlinterpretationen führen kann.

Abbildung 3.13 zeigt und vergleicht die relativen Spitzenamplituden in seitlicher Richtung des sich ausbreitenden 1 MHz Impulses in einer Tiefe von 80 mm in der Flüssigkeit (gestrichelte Linien in Abbildung 3.12). Wie zu erwarten, werden die schwächsten Nebenkeulen für die Stahlprobe mit der längsten akustischen Schwingungsdauer und Unschärfe bzw. Verbreiterung innerhalb der Metallwand erzielt.

3.3 Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld

In diesem Abschnitt geht es um den Empfang von Ultraschall mit einem EMAT, der kein aktives Bias-Magnetfeld während des Empfangszeitpunkts verwendet. Als Voraussetzung muss zumindest die Oberfläche des Prüfkörpers ferromagnetisch sein.

Aus dem Bereich der ZfP mittels residual MFL ist bekannt, dass innerhalb eines ferromagnetischen Metallkörpers geschlossene magnetische Kreise nach dem Abheben eines Permanentmagneten entstehen [99]. Der gleiche Effekt lässt sich auch mittels eines gepulsten Magnetfeldes erzeugen. Nach Antipov und Markov ist jedoch ein unzureichender Wert des durch die Remanenz erzeugten Magnetfelds ein Problem bei der residual MFL [100]. Auch in der Industrie wird die magnetische Remanenz oft als problematisch angesehen, da das magnetische Remanenzfeld Metallspäne anzieht, die Störungen verursachen können. Daher liegt der Schwerpunkt in der Literatur meist auf der erfolgreichen Entmagnetisierung. Hier hingegen wird der Effekt der Remanenz zum Vorteil genutzt.

In Abbildung 3.14 wird die Bildung eines geschlossenen und dauerhaften magnetischen Kreises auf der Oberfläche eines kohlenstoffarmen Stahlblocks mittels FEM-Simulation veranschaulicht, die durch einen externen Magnetfeldimpuls verursacht wird. Es treten hier komplexere Dynamiken und magnetische Schichtungen auf, die nach der Relaxation zu einem dauerhaften geschlossenen magnetischen Kreis führen. Der Aufbau der FEM-Simulation in Abbildung 3.14 zeigt eine Querschnittsdarstellung (2D-Simulation aus Abbildung 3.5) eines einfachen und geraden Leiters über einer Oberfläche eines kohlenstoffarmen Stahlblocks mit einer anfänglichen magnetischen Permeabilität von $\mu_r = 100$. Die FEM-Simulation berücksichtigt eine enge $B - H$ -Hysteresekurve des weichmagnetischen Materials. Der zeitliche Verlauf des Erregerstroms I_c ist in Abbildung 3.14(a) dargestellt. Nach dem gaußartigen Impuls bleibt der Strom bei null. Aus der Simulationsreihe wurden drei charakteristische Zeitpunkte ausgewählt.

Die Farbskala in Abbildung 3.14(b), (c) und (d) repräsentieren den Betrag der magnetischen Flussdichte B , während die zusätzlichen Pfeile die Richtung der B -Vektoren zeigen. In Abbildung 3.14(b) ist das B -Feld während des anfänglichen Anstiegs des Erregungspulses dargestellt, wenn sich die Oberfläche der Stahlkörpers der magnetischen Sättigung nähert. Das vom Leiter erzeugte Magnetfeld und das reaktive B -Feld in der Stahloberfläche zeigen in dieselbe Richtung. Mit dem abnehmenden, aber im-

mer noch positiven Erregerstrom in Abbildung 3.14(c), ist das B -Feld aus Abbildung 3.14(b) bereits weiter in das Material diffundiert und besteht nun aus zwei Schichten mit entgegengesetzten B -Richtungen. Die B -Richtung an der Oberfläche ist nun dem Erregerfeld des Leiters entgegengesetzt. Diese entgegengesetzten Flusslinien (Abbildung 3.14(b)) reichten ursprünglich rechts über den Leiter hinaus und sind nun, bei reduziertem Strom, auf die Oberfläche zurückgefallen. Eine solche magnetisch invertierte Oberflächenschicht ist im Bereich der residual MFL bekannt [99]. Bei der residual MFL führt ein mechanisch von der Metalloberfläche abgehobener U-förmiger Permanentmagnet zu einem ähnlichen Muster in der Eisenprobe [99].

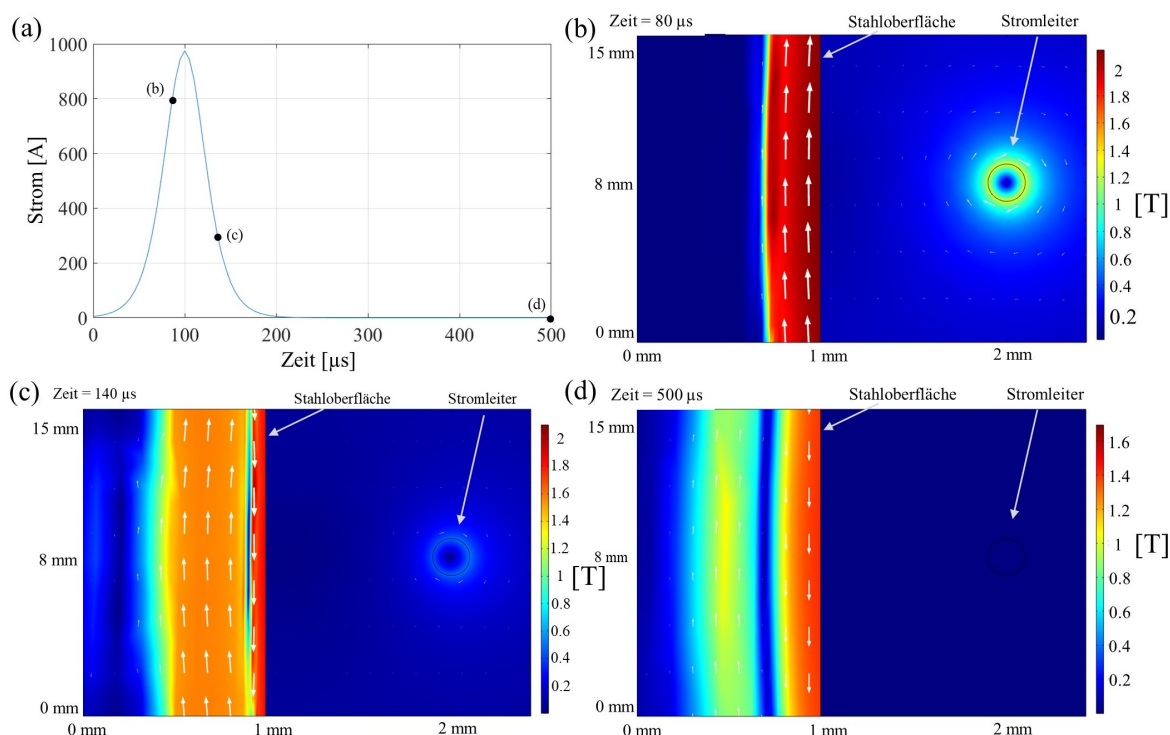


Abbildung 3.14: Ergebnisse der mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführten FEM-Simulation, die eine Querschnittsdarstellung eines Leiters parallel zu der Oberfläche eines kohlenstoffarmen Stahlblocks zeigt. (a) Der modellierte Leiterstrom im Zeitverlauf; die Buchstaben markieren die Zeitpunkte in Abbildung 3.14(a), (b) und (c). (b) Die FEM-Ergebnisse zeigen den Betrag und die Richtung der magnetischen Flussdichte B bei 80 μs . (c) Die FEM-Ergebnisse bei 140 μs . (d) Die FEM-Ergebnisse bei 500 μs . Der Leiterstrom und die magnetische Flussdichte B in der rechten Hälfte des Raums sind nicht vorhanden, während die Magnetisierung in den Schichten im Inneren des Stahls bestehen bleibt. [45]

Das Oberflächenfeld im Material ist in einem bestimmten Moment zwischen Abbildung 3.14(b) und Abbildung 3.14(c) tatsächlich null. In diesem Moment wechselt das Vorzeichen und wie in Kapitel 5.1.2 gezeigt wird, ist die EMAT-Empfangsfähigkeit

trotz eines starken Bias Stroms vorübergehend stark reduziert. Nachdem der Erregungsstrom auf null abgeklungen ist (siehe Abbildung 3.14(d)), gibt es kein nennenswertes B -Feld mehr um den Leiter herum. Dennoch hat sich im Inneren der Eisenprobe ein praktisch statischer Magnetkreis aus zwei gegenüberliegenden Schichten gebildet.

Als möglicher Empfangsmechanismus kann die Lorentzkraft und Magnetisierungskraft ausgeschlossen werden, da ohne Magnetfeld und Strom keine Kräfte zwischen dem Leiter und dem Eisen vorhanden sind. Findet eine Relativbewegung (z. B. Ultraschallschwingung) des gesamten Stahlkörpers in Abbildung 3.14(d) in Richtung des Leiters statt, kann keine Spannung und somit kein Signal in den EMAT-Induktor induziert werden, da die magnetische Flussdichte im Luftspalt oder freien Raum um den Leiter sehr schwach ist.

Daher verbleiben nur magnetostriktive Effekte, die bei hohen Ultraschallfrequenzen (hier 1 MHz) von oberflächennahen Bereichen ausgehen können. Durch Verformungen des magnetisierten Eisens brechen Feldlinien aus der Oberfläche, die dann den Leiter teilweise umschließen und Signalspannungen induzieren.

4 Experimentelle Aufbauten

In diesem Kapitel wird auf die EMAT-Treiberschaltung eingegangen, dabei wird ein bestehendes Treiberschaltungskonzept vorgestellt und die Zielsetzung der für diese Arbeit notwendigen Treiberschaltung erläutert. Das innerhalb dieser Arbeit entwickelte Treiberschaltungskonzept wird präsentiert und die Funktionsweise der Schaltung mittels Schaltungssimulationen gezeigt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten EMAT-Induktoren werden im darauffolgenden Teil beschrieben. Anschließend erfolgt die Vorstellung und Erläuterung der Versuchsaufbauten.

4.1 Treiberschaltung und Zielsetzung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte EMAT-Treiberschaltung baut auf das von Rüter [23] vorgestellte EMAT-Konzept auf. Während der Entstehung dieser Arbeit ist die Schaltung kontinuierlich weiterentwickelt worden. Die zuletzt erstellten Versionen der Platinen und der Schaltpläne befinden sich im Anhang 7. Der Grund für die Eigenentwicklung liegt darin, dass es keine geeignete kommerziell zu erwerbende Treiberschaltung gibt, die die hier geforderten Ansprüche erfüllt. Der große Vorteil einer Eigenentwicklung liegt in der Adaption der EMAT-Elektronik an die Anforderungen des Messaufbaus.

Rüter hat einen EMAT im Puls-Echo-Betrieb demonstriert, der nicht auf einen Permanentmagneten angewiesen ist [23]. In der Veröffentlichung wurde eine Halbleiter-Treiberschaltung vorgestellt, mit der sich ein 500 A MHz-Burst erzeugen lässt [23]. Parallel dazu läuft ein „DC-artiger“ Strom, der für das Bias-Magnetfeld erforderlich ist [23]. Bei Rüters Schaltung handelt es sich um eine Reihenschaltung mit inhärent höherer Impedanz und damit geringeren Strömen bei einer gegebenen und begrenzten Spannung. Grundsätzlich ist das Konzept von Rüter sehr vielversprechend, weswegen es sinnvoll ist, auf das Konzept von Rüter aufzubauen. Ein wichtiger Aspekt der Weiterentwicklung des Schaltungskonzepts von Rüter [23] ist die Separierung der Schaltungsteile zum Erzeugen des MHz-Bursts und dem quasistatischen Strom für das Bias-Magnetfeld. Aus der Separierung ergibt sich der Vorteil, dass die beiden Ströme unabhängig gesteuert werden können und somit der Zeitpunkt des MHz-Burst frei wählbar ist. Hierdurch lässt sich der optimale Zeitpunkt wählen, an dem die Schallintensität des erzeugten Ultraschalls maximal ist. Durch die parallele Schaltung ergibt sich zusätzlich eine geringere Impedanz, d. h. es lassen sich höhere Ströme bei gleichen Spannungen erreichen.

Rüter hat seine Schaltung als Prototyp auf Kupferfolie als Massefläche aufgebracht [23]. Hier hingegen wird alles auf „printed circuit Boards“ (PCB) Leiterplatten aufgebaut, da für EMAT-Arrays mehrere Treiberschaltungen gleichzeitig betrieben werden müs-

sen, weswegen die Treiberschaltungen die gleichen Eigenschaften in Hinsicht auf das Schaltverhalten und die Impulsform der Ströme aufweisen müssen. Bei den Empfängerschaltungen müssen die Verstärkungen, die Gruppenlaufzeiten und die Filterverhalten gleich sein. Auch beschleunigen PCB-Leiterplatten die Iterationen bei der Weiterentwicklung deutlich, da diese maschinell hergestellt und nur noch bestückt werden müssen. Darüber hinaus kann mit der Verwendung von PCB-Leiterplatten in Kombination mit den hohen Strömen und Spannungen (kA/kV) eine Industrietauglichkeit gezeigt werden.

Ein weiteres Ziel ist die Einbringung eines Mikrocontrollers zur Ansteuerung der EMAT-Treiberschaltungen, um automatisierte Messreihen aufzunehmen. Eine Schwierigkeit liegt in den sehr hohen pulsartigen Strömen im kA-Bereich, diese dürfen zu keinen Störungen beim Betrieb des Mikrocontrollers führen. Umgekehrt darf der Mikrocontroller keine Störungen erzeugen, die im Empfangssignal im μV -Bereich sichtbar sind (z.B. überkoppelnde Taktsignale).

Auch die Empfangsschaltung wird weiterentwickelt, da die Ansprüche an die Detektivität und an eine kürzere Erholungszeit sich deutlich erhöht haben. Bei dem Versuchsaufbau von Rüter hat eine Verstärkerschaltung im Empfänger mit einer Stufe basierend auf einem Bipolartransistor ausgereicht. Während hier eine Empfangsschaltung basierend auf Feldeffekttransistoren (FETs) aufgrund der kürzeren Erholungszeit nach einem MHz-Burst notwendig ist. Die Verstärkung von FETs ist geringer als von Bipolartransistoren und eine höhere Detektivität der Empfängerschaltung ist gefordert, weswegen eine vierstufige Empfängerschaltung notwendig ist. Die Verstärkung des neuen Empfängers liegt bei etwa 60 dB.

4.2 Leistungs- und Signalelektronik

In Abbildung 4.1 ist das hier entwickelte Treiberschaltungskonzept vereinfacht dargestellt. Die Schaltung lässt sich in vier Teile A, B, C und D aufspalten. Teil A ist für die Erzeugung eines zeitlich langgezogenen Stromimpulses zuständig, somit soll ein quasi-statisches Bias-Magnetfeld erzeugt werden. Teil B generiert den MHz-Burst, der zur Ultraschallerzeugung dient. Teil C beinhaltet den EMAT-Induktor, das Kabel zwischen EMAT-Induktor und der Treiberschaltung sowie einen Shunt-Widerstand zum Messen des Stroms durch den EMAT-Induktor. Der EMAT-Induktor wird in der Abbildung 4.1 nur durch die Induktivität L_{EMAT} dargestellt. Auf parasitäre Kapazitäten und einen Innenwiderstand wird an der Stelle verzichtet, da diese gegenüber parasitärer Werte des Kabels zu vernachlässigen sind. Teil D ist für die Filterung und Verstärkung der empfangenen Signale zuständig.

Der Hauptunterschied und Vorteil gegenüber dem Schaltungskonzepts von Rüter [23] ist jedoch die unabhängig gesteuerte und parallele Schaltung (= geringere Impedanz, d. h. es werden höhere Ströme erreicht) der Teile A und B, statt einer Reihenschaltung [23] mit inhärent höherer Impedanz und damit weniger Ströme bei einer gegebenen und begrenzten Spannung.

Die Kapazitäten C_1 und C_2 werden in der realen Schaltung durch Kondensatorbänke realisiert. Für C_1 werden dafür Elektrolytkondensatoren verwendet, da diese eine große

Kapazität aufweisen. Die Spannungsquelle U_1 lädt die Kapazität C_1 . Über die Höhe der Ladespannung lässt sich die Amplitude des Stroms I_U einstellen. Je nach Anwendung kann die Spannung U_1 auch deutlich unter 300 V liegen. In der realen Schaltung ist es möglich, dass Teil A auch aus mehreren Zweigen besteht. Jeder Zweig besitzt einen Halbleiter-Schalter, eine Kapazität und eine Induktivität. Somit lässt sich der Stromverlauf von I_U aus mehreren überlagerten langgezogenen Stromimpulsen formen. In Abbildung 4.2 ist ein solcher Stromverlauf dargestellt, verwendet wurden dafür zwei Zweige mit unterschiedlichen Induktivitäten und Kapazitäten. Die Besonderheiten an dem Stromverlauf sind die schnell ansteigende erste Halbwelle, die zusammen mit dem MHz-Burst zum Erzeugen von Ultraschall im Prüfkörper dient und das zeitlich lang andauernde Plateau, welches als Empfangszeitfenster für einfallenden Ultraschall geeignet ist.

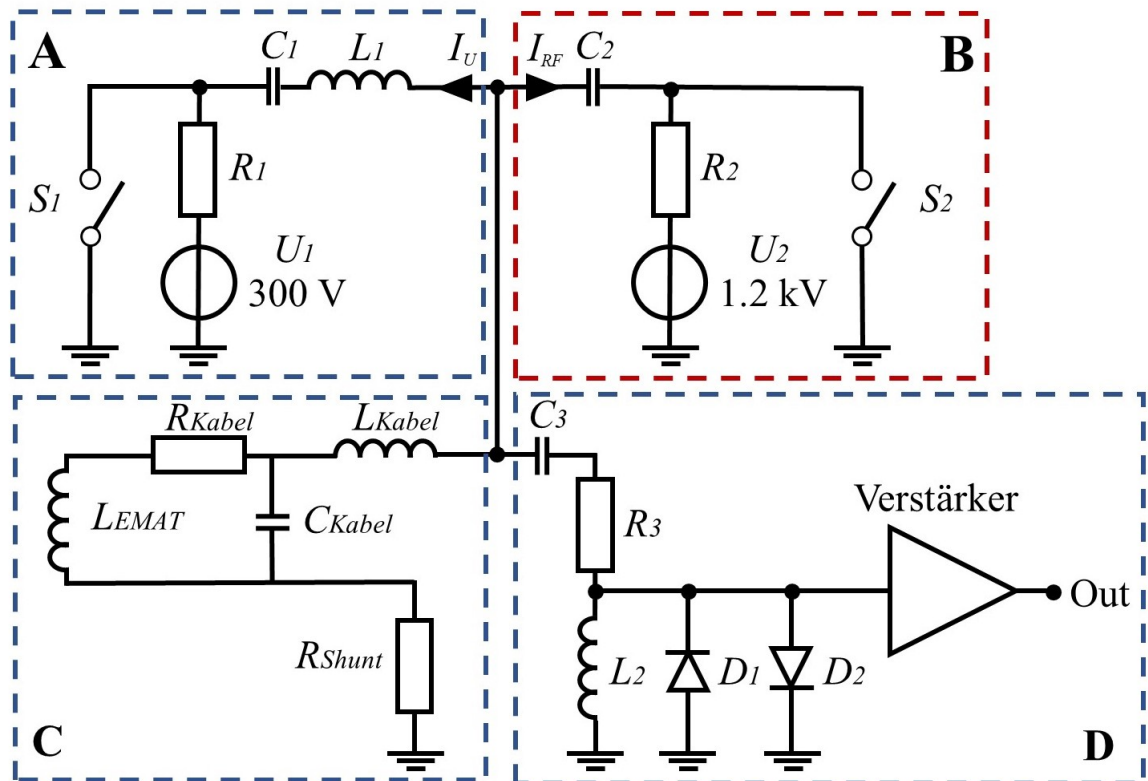


Abbildung 4.1: Vereinfachtes Schaltungskonzept der EMAT-Treiberschaltung. Teil A: Erzeugung eines zeitlich langgezogenen Stromimpulses; Teil B: Erzeugung eines MHz-Bursts; Teil C: EMAT-Induktor mit Kabel; Teil D: Empfängerschaltung. [96]

Die Kapazität C_2 wird durch Folienkondensatoren realisiert, da diese eine hohe Spannungsfestigkeit aufweisen, unipolar sind und einen geringen Innenwiderstand haben, wodurch sich diese gut für Schwingkreise eignen. Die Ströme I_U und I_{RF} lassen sich unabhängig durch die Halbleiter-Schalter S_1 und S_2 starten. Der verwendete Thyri-

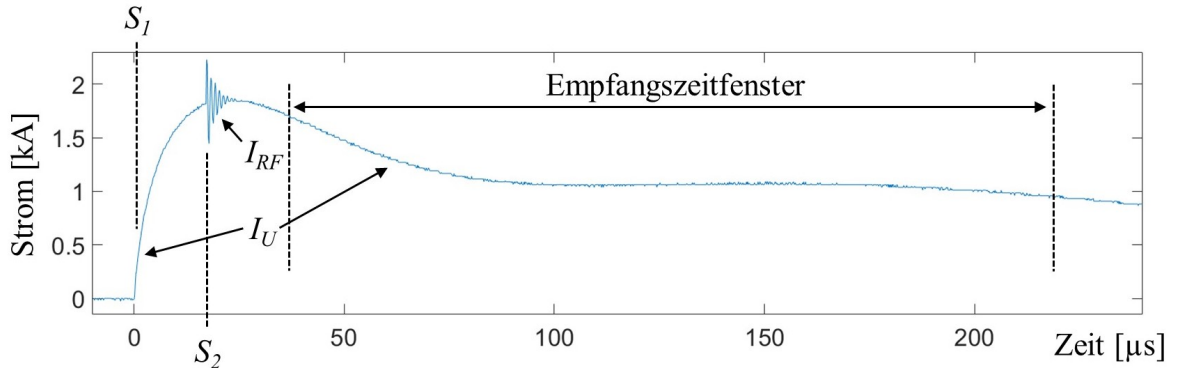


Abbildung 4.2: Gemessener Stromverlauf durch den Shunt R_{Shunt} . Ein langer Stromimpuls $I_U > 1$ kA wird erzeugt, wenn S_1 geschlossen wird. Durch das Schalten von S_2 wird der Strom I_U durch einen kurzen MHz Burst I_{RF} mit Anfangsamplituden $> 300A$ für die Ultraschallaussendung überlagert. Das Empfangszeitfenster ist die Zeitspanne, in der der EMAT eine ausreichende Empfindlichkeit für den Ultraschallempfang aufweist. [96]

stor (S_1) und der Hochspannungstransistor (S_2) können mit höheren Strömen belastet werden als im Datenblatt angegeben, da nur ein einziger, schneller Einschaltvorgang anstelle von sehr häufigen Ein-Ausschaltvorgängen getätigt wird. Besonders die kritischen Ausschaltvorgänge bei noch hohen Restströmen finden hier nicht statt. Beim Einschalten begünstigen Avalanche-Effekte im Halbleiter einen sehr schnellen Übergang von einem stark isolierenden Zustand zu einem hochleitenden Zustand. Selbst bei kurzen Strömen > 1 kA bleibt die Temperatur im Halbleiterschalter unter einem Temperaturbereich bei dem irreversible Schäden im Bauteil auftreten. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messreihen hat sich gezeigt, dass auch nach tausenden Schaltzyklen die Schalter einwandfrei funktionieren. Die wichtigste Spezifikation des Thyristors (S_1) ist die Eigenschaft dem schnellen Stromanstieg des Stroms I_U standzuhalten. Der Hochspannungstransistor (S_2) muss Schaltzeiten im unteren ns-Bereich erfüllen um den hochfrequenten Strom I_R ausreichend schnell einzuschalten.

Die Kondensatorbank C_2 bildet zusammen mit der Induktivität des EMAT-Induktors L_{EMAT} einen Schwingkreis. Die Resonanzfrequenz ist die Frequenz des Stroms I_{RF} und somit auch die Ultraschallfrequenz. Eine Frequenz um 1 MHz stellt hier meist die gewünschte Frequenz dar, was jedoch von der Anwendung abhängig ist. Es konnten auch Ultraschallfrequenzen von 0.5 - 2 MHz erfolgreich erzeugt und empfangen werden. Die Resonanzfrequenz lässt sich mit der Gleichung 4.1 bestimmen:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Höhere und tiefere Frequenzen sind grundsätzlich möglich, zur Erhöhung der Frequenzen bei gleicher Induktivität L_{EMAT} muss die Kapazität C_2 verringert werden, wodurch auch die Energie von C_2 (Gleichung 4.2) und somit die Stromamplitude I_{RF} geringer wird. Dieser Zusammenhang dient demnach als limitierender Faktor für die Er-

höhung der Ultraschallfrequenz mit dem hier verwendeten Treiberschaltungskonzept.

$$W_K = \frac{1}{2}CU^2 \quad (4.2)$$

Die Kapazität C_{Kabel} und Induktivität L_{Kabel} des Kabels sollten klein gegenüber C_2 und L_{EMAT} sein, damit maximal viel Energie des MHz-Bursts im Induktor umgesetzt wird. Dadurch ist die Kabellänge begrenzt.

Teil D besteht aus der EMAT-Empfängerschaltung, die wiederum einen Bandpassfilter und eine Verstärkerschaltung beinhaltet. Die Charakteristik des Bandpassfilters wird über die Bauteilparameter C_3 , R_3 und L_2 bestimmt. Die Kapazität C_3 blockt zusätzlich jegliche Gleichspannungsanteile. Die Dioden D_1 und D_2 schützen den Verstärker vor zu hohen Spannungsspitzen.

4.3 Schaltungssimulation

Die Schaltungssimulation in Abbildung 4.3 ist mit der Software LTspice [97] durchgeführt worden. Aufgeteilt ist die Simulation in fünf Teile, angelehnt an die Abbildung 4.1. Zusätzlich zu Abbildung 4.1 berücksichtigt die Abbildung 4.3 die Kopplung zum Medium und das 1D-Ultraschallverhalten im Puls-Echo-Betrieb. Die Buchstabenbezeichnung der Teile in Abbildung 4.1 entsprechen den Buchstabenbezeichnungen in Abbildung 4.3.

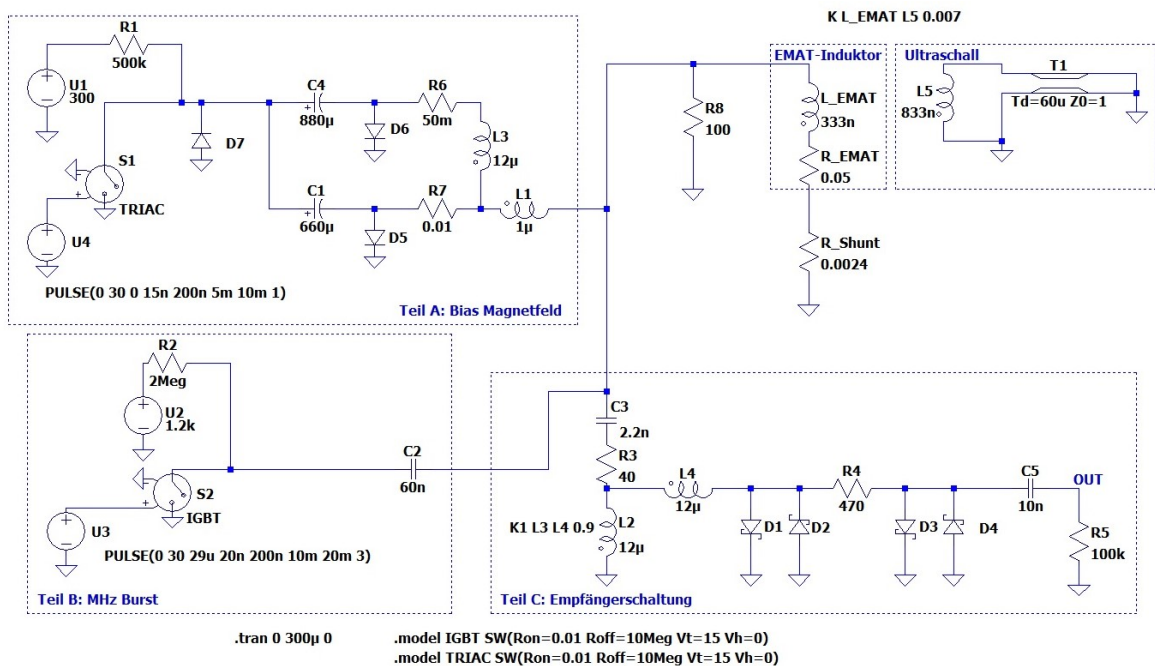


Abbildung 4.3: Schaltungssimulation der EMAT-Treiber- und Empfängerschaltung in LTspice.

In Abbildung 4.4 ist der Stromverlauf gemessen über den Shunt R_{Shunt} dargestellt. Der langgezogene Stromverlauf dient dem Bias-Magnetfeld und wird durch den Schal-

tungsteil A generiert. Gestartet wird der Strom in Teil A über den Schalter S_1 , der in der EMAT-Treiberschaltung durch zwei parallel geschaltete „Triodes for Alternating Current“ (Triacs) realisiert wird. Die Parallelschaltung dient der Stromverteilung, da einer der hier verwendeten Triacs den Stromanstieg allein nicht standhält. Durch die Dimensionierung von C_1 , R_7 , L_1 , C_4 , R_6 und L_3 lässt sich der Stromverlauf formen. Über den unteren Zweig wird die erste Halbwelle des Stromverlaufs gesteuert. Die Kapazität von C_1 entscheidet über die zeitliche Dauer der ersten Halbwelle. Über R_7 und L_1 lässt sich der Stromanstieg der ersten Halbwelle einstellen. R_7 beeinflusst gleichzeitig die zeitliche Entladung von C_1 und somit die zeitliche Dauer der ersten Halbwelle. Der obere Zweig in Teil A ist für das Plateau hinter der ersten Halbwelle zuständig. Das Plateau erzeugt ein quasistatisches Bias-Magnetfeld, welches gut geeignet als Empfangszeitraum für Ultraschall ist. Es wird dadurch verhindert, dass die Spannung an den Diode D_5 und D_6 positiv wird und die Dioden schalten müssen. Die Dioden D_5 , D_6 und D_7 verhindern, dass die Polarität an den Kapazitäten C_1 und C_4 dreht. Da in der realen Schaltung Elektrolytkondensatoren wegen der hohen Kapazität verwendet werden und diese sehr empfindlich gegen Verpolung sind. Idealerweise sollten die Dioden nicht schalten müssen oder zu einem Zeitpunkt schalten, an dem kein Ultraschall detektiert werden soll, da das Schalten im Empfangssignal deutlich als Störung zu sehen ist.

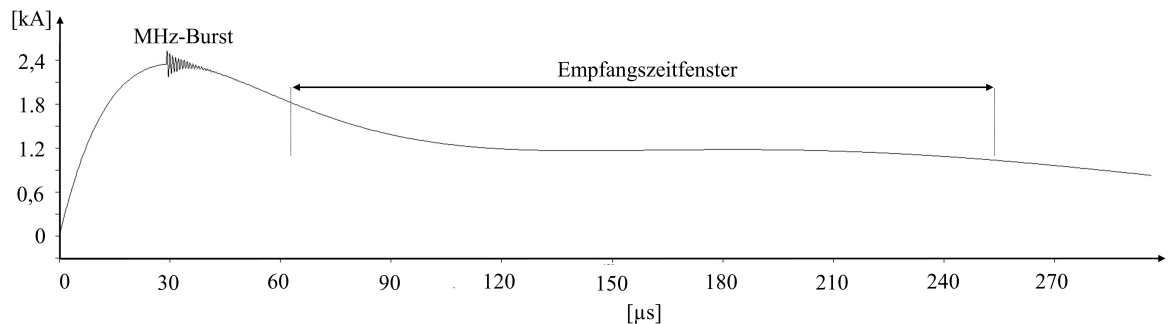


Abbildung 4.4: Simulierter Stromverlauf über R_{Shunt} in der Schaltungssimulation aus Abbildung 4.3. Der Verlauf entspricht weitgehend dem real gemessenen Stromverlauf aus Abbildung 4.2.

Teil B erzeugt den MHz-Burst, der in Abbildung 4.4 bei $29 \mu\text{s}$ auf dem zeitlich langgezogenen Stromimpuls aufgesetzt ist. Der Startzeitpunkt des MHz-Bursts lässt sich über den Schalter S_2 steuern. Die Frequenz des MHz-Burst wird über den LC-Schwingkreis, bestehend aus C_2 und L_{EMAT} eingestellt. Über den Widerstand R_8 kann die Dämpfungen des MHz-Bursts an die realen Messungen angepasst werden, die durch Verluste im System entstehen.

Die Kopplung zwischen EMAT-Induktor und Metallobjekt wird in der Schaltungssimulation über die Kopplung zu der Induktivität L_5 simuliert. Eingestellt wird die Kopplung über den Kopplungsfaktor K , der anhand von Messdaten geschätzt werden kann. Um den Puls-Echo-Betrieb eines EMATs nachzustellen, wird wie bereits in den Abbildung 3.10 und 3.10 eine Verzögerungsleitung verwendet, die auf einer Seite

kurzgeschlossen ist. Über die Verzögerungsleitung T_1 lässt sich das Stromsignal zeitlich verzögern, was der Ultraschalllaufzeit im realen System entspricht. Das durch die Verzögerungsleitung T_1 zurücklaufende Signal koppelt wieder zurück in den EMAT-Induktor L_{EMAT} und kann dadurch von der Empfängerschaltung detektiert werden. Teil C in Abbildung 4.3 beinhaltet die Empfängerschaltung. Es wird nur der Eingang der Empfängerschaltung mit der Signalfilterung berücksichtigt. Um die Schaltungssimulation in Abbildung 4.3 simpel zu halten, wird die komplette Empfängerschaltung separat in Abbildung 4.6 simuliert.

Das Ausgangssignal gemessen über den Widerstand R_5 ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Bei $0 \mu\text{s}$ gibt es einen deutlichen Ausschlag im Empfangssignal, verursacht durch das Schalten von S_1 . Von $29 \mu\text{s}$ bis $80 \mu\text{s}$ ist der MHz-Burst zu sehen, der die gleiche Frequenz wie das Ultraschallsignal hat, wodurch sich der MHz-Burst nicht herausfiltern lässt. Die Abklingzeit des MHz-Bursts lässt sich durch die Dimensionierung des EMAT-Induktors beeinflussen. Das erste und zweite Ultraschallecho ist deutlich zu erkennen. Da keine Verstärkerstufe vorhanden ist, wurde der Kopplungsfaktor K etwas größer gewählt. Der Signalverlauf in Abbildung 4.5 ähnelt realen Messsignalen.

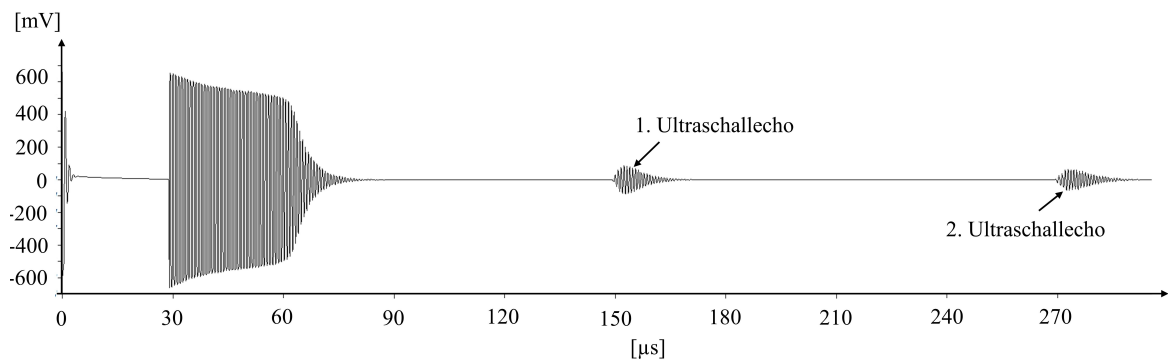


Abbildung 4.5: Dargestellt ist das simulierte Signal am Empfängeranfang von Abbildung 4.3.

In Abbildung 4.6 ist die Schaltungssimulation der EMAT-Empfängerschaltung dargestellt. Vor dem Eingang der Empfängerschaltung befindet sich ein Spannungsteiler, bestehend aus R_9 und R_{10} . Der Spannungsteiler dient zur Nachbildung des niederohmigen Verhaltens des EMAT-Induktors.

Der Eingang der Empfängerschaltung hat ein Bandpassfilterverhalten, welches über C_2 , R_3 , L_3 und L_4 eingestellt wird. Bei der Verschaltung von L_3 und L_4 handelt es sich um einen Spartrafo. Allen Dioden in Abbildung 4.6 sind Schottky Dioden, da diese schnell und bei geringen Spannungen schalten. Somit sind diese Dioden ideal um Spannungsspitzen abzufangen.

Nach der Filterung kommen vier Verstärkerstufen, bestehend aus den FETs $J_{1,2,3,4}$. Der NPN-Transistor Q_1 sorgt für einen niederohmigen Ausgang der Empfängerschaltung. Der Widerstand R_{16} und die Kapazität C_9 dienen als niederohmiger Abschluss innerhalb der Simulation. Ein niederohmiger Abschluss ist notwendig, damit es nicht zu einer Fehlanpassung zwischen Empfängeranfang und dem Eingang am Oszilloskop kommt. Denn der Eingang des Oszilloskops ist bei den realen Messungen auf 50Ω einge-

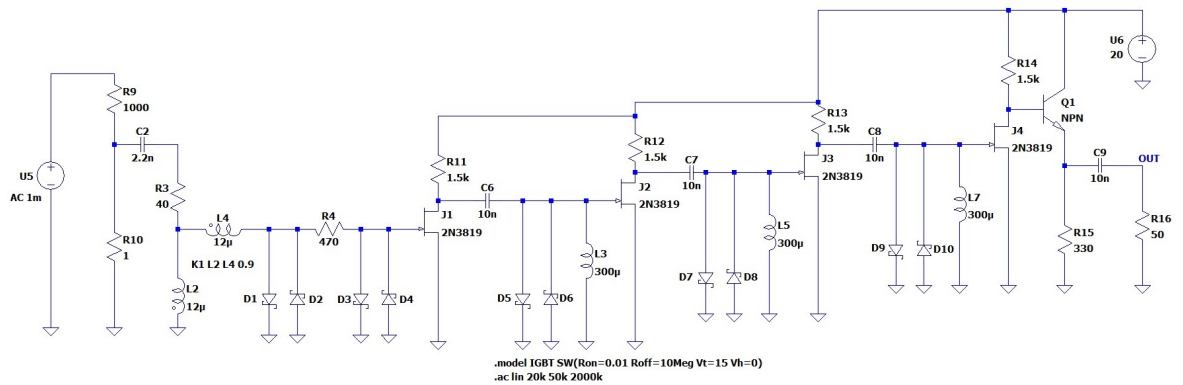


Abbildung 4.6: Schaltungssimulation der EMAT-Empfängerschaltung in der Software LTspice.

stellt, da es anderenfalls bei den starken Stromimpulsen in der EMAT-Treiberschaltung zu Potentialanhebungen des Ausgangssignals des EMAT-Empfängers gekommen ist. Das Frequenzverhalten der Empfängerschaltung ist in Abbildung 4.7 dargestellt, die Spannung ist am Ausgang über R_{16} gemessen. Am Eingang der Schaltung liegt $1 \mu\text{V}$ an, somit entsprechen die μV Spannungswerte direkt der Verstärkung. Die maximale Verstärkung liegt demnach bei Faktor 900 (59 dB). Der zeitlich langgezogene Stromimpuls für das Bias-Magnetfeld hat eine Frequenz von etwa 10 kHz und wird somit komplett aus dem Ausgangssignal herausgefiltert. Die höchste Verstärkung findet in dem Frequenzbereich zwischen 900 kHz und 1 MHz statt, dabei handelt es sich um die Frequenz, die in den meisten Versuchsaufbauten in dieser Arbeit verwendet wird.

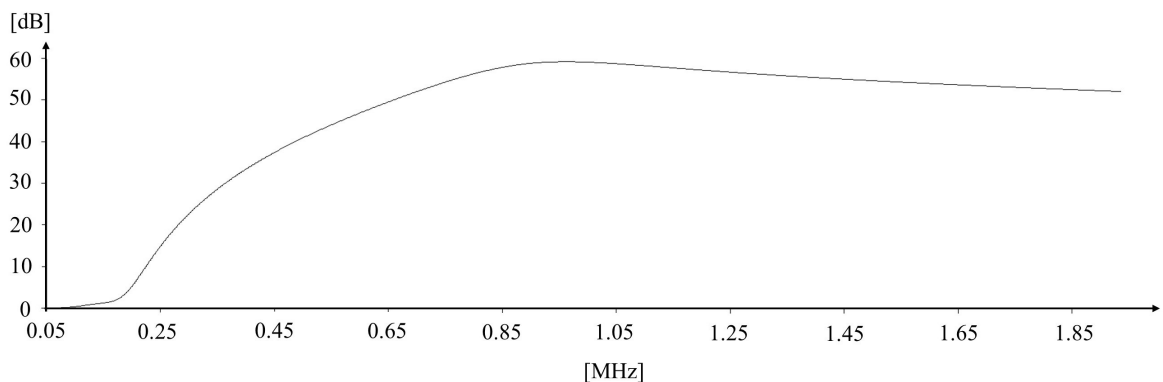


Abbildung 4.7: Frequenzverhalten der Empfängerschaltung aus Abbildung 4.6 simuliert mit LTspice.

4.4 Induktoren

Innerhalb dieser Arbeit wurden aufgrund des linearen Verhaltens und der einfachen Herstellbarkeit überwiegend Luftspulen als Induktoren eingesetzt. Probleme bei Induktoren mit Ferritkern oder -rückplatte (oder Eisenpulverkerne/Transformatorbleche) sind

ein nichtlineares Verhalten durch die Hysteresekurve des Kerns/Rückplatte und das mögliche Auftreten von Magnetostriktion und Magnetisierungskräften im Ferrit/Eisen, die zu ungewollter Ultraschallanregung im Kern oder in der Rückplatte führen können. Induzierter Ultraschall im Kern oder in der Rückplatte kann vom EMAT detektiert werden und führt zu unerwünschten Signalen, die sich mit dem Empfangssignal überlagern. Für Versuchsaufbauten ist es aufgrund dieser Problematik oftmals einfacher Luftspulen zu verwenden, da eine weitere Fehlerquelle ausgeschlossen werden kann. Generell wurden innerhalb dieser Arbeit zwei Induktortypen verwendet: dabei handelt es sich um runde Flachspulen zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall (Abbildung 4.8) und um rennbahnförmige Induktoren zum Erzeugen von Lamb-Wellen (4.9). Alle Induktoren bestehen aus Kupferlackflachdraht, da Flachdraht mehrere Vorteile im Gegensatz zu Runddraht hat. Bei Induktoren aus Flachdraht besteht eine höhere mechanische Stabilität, da die Flachdrahtwindungen eine größere Auflagefläche zueinander haben (Abbildung 4.8(a)). Durch die Stromimpulse im kA-Bereich treten hohe Lorentzkräfte zwischen den Windungen auf. Bei Induktoren aus Runddraht kann es dazu kommen, dass die Windungen sich zueinander verschieben, da die Kontaktfläche sehr klein ist und immer Freiräume durch die Rundung bestehen. Eine Verschiebung der Windungen kann zu mechanischen Beschädigungen der Leiterisolierung und daraus folgend zu Stromdurchschlägen führen. Auch ist die Induktorfülldichte bei Flachdraht deutlich größer, da die Leiter flach aufeinander aufliegen und somit das vorhandene Volumen fast vollständig gefüllt ist. Eine höhere Füllhöhe führt zu einer besseren Wärmeableitfähigkeit, wodurch Wärme besser abgeführt werden kann, die in Folge der Stromimpulse erzeugt wird.

In Abbildung 4.8(b) ist ein EMAT-Induktor-Array dargestellt, bestehend aus acht flachen runden Induktoren. Das Induktor-Array dient zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall und wird in dem Versuchsaufbau in Abbildung 4.12 verwendet. Die Abstandshalter sorgen dafür, dass im Versuchsaufbau ein Abstand von mindestens 1 mm gehalten wird, um einen solchen Luftspalt absichtlich zu erzwingen. Eine Nahaufnahme eines einzelnen Induktors ist in Abbildung 4.8(c) zu sehen. Gewickelt wurde der Induktor um einen Holzkern mit einem Durchmesser von 6 mm. Die Verklebung des Induktors erfolgte mit Epoxidharz.

In Abbildung 4.9 sind zwei rennbahnförmige Induktoren dargestellt, welche zur Erzeugung von unidirektionalen Ultraschall Lamb-Wellen dienen. In Abbildung 4.9(a) ist das CAD-Modell (Computer Aided Design) des Induktors dargestellt. Der Induktorhalter ist 3D gedruckt, wodurch sich gut definierte Induktorgeometrien ermöglichen lassen. In Abbildung 4.9(b) ist zusätzlich noch ein Abstandshalter angebracht, wodurch gewährleistet wird, dass immer mindestens ein Luftspalt von 1 mm überwunden werden muss. Nach dem Wickeln der Induktoren werden auch diese in Epoxidharz eingebettet und fixiert.

4.5 2D-Schallfeldcharakterisierung

In diesem Abschnitt geht es um die Untersuchung der 2D-Schallfeldcharakteristik der ringförmigen EMAT-Induktoren aus Abbildung 4.8 in Flüssigkeit. Die berechneten

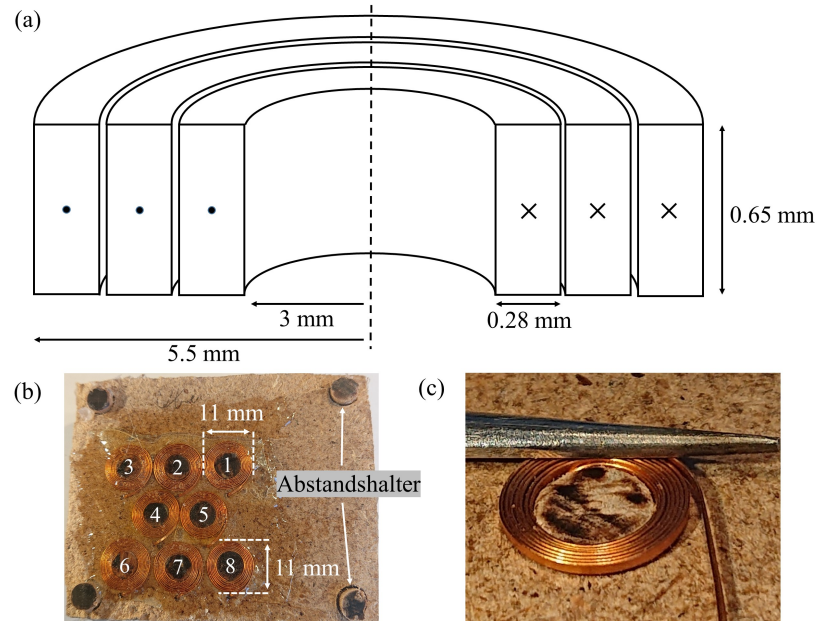


Abbildung 4.8: Überblick über die ringförmigen EMAT-Induktoren ohne Permanentmagnet. (a) Schema eines ringförmigen EMAT-Induktors, der aus abgeflachtem und emailliertem Kupferdraht besteht. (b) EMAT-Array bestehend aus acht EMAT-Induktoren, die vier Abstandshalter (schwarz) in den Ecken sorgen für einen Luftspalt von 1 mm. (c) Vergrößerter EMAT-Induktor mit abgeflachtem Kupferdraht vor Einbettung in Epoxidharz. [96]

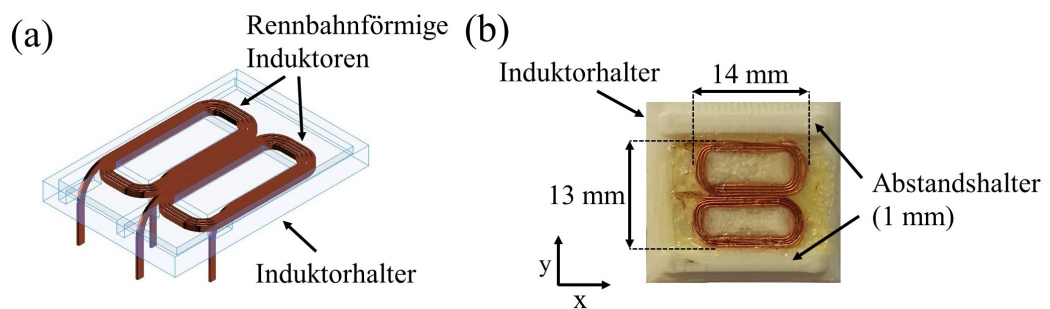


Abbildung 4.9: Darstellung eines EMATs zur Erzeugung von unidirektionalen Lamb-Wellen, bestehend aus zwei rennbahnförmigen Induktoren. (a) Das CAD-Modell des Induktorhalters mit zwei Luftspulen. (b) Der Induktorhalter ist 3D gedruckt und die Induktoren bestehen aus flachem Kupferlackdraht. Der Abstandshalter beträgt 1 mm. [93]

Schallfelder aus Abbildung 3.12 sollen experimentell überprüft werden. Ein geeigneter Messaufbau ist daher wichtig. Da die verwendeten Flachspulen aus Abbildung 4.8 rotationssymmetrisch sind, ist auch das Schallprofil rotationssymmetrisch und es reicht eine 1D-Messung in einem Abstand. Die Abbildung 4.10 zeigt die maßstabsgetreue schematische Darstellung der Messanordnung für das Schallprofil des EMATs. Dabei werden zwei EMATs verwendet. Der blaue Bereich stellt den Flüssigkeitsbereich dar. Bei der Behälterwand handelt es sich um eine Metallwand. EMAT A sendet und empfängt Ultraschall, während der direkt benachbarte EMAT B nur als Empfänger dient. Ein langer Glasstab mit einem Durchmesser von 5 mm erstreckt sich in die y -Richtung und dient als Ultraschallreflektor. Der Abstand in z -Richtung ist während der Messung gleichbleibend und beträgt hier 80 mm. Das Glasrohr wird schrittweise auf der x -Achse bewegt (gestrichelter Pfeil). Bei jedem Schritt werden Echomessungen von EMAT A und B vorgenommen. Der Vorteil des Glasrohres gegenüber einem Ultraschallsensor liegt darin, dass der Einfallswinkel wegen der Rundung nicht relevant ist. Bei einem Ultraschallsensor muss die Richtung dem Einfallswinkels des Ultraschalls angepasst werden. Dadurch gibt es einen zusätzlichen Freiheitsgrad, wodurch die Messung deutlich aufwändiger wird, denn eine Verkippung um $\lambda/4$ ist schon relevant (hier ca. 1,5 mm in Wasser).

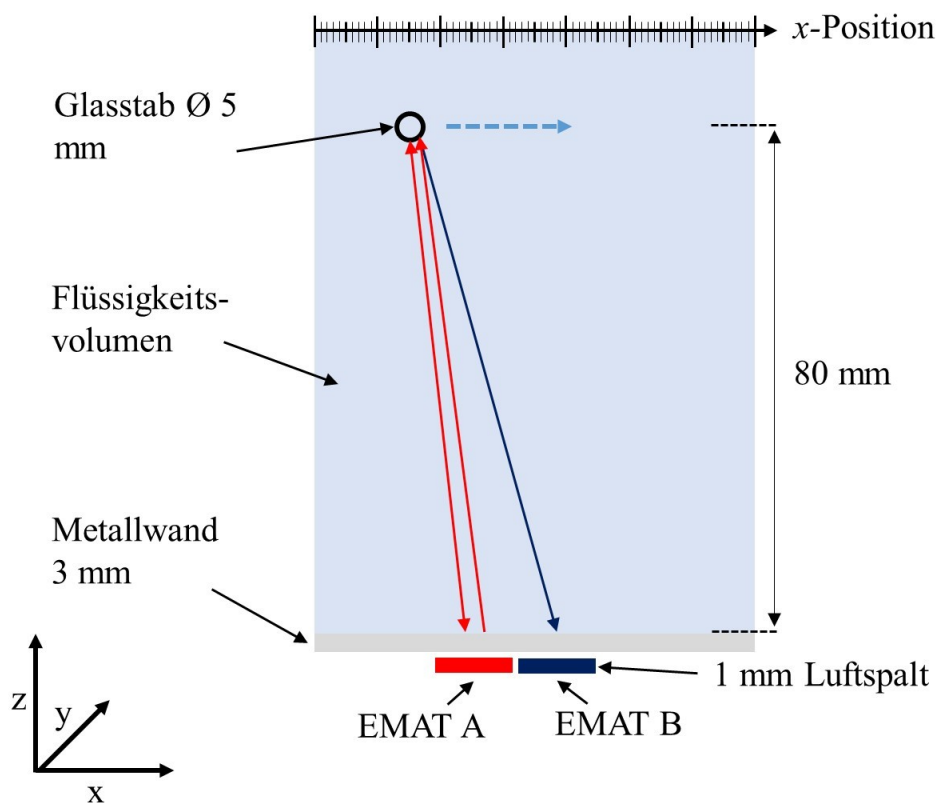


Abbildung 4.10: Maßstabsgetreues Schema des Messverfahrens zur Untersuchung der Ultraschallfelder der EMATs mit einem senkrecht hängenden 5 mm Glasstab. [96]

4.6 Berührungslose 3D-Echolokalisierung in einem dickwandigen Metalltank

Die Abbildung 4.11 zeigt eine maßstabsgetreue Querschnittsdarstellung des Aufbaus zur 3D-Lokalisierung einer Kugel im Flüssigkeitsvolumen eines Metallbehälters. Der blaue Bereich stellt die Flüssigkeit dar, die Behälterwand besteht aus einer 3 mm dicken Aluminiumplatte. Das Ziel ist es, eine 10 mm Metallkugel zu lokalisieren. Eine Kugel zu detektieren ist anspruchsvoller als die 2D-Lokalisierung eines länglichen Stabs in Abbildung 4.10. Der Grund dafür liegt in der geringeren reflektierenden Oberfläche des Lokalisierungsobjekts. Zusätzlich wird die Ultraschallreflektion in die vertikale und horizontale Richtung reflektiert, wodurch die Echoamplituden über die Entfernung schneller abnehmen.

Zur Erklärung des Grundprinzips der 3D-Lokalisierung sind in der Darstellung nur zwei EMATs abgebildet, im realen Versuchsaufbau wird jedoch ein EMAT-Array verwendet. EMAT A sendet und empfängt Ultraschall, während EMAT B (und im Falle eines Arrays, alle anderen EMATs) nur Echos empfängt. Das Verhalten könnte ähnlich wie bei der Radargleichung zu erwarten sein, so dass mehr gerichtete, schmale Strahlen vorteilhafter sind. Außerdem unterliegen die kurzen Wellenlängen λ bei MHz-Frequenzen (hier ca. 1,5 mm in Wasser) eine nahezu vollständige Reflektion von der 10 mm Kugel. Während viel längere Wellenlängen (kHz-Bereich mit $\lambda > 1$ cm) sich dem Bereich der weniger effektiven Rayleigh-Streuung nähern.

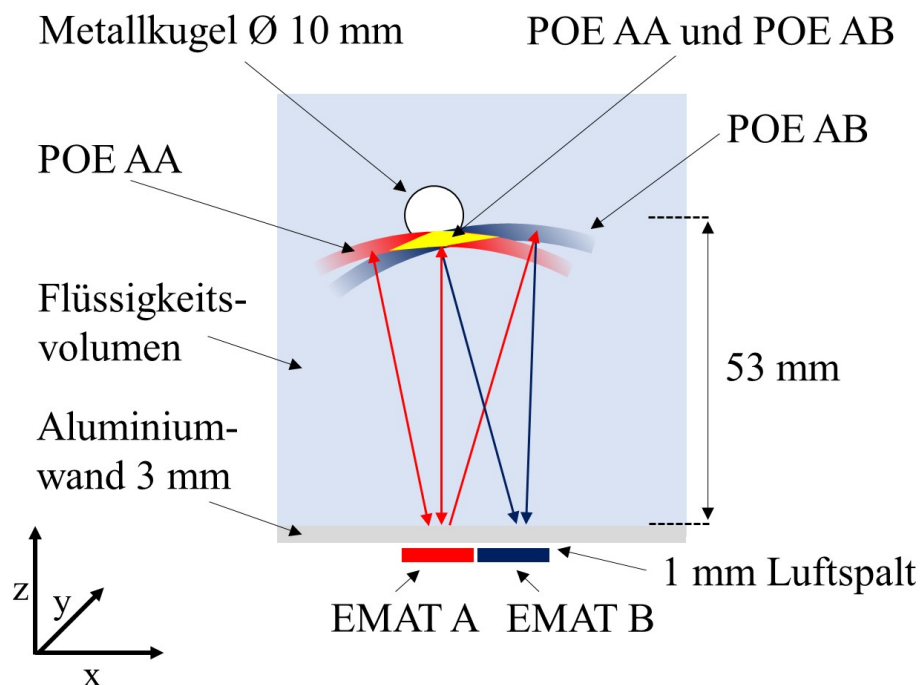


Abbildung 4.11: Maßstabsgetreues Schema (Querschnitt) für die 3D-Lokalisierung einer 10 mm Metallkugel. [96]

Durch die Bestimmung der Laufzeit des Ultraschalls lässt sich für jeden EMAT eine virtuelle kugelförmige Schale bilden, die den Abstand von dem jeweiligen EMAT zu der Metallkugel kennzeichnet. Die angenommene Unsicherheit der Laufzeitmessung (zu welchem Zeitpunkt das Echosignal beginnt) definiert die Dicke der kugelförmigen Schale. Da das Ultraschallstrahlprofil der EMATs bekannt ist, können die kugelförmigen Schalen weiter eingegrenzt werden. Diese kugelförmigen Schalen werden in der Querschnittsdarstellung in Abbildung 4.11 dargestellt und im Weiteren als „possible origin of the echos“ (POEs) bezeichnet. Die Überlappung von zwei unabhängigen POEs (in Abbildung 4.11 gelb markiert) reduziert das POE. Die Schreibweise POE AA bezieht sich auf eine Emission von EMAT A und ein empfangenes Echo in EMAT A, während POE AB zu einem sendenden EMAT A und einem empfangenden EMAT B gehört. Der gelbe Bereich (POE AA und POE AB) in Abbildung 4.11 ist eigentlich einen Bogen im 3D-Raum, da die Schnittlinie zwischen zwei Kugelschalen ein Bogen ist. Eine weitere unabhängige POE-Schale ist erforderlich, um die POE in Richtung einer bestimmten x -, y - und z -Position einzugrenzen. Im Prinzip könnte eine POE BB ausreichend sein. In Abbildung 4.12 ist der Versuchsaufbau für die 3D-Lokalisierung einer Metallkugel in einem Flüssigkeitsbehälter dargestellt. Als Flüssigkeitsbehälter wird der Einfachheits halber eine Kunststoffbox verwendet, bei der die Wandteile durch Metallplatten ersetzt wurden. Somit lassen sich verschiedene Metalle und Wandstärken testen. In einer realen Anwendung würde es sich um einen Metallbehälter handeln. Verwendet werden für den Versuch zwei EMAT-Treiberschaltungen und ein EMAT-Array, welches an der eingesetzten Metallwand positioniert ist. Bei den Treiberschaltungen handelt es sich um eine Vorgängerversion der Treiberschaltungen aus Abbildung 4.14. Der Unterschied zwischen den Versionen besteht im Platinendesign und in der Wahl der Platinen, denn in Abbildung 4.12 wurden gefräste Platinen und in Abbildung 4.14 PCB-Platinen verwendet. Das Schaltungskonzept ist bei beiden Aufbauten gleich.

Als Kabel zwischen EMAT-Induktor und Treiberschaltung wurden spezielle Kabel bestehend aus Kupferfolie verwendet. Die breiten Kupferstreifen haben einen niedrigen elektrischen Widerstand und eine geringe Induktivität im Vergleich zu normalen runden Drähten. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, dass die geringere Stromdichte eine Reduzierung der transienten Lorentzkräfte innerhalb der Kabel bei kA-Bursts bewirkt. Jegliche transienten Bewegungen innerhalb der Kabel können zum Auftreten von unerwünschten Artefakten im Empfangssignal (liegt im μV -Bereich) führen, da Bewegungen oder Schwingungen des Kabels im eigenen Magnetfeld die Induktion einer elektrischen Spannung ins Kabel zur Folge haben. Im Rahmen der Weiterentwicklung innerhalb dieser Arbeit konnten im weiteren Verlauf passende kommerziell erwerbbarer Koaxialkabel (Abbildung 4.14) gefunden werden, die sich für die Übertragung der kA-Impulse eignen. Die Koaxialkabel sind aufgrund der elektrischen Schirmung deutlich praktikabler als die Kupferstreifen.

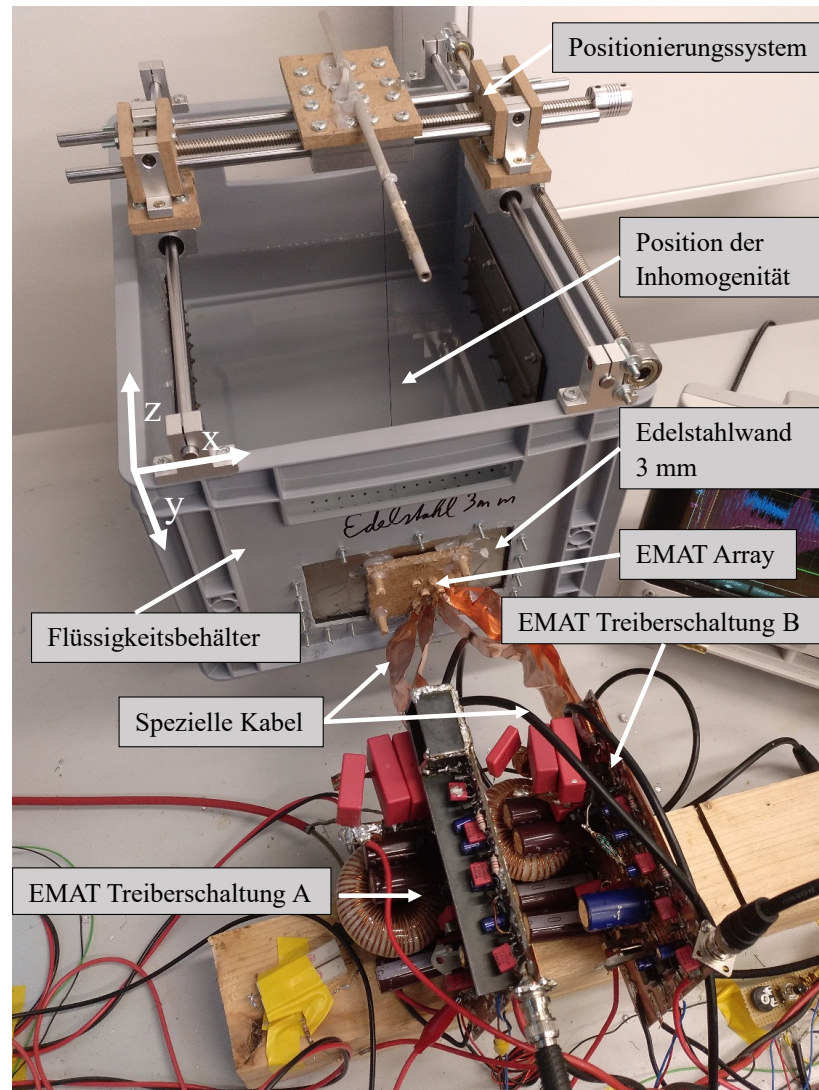


Abbildung 4.12: Versuchsaufbau bestehend aus einem Kunststofftank mit Metallwänden, einem Positionierungssystem, einem EMAT-Array mit acht EMAT-Induktoren (siehe Abbildung 4.8), und zwei unabhängigen EMAT-Schaltungen (beschrieben in Abbildung 4.1). [96]

4.7 Phasengenauer Doppel-EMAT für Lamb-Wellen

In Abbildung 4.13 ist exemplarisch die Abtastung einer Metallplattenkante schematisch dargestellt. Eine Schwierigkeit liegt darin, dass die EMAT-Induktoren nur in dem „zugänglichen Bereich“ platziert werden dürfen, welcher sich genau zwischen der „zu untersuchenden Kante“ und der „gegenüberliegenden Kante“ befindet. Die im nahezu gleichen Abstand gegenüberliegende Kante darf die Messung nicht beeinflussen. Daher handelt es sich um die ungünstigste und somit schwierigste mögliche Positionierung des EMATs auf der Metallplatte, wodurch angenommen werden kann, dass der EMAT auch in allen anderen Bereichen funktioniert.

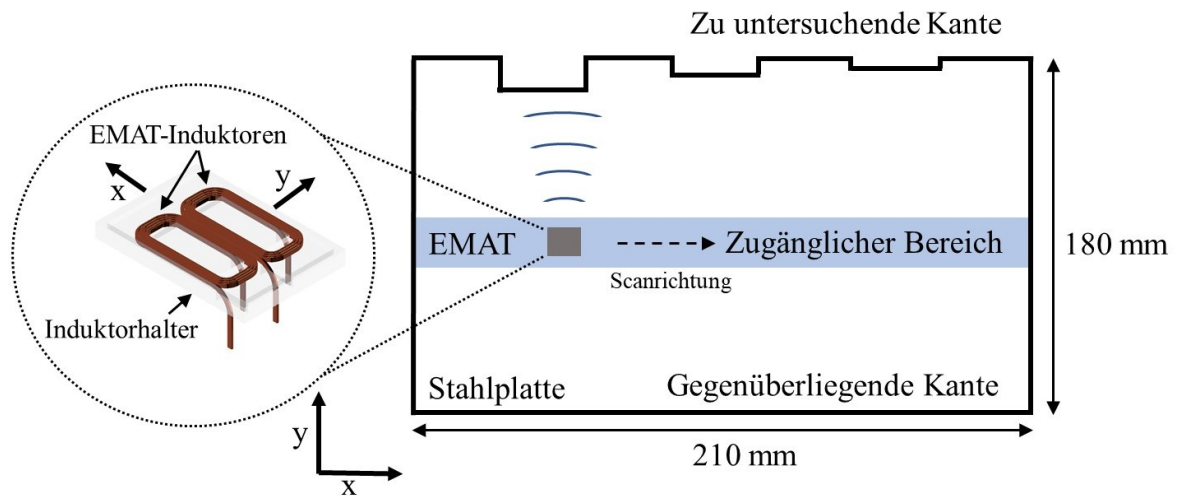


Abbildung 4.13: Skizze der Kantenabtastung mit gerichtetem Ultraschall in y Richtung. [93]

Des Weiteren soll kein mechanischer Kontakt zur Stahlplatte vorhanden sein. Der Grund dafür könnte in einer realen Anwendung eine Schutzfolie, Rost oder abblätternde Farbe auf der Metalloberfläche sein. Ein Abstandshalter an der Unterseite der EMAT-Induktorhalterung gewährleistet einen 1 mm Luftspalt zwischen den EMAT-Induktoren und der Metalloberfläche. Damit ist sichergestellt, dass kein mechanischer Kontakt vorhanden ist und es sich um eine kontaktlose Messung handelt. Die Kante wird schrittweise in x -Richtung erfasst, dabei wird bei jedem Schritt eine Ultraschallabstandsmessung gemacht. Bei jeder Messung sollen Ultraschall Lamb-Wellen in Richtung der „zu untersuchenden Kante“ gesendet und das Echo anschließend wieder empfangen werden.

Abbildung 4.14 zeigt den Versuchsaufbau für die Kantenabtastung mit einer 1 mm dicken Stahlplatte. Das EMAT-Treiberschaltungs-Rack hat vier Steckplätze für EMAT-Treiberschaltungen. In diesem Versuchsaufbau werden nur zwei Treiberschaltungen verwendet, verbunden sind diese mit den EMAT-Induktoren über ein 1 m langes Koaxialkabel. Das Positioniersystem dient der exakten Positionierung der EMAT-Induktoren und der Reproduzierbarkeit der Versuche. Mit Hilfe von zwei Schrittmotoren lassen sich Messreihen vollautomatisch durchführen. Bei den EMAT-Induktoren handelt es sich

um die Induktoren, die in Abbildung 4.9 abgebildet sind. Der rechteckige Metallkörper oberhalb der Induktoren dient ausschließlich der Beschwerung der EMAT-Halterung, wodurch die EMAT-Abstandshalter auf die Metalloberfläche gedrückt werden und eine Veränderung des Luftspalts durch eine Positionsänderung des Positionierungssystems verhindert wird.

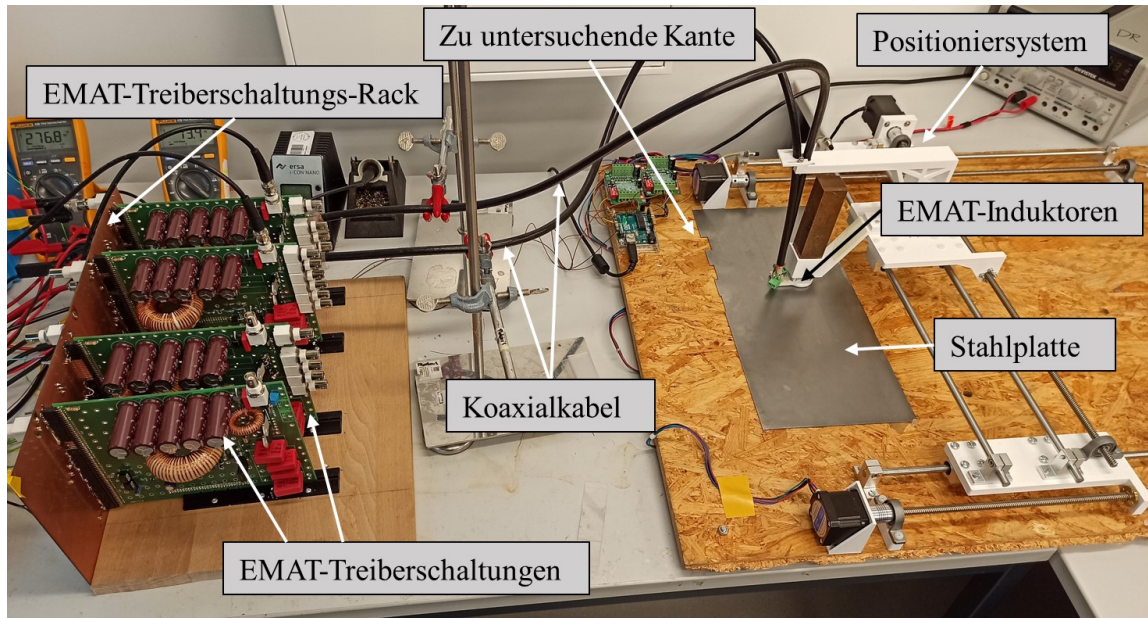


Abbildung 4.14: Versuchsaufbau bestehend aus einem Positionierungssystem, vier unabhängigen EMAT-Treiberschaltungen und einer ferromagnetischen Stahlplatte als Prüfkörper. Die flexible Verkabelung ermöglicht den Einsatz von kleinen und robusten Sensoren in kritischen Umgebungen, unabhängig von voluminösen Treiberschaltungen. [93]

4.8 Aufbau Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld

Die beiden Versuchsaufbauten für die Ultraschallempfangsmessung mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Es handelt sich um zwei völlig unterschiedliche EMAT-Induktoranordnungen. Der Aufbau in Abbildung 4.15(a) entspricht dem Aufbau aus Abbildung 4.14, bei der Lamb-Wellen in einer Stahlplatte erzeugt werden. Der Aufbau in Abbildung 4.15(b) basiert auf dem vorherigen Aufbau für longitudinale Ultraschallwellen (Abbildung 4.12). Anderer Ultraschallmodalitäten als longitudinaler Ultraschall werden durch den Schallweg hier durch flüssiges Wasser verhindert, da sich z. B. Scherwellen nicht in Flüssigkeiten ausbreiten. Bei beiden Aufbauten findet kein mechanischer Kontakt zwischen den EMAT-Induktoren und der Metalloberfläche statt. Es gibt einen Ultraschall erzeugenden EMAT (T-EMAT) und einen zweiten EMAT für den Ultraschallempfang (R-EMAT). Die zuvor demon-

strierten Puls-Echo-Techniken für ein einzelnes EMAT-Element werden hier nicht genutzt, um mehr Klarheit über die relevanten Effekte zu schaffen.

Die Besonderheit hier ist das ungewöhnliche Signalmuster in den EMAT-Induktoren. Zunächst wurde ein kurzer, starker und unipolarer Stromimpuls im Induktor des R-EMATs erzeugt. Dieser Impuls sorgte für die scheinbar langanhaltende Magnetisierung im Inneren der Stahlplatte. Nach einer willkürlich gesteuerten Verzögerung (hier typischerweise Millisekunden) regt der T-EMAT einen Ultraschallimpuls an, indem dieser einen starken Bias-Strom und einen starken MHz-Burst überlagert, die zusammen eine mechanische MHz-Schwingung der Metalloberfläche bewirken.

In Abbildung 4.16 sind die Stromimpulse schematisch dargestellt, wobei der anfängliche blaue Signalverlauf zum Strom durch den Induktor des R-EMATs gehört. Der später auftretende rote Signalverlauf repräsentiert den Strom im Induktor des T-EMATs. Die Zeit t_d ist die Verzögerungszeit zwischen dem ausgelösten Stromimpuls durch den R-EMAT und dem Empfang des Ultraschallsignals. t_d ist über die Schaltzeitpunkte des R- und T-EMAT einstellbar. Wichtig ist, dass der Strom durch den R-EMAT-Induktor auf null abklingt, wenn die später ausgesendete Ultraschallwelle den R-EMAT erreicht.

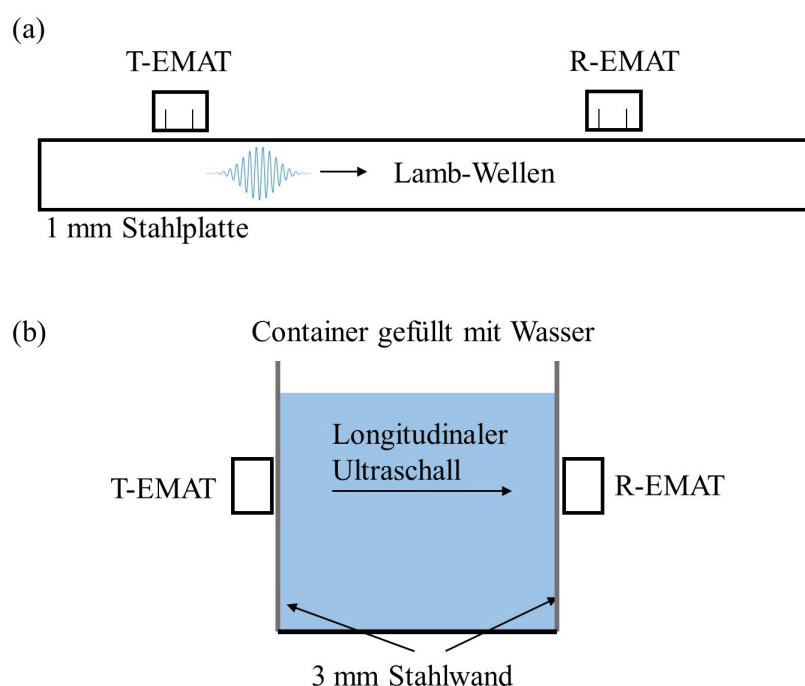


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten für den berührungslosen Empfang von Ultraschall Lamb-Wellen (a) und longitudinalem Ultraschall (b) ohne aktives Bias-Magnetfeld. (a) Zwei rennbahnförmige EMAT-Induktoren sind auf einer 1 mm dicken ferromagnetischen Stahlplatte platziert. (b) Zwei runde, flache EMAT-Induktoren wurden außerhalb eines mit Wasser gefüllten Behälters angebracht. Die Wände, an denen sich die EMAT-Induktoren befinden, sind aus 3 mm dickem ferromagnetischem Stahl gefertigt. [45]

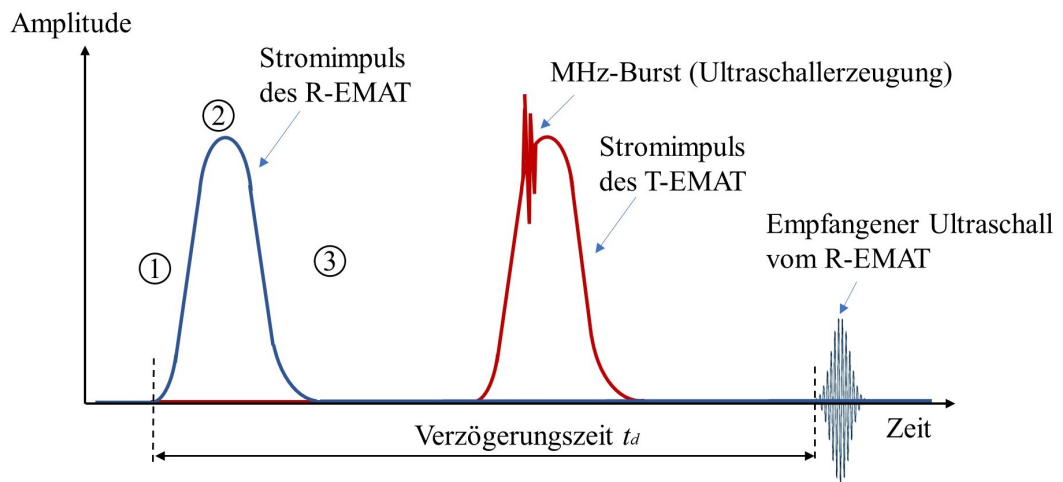


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung des Stromflusses durch die beiden EMAT-Induktoren im Zeitverlauf; die Zahlen entsprechen denen in Abbildung 2.2. [45]

5 Experimentelle Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse vorgestellt, die mit Hilfe der Versuchsaufbauten in Kapitel 4 generiert wurden. Zu Beginn werden drei allgemeine Messungen vorgestellt: Erzeugung von Barkhausenrauschen, Variation des Empfangszeitpunkts und die Auswirkung der Variation der Amplitude des MHz-Bursts und des Bias-Magnetfeldes auf die Ultraschallamplitude. Es werden verschiedene Messungen zu den drei Themenfeldern „Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall“, „Lamb-Wellen in Metallplatten“ und „EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld“ gezeigt.

5.1 Allgemeine Ergebnisse

In diesem Abschnitt befinden sich alle Messergebnisse, die sich nicht in die drei Themenfelder „Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall“, „Lamb-Wellen in Metallplatten“ und „EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld“ einordnen lassen.

5.1.1 Messung von Barkhausenrauschen

Um explizit Barkhausenrauschen mit einem EMAT zu erzeugen, wurde ein EMAT-Induktor auf einen ferromagnetischen Stahlblock positioniert. Zwischen EMAT und Metalloberfläche wurde ein Luftspalt von 1 mm als Abstand gewählt, da bei den meisten Messungen in dieser Arbeit ein solcher Luftspalt von 1 mm bestand. Verwendet wurde ein langsam ansteigender Strom I_U , der in Abbildung 5.1(a) dargestellt ist. Ein MHz-Burst wird nicht verwendet, da dieser hier keinen Beitrag zum Barkhausenrauschen liefert. Abbildung 5.1(b) zeigt das Ausgangssignal des Empfängers.

Mit abnehmendem Strom I_U tritt ein ausgeprägtes Rauschphänomen auf (d. h. nach etwa 140 μs). Bei den Messungen von Boyd und Sperline ist ein ähnliches Rauschverhalten zu sehen, welches die Autoren als Barkhausenrauschen bezeichnen [83].

Dieses Rauschphänomen ist bei nichtferromagnetischen Prüfkörpern wie Aluminium nicht vorhanden. Barkhausenrauschen muss sorgfältig berücksichtigt werden, wenn EMAT-Systeme mit einem zeitlich nicht konstanten Bias-Magnetfeld betrieben werden. Andernfalls können empfangene Ultraschallsignale im Rauschen verschwinden. Um dies bei einem zeitlich nicht konstanten Bias-Magnetfeld zu verhindern, kann der Stromverlauf entsprechend gestaltet werden, dass das Barkhausenrauschen zu einem Zeitpunkt auftritt, bei dem kein Ultraschall empfangen werden muss. Das kann jedoch zu deutlichen Einschränkungen im Empfangszeitfenster führen.

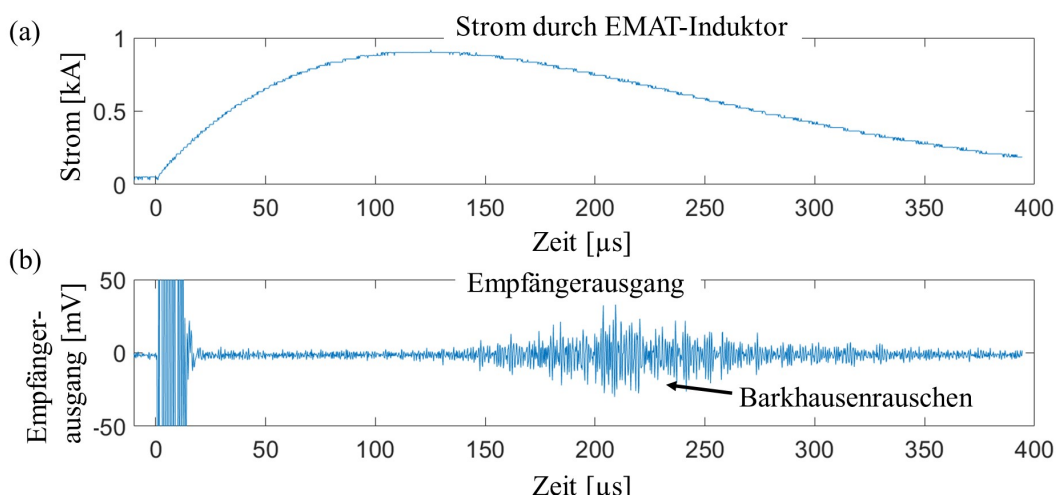


Abbildung 5.1: Explizit erzeugtes Barkhausenrauschen an einem massiven ferromagnetischen Stahlblock. (a) Relativ langsam ansteigender und abfallender Strom I_U im EMAT-Induktor. (b) Ausgangssignal aus der Empfängerschaltung zeigt nach 140 μs deutliches Barkhausenrauschen. [96]

5.1.2 Variation des Empfangszeitpunkts

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie sich das Empfangsverhalten eines EMATs ohne zusätzliche Magnete während unterschiedlicher Zeitpunkte im Magnetisierungsstrompuls I_U ändert. Abbildung 5.2 zeigt die Variation des Empfangszeitpunkts mit dem Stromverlauf aus Abbildung 4.2. Verwendet wurde für beide Messreihen der Aufbau aus Abbildung 4.15(a). Da es sich um Messreihen handelt, repräsentiert jeder Signalpunkt der blauen Kurve die maximale Spitzen-Spitzen-Amplitude des Spannungssignals am Empfängerausgang einer Einzelmessung. Das Spannungssignal am Ausgang des Empfängers ist proportional zum empfangenen Ultraschallsignal. Die roten Kurven repräsentieren den Magnetisierungsstrom im Induktor des R-EMATs zum Empfangszeitpunkt des Ultraschalls.

In der Messreihe in Abbildung 5.2(a) wird eine 1 mm dicke Aluminiumplatte verwendet. Innerhalb der ersten Mikrosekunden kann der R-EMAT noch keinen Ultraschall empfangen, da der Empfänger durch das Schalten des Stroms I_U übersteuert ist und erst nach ein paar Mikrosekunden wieder empfangsbereit ist. Da Aluminium nicht ferromagnetisch ist, treten nur Lorenzkkräfte auf. Somit ist auch die Ultraschallamplitude proportional zum Bias-Magnetfeld und zum Strom I_U im Induktor. Diese Proportionalität wird durch die Abbildung 5.2(a) sehr gut dargestellt. Eine Ausnahme liefert der Signaleinbruch in der ersten Halbwelle. Sobald die Stromamplitude sinkt und somit auch die magnetische Flussdichte proportional abnimmt. Durch die Änderung des Bias-Magnetfeldes wird ein Wirbelstrom in die Aluminiumoberfläche induziert (Induktionsgesetz Gleichung 3.3). Mit der Änderung des Stroms vom Anstieg in den Abfall dreht sich die Richtung des induzierten Wirbelstroms. Das hat eine deutliche Reduktion des Bias-Magnetfeldes an der Oberfläche für einen kurzen Zeitraum zur Folge. Die Stromverläufe in Abbildung 5.2(a) und (b) unterscheiden sich leicht in der Ampli-

tude, da bei Aluminium ein höherer Strom notwendig ist, um auf akzeptable Signale zu kommen. In Abbildung 5.2(b) wird eine 1 mm dicke ferromagnetische Stahlplatte verwendet. Ebenso wie bei der Messreihe aus Abbildung 5.2(a) kann der R-EMAT kein Signal in den ersten Mikrosekunden empfangen aufgrund des Schaltvorgangs. In der abfallenden Flanke der ersten Stromhalbwelle kommt es zu einem Nulldurchgang des Bias-Magnetfeldes. Der Grund dafür liegt im Remanenzeffekt, der in Abbildung 3.14 gezeigt wird. Auch das Verhalten, nachdem das extern erzeugte Bias-Magnetfeld verschwindet, lässt sich mit dem Remanenzeffekt erklären. Im Abschnitt 5.4 wird auf weitere Messungen zu dem Effekt eingegangen.

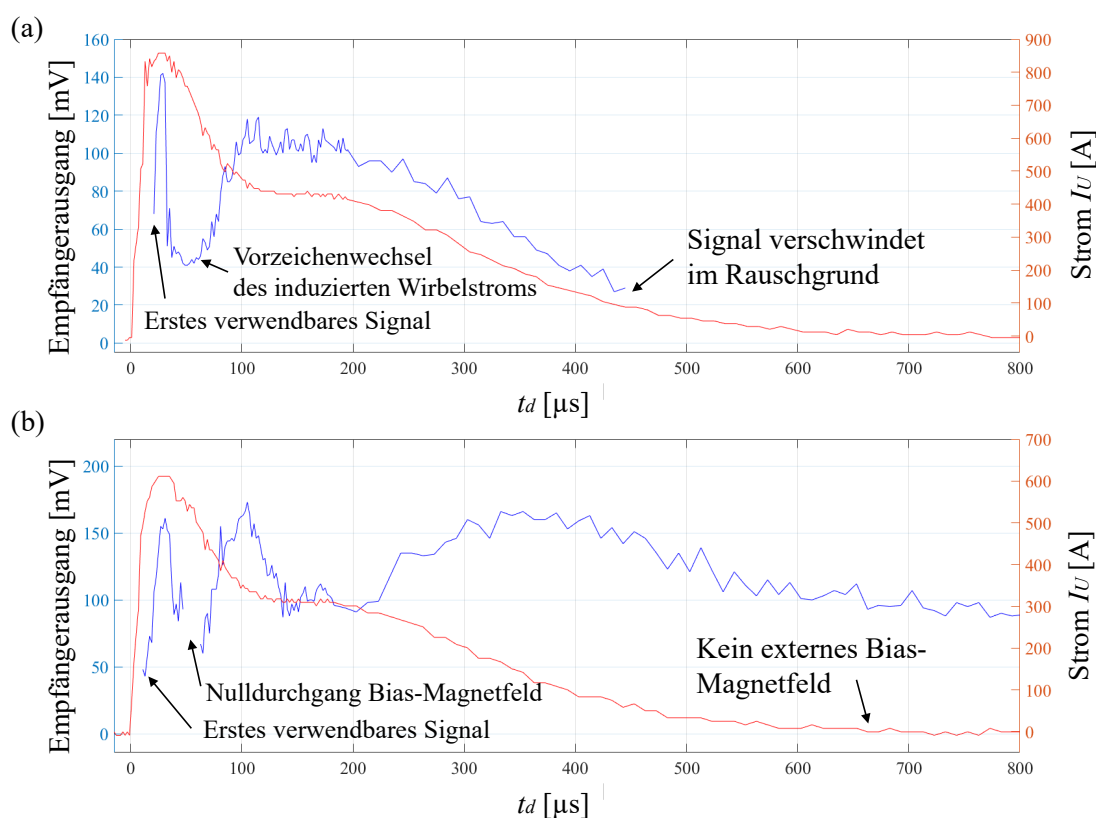


Abbildung 5.2: Dargestellt ist die Variation des Empfangszeitpunkts mit Lamb-Wellen in einer 1 mm dicken Metallplatte. Die Ultraschallsignale zeigen die Spitze-Spitze-Amplitude. (a) Aluminiumplatte. (b) Ferromagnetische Stahlplatte.

Die Stromimpulsform in Abbildung 5.2(a) eignet sich sehr gut für einen EMAT im Puls-Echo-Betrieb auf einem nicht ferromagnetischen Metall. Die hohe Amplitude am Anfang kann genutzt werden, um Ultraschall auszusenden und der Empfang kann innerhalb des Plateaus stattfinden.

Für ferromagnetische Metalle ist die Impulsform eher ungeeignet, da sich erst sehr spät ein konstantes Empfangszeitfenster ergibt. Besser geeignet sind kürzere kräftigere Stromimpulse. Solche Untersuchungen sollten Teil einer anschließenden Forschungsarbeit

sein, besonders da ferromagnetische Metalle wie Eisen und ferromagnetischer Stahl in der Industrie weit verbreitet sind.

5.1.3 Variation des MHz-Bursts und des Bias-Magnetfeldes

In diesem Abschnitt geht es um den Einfluss der Veränderung der Stromamplitude des MHz-Bursts und des Bias-Magnetfeldes auf die Ultraschallamplitude. Für die Messung wurde der Aufbau in Abbildung 4.12 verwendet. Gemessen wurde mit einem EMAT im Puls-Echo-Betrieb. Als großflächiger Reflektor wurde eine dünne Metallplatte im Wasserbecken positioniert.

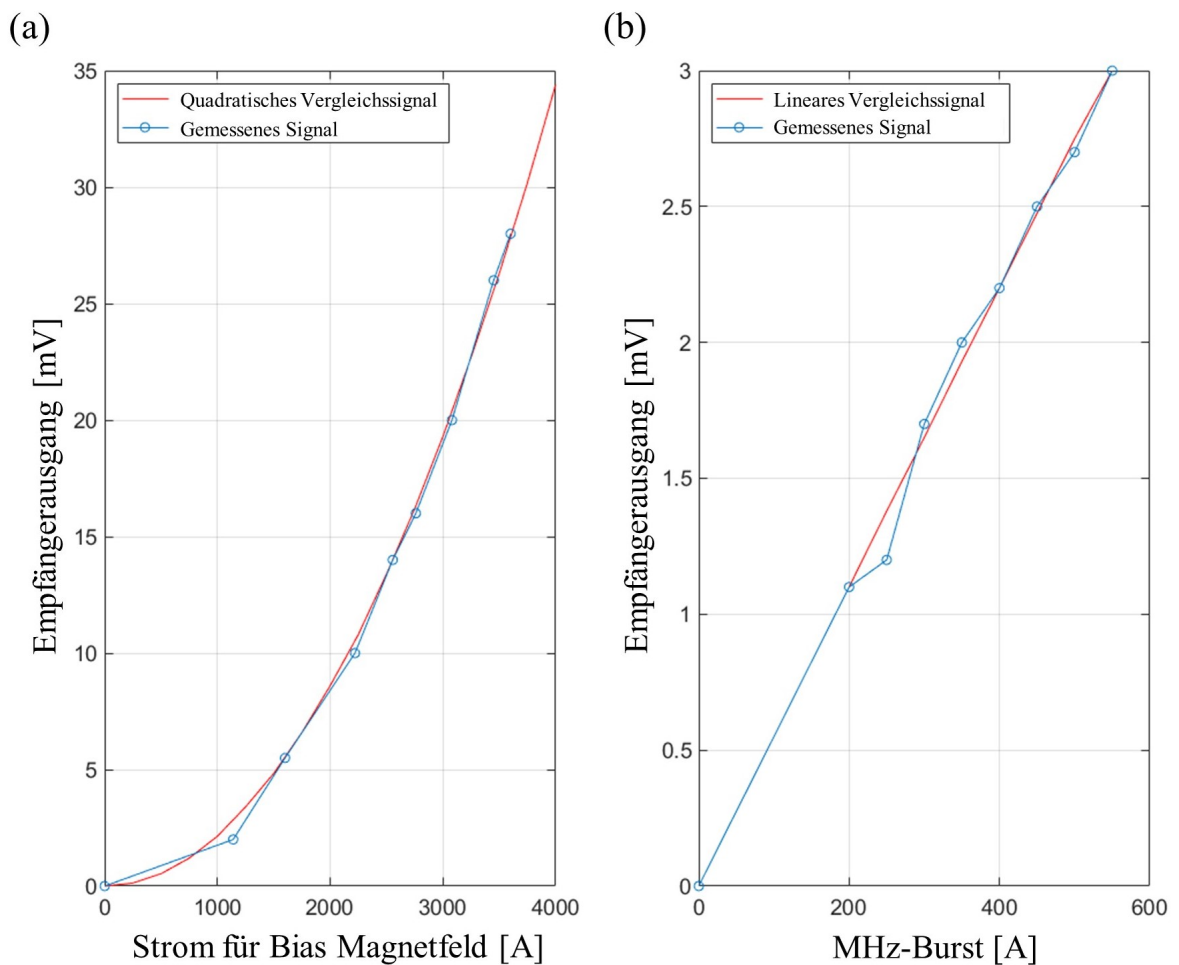


Abbildung 5.3: Variation der Stromstärke des MHz-Bursts und des langgezogenen Stroms für das Bias-Magnetfeld mit Hilfe von Puls-Echomessungen am Aufbau in Abbildung 4.12. (a) Empfängener Ultraschall-Spitzenwert am Empfängerausgang über die Stromamplituden für das Bias-Magnetfeld: Quadratische Beziehung. (b) Empfängener Ultraschall-Spitzenwert am Empfängerausgang über die Stromamplituden des MHz-Burst: Lineare Beziehung. [101]

In Abbildung 5.3 sind die beiden Messreihen dargestellt. Es zeigt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen der empfangenen Signalamplitude des Ultraschallechos und der Stromamplitude zur Erzeugung des Bias-Magnetfeldes in Abbildung 5.3(a). Zum Vergleich zeigt Abbildung 5.3(b) einen linearen Einfluss der Stromamplituden des MHz-Bursts auf die empfangenen Echoamplituden. Die Werte von Abbildung 5.3(a) wurden durch eine Variation der maximalen Ladespannung der Elektrolytkondensatorbank C_1 in Abbildung 4.1 gemessen. Der quadratische Zusammenhang entsteht, da das Bias-Magnetfeld sowohl für das Senden als auch für den Empfang dient. Die Werte von Abbildung 5.3(b) wurden durch eine Variation der maximalen Ladespannung der Folienkondensatorbank C_2 in Abbildung 4.1 gemessen. Folglich ist der Strom für das Bias-Magnetfeld im Allgemeinen effektiver für die Gesamtdetektivität als die Amplitude des MHz-Bursts.

5.2 Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall

In diesem Unterkapitel geht es um longitudinalen Ultraschall in einem Metallbehälter gefüllt mit Flüssigkeit. Dabei werden Puls-Echo-Messergebnisse für unterschiedliche Bedingungen präsentiert, als auch eine 2D- und 3D-Lokalisierung von Fremdobjekten in Flüssigkeit gezeigt.

5.2.1 Puls-Echo-Betrieb

Die Ergebnisse in Abbildung 5.4 sollen die idealisierte Simulation in Abbildung 3.10 experimentell reproduzieren. Für die Datenerfassung wurde der Aufbau aus Abbildung 4.12 mit einem einzelnen EMAT im Puls-Echo-Betrieb verwendet. Ein 30 mm dicker ebener Stahlblock diente als reflektierendes Objekt im Wasser in einer Tiefe (z -Richtung) von 62 mm.

Abbildung 5.4(a) zeigt den Strom durch den EMAT-Induktor über die Zeit. Der Stromverlauf ist extra sehr langezogen, damit ein langes Empfangszeitfenster besteht. Der für den Ultraschallempfang genutzte Strom I_U in Abbildung 5.4(a) ist bewusst sehr flach und konstant im Empfangszeitfenster (100-200 μ s) gehalten, um Barkhausenrauschen zu vermeiden.

Die empfangenen Signale bei Verwendung eines 1 MHz Bursts sind in Abbildung 5.4(b), (c), (d) und (e) dargestellt. Bei den eingesetzten Metallwänden am Kunststoffbecken handelt es sich um eine 30 μ m dicke Aluminiumfolie, eine 3 mm dicke Aluminiumplatte, eine 3 mm dicke Edelstahlplatte und eine 3 mm dicke ferromagnetische Stahlplatte.

Wie schon aus Abbildung 3.10 zu erwarten war, ist die Intensität und Impulstreue des ersten Echos in Abbildung 5.4(b) größer als in Abbildung 5.4(c), (d) und (e). Die Verbreiterung des Echosignals in Abbildung 5.4 wird hauptsächlich durch die begrenzte Bandbreite (Abbildung 3.11(b)) des MHz-Bursts I_{RF} (Abbildung 4.2) verursacht, dessen Schaltung (Abbildung 4.3) und inhärente Bandbreitenbegrenzung (Filterung) auch beim Empfang aktiv sind (doppelte Wirksamkeit). Eine weitere Echoverbreiterung wird durch die Filterelemente der Empfängerschaltung (C_3 , L_2 und L_4 in Abbildung 4.3) verursacht.

Zusätzlich zu den Mehrfachechos aus der flächigen Anordnung der Metallwand und der hochreflektierenden Oberfläche des Stahlblocks treten im Inneren des 30 mm dicken Stahlblocks auch Mehrfachreflexionen auf, die in Abbildung 5.4 als kleine Wiederholungen alle 10 μs erscheinen. Die exakte parallele Ausrichtung von dem planaren Reflektor und den Metallwänden war bei diesen Experimenten nur schwer zu erreichen, da die Wände des Kunststoffbehälters nicht ideal ausgerichtet sind. Somit kann es zu einem kleinen Winkel zwischen den beiden Oberflächen kommen (nicht exakt parallel), wodurch die Echos schräg zurück reflektiert werden. Die Phasenfront der 1,5 mm Wellen im Wasser trifft dann schräg auf die Empfangsebene (mit einer abweichenden Phasenverteilung) und das Gesamtsignal des EMATs wird klein.

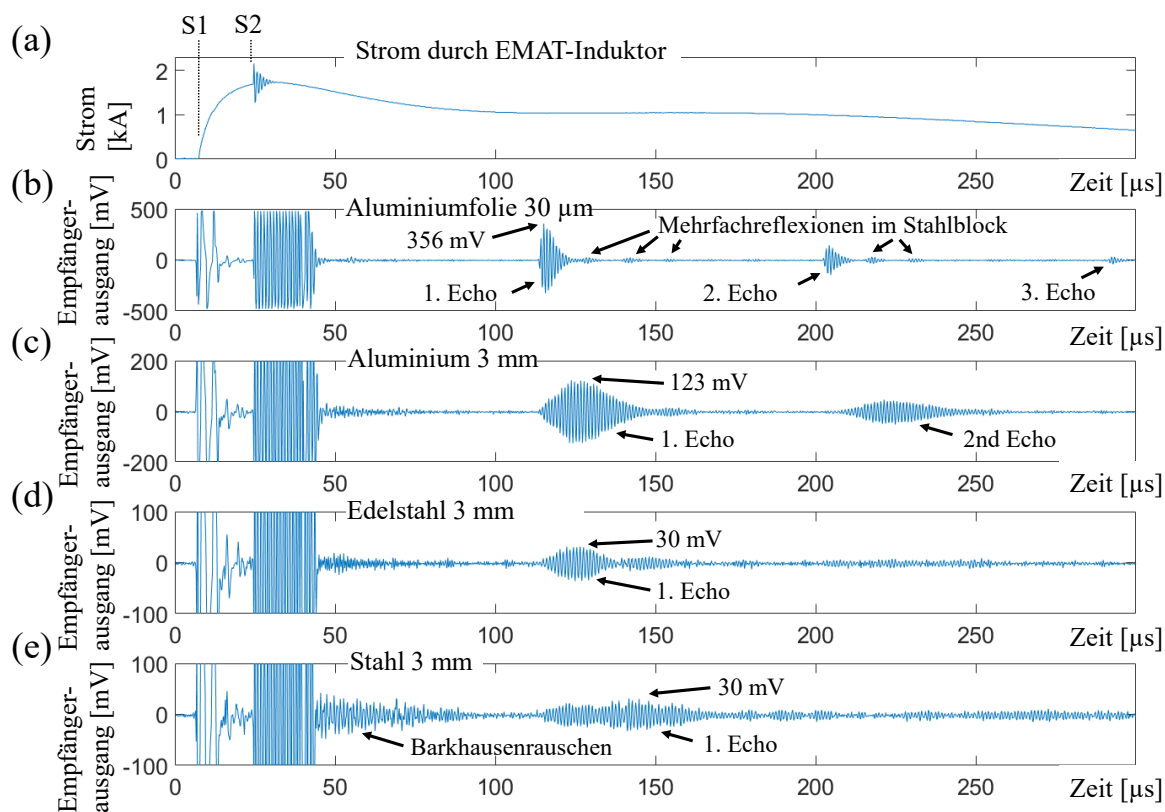


Abbildung 5.4: Puls-Echomessungen mit einem ebenen Metallblock im Wasser als reflektierendes Objekt. (a) Strom im EMAT-Induktor. (b) Empfänger-ausgangssignal bei der Messung durch 30 μm dicke Aluminiumfolie. (c) 3 mm dicke Aluminiumwand. (d) 3 mm Edelstahlwand. (e) 3 mm dicke ferromagnetische Stahlwand. [96]

Die Amplitude des ersten Echos für die 3 mm Aluminiumwand (Abbildung 5.4(c)) beträgt 35 % der Amplitude der Aluminiumfolie (simuliert in Abbildung 3.10, 23 %). Bei Stahl beträgt die Amplitude 8,4 % gegenüber der Aluminiumfolie (simuliert 8,5 %). Die Ausläufer der Echos durch die 3 mm dicken Metallwände fallen nicht monoton ab, wie aus Abbildung 3.10(b) zu erwarten ist. Dies könnte durch kleine Winkel zwischen dem reflektierenden Stahlblock und der Metallwand verursacht worden sein

oder dadurch, dass das empfangene Echo seitlich etwas versetzt auf der Metallplatte ankommt.

Bei den deutlich schwierigeren Messungen durch die Stahl- und Edelstahlwand wird kein zweites Echosignal detektiert, obwohl eine solche zweite Echoausbreitung im Wasser vorhanden ist. Das Signal durch die 3 mm dicke ferromagnetische Stahlwand (Abbildung 5.4(e)) erscheint deutlich unregelmäßiger als das der 3 mm dicken Edelstahlwand (Abbildung 5.4(d)). Dies wird teilweise durch zusätzliches Barkhausenrauschen verursacht, das in Abbildung 5.4(e) besonders bei etwa 50 μs als übermäßiges Rauschen auftritt. Eine Verzerrung des Echos selbst bei 120 μs rührt wahrscheinlich von anderen Krafteffekten als dem Lorentzkraftmechanismus her, insbesondere von den hier als ungünstig betrachteten Magnetisierungskräften [102]. Dennoch nähert sich die erhaltene Amplitude immer noch fast der Edelstahlprobe in Abbildung 5.4(d) an.

5.2.2 2D-Schallfeldvermessung

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der 2D-Schallfeldvermessung vorgestellt, die Messprozedur ist in Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben. Abbildung 5.5 zeigt vier Messreihen bei 1 und 2 MHz mit verschiedenen Metallwänden. Die beiden vertikalen Linien stellen die Achsenpositionen der beiden EMAT-Induktoren dar. Jeder Messpunkt zeigt die maximale Amplitude des empfangenen Echos. Die Amplituden für die 3 mm dicke Aluminiumwand (Abbildung 5.5(a)) sind größer als für die Stahlwände (Abbildung 5.5(b), (c) und (d)), wie aus Abbildung 3.12 und Abbildung 5.4 zu erwarten ist. Nebenkeulen sind bei den Echosignalen von EMAT A nicht zu erkennen.

Der empfangende EMAT B in Abbildung 5.5(a) und (b) zeigt jedoch zwei deutliche Maxima, die auf Nebenkeuleneffekte hindeuten; das linke Maximum wird vermutlich durch die Hauptkeule von EMAT A und die linke Nebenkeule von EMAT B erzeugt (vgl. Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13). Das rechte Maximum wird durch die rechte Nebenkeule von EMAT A und die Hauptkeule von EMAT B erzeugt. Wie aus den geringeren Intensitäten der Nebenkeulen in Abbildung 3.13 zu erwarten ist, beträgt die Signalamplitude von EMAT B nur ein Drittel der Amplitude von EMAT A, das die größere Hauptkeule sowohl für die Emission als auch für die Detektion hat.

Abbildung 5.5(c) zeigt eine Messreihe mit einer 1,5 mm dicken Edelstahlwand. Die Betriebsfrequenz des Systems musste zum Senden und Empfangen auf 2 MHz erhöht werden. EMAT B empfängt hier keine Echosignale, was zumindest teilweise auf das entsprechend verengte Strahlprofil bei kürzeren Wellenlängen zurückzuführen ist, so dass in 80 mm Tiefe keine ausreichende Überlappung mit dem Strahlprofil des benachbarten EMATs vorhanden ist. Die Amplituden sind bei 1,5 mm Edelstahl um etwa ein Drittel kleiner als bei 3 mm, weil der Wert der Kondensatorbank C_2 (Abbildung 4.1) geviertelt werden muss, um mit dem gleichen EMAT-Induktor die doppelte Resonanzfrequenz zu erreichen. Außerdem weist der Empfänger eine geringere Verstärkung für das 2 MHz Signal auf.

Die Signalverläufe der 1 MHz Messung in Abbildung 5.5(d) mit der 3 mm dicken Stahlwand sind weniger ausgeprägt als bei der 3 mm dicken Edelstahlwand, obwohl ziemlich ähnliche Amplituden erzielt werden. Wie bereits in Abbildung 5.4(d) und (e) beobachtet, sind die Echoamplituden von ferromagnetischem Stahl weniger stabil als

von Edelstahl.

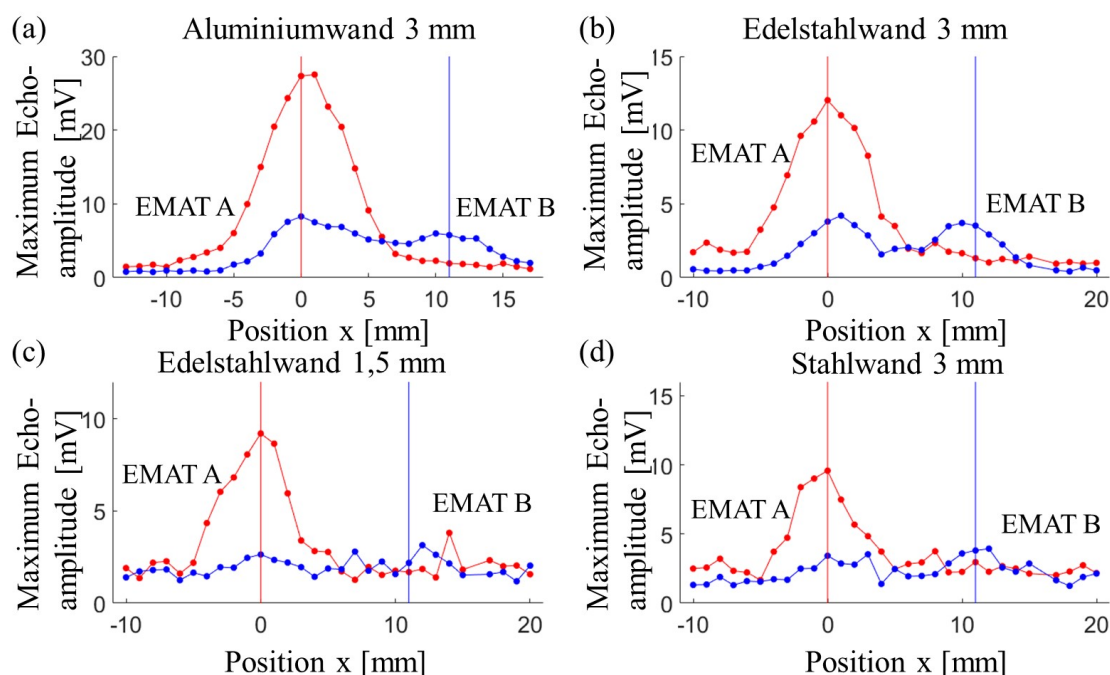


Abbildung 5.5: Alle vier Abbildungen zeigen Messreihen zur 2D-Schallfeldvermessung, durchgeführt mit dem Messaufbau in Abbildung 4.12. Es besteht ein 1 mm Luftspalt zwischen EMAT und Metalloberfläche. (a) Aluminiumwand mit einer Dicke von 3 mm und einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. (b) Wand aus 3 mm Edelstahl mit einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. (c) Wand aus Edelstahl mit einer Dicke von 1,5 mm und einer Ultraschallfrequenz von 2 MHz. (d) Stahlwand mit einer Dicke von 3 mm und einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. [96]

Im Allgemeinen können die Experimente mit dem länglichen Glasstab die Ultraschallfelder (z. B. in Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13) nicht exakt reproduzieren, da der Stab das rotationssymmetrische 3D-Strahlprofil entlang der y -Achse schneidet und somit Strahlenkomponenten aus einem radialen Bereich und nicht nur aus einem bestimmten Radius (x -Position in Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13) reflektiert. Dennoch zeigt das deutliche Auftreten von zwei Maxima für EMAT B eine einigermaßen übereinstimmende Gültigkeit der Ultraschallfelder mit den berechneten Ultraschallfeldern in Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13.

Um die Leistungsfähigkeit des EMAT-Systems weiter zu demonstrieren, wurde eine Reihe von Puls-Echo-Ultraschallmessungen durchgeführt, bei denen die z -Position des Glasstabes in 1 mm Schritten entlang der Achse des EMATs A variiert wurde (vgl. Abbildung 4.10). Als Wand diente Edelstahl mit einer Dicke von 3 mm. Die erste Messung in Abbildung 5.6 wurde bei einem Abstand von $z = 26$ mm und die letzte bei $z = 215$ mm durchgeführt, als das Positionierungssystem den mechanischen Anschlag erreichte. Aufgrund der Signalstärke der Echos (3 mV bei $z = 215$ mm; vgl. Abbildung

5.5(b)) wären noch größere Entfernungen erfassbar. Im Bereich $z < 50$ mm führen Nahfeldphänomene zu oszillierenden Amplituden [2], weswegen der Bereich problematisch ist.

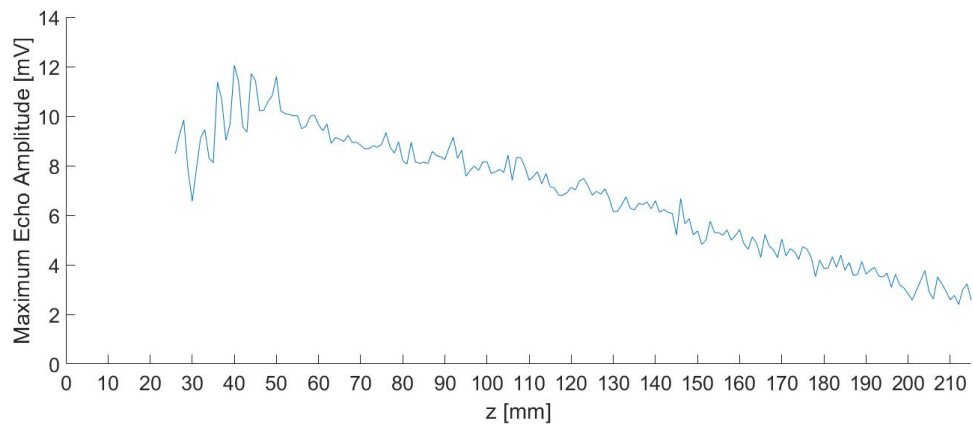


Abbildung 5.6: Serie von Ultraschallamplituden über die Änderung der Entfernung mit einem EMAT im Puls-Echo-Betrieb (1 mm Luftspalt; Versuchsaufbau siehe Abbildung 4.12). Ein langer Glasstab (in y -Richtung) mit einem Durchmesser von 5 mm wurde entlang der z -Achse des EMAT schrittweise verschoben; als Wandmaterial für den Tank diente 3 mm Edelstahl. [96]

5.2.3 3D-Lokalisierung

In folgendem Abschnitt werden die Messungen für die 3D-Lokalisierung vorgestellt, während die Messprozedur in Kapitel 4.6 präsentiert wurde. In Abbildung 5.8(a) ist die Anordnung der EMAT-Induktoren und des zu lokalisierenden Objekts dargestellt. Die 3D-Lokalisierung konnte nicht auf einmal durchgeführt werden, da nur zwei gleichzeitig arbeitende EMAT-Schaltungen (Abbildung 4.12) zur Verfügung standen. Stattdessen übertrug EMAT 4 (mit dem stärksten direkten Echo) bei allen Messungen Ultraschall und die zweite EMAT Schaltung war bei jeder Messung mit einer der sieben anderen EMAT-Induktoren (Abbildung 4.8) verbunden. EMAT 1, 2 und 5 erhielten die höchsten indirekten Echoamplituden (siehe Abbildung 5.7), während der Ausgang aller anderen EMATs für eine zuverlässige Interpretation zu gering erschien aufgrund ihrer Position zu der Metallkugel (außerhalb des Ultraschallstrahlprofils).

Bei $t = 0 \mu\text{s}$ wurde der MHz-Burst in Abbildung 5.7 ausgesendet. Die vier am stärksten ausgeprägten Signale der EMATs 1, 2, 4 und 5 wurden gespeichert und anschließend in MATLAB verarbeitet. Die ersten $60 \mu\text{s}$ zeigen starke Nachschwingungen, die mit den gewählten Parametern in diesem Aufbau unbrauchbar sind und daher von der Software ignoriert werden. Für die verschiedenen POE-Kugeln im Raum ist es wichtig, eine charakteristische Laufzeit für die Echos abzuleiten. Diese wurde automatisch generiert, indem das nächstgelegene Minimum der Signalhüllkurve vor einer deutlichen Echoschwingung gefunden wurde, die irgendwann nach $60 \mu\text{s}$ zu erwarten ist. Die

vergrößerten Einhüllenden der Oszillationen sind als rote Kurven abgebildet. Ein Minimum tritt viele μs vor dem Amplitudenmaximum des Echos auf (d. h. das verzögerte Maximum (vgl. Abbildung 3.10 und 5.4) entspricht nicht dem Radius der Kugelschale eines POE). Es zeigt sich, dass diese Methode nicht in der Lage ist, die Laufzeit und den Abstand der POEs mit einer Genauigkeit von beispielsweise einer Viertelwellenlänge oder 250 ns zu bestimmen. Vielmehr muss ein Unsicherheitsbereich von 3 μs ermittelt werden (Gaußsche Kurven in Abbildung 5.7), was wiederum die POE-Schalen verdickt und die Schnittbögen zwischen diesen Schalen verbreitert. Dies führt letztlich zu einer Lokalisierungsunsicherheit.

Es ist möglich mit jedem der EMATs im Array zu senden und zu empfangen, um mehr Volumen im Metalltank zu untersuchen. Außerdem kann das Array an jede beliebige Position entlang der Oberfläche bewegt werden. Die gezeigte Variante stellt jedoch die Prinzipien der Detektion und Lokalisierung in der gegebenen Position dar (d. h. irgendwo vor EMAT 4).

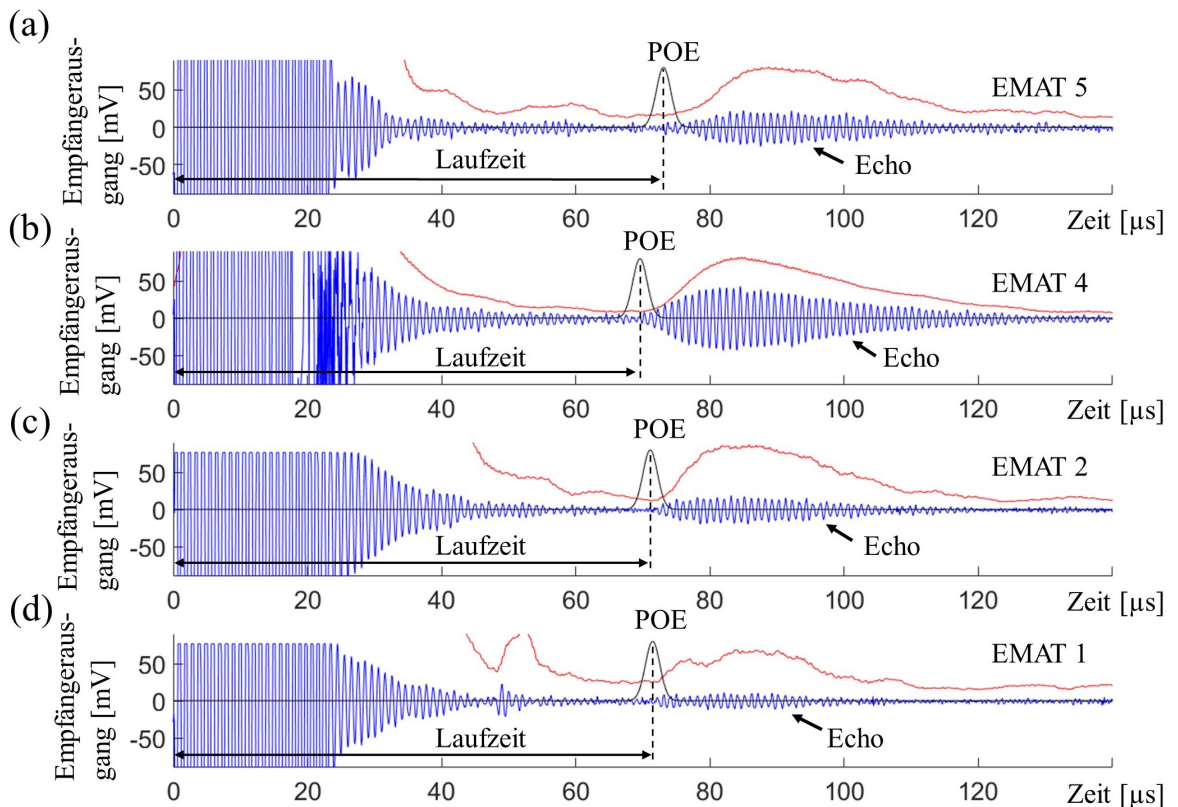


Abbildung 5.7: Empfängerausgangssignale der EMATs 1, 2, 4 und 5 für die in Abbildung 5.8 gezeigte 3D-Lokalisierung. Der Strom I_{RF} für die Emission wird in EMAT 4 bei 0 μs ausgelöst; daher sendet EMAT 4 aktiv und empfängt auch (siehe abweichende Artefakte nach 20 μs). Die roten Linien zeigen die vergrößerte und gefilterte Hüllkurve der blauen HF-Signale. Die schwarzen Gaußfunktionen markieren den Bereich des Echobeginns und ergeben eine radiale Dicke (Unsicherheit) der resultierenden POE-Schale. [96]

Abbildung 5.8(a) zeigt den schematischen Aufbau für die 3D-Lokalisierung und die verschiedenen Induktorpositionen des EMAT-Arrays. Abbildung 5.8(b) illustriert die resultierende Lokalisierungswahrscheinlichkeit der Metallkugel. Um diese zu erhalten, werden die Werte der einzelnen Kugelschalen der POEs der EMATs 1, 2, 4 und 5 an jedem Punkt im Raum multipliziert. Wie aus der Seitenansicht in Abbildung 5.8(c) ersichtlich, ist die Unsicherheit in der lateralen Position (x - und y -Richtung) stärker ausgeprägt als die axiale (z -Richtung) Unsicherheit. Dies ergibt sich aus der seitlich verbreiterten Form der POE-Schnittpunkte (siehe Abbildung 4.11). Tabelle 5.1 zeigt die Parameter der 3D-Lokalisierung.

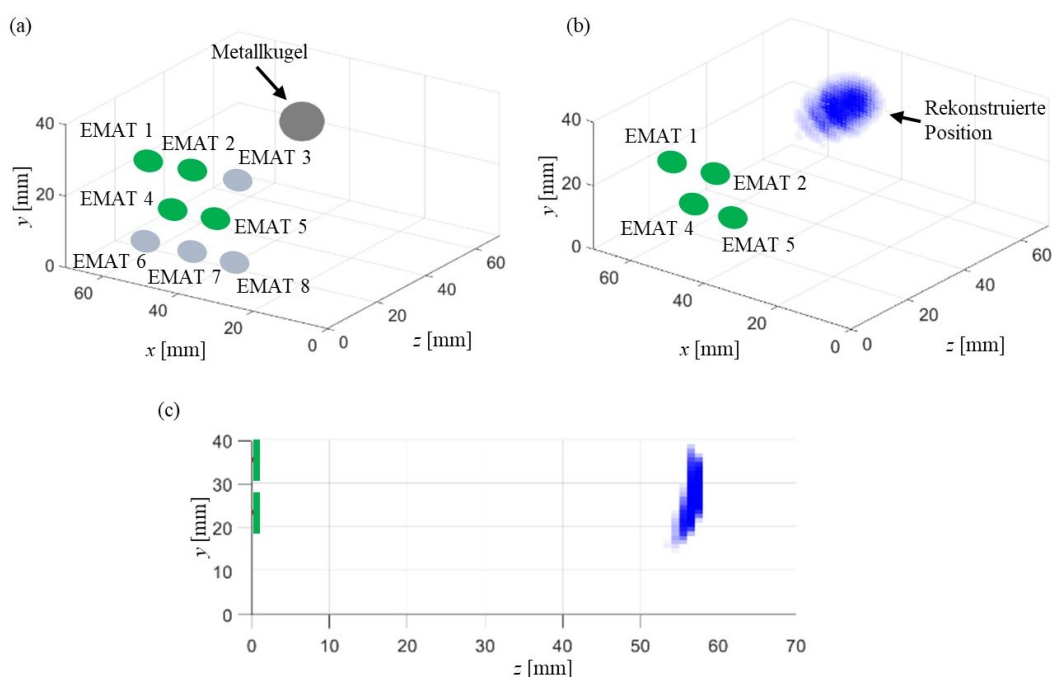


Abbildung 5.8: 3D-Lokalisierung einer 10 mm Metallkugel, die sich in einem mit Wasser gefüllten Metallbehälter befindet. (a) Anordnung des EMAT-Arrays und der Metallkugel. (b) Lokalisierungsergebnisse der Metallkugel aus den Signalen in Abbildung 5.7. (c) Seitenansicht der Lokalisierungsergebnisse der Metallkugel aus den Signalen in Abbildung 5.7. [96]

	x -Position [mm]	y -Position [mm]	z -Position [mm]	Laufzeit [μ s]
EMAT 1:	49	35	0	71,4
EMAT 2:	37	35	0	71,4
EMAT 4:	42	23	0	69,5
EMAT 5:	31	23	0	73,1
Wahre Position:	43	27	55	–
Mittelpunkt der rekonstruierten Position:	≈ 46	≈ 26	≈ 57	–

Tabelle 5.1: Parameter der 3D-Lokalisierung (Abbildung 5.8). Aufgelistet sind die Positionen der vier aktiven EMATs und der Mittelpunkt der wahren und rekonstruierten Position der Metallkugel. Die Laufzeit geht von EMAT 4 als einzigen Emitter aus, während die EMATs 1, 2, 4 und 5 Ultraschall empfangen haben. Die wahre Position der EMATs liegt bei $z = -1$ mm (Luftspalt), jedoch ist der Luftspalt für die Ultraschalllaufzeit unerheblich. [96]

5.3 Lamb-Wellen in Metallplatten

In diesem Unterkapitel geht es um das direktionale Aussenden und selektive Empfangen von Lamb-Wellen in Metallplatten. Die Vermessung des Schallfeldes wird präsentiert und die Ergebnisse zur automatischen Kantenabtastung vorgestellt.

5.3.1 Unidirektionale Schallaussendung

Zur Messung der konstruktiven und destruktiven Interferenz von Lamb-Wellen sind vier EMATs notwendig, wie in Abbildung 3.7(b) theoretisch berechnet. Die EMATs wurden im Versuchsaufbau wie in Abbildung 3.7(a) positioniert. Die EMATs 3 und 4 empfangen den Ultraschall auf der linken und rechten Seite der zentral positionierten EMATs 1 und 2. Die Ergebnisse in Abbildung 5.9(a) zeigen die Variation des Zeitversatzes t_{p12} zwischen den EMAT-Induktoren 1 und 2 (Abbildung 3.6). Die von den EMATs 3 und 4 empfangenen Signale haben drei lokale Minima und Maxima bei etwa $t_{p12} = \pm 250$ ns, $t_{p12} = \pm 750$ ns und $t_{p12} = \pm 1250$ ns. Die gestrichelten Linien zeigen die aus Gleichung 3.24 erwarteten Ergebnisse. Wie bereits berechnet, erscheint ein Zeitversatz von ± 750 ns als geeignet, wegen des besten Kontrastverhältnisses zwischen der konstruktiven und der destruktiven Interferenz. Wie aus den vorangegangenen Berechnungen zu erwarten war, wurde die höchste Amplitude bei ± 1250 ns erzielt, jedoch ist die Richtwirkung schlechter als bei ± 250 ns.

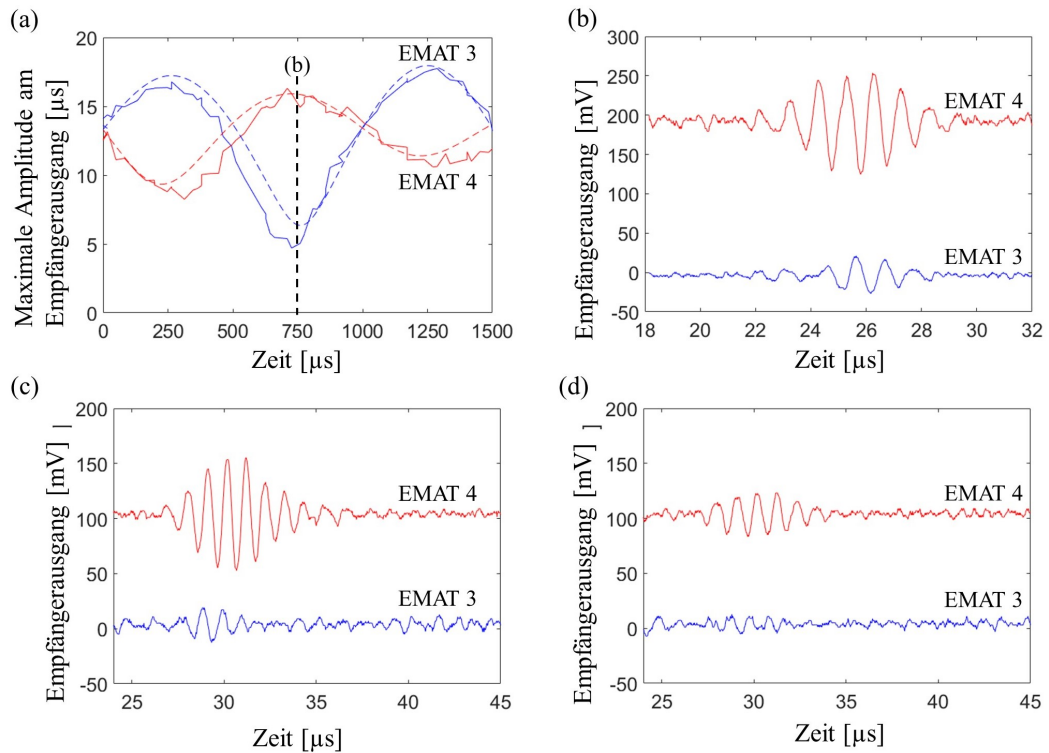


Abbildung 5.9: Messung der konstruktiv und destruktiv überlagerten Ultraschallemission durch die EMATs 1 und 2, hier gemessen mit EMAT 3 und 4. (a) Maximale Ultraschallamplitude über die Zeitverzögerung t_{p12} zwischen den EMAT-Induktoren 1 und 2. (b) Die von den EMATs 3 und 4 empfangenen Signale bei $t_{p12} = \pm 750$ ns, entsprechend der gestrichelten senkrechten Linie in Abbildung 5.9(a). (c) Messung wie in Abbildung 5.9(b) mit einem Luftspalt von 1 mm zwischen allen vier EMATs und der Stahloberfläche. (d) Messung wie in Abbildung 5.9(b) mit einem Luftspalt von 1,5 mm zwischen allen vier EMATs und der Stahloberfläche. [93]

5.3.2 Unidirektionaler Echo-Empfang

Bei der gerichteten Aussendung von Ultraschall mittels Überlagerung müssen die passenden Verzögerungszeiten in physikalischer Echtzeit angewendet werden. Beim Empfang ist eine Überlagerung von empfangenen und digitalisierten Signalen auch nachträglich am Computer möglich und muss nicht unbedingt in Echtzeit erfolgen. Um den gerichteten Empfang zu demonstrieren, wurde die Messaufbauanordnung aus Abbildung 5.10(a) verwendet. Der EMAT wurde mit einem Luftspalt von 1 mm über einer rechteckigen und 1 mm dicken Stahlplatte positioniert. Der Abstand zu Kante 1 wurde absichtlich geringer als zu Kante 2 gewählt.

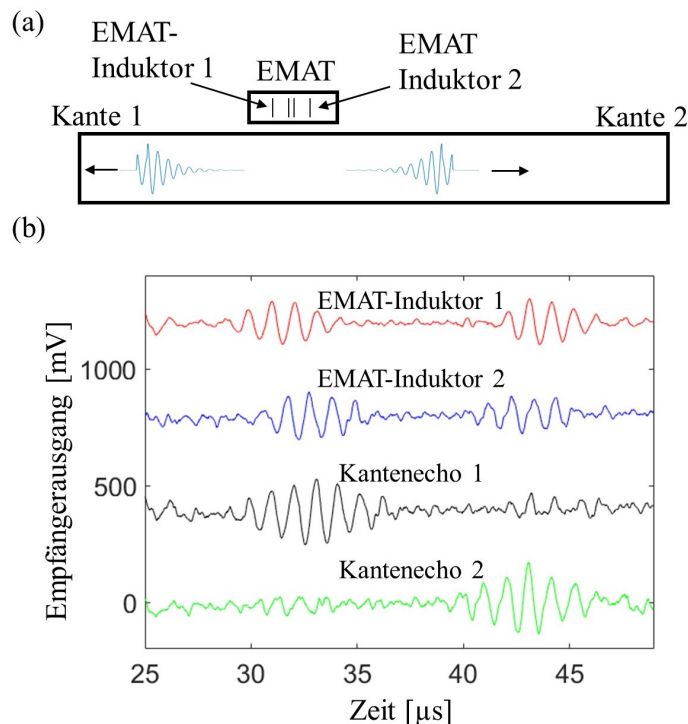


Abbildung 5.10: Messung des selektiven Lamb-Wellen-Empfangs mit zwei EMATs. Die Spannung am Empfängerausgang ist proportional zum Ultraschallsignal. (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus. Ein einzelner EMAT sendet bidirektional Ultraschall und die beiden Echos von beiden Kanten werden von zwei EMATs empfangen. (b) Messergebnisse für den selektiven Empfang. Die blauen und die roten Signalverläufe zeigen die beiden Roh-Echos. Die grünen und schwarzen Signalverläufe wurden nachträglich mit einem Zeitversatz von ± 1250 ns und einer Überlagerung am Computer ermittelt. [93]

In diesem Versuch erzeugt nur der EMAT-Induktor 1 Ultraschall, welcher sich in beide Richtungen ausbreitet (vgl. Abbildung 5.10(b)). Die Echos von den reflektierenden Kanten wurden mit beiden EMAT-Induktoren 1 und 2 detektiert, wie die blauen und roten Signale in Abbildung 5.10(b) zeigen. Bei beiden Signalen kam das Echo von

der weiter entfernten Kante 2 zeitlich später an und die Amplitude ist wegen des sich verbreiternden „Ultraschall-Strahlprofils“ in Abbildung 5.10(b) etwas abgeschwächt. Um das Echo von entweder Kante 1 oder Kante 2 gezielt zu selektieren, wurde eines der beiden empfangenen und aufgezeichneten Echosignale anschließend am Computer um 1250 ns digital verzögert. Die Superposition der beiden Signale ist in Abbildung 5.10(b) mit den grünen und schwarzen Signalverläufen dargestellt. Je nach Vorzeichen der Verzögerungszeit wird das Echo von Kante 1 oder Kante 2 selektiv verstärkt, während die gegenüberliegende Kante in den Messsignalen stark unterdrückt wird.

5.3.3 Kombinationen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, das gerichtete Senden und Empfangen von Ultraschall zu kombinieren. Für die gerichtete Übertragung sind Zeitversätze t_{p12} von ± 250 ns, ± 750 ns oder ± 1250 ns geeignet. Beim gerichteten Empfang kann neben diesen Zeitverschiebungen auch eines der beiden Signale invertiert werden. Abbildung 5.11 zeigt zwei Kombinationen von gerichtetem Senden und Empfangen von Lamb-Wellen mit dem in Abbildung 5.10(a) gezeigten Aufbau. Der Luftspalt zwischen dem EMAT und der Stahloberfläche betrug 0 mm, da somit das Echo der zu unterdrückenden Seite stärker sichtbar war, während bei einem Luftspalt von 1 mm das Echo teilweise im Rauschen verschwand. Das stärkere Echo von der näheren Kante 1 sollte ausgelöscht werden, während es galt, das Echo von der weiter entfernten Kante 2 hervorzuheben. In Abbildung 5.11(a) wurden die Lamb-Wellen mit einem Zeitversatz von $t_{p12} = 750$ ns ausgesendet und die Echos mit beiden EMAT-Induktoren empfangen. Danach wurde das Signal von EMAT-Induktor 1 um $5/4\lambda$ verschoben und ein Summensignal gebildet.

In Abbildung 5.11(b) ist zu erkennen, dass der Zeitversatz für die Aussendung $t_{p12} = -1250$ ns betrug. Das Signal des EMAT-Induktors 1 wurde um $3/4\lambda$ verschoben und invertiert (als Subtraktion). Das summierte Echosignal in Abbildung 5.11(a) ist breitbandiger als das Echo in Abbildung 5.11(b) und auch die letztlich resultierende Amplitude in Abbildung 5.11(b) ist etwas größer. Die Addition ohne Invertierung der Signale in Abbildung 5.11(b) funktioniert nicht so gut wie in der Anordnung in Abbildung 5.11(a), da das unerwünschte Echo von Kante 1 weniger unterdrückt wird.

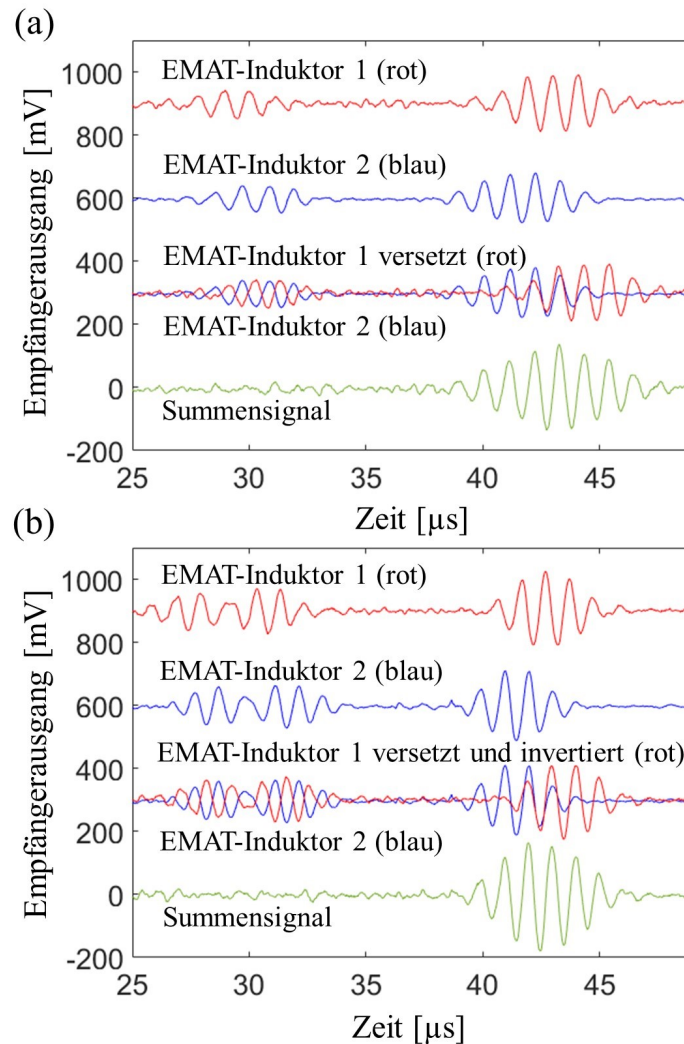


Abbildung 5.11: Messergebnisse von der Kombination aus gerichtetem Aussenden und Empfangen von Lamb-Wellen. (a) Die Verschiebung zwischen den EMATs 1 und 2 betrug $t_{p12} = 750$ ns und das Empfangssignal des EMAT-Induktors 1 wurde für das Summensignal um $5/4\lambda$ verschoben. (b) Der Sendezeitversatz $t_{p12} = -1250$ ns und das Empfangssignal des EMAT-Induktors 1 wurde um $3/4\lambda$ verschoben und für das Summensignal invertiert. [93]

5.3.4 Schallfeld

Zur Überprüfung des berechneten Lamb-Wellenfeldes aus Abbildung 3.8 wurde eine Messreihe mit dem in Abbildung 4.14 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Der in Abbildung 3.8 angenommene Prüfkörper ist eine große 1 mm dicke Stahlplatte. Um das Schallfeld abzutasten wird ein EMAT bestehend aus einem ringförmigen Induktor (nicht abgebildet) verwendet, da die Rotationssymmetrie keine Richtwirkung für den eingehenden Ultraschall hat. Abbildung 5.12 zeigt die maximale gemessene Ultraschallamplitude über der x -Achse, dabei wurden alle Zeitpunkte des Ultraschallsignals berücksichtigt. Im Gegensatz zu Abbildung 3.8 bei dem das Ultraschallfeld nur zu einem Zeitpunkt dargestellt ist. Die in Abbildung 3.8(c) als gestrichelte weiße Linie dargestellte Trajektorie wurde mit dem in Abbildung 4.14 gezeigten Positionierungssystem in 1 mm Schritten abgefahren. Das gemessene Signal wurde nach der Messung nicht gefiltert und die berechnete maximale Amplitude ist zur besseren Vergleichbarkeit auf dieselbe Höhe wie das gerechnete Signal skaliert worden. Wie Abbildung 5.12 zeigt, stimmen die Ergebnisse aus Gleichung 3.24 mit den gemessenen Ultraschallsignalen überein.

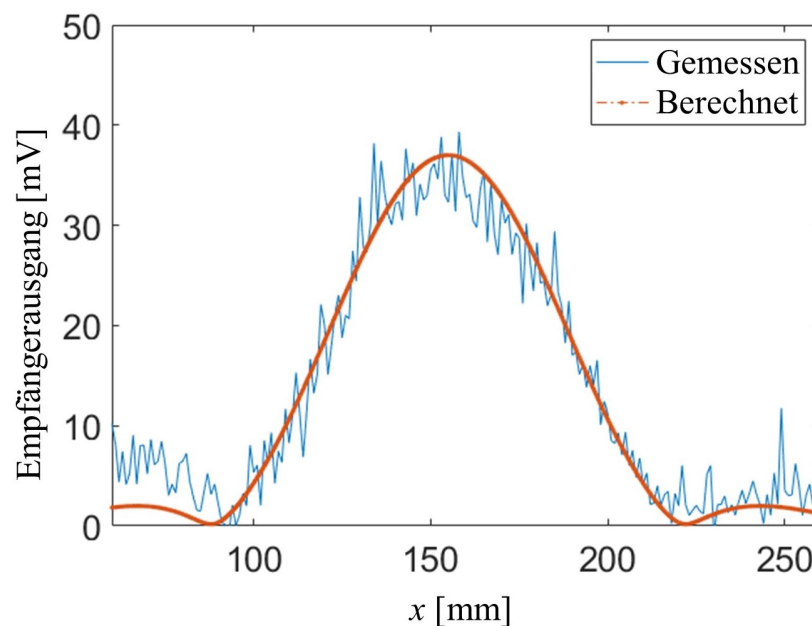


Abbildung 5.12: Die beiden Kurven in der Abbildung zeigen den berechneten und den gemessenen 1D-Ausschnitt des Ultraschallfeldes von Abbildung 3.8(c) (weiße gestrichelte Linie). [93]

5.3.5 Automatische Kantenabtastung

Die Messergebnisse einer Kantenabtastung mit einem EMAT werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Der Ablauf der Messung ist in Kapitel 4.7 beschrieben. Als spezifisches Testmuster wurden drei unterschiedlich große Rechtecke aus der oberen Kante

der Stahlplatte (Abbildung 4.13) ausgeschnitten. Nur der hellblaue Bereich in der Mitte der Stahlplatte ist für die Platzierung des EMATs zugänglich. Für die Abtastung der zu untersuchenden Kante war eine gerichtete Ultraschallabtastung erforderlich, da sonst Ultraschallechos von beiden Kanten nahezu gleichzeitig auftreten würden. Da es sich um ein berührungsloses Verfahren handelt, sollte der Luftspalt zwischen EMAT und Stahlplatte mindestens 1 mm betragen.

Um diese Aufgabe zu lösen, wurden die EMAT-Induktoren schrittweise in x -Richtung bewegt. An jedem Messpunkt wurde ein gerichteter Lamb-Wellenimpuls in Richtung der zu untersuchenden Kante projiziert. Die Echosignale der reflektierten Lamb-Wellen wurden mit beiden EMAT-Induktoren empfangen und anschließend gefiltert, verstärkt und über das Oszilloskop ausgelesen. Die beiden Echosignale wurden aufgezeichnet und am Computer verarbeitet. Dabei wird jede Schrittposition unabhängig ausgewertet, obwohl eine kohärente Verarbeitung und Überlagerung vieler vorheriger und nachfolgender Echos möglich ist. Diese Art der Multisignalverarbeitung basiert ebenfalls auf dem Interferenzverhalten nach Gleichung 3.24 und erhöht sowohl die Auflösung als auch das Signal-Rausch-Verhältnis der Ergebnisse. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit, die sich auf die grundlegenden Eigenschaften des neuartigen EMAT-Konzepts konzentriert.

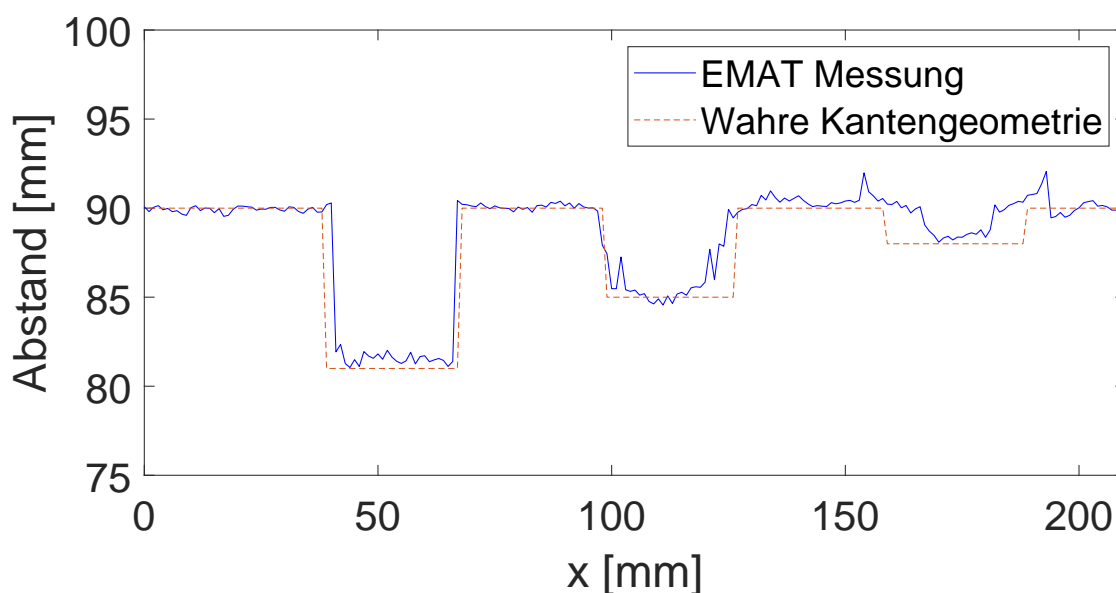


Abbildung 5.13: Rekonstruierte Geometrie der Stahlplattenkante. Die durchgezogene blaue Linie zeigt die mit dem EMAT gemessene Kante, die gestrichelte rote Linie zeigt die mit einem Messschieber gemessene Kante. [93]

Im ersten Schritt der durchgeführten Messung wurde, wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, aus den beiden Einzelsignalen ein zeitversetztes Summensignal gebildet. Über eine Laufzeitberechnung der Einzelechos wurde der Abstand zur Kante bestimmt. Dazu wurde das Summensignal der Echos mit einem Bandpassfilter gefiltert. Schließlich

wurde das Hüllkurvensignal des Echos gebildet und das Signalmaximum für die Laufzeitbestimmung herangezogen. Obwohl es bei der Auswertung der Einzelsignale bessere Möglichkeiten der Signalverarbeitung gibt, sind die erzielten Ergebnisse bereits recht genau.

Abbildung 5.13 zeigt die Ergebnisse der in Abbildung 4.13 schematisch dargestellten Messung. Die gestrichelte rote Linie markiert den tatsächlich mit einem Messschieber gemessenen Randabstand. Die blaue Linie zeigt das Ergebnis der Laufzeitmessung aus den gerichteten und einzeln verarbeiteten Echos. Für jeden Schritt (Schrittweite 1 mm) wurde eine Einzelmessung durchgeführt, so dass sich die blaue Linie aus 211 Abstandsmessungen zusammensetzt.

Im Bereich von $x = 0$ mm bis 39 mm betrug die maximale Streuung 0,8 mm. Bei der ersten Aussparung bei $x = 40$ mm bis 70 mm wurde die Kante sehr scharf erkannt, weil der Abstandsunterschied sehr deutlich war. Mit jeder weiteren Aussparung wurden die Kanten weniger scharf dargestellt, da der Abstandsunterschied immer geringer wurde. An dieser Stelle kommt eine einfache Auswertung der Echosignale an die Grenzen. Außerdem sind wahrscheinlich Interferenzen und Beugungen des Ultraschalls an den Rändern der rechten Aussparung aufgetreten.

5.4 Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse zu den theoretischen Betrachtungen aus Kapitel 3.3 vorgestellt. Die Messaufbauanordnung und der Ablauf der Messung ist in Kapitel 4.8 beschrieben. Abbildung 5.14 zeigt die Ergebnisse einer Messreihe mit dem Aufbau aus Abbildung 4.15(a), wobei jeder Signalpunkt der blauen Kurve die maximale Spitze-Spitze-Amplitude des empfangenen Ultraschallsignals aus einer Einzelmessung darstellt.

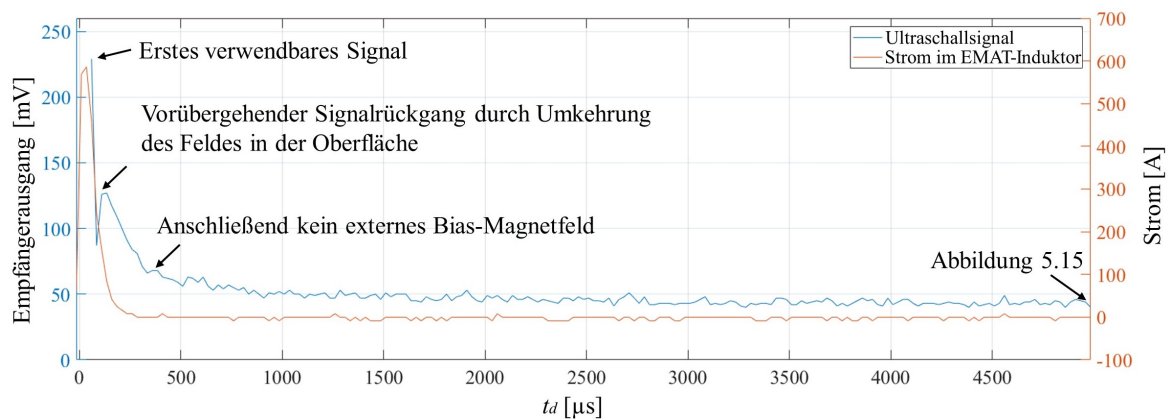


Abbildung 5.14: Die blaue Linie zeigt die maximale Spitze-Spitze-Amplitude des empfangenen Lamb-Wellen-Ultraschallsignals über unterschiedliche Verzögerungszeiten. Die rote Linie stellt den elektrischen Strom im R-EMAT-Induktor dar, der zum Zeitpunkt des Ultraschallempfangs gemessen wurde. [45]

Das Ultraschallsignal ist proportional zu der Spannung am Ausgang der Empfängerschaltung. Die Verstärkung der Empfängerschaltung beträgt etwa 60 dB. Der rote Signalverlauf ist der Magnetisierungsstrom im R-EMAT-Induktor, der nach etwa 400 μs auf null abfällt (und dann nicht mehr von null zu unterscheiden ist). Die erste Messung der Reihe wird bei $t_d = -15 \mu\text{s}$ durchgeführt. Der Wert von t_d wird bei jeder weiteren Messung um 25 μs erhöht. Im Anfangszeitbereich ($t_d < 250 \mu\text{s}$) ist eine komplexere und stärkere Reaktion zu beobachten. Beispielsweise verursacht das Umkehrfeld auf der Stahloberfläche einen kurzzeitigen Abfall der Empfindlichkeit.

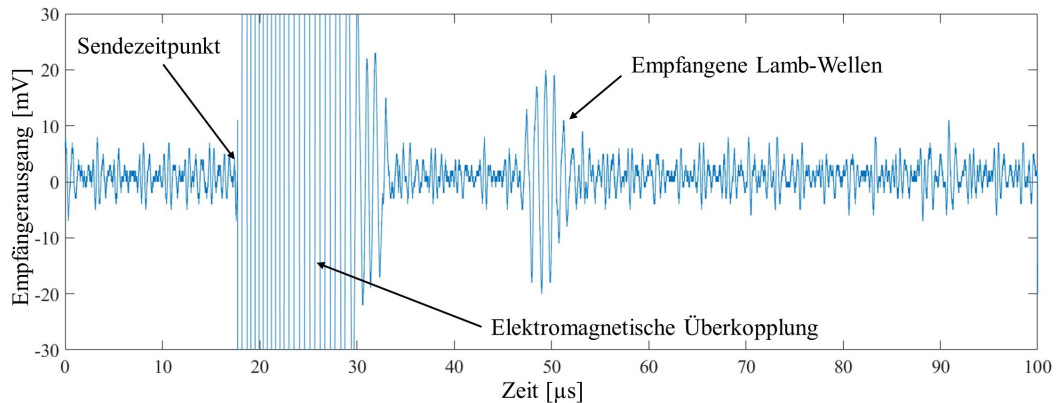


Abbildung 5.15: Ungefilterte Einzelmessung des Lamb-Wellen-Ultraschallempfangssignals mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld bei einer Verzögerungszeit t_d von 5 ms. [45]

Interessant ist hier, dass die empfangene Ultraschallamplitude bei einer längeren Verzögerungszeit t_d nur schwach abnimmt und überhaupt nicht proportional zum Strom verläuft. Es sei darauf hingewiesen, dass der Ultraschall auch viel später als die hier gezeigten 5 ms empfangen werden kann; ein Empfang ist sogar nach Minuten möglich. Eine wesentliche Voraussetzung ist das vorherige Erzeugen eines Bias-Magnetfeldimpulses, denn ohne einen solchen Impuls findet kein Ultraschallempfang statt.

Es wird auch kein Ultraschall empfangen, wenn der EMAT-Induktor nach einem Bias-Magnetfeldimpuls seitlich zu einem frischen und nicht magnetisierten Bereich des Stahlprüfkörpers bewegt wird. Die Beobachtungen lassen sich ohne einen Effekt entsprechend Abbildung 3.14(d) nicht erklären. Alle Messungen wurden bei Raumtemperatur (ca. 20°C) durchgeführt.

Abbildung 5.15 zeigt das Rohsignal aus Abbildung 5.14 bei einer Verzögerungszeit von $t_d = 5 \text{ ms}$. Der starke MHz-Sendeimpuls des T-EMAT wird auch vom R-EMAT durch unmittelbare elektromagnetische Einkopplung empfangen und nicht durch Ultraschallausbreitung. Elektromagnetische Störungen sind aufgrund der starken Sendeleistung und des empfindlichen Empfängers schwer zu vermeiden. Ultraschall lässt sich jedoch durch die charakteristische Laufzeitverzögerung eindeutig unterscheiden, die durch die Schallgeschwindigkeit und den geometrischen Abstand zwischen T-EMAT und R-EMAT gegeben ist. Der detektierte Ultraschall hat auch nach $t_d = 5 \text{ ms}$ noch eine Spitze-Spitze-Amplitude von etwa 40 mV und ist damit als Einzelmessung ohne

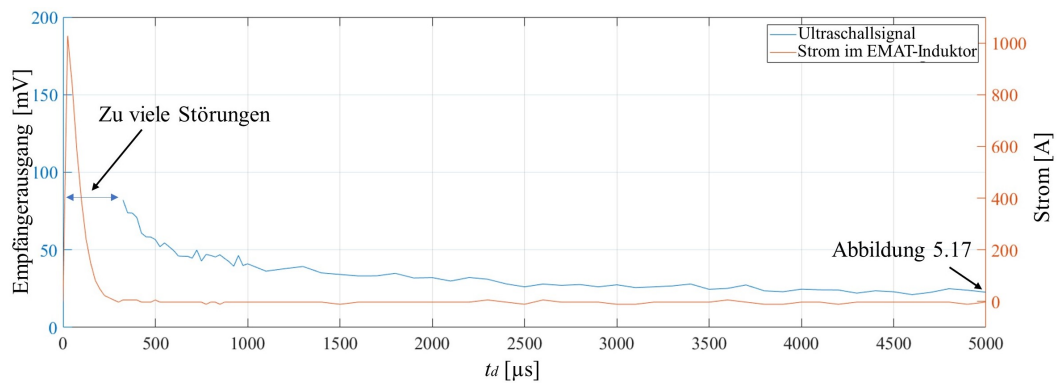


Abbildung 5.16: Die blaue Linie zeigt die maximale Spitze-Spitze-Amplitude des empfangenen longitudinalen Ultraschallsignals über die Zeit t_d . Die rote Linie stellt die elektrische Stromamplitude im R-EMAT-Induktor dar, die zum Zeitpunkt des Ultraschallempfangs gemessen wurde. [45]

nachträgliche Filterung leicht zu erkennen.

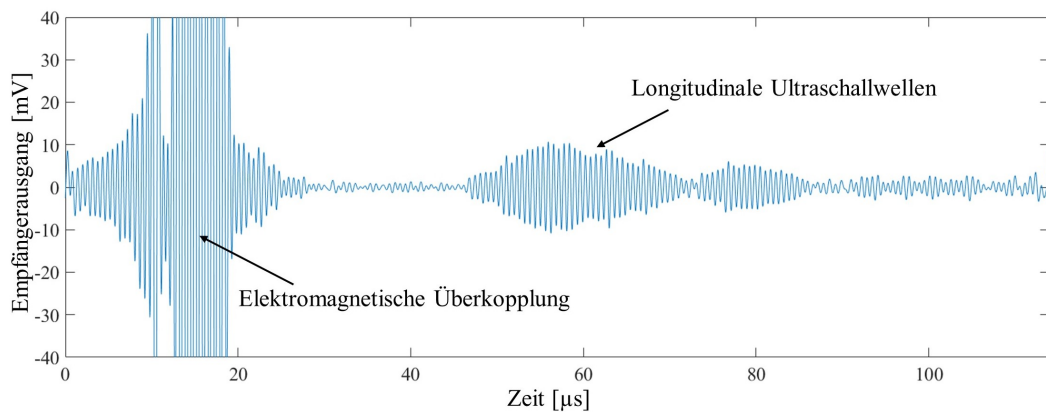


Abbildung 5.17: Bandpassgefilterte Einzelmessung des longitudinalen Ultraschallempfangssignals mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld bei einer Verzögerungszeit t_d von 5 ms. [45]

Abbildung 5.16 zeigt die Ergebnisse mit longitudinalem Ultraschall an einem Flüssigkeitsbehälter (Abbildung 4.15(b)) über die Verzögerungszeit t_d . Der Signalpegel ist im Allgemeinen niedriger als bei den Lamb-Wellen in Abbildung 5.14 und 5.15. Die hier erzwungenen longitudinalen Wellen setzen sich nicht effektiv in seitlich wirksame Verformungen der Oberfläche um, wie es für magnetostriktive Effekte erforderlich ist. Eine axiale oder normale Verformung der Eisenoberfläche ist nicht wirksam, da auf die blanke Oberfläche fast keine Normalkräfte wirken. In den ersten 400 μs war es aufgrund von Barkhausenrauschen und anderen übermäßigen Störungen nicht möglich, ein brauchbares Ultraschallsignal zu empfangen. Mit entsprechend angepassten Stromimpulsen wurden brauchbare Signale erhalten. Hier ist jedoch die längere Verzögerungszeit t_d besonders interessant, da nach 400 μs der Strom im R-EMAT als null angesehen werden kann. Ähnlich wie bei den in Abbildung 5.14 gezeigten Ergebnissen

nimmt die empfangene Amplitude mit der Zeit nur mäßig ab. Abbildung 5.17 zeigt das empfangene Ultraschallsignal bei einer Verzögerungszeit $t_d = 5$ ms (aus Abbildung 5.16). Das Signal ist bandpassgefiltert, da die Anzahl der Störungen im empfangenen Signal höher als in Abbildung 5.15 sind. Außerdem ist das empfangene Signal aufgrund der Dickenresonanz der beiden Eisenplatten in Abbildung 4.15(b) zeitlich erheblich verbreitert.

6 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von kompakten EMATs ohne zusätzliche Magnete. Viele Aspekte dieser Arbeit wurden bereits einschlägig publiziert (siehe Anhang 1.5). Die Arbeit lässt sich in vier Bearbeitungsfelder einteilen: „Konzeptionierung und Inbetriebnahme einer geeigneten EMAT-Treiber- und Empfangsschaltung“, „Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall“, „Unidirektionales Senden und Empfangen von Lamb-Wellen“ und „Ultraschallempfang mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld“.

Im Bearbeitungsfeld „Konzeptionierung und Inbetriebnahme einer geeigneten EMAT-Treiber- und Empfangsschaltung“ wird ein EMAT-Design vorgestellt, das in der Lage ist, einen Luftspalt von 2 mm zwischen EMAT-Induktor und Metalloberfläche zu überwinden. Eine solche Leistung ist durch die Implementierung von stärkeren Bias-Magnetfeldern im Vergleich zu konventionellen Permanentmagneten möglich. Die Ströme für die Erzeugung des Bias-Magnetfeldes müssen im kA-Bereich liegen, um deutlich mehr als 1 T über den Luftspalt zu erreichen, was mit konventionellen Permanentmagneten kaum möglich ist. Somit ist das hier vorgestellte EMAT-Design deutlich leistungsstärker und sensitiver (besonders wegen der quadratischen Abhängigkeit vom Bias-Magnetfeld) als EMATs mit konventionellen Permanentmagneten, insbesondere über einen solchen Luftspalt. Hierfür wird eine neuartige Schaltung für EMATs vorgestellt. Die Besonderheit dieses Schaltungsentwurfs ist der parallele und unabhängige Betrieb des MHz-Burst-Moduls und dem Modul zur Erzeugung des langgezogenen Stromimpulses für das Bias-Magnetfeld. Die neue Treiberschaltung kann ein quasistatisches Bias-Magnetfeld erzeugen, das im Puls-Echo-Betrieb einmal für die Ultraschallerzeugung und ein zweites Mal für den Ultraschallempfang eingesetzt werden kann. Der MHz-Burst lässt sich zu einem beliebigen Zeitpunkt erzeugen, wodurch der optimale Zeitpunkt des Überlagerns mit dem langgezogenen Strom für das Bias-Magnetfeld frei gewählt werden kann.

Bei dem langgezogenen Stromimpuls konnten in dieser Arbeit Stromamplituden von bis zu 3,6 kA erreicht werden. Daraus ergibt sich rechnerisch eine magnetische Flussdichte von 3,2 T an der Metalloberfläche bei einem Luftspalt von 2 mm. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Bias-Magnetfeldes sorgt dieses stärkere Magnetfeld für eine deutlich verbesserte Detektion. Der empfindliche Empfänger ist nach kurzer Erholungszeit in der Lage, Echosignale im μV Bereich zu erkennen, trotz der kV/kA-Impulse. Der Gesamtwirkungsgrad ist wie bei EMATs üblich sehr niedrig und kann hier auf etwa 10^{-16} für die gesamte Signalkette geschätzt werden (von Emission im MHz-Bereich (1 kV) bis zur Ultraschallechodetektion im Induktor (10 μV) entspricht -160 dB). Der Grund für den schlechten Wirkungsgrad liegt in der Fehlanpassung zwischen EMAT (wenig Druck, viel Schnelle) und Metallkörper mit hoher akustischer Impedanz [22]. Im Bereich der „Lokalisierung mit longitudinalem Ultraschall“ wurde ein EMAT-System

zur Erkennung und Lokalisierung von Inhomogenitäten in einem mit Flüssigkeit gefüllten Metallbehälter vorgestellt. Bei den Inhomogenitäten handelt es sich hier um längliche 5 mm Glasstäbe und 10 mm Metallkugeln, die sich im Flüssigkeitsvolumen befanden. Das EMAT-System war berührungslos außen an der Wand des Metallbehälters positioniert. Der Luftspalt zwischen den EMAT-Induktoren und der Metallwand wurde bei allen Messungen auf 1 mm festgelegt, wodurch eindeutig sichergestellt ist, dass die vorgestellte Methode ohne mechanischen Kontakt funktioniert. Durch das neuartige EMAT-Konzept konnte speziell die gewünschte longitudinale Ultraschalltransduktion von eng angeordneten EMATs in einem Array verstärkt werden. Es wurden Ultraschallmessungen mit verschiedenen Wandmaterialien (Aluminium, ferromagnetischer Stahl und Edelstahl), Wandstärken und Arbeitsfrequenzen durchgeführt.

Mit einer Schaltungssimulation lässt sich die 1D-Impulstransduktion (ebene Welle) und das spektrale Verhalten des Aufbaus darstellen. Mit entsprechenden Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Schaltungssimulation dem Gesamtproblem entspricht. Die zusätzliche und unvermeidliche Fehlanpassung der akustischen Impedanz zwischen der Metallwand und dem Wasser verringert die Ultraschallamplitude, begrenzt die Bandbreite und führt zu einer zeitlichen Verbreiterung der Signalantwort, insbesondere bei Stahl und Edelstahl. Aufgrund dieser Fehlanpassung zwischen der Metallwand und der Flüssigkeit könnte angenommen werden, dass durch die Wahl sehr niedriger Betriebsfrequenzen das Übertragungsverhalten verbessert würde. Das Problem besteht jedoch darin, dass die Dicke der Metallwand weniger als ein Zwanzigstel der longitudinalen Ultraschallwellenlänge im Metall betragen muss. Aber bei niedrigen Frequenzen divergiert das Schallfeld räumlich und zeitlich stark, sodass die Echosignale kleinerer Objekte schwach und schwer zu detektieren sind. Auch ist die Reflexion akustischer Wellen mit größerer Wellenlänge an kleinen Objekten (Rayleigh-Streuung) gering. Daher wurde in dieser Arbeit die Dickenresonanz der Wand bei höheren Frequenzen (hier etwa 1 MHz für eine Wanddicke von 3 mm) bevorzugt, da diese zu einem Kopplungsfrequenzband mit kürzeren Wellenlängen und einem gerichteteren Strahlprofil sowie zu einer größeren Reflexion von kleinen Fremdoobjekten führt.

Die Ultraschallfelder in Flüssigkeit wurden für verschiedene Konfigurationen simuliert. Um die Simulationen mit realen Messdaten zu vergleichen, wurde eine Messreihe mit einem senkrecht zum Boden ausgerichteten Glasstab mit 5 mm Durchmesser als Reflektor im Wasserbecken durchgeführt. Die EMATs wurden im Puls-Echo-Betrieb verwendet und der Glasstab wurde nach jeder Messung schrittweise verschoben. Die empfangenen Echoamplituden gaben Aufschluss über die Form und die Reichweite des Ultraschallfeldes. Die Doppelmaxima von EMAT B wiesen auf Nebenkeuleneffekte hin, wie diese aufgrund theoretischer Überlegungen zu erwarten waren.

Bei Messungen mit ferromagnetischem Stahl trat Barkhausenrauschen auf, welches in einem separaten Versuch mit einem EMAT reproduziert werden konnte. Das Barkhausenrauschen kann dazu führen, dass Messsignale unbrauchbar werden. Es konnte gezeigt werden, wie der Barkhauseneffekt im EMAT-Design für ferromagnetische Prüfkörper so berücksichtigt werden kann, dass dieser zu keiner Beeinträchtigung der Messsignale führt.

Es wurde eine 3D-Lokalisierung für eine 10 mm große Metallkugel in einem Wasserbecken mit 3 mm dicken Aluminiumwänden vorgestellt. Für die 3D-Lokalisierung wur-

de eine Laufzeitmessung von mehreren, eng angeordneten und gleichzeitig arbeitenden EMAT-Elementen durchgeführt. Unerwünschte laterale Kopplungen zwischen eng benachbarten EMAT-Elementen, entweder über sich seitlich ausbreitender Schwingungen oder über elektromagnetische Interferenz, sind bei der Versuchsanordnung mit einer Aluminiumwand nur in geringem Maße aufgetreten. Das Lokalisierungsergebnis zeigt folglich die Anwendbarkeit solcher EMAT-Arrays für diese Aufgabe.

Die derzeitige Fähigkeit etwas zu detektieren lag für 5 mm lange Stäbe in einer Tiefe von bis zu 210 mm und bei einer 10 mm großen Kugel in einer Tiefe von bis zu 60 mm. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch eine Weiterentwicklung des EMAT-Systems auch kleinere Objekte detektierbar sind oder größere Abstände überwunden werden können. Objekte, die sich sehr nah an der Wand befinden, werden jedoch aufgrund der anhaltenden Schwingungen in der Metallwand auch weiterhin schwer zu erkennen sein. Die Metall-Wasser-Grenzfläche führt grundsätzlich zu charakteristischen Betriebsfrequenzen und verfügbaren Bandbreiten (reziprok zur Zeitauflösung) gemäß Abbildung 3.11(b), die mit extern eingesetzten EMAT-Technologien nicht ohne weiteres überwunden werden können.

Im Bearbeitungsfeld „Unidirektionales Senden und Empfangen von Lamb-Wellen“ wird eine besonders kompakte und leistungsfähige Doppel-EMAT-Struktur für die unidirektionale Übertragung und den Empfang von Ultraschall-Lamb-Wellen in ferromagnetischen Stahlplatten vorgestellt. Der Luftspalt kann dabei bis zu 1,5 mm betragen. Die überwiegend tangentialen Felder dieses EMAT-Konzepts ohne zusätzliche Magnete sind eigentlich dafür bekannt, dass diese EMAT-Konzepte Schwierigkeiten bei ferromagnetischen Metallen bereiten [1]. Das Konzept funktioniert auch bei anderen Metallen wie Aluminium, jedoch ist ferromagnetischer Stahl ein schwierigeres und wichtigeres Material in der Industrie, wodurch hierauf der Schwerpunkt gelegt wurde.

Die Unidirektionalität bei der Lamb-Wellenübertragung wird durch Interferenz des Ultraschalls umgesetzt, die über definierte Zeitabstände für die beiden Sendeimpulse eingestellt wird. Außerdem können die beiden empfangenen Echosignale nachträglich mathematisch verschoben, invertiert und überlagert werden, was die Richtwirkung weiter verbessert. Der kompakte Aufbau des phasengenauen Doppel-EMATs zeigt prinzipiell die Machbarkeit eines Phased-Array-Design.

Es werden Berechnungen für 1D- und 2D-Lamb-Wellenfelder gezeigt, die eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen aufweisen. Schließlich wurde die Abtastung der unzugänglichen Kante einer Stahlplatte als mögliche Anwendung vorgestellt. Eine zusätzliche Schwierigkeit war der zugängliche Bereich auf der Metallplatte, über dem der EMAT positioniert werden kann. Der zulässige Positionierungsbereich liegt mittig auf der Metallplatte, was bedeutet, dass zwischen der zu untersuchenden Kante und der gegenüberliegenden Kante ein ähnlicher Abstand besteht. Dadurch können Störechos von der nicht zu untersuchenden Kante zur gleichen Zeit eintreffen wie von der zu Untersuchenden. Außerdem muss ein Abstand zwischen dem EMAT und der Stahloberfläche von mindestens 1 mm eingehalten werden. Trotz der schwierigen Bedingungen hat das EMAT-Konzept die Kante erfolgreich rekonstruiert. Es konnte gezeigt werden, dass eine phasengenaue Emission und Detektion mit eng benachbarten EMAT-Induktoren (Abbildung 4.9) und in diesem neuen und kompakten Design, d. h. ohne Permanentmagnete oder separate/große Elektromagnete, möglich

ist.

Im Bearbeitungsfeld „Ultraschallempfang mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld“ wurde ein neuer Ansatz für die Verwendung von EMAT-Induktoren vorgestellt, bei dem das Problem des zeitlich begrenzten Bias-Magnetfeldes gelöst wurde. Die Voraussetzung ist, dass das Metallobjekt ferromagnetisch ist. Mit einem FEM-Modell war es möglich zu beweisen, dass sich in weichmagnetischen Eisenwerkstoffen, die normalerweise nicht als dauermagnetisches Material verwendet werden können, stabile und geschlossene Magnetkreise bilden. Die magnetostriktiven Effekte der Oberfläche werden als elektroakustischer Kopplungsmechanismus angenommen, da andere Mechanismen aufgrund des Fehlens von Magnetfeldern zwischen dem EMAT-Induktor und der Eisenoberfläche als unwirksam angesehen werden.

Mit einer FEM-Simulation wurde das Magnetisierungsverhalten einer kohlenstoffarmen Stahlprobe visualisiert. Die Ultraschallmessungen zeigen die Machbarkeit des Empfangs von longitudinalen und Lamb-Wellen bei vormagnetisierten Eisenwerkstoffen mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld. Somit konnte der Zeitrahmen für die Detektion von etwa 200 μs auf mindestens 5 ms verlängert werden. Es wurde sogar festgestellt, dass Lamb-Wellen noch nach $t_d = 1$ min nachweisbar sind. Die hier gezeigten Messungen waren jedoch auf 5 ms beschränkt, da selbst bei der langsamen Ultraschallgeschwindigkeit von 1500 m/s in Wasser die zurückgelegte Entfernung 7,5 m betragen würde.

EMATs ohne zusätzliche Magnete verwenden in der Regel Kondensatorbänke um die erforderlichen hohen Ströme zur Erzeugung des Bias-Magnetfeldes zu generieren. Der Ultraschallerzeugung ist bei EMATs ohne zusätzliche Magnete wesentlich einfacher als dessen Empfang, insbesondere wenn das Empfangszeitfenster lang ist. Während des Empfangs muss ein nahezu konstanter Strom durch den EMAT-Induktor fließen, um das Bias-Magnetfeld konstant zu halten. Schwankungen im Bias-Magnetfeld können Barkhausenrauschen verursachen, wodurch eine empfindliche Ultraschalldetektion unmöglich werden kann.

Ein großer Vorteil des EMAT-Konzepts ohne aktives Bias-Magnetfeld ist der größere Freiheitsgrad bei der Konzeptionierung der Treiberschaltung. Probleme, wie das Schalten von Dioden zum Schutz von Elektrolytkondensatoren vor Verpolung, müssen berücksichtigt werden. Jedes Schalten einer Diode führt zu einer großen Amplitudenauslenkung der empfindlichen Empfängerschaltungen. Auch Bewegungen innerhalb des EMAT-Induktors und -Kabels, die durch Lorentzkräfte bei hohen Stromimpulsen hervorgerufen werden, führen zur Selbstinduktion und damit zu störenden Signalspitzen. Bei dem hier vorgestellten Ansatz sind diese Probleme nicht mehr relevant, da während des verlängerten Empfangszeitfensters kein Strom fließt und kein Barkhausenrauschen auftritt.

Ein Nachteil des EMATs ohne aktives Bias-Magnetfeld ist die deutlich geringere Empfindlichkeit im Vergleich zum Empfang mit einem aktiven Bias-Magnetfeld. Da jedoch keine großen Magnete erforderlich sind und keine magnetische Anziehung auftritt, können größere Sensoren mit größerer Grundfläche realisiert werden, die dann mehr Signalenergie empfangen und eine größere Reichweite haben. Außerdem könnte die Verwendung einer Rückplatte aus Ferrit oder Stahlblech die Empfindlichkeit des Induktors beim Empfang erheblich verbessern. Die Idee, eine Rückplatte zu verwenden, ist nicht

neu und wurde bereits in der Literatur beschrieben, z. B. von Ren et al. [52]. Bei dem hier vorgestellten EMAT-Konzept mit einem langen Magnetisierungsstrom ist die Verwendung von Rückplatten schwierig, da das Ferritmaterial aufgrund der Sättigung durch das starke Bias-Magnetfeld unwirksam werden würde. Daher könnte eine Kombination aus dem hier vorgestellten Remanenzansatz und einer Rückplatte aus Ferrit oder einem anderen geeigneten Material zu einer besseren Leistung führen.

Der vorgestellte Ansatz kann auch für einen EMAT im Puls-Echo-Betrieb verwendet werden. Darüber hinaus sind EMAT-Arrays möglich. Die EMATs ohne aktives Bias-Magnetfeld eignen sich gut für komplexere Arrays oder Phased-Arrays, da die Konstruktion ohne zusätzliche Magnete einfacher, kleiner und weniger empfindlich gegenüber Hitze und mechanischer Belastung ist.

7 Ausblick

Es könnte gezeigt werden, dass es mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld möglich ist, Ultraschall zu empfangen. Es ist sinnvoll diesen Effekt weiter zu untersuchen, um somit neue EMAT-Konzepte zu ermöglichen. Die Weiterentwicklung des hier vorgestellten Modells zur Darstellung des Magnetfeldverhaltens im Metall ist wichtig, um das ungewöhnliche Remanenzverhalten von weichmagnetischem Eisen besser nachzuvollziehen. Bei der Vormagnetisierung müssen einige Fragestellungen, wie der Einfluss der Impulsform auf das Magnetisierungsverhalten, geklärt werden. Der Temperatureinfluss des Zielmetalls sollte untersucht werden, da EMAT-Systeme sich aufgrund der berührungslosen Eigenschaften gut für Metalloberflächen mit hohen Temperaturen eignen. Mit dem Messaufbau sollte es möglich sein, die Phasenverschiebungen des Ultraschalls zu messen, womit sich mehr Erkenntnisse zum Wirkmechanismus herausfinden lassen (siehe Thompson [47]).

Eine interessante Möglichkeit ist darüber hinaus, erst das Material durch einen Magnetfeldimpuls zu magnetisieren, damit sich geschlossene magnetische Kreise im Inneren bilden und im Anschluss erneut einen Magnetfeldimpuls mit getauschter Polarität zu erzeugen, um die gleiche B -Feldrichtung zu haben wie die Magnetisierung der Oberfläche. Möglicherweise lassen sich somit höhere Ultraschallamplituden erzeugen bzw. empfangen.

Eine weitere Option könnten flächigere Induktoren sein, um die Detektionsfähigkeit eines EMATs ohne aktives Bias-Magnetfeld zu erhöhen. Bei den hier vorgestellten EMATs lag der Fokus auf sehr hohen magnetischen Flussdichten, weswegen flächige Induktoren widersprüchlich sind. Beim Ultraschallempfang ohne aktives Bias-Magnetfeld besteht diese Problematik nicht. Flächige Induktoren können austretende Feldlinien, verursacht durch eintreffenden Ultraschall (Kapitel 3.3), über eine größere Fläche (Integration über die Fläche) und Reichweite detektieren.

Eine ferromagnetische Rückplatte, bestehend aus Ferrit, Eisenpulverkernen oder Transformatorblechen, würde die Kopplung eines EMAT-Induktors ohne aktives Bias-Magnetfeld zur Metalloberfläche verbessern und somit die Ultraschalldetektionsfähigkeit erhöhen. Bei EMATs mit nicht statischen Bias-Magnetfeldern ermöglichen ferromagnetische Rückplatten nur bedingt eine Verbesserung, da das Material bei starken Bias-Magnetfeldern schnell in Sättigung geht. Auch können Störeffekte wie Barkhausenrauschen oder die Erzeugung von Ultraschall in der Rückplatte für Probleme sorgen. Bei EMATs ohne aktives Bias-Magnetfeld besteht das Problem nicht. Daher können hochfrequenztaugliche Ferritmaterialien mit hohen relativen Permeabilitätszahlen μ_r gewählt werden, während sonst der Fokus auf Materialien liegt, die erst bei einer hohen Magnetfeldstärke in Sättigung gehen.

In Abbildung 7.1 ist ein neuartiges EMAT-Konzept dargestellt, welches nur eine einzelne Linienquelle zur Ultraschallerzeugung aufweist. In Abbildung 7.1(a) ist der EMAT

ohne Kupferdeckel dargestellt. Dieser besteht aus einem Induktor und einer runden Kupferspule, die im Weiteren als Kupferspule bezeichnet wird. Beides zusammen wirkt wie ein Transformator. Der Induktor wird an die EMAT-Treiberschaltung angeschlossen. Die Induktivität des Induktors ist deutlich größer als die des Verbindungskabels zwischen Treiberschaltung und Induktor. Das Transformationsverhältnis vom Induktor zur Kupferspule ist die Anzahl der Windungen des Induktors zu einer Windung, da die Kupferspule nur aus einer Windung besteht. In der Kupferspule muss der komplette Strom durch einen einzelnen Leiter (Steg) durchlaufen. Die Induktivität des Stegs sollte nicht zu gering im Vergleich zu der Induktivität der restlichen Kupferspule sein, da ansonsten nur wenig Energie im Magnetfeld um den Steg herum ankommt. Der Steg kann als Ultraschalllinienquelle gesehen werden. In Abbildung 7.1(b) ist der EMAT mit Kupferdeckel dargestellt. Insgesamt besteht der EMAT somit aus drei Komponenten: Kupferspule, Induktor und Kupferdeckel.

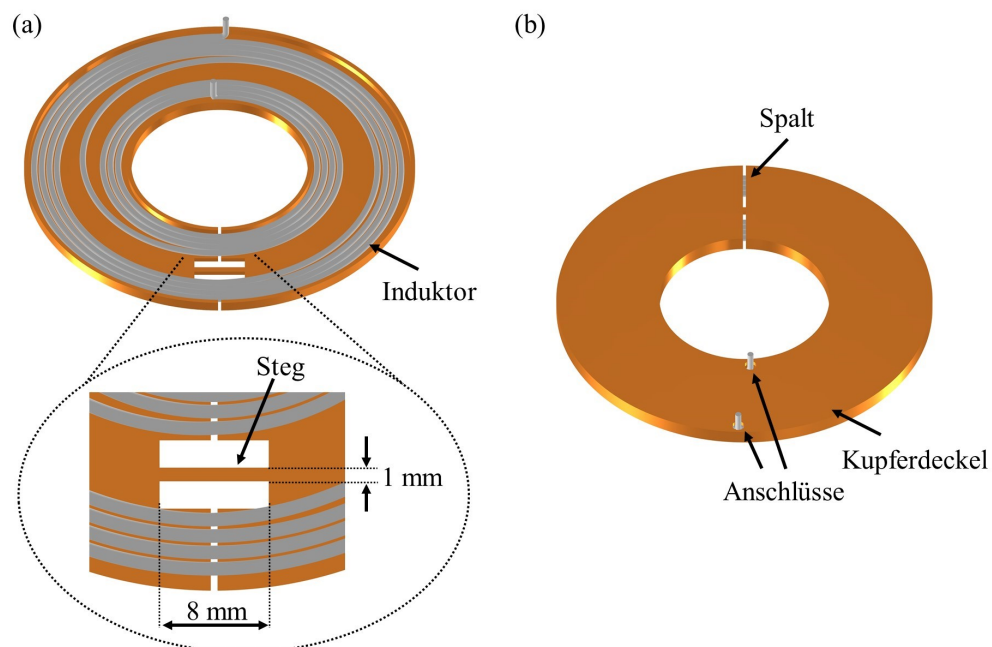


Abbildung 7.1: Neuartiges EMAT-Konzept mit nur einem Linienleiter als Ultraschallquelle. (a) Die Kupferspule ist ohne Deckel dargestellt, somit ist im Inneren der Induktor zu sehen. (b) Die Kupferspule ist komplett zusammengebaut.

Der Vorteil dieser EMATs könnten sehr hohe Ströme im Steg sein, was zu hohen magnetischen Flussdichten führt. Die Kupferspule weist aufgrund der Bauweise eine sehr hohe mechanische Stabilität auf, was besonders in industriellen Umgebungen eine wichtige Anforderung ist. Eine günstige Herstellung ist denkbar, da die Kupferspule gefräst oder gestanzt werden kann. Ein weiterer großer Vorteil ist die Kühlung der Kupferspule, da Kupfer sehr gut wärmeleitend ist und die Kupferspule große Kontaktflächen für Kühlkörper zulässt.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Hirao and H. Ogi, *Electromagnetic Acoustic Transducers Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*, 2nd ed. Springer, 2017, doi: 10.1007/978-4-431-56036-4.
- [2] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, 5th ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986, doi: 10.1007/978-3-662-10909-0.
- [3] W. M. Alobaidi, E. A. Alkuam, H. M. Al-Rizzo, and E. Sandgren, “Applications of ultrasonic techniques in oil and gas pipeline industries: A review,” *Am J Oper Res*, vol. 5, no. 4, 2015, doi: 10.4236/ajor.2015.54021.
- [4] K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, and T. Kiwa, “Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2845864.
- [5] R. Ghoni, M. Dollah, A. Sulaiman, and F. M. Ibrahim, “Defect characterization based on eddy current technique: Technical review,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 6, 2014, doi: 10.1155/2014/182496.
- [6] Q. Feng, R. Li, B. Nie, S. Liu, L. Zhao, and H. Zhang, “Literature review: Theory and application of in-line inspection technologies for oil and gas pipeline girth weld deflection,” *Sensors*, vol. 17, no. 1, 2017, doi: 10.3390/s17010050.
- [7] M. Hayashi, T. Kawakami, T. Saito, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Imaging of defect signal of reinforcing steel bar at high lift-off using a magnetic sensor array by unsaturated AC magnetic flux leakage testing,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 2, pp. 1–4, 2021, doi: 10.1109/TMAG.2020.3017722.
- [8] K. Tsukada, Y. Majima, Y. Nakamura, T. Yasugi, N. Song, K. Sakai, and T. Kiwa, “Detection of inner cracks in thick steel plates using unsaturated AC magnetic flux leakage testing with a magnetic resistance gradiometer,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2713880.
- [9] J. Tkocz, D. Greenshields, and S. Dixon, “High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel,” *NDT E Int.*, vol. 102, pp. 47–55, 2019, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.11.001.
- [10] L. Pucci, R. Raillon, L. Taupin, and F. Baqué, “Design of a phased array EMAT for inspection applications in liquid sodium,” *Sensors*, vol. 19, no. 20, 2019, doi: 10.3390/s19204460.

- [11] Y. Yan, D. Liu, B. Gao, G. Tian, and Z. Cai, “A deep learning-based ultrasonic pattern recognition method for inspecting girth weld cracking of gas pipeline,” *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 14, pp. 7997–8006, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2982680.
- [12] R. Ribichini, F. Cegla, P. B. Nagy, and P. Cawley, “Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 58, no. 12, pp. 2571–2581, 2011, doi: 10.1109/TUFFC.2011.2120.
- [13] A. C. Kubrusly, M. A. Freitas, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Mode selectivity of SH guided waves by dual excitation and reception applied to mode conversion analysis,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 65, no. 7, pp. 1239–1249, 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2018.2835299.
- [14] Z. Cai, Y. Yan, and G. Tian, “Enhancement of Lamb-EMAT signal using a modified one-side pitch-catch design,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 138 556–138 566, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2943402.
- [15] R. Su, S. Wang, and G. Zhai, “Numerical simulation of magnetostrictive Lamb wave EMATs on steel plate,” in *2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, 2014, pp. 107–111, doi: 10.1109/FENDT.2014.6928243.
- [16] G. Zhai, T. Jiang, L. Kang, and S. Wang, “Minimizing influence of multi-modes and dispersion of electromagnetic ultrasonic Lamb waves,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 57, no. 12, pp. 2725–2733, 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1746.
- [17] P. D. Wilcox, “Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 50, no. 6, pp. 699–709, 2003, doi: 10.1109/TUFFC.2003.1209557.
- [18] C. B. Thring, S. Hill, S. Dixon, and R. S. Edwards, “The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour,” *Ultrasonics*, vol. 99, p. 105945, 2019, doi: 10.1016/j.ultras.2019.06.007.
- [19] Y. Xie, L. Yin, Z. Liu, P. Deng, and W. Yin, “A novel variable-length meander-line-coil EMAT for side lobe suppression,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 16, pp. 6279–6287, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2584702.
- [20] X. Jian, S. Dixon, K. Grattan, and R. S. Edwards, “A model for pulsed rayleigh wave and optimal EMAT design,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 128, no. 2, pp. 296–304, 2006, doi: 10.1016/j.sna.2006.01.048.
- [21] S. Huang, S. Wang, W. Li, and Q. Wang, *Electromagnetic Ultrasonic Guided Waves*. Springer, Singapore, 2016, doi: 10.1007/978-981-10-0564-0.

- [22] D. Rueter and T. Morgenstern, “Ultrasound generation with high power and coil only EMAT concepts,” *Ultrasonics*, vol. 54, no. 8, pp. 2141–2150, 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2014.06.012.
- [23] D. Rueter, “Experimental demonstration and circuitry for a very compact coil-only pulse echo EMAT,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, 2017, doi: 10.3390/s17040926.
- [24] ALS Limited, “Electro-Magnetic Acoustic Transducer (EMAT),” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.alsglobal.com/en-us/services-and-products/asset-integrity-and-reliability/advanced-ndt/electro-magnetic-acoustic-transducer>
- [25] Applus+, “Elektromagnetisch-akustischer Wandler (EMAT),” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: [https://www.applus.com/de/de/what-we-do/sub-service-sheet/elektromagnetisch-akustischer-wandler-\(emat\)](https://www.applus.com/de/de/what-we-do/sub-service-sheet/elektromagnetisch-akustischer-wandler-(emat))
- [26] Arora Technologies Limited, “Electro Magnetic Acoustic Transducers (EMAT),” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.arorandt.com/electro-magnetic-acoustic-transducers-emat/>
- [27] BFI Betriebstechnik GmbH, “Fidus,” Online, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://bfi-bt.de/produkte/fidus/>
- [28] I. D. F. G. . C. KG, “Ultraschallprüfung,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.foerstergroup.de/de/deu/technologie/ultraschallpruefung/>
- [29] I. T. Inc, “EMAT-Technologie,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://de.innerspec.com/emat-technology>
- [30] N. AG, “PRODUKTE,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://nordinkraft.de/produkte/>
- [31] O. E. S. . C. KG, “Wanddickenmessung bei Dampfkesselrohren mit EMAT-Prüfköpfen,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/de/applications/thickness-boiler-tubes-emat-transducers/>
- [32] O. E. GmbH, “EMAT-Prüfgeräte,” Online, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.optimes.net/de/produkte/emat-pruefgeraete.html>
- [33] P. Group, “INSPECTION & ACCURATE CRACK DETECTION,” Online, 2021. [Online]. Available: <https://www.pipecaregroup.com/emat-inspection/>
- [34] R. Group, “EMATMeasurement Technology,” Online, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.rosen-group.com/global/company/explore/we-can/technologies/measurement/emat.html>
- [35] S. Ltd., “Applications,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.sonemat.co.uk/applications>

- [36] S. electronics s.r.o., “EMAT Transducer,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <http://www.starmans.net/product/emat-transducer/>
- [37] I. T.D. Williamson, “SpirALL® Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT),” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/in-line-Inspection/emat>
- [38] I. T. Inc, “Über uns,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://de.innerspec.com/about-us>
- [39] O. E. GmbH, “OPTIEMAT,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.optimes.net/de/produkte/emat-prüfgeräte/optiemat.html>
- [40] S. Ltd., “About Us,” Online, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://www.sonemat.co.uk/about-us>
- [41] M. Seher and P. B. Nagy, “On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of electromagnetic acoustic transducers (EMATs),” *NDT E Int.*, vol. 84, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2016.07.001.
- [42] H. Zhang, R. Su, S. Wang, G. Zhai, and L. Kang, “Design of bulk wave EMAT using a pulsed electromagnet,” in *2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, 2014, pp. 242–246, doi: 10.1109/FENDT.2014.6928272.
- [43] J. Isla and F. Cegla, “Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 63, no. 8, pp. 1148–1160, 2016, doi: 10.1109/TUFFC.2016.2558467.
- [44] M. Leone, *Theoretische Elektrotechnik Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, doi: 10.1007/978-3-658-18317-2.
- [45] K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs,” *NDT E Int.*, vol. 125, p. 102569, 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102569.
- [46] R. B. Thompson, “A model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals,” *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. 25, no. 1, pp. 7–15, 1978, doi: 10.1109/T-SU.1978.30979.
- [47] R. B. Thompson, “Mechanisms of electromagnetic generation and detection of ultrasonic Lamb waves in iron-nickel alloy polycrystals,” *J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 12, pp. 4942–4950, 1977, doi: 10.1063/1.323623.
- [48] C. Rouge, A. Lhémy, and C. Aristégui, “EMAT generation of bulk forces in a ferromagnetic plate and their equivalent surface stresses,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 498, p. 012013, apr 2014, doi: 10.1088/1742-6596/498/1/012013.

- [49] Nurmalia, N. Nakamura, H. Ogi, and M. Hirao, “EMAT pipe inspection technique using higher mode torsional guided wave T(0,2),” *NDT E Int.*, vol. 87, pp. 78–84, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.01.009.
- [50] Y. Wang, X. Wu, P. Sun, and J. Li, “Enhancement of the excitation efficiency of a torsional wave PPM EMAT array for pipe inspection by optimizing the element number of the array based on 3-D FEM,” *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 3471–3490, 2015, doi: 10.3390/s150203471.
- [51] K. Ho, D. Billson, and D. Hutchins, “Inspection of drinks cans using non-contact electromagnetic acoustic transducers,” *J. Food Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 431–444, 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.025.
- [52] W. Ren, J. He, S. Dixon, and K. Xu, “Enhancement of EMAT’s efficiency by using silicon steel laminations back-plate,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 274, pp. 189–198, 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.03.010.
- [53] X. Jian, S. Dixon, R. S. Edwards, K. Quirk, and I. Baillie, “Effect on ultrasonic generation of a backplate in electromagnetic acoustic transducers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 2, p. 024909, 2007, doi: 10.1063/1.2756090.
- [54] F. Hernandez-Valle and S. Dixon, “Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures,” *Insight: Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 53, no. 2, pp. 96–99, 2011, doi: 10.1784/insi.2011.53.2.96.
- [55] N. Lunn, S. Dixon, and M. D. G. Potter, “High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel,” *NDT E Int.*, vol. 89, pp. 74–80, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.04.001.
- [56] S. E. Burrows, Y. Fan, and S. Dixon, “High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers,” *NDT E Int.*, vol. 68, pp. 73–77, 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.07.009.
- [57] Jean-François Saillant and Régis Marlier and François Baqué, “First results of Non-destructive testing under liquid sodium at 200°C,” *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 0–4, 2016, doi: 10.1109/ULT-SYM.2016.7728558.
- [58] Florian Le Bourdais and T. Le Pollès and François Baqué, “Liquid sodium testing of in-house phased array EMAT transducer for L-wave applications,” *2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA)*, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1109/ANIMMA.2015.7465510.
- [59] M. Cong, X. Wu, and C. Qian, “A longitudinal mode electromagnetic acoustic transducer (emat) based on a permanent magnet chain for pipe inspection,” *Sensors*, vol. 16, no. 5, pp. 740–758, 2016, doi: 10.3390/s16050740.

- [60] H. Lamb, “On waves in an elastic plate,” *Proc. R. Soc.*, vol. 93, no. 648, pp. 114–128, 1917, doi: 10.1098/rspa.1917.0008.
- [61] E. C. Ashigwuike, O. J. Ushie, R. Mackay, and W. Balachandran, “A study of the transduction mechanisms of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) on pipe steel materials,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 229, pp. 154–165, 2015, doi: 10.1016/j.sna.2015.03.034.
- [62] H. Rizvi, “Lamb Wave Dispersion Curve. MATLAB Central File Exchang.” Online, Nov. 2021, MATLAB Central File Exchange. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73050-lamb-wave-dispersion-curve>
- [63] J. K. Lee, H. W. Kim, and Y. Y. Kim, “Omnidirectional Lamb waves by axisymmetrically-configured magnetostrictive patch transducer,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, no. 9, pp. 1928–1934, 2013, doi: 10.1109/TUFFC.2013.2777.
- [64] S. Wang, S. Huang, Y. Zhang, and W. Zhao, “Modeling of an omni-directional electromagnetic acoustic transducer driven by the Lorentz force mechanism,” *Smart Mater Struct*, vol. 25, no. 12, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/12/125029.
- [65] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 2014, doi: 10.1017/CBO9781107273610.
- [66] J. Tkocz and S. Dixon, “Electromagnetic acoustic transducer optimisation for surface wave applications,” *NDT E Int.*, vol. 107, p. 102142, 2019, doi: 10.1016/j.ndteint.2019.102142.
- [67] P. A. Petcher, M. D. G. Potter, and S. Dixon, “A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail,” *NDT E Int.*, vol. 65, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.03.007.
- [68] W. Yin, Y. Xie, Z. Qu, and Z. Liu, “A pseudo-3d model for electromagnetic acoustic transducers (EMATs),” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 450, 2018, doi: 10.3390/app8030450.
- [69] C. B. Thring, Y. Fan, and R. S. Edwards, “Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects,” *NDT E Int.*, vol. 81, pp. 20–27, 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2016.03.002.
- [70] P. A. Petcher and S. Dixon, “Weld defect detection using PPM EMAT generated shear horizontal ultrasound,” *NDT E Int.*, vol. 74, pp. 58–65, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.05.005.
- [71] M. Clough, M. Fleming, and S. Dixon, “Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound,” *NDT E Int.*, vol. 86, pp. 20–27, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2016.11.010.

- [72] S. Hill and S. Dixon, "Frequency dependent directivity of periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducers," *NDT E Int.*, vol. 62, pp. 137–143, 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2013.12.009.
- [73] Y.-Q. Li, C. Li, R.-L. Su, G.-F. Zhai, and K.-C. Wang, "Unidirectional line-focusing shear vertical wave EMATs used for rail base center flaw detection," in *2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2016, pp. 99–102, doi: 10.1109/FENDT.2016.7992004.
- [74] H. M. Seung, C. I. Park, and Y. Y. Kim, "An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate," *Ultrasonics*, vol. 69, pp. 58–66, 2016, doi: 10.1016/j.ultras.2016.03.011.
- [75] P. A. Petcher and S. Dixon, "Mode mixing in shear horizontal ultrasonic guided waves," *Nondestruct. Test. Evaluation*, vol. 32, no. 2, pp. 113–132, 2017, doi: 10.1080/10589759.2016.1184268.
- [76] J. Isla and F. Cegla, "EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection," *Ultrasonics*, vol. 78, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1016/j.ultras.2017.02.009.
- [77] L. M. Martinho, A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, "Computation of the radiation pattern of unidirectional SH wave generated by dual-PPM EMATs," in *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/IUS52206.2021.9593803.
- [78] J. Parra-Raad and F. Cegla, "On the steerability of phased array emats: The dipole element," *NDT E Int.*, vol. 125, p. 102563, 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102563.
- [79] S. Hill and S. Dixon, "Localisation of defects with time and frequency measurements using pulsed arrays," *NDT E Int.*, vol. 67, pp. 24–30, 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.06.008.
- [80] Y. Y. Kim and Y. E. Kwon, "Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides," *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 3–19, 2015, doi: 10.1016/j.ultras.2015.05.015.
- [81] H. Kwun, S.-Y. Kim, and J. F. Crane, "Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes," *U.S. Patent*, no. 6429650, Aug. 2002.
- [82] C. D. Graham, "Physical origin of losses in conducting ferromagnetic materials (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 11, pp. 8276–8280, 1982, doi: 10.1063/1.330306.
- [83] D. M. Boyd and P. D. Sperline, "Noncontact temperature measurements of hot steel bodies using an electromagnetic acoustic transducer (EMAT)," In: *Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds) Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Springer, Boston, MA*, 1988, doi: 10.1007/978-1-4613-0979-6_96.

- [84] T. Liu, C. Pei, R. Cai, Y. Li, and Z. Chen, “A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 314, p. 112213, 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112213.
- [85] D. Rueter, “Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: Modeling of magnetic fields for improving the performance,” *Ultrasonics*, vol. 65, pp. 200–210, 2016, doi: 10.1016/j.ultras.2015.10.003.
- [86] S. Liu, K. Chai, C. Zhang, L. Jin, and Q. Yang, “Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, p. 5534, 2020, doi: 10.3390/app10165534.
- [87] X. Chen, R. Su, H. Zhang, S. Wang, and G. Zhai, “Influence of coil parameters on transduction performance of unidirectional EMATs for Rayleigh wave,” *2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application*, pp. 150–154, 2013, doi: 10.1109/FENDT.2013.6635546.
- [88] S. Wang, R. Su, X. Chen, L. Kang, and G. Zhai, “Numerical and experimental analysis of unidirectional meander-line coil electromagnetic acoustic transducers,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, no. 12, pp. 2657–2664, 2013, doi: 10.1109/TUFFC.2013.2864.
- [89] Z. Wang, S. Huang, S. Wang, Q. Wang, and W. Zhao, “EMAT design for defect inspection in pipe-like structure using helical Lamb wave,” in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129193.
- [90] J. He, S. Dixon, S. Hill, and K. Xu, “A new electromagnetic acoustic transducer design for generating and receiving S0 Lamb waves in ferromagnetic steel plate,” *Sensors*, vol. 17, no. 5, pp. 1023–36, 2017, doi: 10.3390/s17051023.
- [91] W. Ren, K. Xu, and S. Dixon, “A study of stress dependent magnetostriction on steel plate by analysis of an electromagnetically generated S0 Lamb wave,” *J Nondestr Eval*, vol. 38, no. 102, 2019, doi: 10.1007/s10921-019-0642-1.
- [92] A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, “Unidirectional shear horizontal wave generation with side-shifted periodic permanent magnets electromagnetic acoustic transducer,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 67, no. 12, pp. 2757–2760, 2020, doi: 10.1109/TUFFC.2020.3027246.
- [93] K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT,” *NDT E Int.*, vol. 122, p. 102492, 2021, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102492.
- [94] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, “The complex-image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the Earth by the auroral electrojet,” *Geophys. J. Int.*, vol. 132, no. 1, pp. 31–40, 1998, doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00388.x.

- [95] C. Dodd and W. Deeds, “Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems,” *J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 6, 1968, doi: 10.1063/1.1656680.
- [96] K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Examination of the liquid volume inside metal tanks using noncontact EMATs from outside,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 68, no. 4, pp. 1314–1327, 2021, doi: 10.1109/TUFFC.2020.3022946.
- [97] A. Devices., “Ltspice,” Online, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [98] B. E. Treeby and B. T. Cox, “K-wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–12, 2010, doi: 10.1117/1.3360308.
- [99] V. Babbar and L. Clapham, “Residual magnetic flux leakage: A possible tool for studying pipeline defects,” *J Nondestr Eval*, vol. 22, p. 117–125, 2003, doi: 10.1023/B:JONE.0000022031.16580.5a.
- [100] A. Antipov and A. Markov, “A comparative analysis of the active and residual magnetization methods in the nondestructive testing of rails,” *Russ J Nondestruct Test*, vol. 52, p. 155–160, 2016, doi: 10.1134/S1061830916030037.
- [101] K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “A compact and powerful EMAT design for contactless detection of inhomogeneities inside the liquid volume of metallic tanks,” *TM. Tech. Mess.*, vol. 87, no. 5, pp. 349–359, 2020, doi: 10.1515/teme-2019-0124.
- [102] H. Ogi, “Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves,” *J. Appl. Phys.*, vol. 82, no. 8, pp. 3940–3949, 1997, doi: 10.1063/1.365701.

Publikationen aus dieser Arbeit

1. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “A compact and powerful EMAT design for contactless detection of inhomogeneities inside the liquid volume of metallic tanks,” *TM. Tech. Mess.*, vol. 87, no. 5, pp. 349–359, **2020**, doi: 10.1515/teme-2019-0124.
2. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Examination of the liquid volume inside metal tanks using noncontact EMATs from outside,” *IEEE Trans Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 68, no. 4, pp. 1314–1327, **2021**, doi: 10.1109/TUFFC.2020.3022946.
3. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT,” *NDT E Int.*, vol. 122, p. 102492, **2021**, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102492.
4. K. Rieger, D. Erni, and D. Rueter, “Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs,” *NDT E Int.*, vol. 125, p. 102569, **2022**, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102569.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Funktionsweise eines EMATs basierend auf Lorentzkraften zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall.	9
2.2	Schematische Darstellung der magnetischen Hysteresekurve eines weichmagnetischen Metalles wie Eisen oder Baustahl. Die Zahlen beziehen sich auf Abbildung 4.16. [45]	11
2.3	Schematisch dargestellt ist die Abhängigkeit der Ultraschallamplitude für Lorentzkraft und Magnetostriktion in Eisen für Lamb-Wellen (nach Thompson [46]).	12
2.4	Schematische Darstellung der Magnetostriktionskurve von ferromagnetischem Stahl (nach Thompson, Hirao und Ogi [47, 1]).	13
2.5	Schematische Darstellung eines Leiters, der von einem sich zeitlich ändernden Strom durchflossen wird und über einem ideal elektrisch leitfähigen Material positioniert ist. (a) Skizze der Anordnung mit eingezeichneter Kraftwirkung. (b) Magnetische Flussdichte B berechnet mittels Spiegelstrommethode. Die weißen Pfeile zeigen die magnetische Flussrichtung.	14
2.6	Schematische Darstellung eines stromdurchflossenen Leiters über einem idealen Ferrit. (a) Skizze der Anordnung mit eingezeichneter Kraftwirkung. (b) Magnetische Flussdichte B berechnet mittels Spiegelstrommethode. Die weißen Pfeile zeigen die magnetische Flussrichtung.	15
2.7	Schematische Darstellung der Magnetostriktion bei ferromagnetischen Materialien in Anlehnung an [21].	17
2.8	Schematische Darstellung eines EMATs mit Permanentmagneten zur Erzeugung von longitudinalem Ultraschall.	19
2.9	Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit von A0-, A1-, S0- und S1-Lamb-Wellen in einer Aluminiumplatte mit der Dicke von 1 mm. Berechnet wurden beide Grafiken mit der Matlab Bibliothek von Haider [62]. (a) Phasengeschwindigkeit über die Frequenz. (b) Gruppengeschwindigkeit über die Frequenz.	21
2.10	Schematisch dargestellt sind zwei unterschiedliche EMAT-Konfigurationen zur Erzeugung von Lamb-Wellen. (a) Draufsicht einer EMAT-Konfiguration mit Magnetostriktion als dominanter Mechanismus. (b) Querschnitt eines EMAT-Konzepts für Magnetostriktion als dominanter Mechanismus. (c) Querschnitt eines EMAT-Konzepts für Lorentzkraft als dominanter Mechanismus.	22
2.11	Schematische Darstellung eines EMATs mit Permanentmagneten zur Erzeugung von sich transversal ausbreitenden Ultraschall.	24
2.12	Lamb-Wellen EMAT über einer ferromagnetischen Metallplatte, der aus einem rennbahnförmigen Induktor besteht.	26

3.1	Schematisch dargestellt ist die winkelabhängige Berechnung der magnetischen Flussdichte um ein Linienleiterelement.	31
3.2	Dargestellt ist die komplexe Spiegelungsmethode nach Boteler und Pirojola [94].	32
3.3	Berechnung der magnetischen Flussdichte im Zeitbereich bei einem impulsartigen Strom. (a) Aufbau bestehend aus einem Leiter über einer Aluminiumplatte. (b) Dargestellt ist ein gaußähnlicher Stromverlauf durch den Leiter über die Zeit. (c) Frequenzverhalten der magnetischen Flussdichte an der zu berechnenden Position. (d) Magnetische Flussdichte dargestellt im Zeitbereich, die Werte aus der FEM-Simulation dienen als Referenz.	33
3.4	Analytische Berechnungen des Magnetfelds eines ringförmigen Induktors über einer Aluminiumplatte. (a) Dargestellt ist die schematische Anordnung für die Magnetfeldberechnung. (b) Die r -Komponenten der magnetischen Flussdichte bei $z = 0$ sind für verschiedene Frequenzen abgebildet. (c) Die z -Komponenten der magnetischen Flussdichte bei $z = 0$ sind für verschiedene Frequenzen dargestellt. [96]	35
3.5	Schematische Darstellung der geometrischen Anordnung des FEM-Modells.	37
3.6	Gerichtete Lamb-Wellenemission in einer ferromagnetischen Metallplatte. Zwei unabhängig voneinander sendende EMAT-Induktoren erzeugen ein interferierendes Wellenfeld. Die sich in Richtung der rechten Seite ausbreitende Welle wird verringert, während die Welle in Richtung der linken Seite verstärkt wird. [93]	38
3.7	1D-Berechnung der emittierten Welle mit konstruktiver und destruktiver Interferenz. (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Verifizierung der vorgestellten Berechnungen. (b) Analytische Ergebnisse für die Richtungsabhängigkeit von zwei EMAT-Strukturen. Eine einzelne EMAT-Struktur (rote Kurve) erzeugt bidirektional Lamb-Wellen. Zwei unabhängig voneinander emittierende EMAT-Strukturen haben einen Zeitversatz von 1250 ns (blaue Kurve) und -750 ns (schwarze Kurve). [93]	40
3.8	2D-Berechnung: Ultraschallamplituden in einer Stahlplatte aus gepulsten (1 MHz) Quellenlinien. (a) und (b) bidirektionale Emission in positiver und negativer y -Richtung. (c) Ausgeprägte Unidirektionalität aufgrund einer Verzögerung von 750 ns für beide unteren Quellenlinien, destruktiv Überlagerung der unteren Ultraschallkeule (Auslöschung). Die gestrichelte weiße Linie zeigt den in Abbildung 5.12 erwähnten Bereich. (d) Verzögerung von 1250 ns für die beiden oberen Quelleleitungen führt zur effektivsten Verstärkung der obere Ultraschallkeule. Weniger effektive Auslöschung der untere Ultraschallkeule. [93]	43
3.9	Schematische Darstellung von zwei EMATs, die eine Inhomogenität mittels Ultraschall innerhalb eines Flüssigkeitsvolumens in einem Metallbehälter detektieren. [96]	44

3.10	Elektrische Analogie der Ultraschallübertragung bei Übergängen von Materialien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen. (a) 1D-Echosimulation für drei verschiedene Szenarien der EMAT-Kopplung an Wasser. (b) Echos nach 70 μs , die als Ströme durch R_1 , R_2 und R_3 erscheinen. Zur besseren Darstellung werden für I_{R1} und I_{R2} Offsets verwendet. [96] . . .	46
3.11	Spektralanalyse der elektrischen Analogie der Ultraschallübertragung bei Übergängen von Materialien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen. (a) 1D-Simulation für drei verschiedene Szenarien der EMAT-Kopplung an Wasser. (b) Transmissionsspektren der drei verschiedene Szenarien. [96]	48
3.12	Simuliertes Ultraschallfeld. (a) Direkte Einkopplung in Wasser bei einer Frequenz von 100 kHz; (b) direkte Einkopplung in Wasser bei einer Frequenz von 1 MHz; (c) Einkopplung durch eine 3 mm dicke Aluminiumwand mit einem 1 MHz Impuls; (d) Einkopplung durch eine 3 mm dicke Stahlwand bei 1 MHz; eine seitliche Unschärfe des einfallenden Impulses innerhalb der Metallwand ergibt sich insbesondere in (d) (weißer Doppelpfeil) und ist wegen der direkten Einkopplung nicht vorhanden in (b) (schwarzer Doppelpfeil). Die gestrichelte weiße Linie bei $z = 80$ mm zeigt den Bereich, auf den sich Abbildung 3.13 bezieht. [96]	49
3.13	Relative 1 MHz Schalldruckamplitude entlang der x -Koordinate in einer Tiefe von $z = 80$ mm (gestrichelte weiße Linie 3.12). Es werden drei verschiedene Ankopplungen verglichen: direkte Ankopplung an das Wasser, Ankopplung durch eine 3 mm Aluminiumwand und Ankopplung durch eine 3 mm Edelstahlwand. [96]	50
3.14	Ergebnisse der mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführten FEM-Simulation, die eine Querschnittsdarstellung eines Leiters parallel zu der Oberfläche eines kohlenstoffarmen Stahlblocks zeigt. (a) Der modellierte Leiterstrom im Zeitverlauf; die Buchstaben markieren die Zeitpunkte in Abbildung 3.14(a), (b) und (c). (b) Die FEM-Ergebnisse zeigen den Betrag und die Richtung der magnetischen Flussdichte B bei 80 μs . (c) Die FEM-Ergebnisse bei 140 μs . (d) Die FEM-Ergebnisse bei 500 μs . Der Leiterstrom und die magnetische Flussdichte B in der rechten Hälfte des Raums sind nicht vorhanden, während die Magnetisierung in den Schichten im Inneren des Stahls bestehen bleibt. [45]	52
4.1	Vereinfachtes Schaltungskonzept der EMAT-Treiberschaltung. Teil A: Erzeugung eines zeitlich langgezogenen Stromimpulses; Teil B: Erzeugung eines MHz-Bursts; Teil C: EMAT-Induktor mit Kabel; Teil D: Empfängerschaltung. [96]	56
4.2	Gemessener Stromverlauf durch den Shunt R_{Shunt} . Ein langer Stromimpuls $I_U > 1$ kA wird erzeugt, wenn S_1 geschlossen wird. Durch das Schalten von S_2 wird der Strom I_U durch einen kurzen MHz Burst I_{RF} mit Anfangsamplituden $> 300A$ für die Ultraschallaussendung überlagert. Das Empfangszeitfenster ist die Zeitspanne, in der der EMAT eine ausreichende Empfindlichkeit für den Ultraschallempfang aufweist. [96]	57

4.3	Schaltungssimulation der EMAT-Treiber- und Empfangsschaltung in LTspice.	58
4.4	Simulierter Stromverlauf über R_{Shunt} in der Schaltungssimulation aus Abbildung 4.3. Der Verlauf entspricht weitgehend dem real gemessenen Stromverlauf aus Abbildung 4.2.	59
4.5	Dargestellt ist das simulierte Signal am Empfängerausgang von Abbildung 4.3.	60
4.6	Schaltungssimulation der EMAT-Empfängerschaltung in der Software LTspice.	61
4.7	Frequenzverhalten der Empfängerschaltung aus Abbildung 4.6 simuliert mit LTspice.	61
4.8	Überblick über die ringförmigen EMAT-Induktoren ohne Permanentmagnet. (a) Schema eines ringförmigen EMAT-Induktors, der aus abgeflachtem und emailliertem Kupferdraht besteht. (b) EMAT-Array bestehend aus acht EMAT-Induktoren, die vier Abstandshalter (schwarz) in den Ecken sorgen für einen Luftspalt von 1 mm. (c) Vergrößerter EMAT-Induktor mit abgeflachtem Kupferdraht vor Einbettung in Epoxidharz. [96]	63
4.9	Darstellung eines EMATs zur Erzeugung von unidirektionalen Lamb-Wellen, bestehend aus zwei rennbahnförmigen Induktoren. (a) Das CAD-Modell des Induktorhalters mit zwei Luftspulen. (b) Der Induktorhalter ist 3D gedruckt und die Induktoren bestehen aus flachem Kupferlackdraht. Der Abstandshalter beträgt 1 mm. [93]	63
4.10	Maßstabsgetreues Schema des Messverfahrens zur Untersuchung der Ultraschallfelder der EMATs mit einem senkrecht hängenden 5 mm Glasstab. [96]	64
4.11	Maßstabsgetreues Schema (Querschnitt) für die 3D-Lokalisierung einer 10 mm Metallkugel. [96]	65
4.12	Versuchsaufbau bestehend aus einem Kunststofftank mit Metallwänden, einem Positionierungssystem, einem EMAT-Array mit acht EMAT-Induktoren (siehe Abbildung 4.8), und zwei unabhängigen EMAT-Schaltungen (beschrieben in Abbildung 4.1). [96]	67
4.13	Skizze der Kantenabtastung mit gerichtetem Ultraschall in y Richtung. [93]	68
4.14	Versuchsaufbau bestehend aus einem Positionierungssystem, vier unabhängigen EMAT-Treiberschaltungen und einer ferromagnetischen Stahlplatte als Prüfkörper. Die flexible Verkabelung ermöglicht den Einsatz von kleinen und robusten Sensoren in kritischen Umgebungen, unabhängig von voluminösen Treiberschaltungen. [93]	69

4.15	Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten für den berührungslosen Empfang von Ultraschall Lamb-Wellen (a) und longitudinalem Ultraschall (b) ohne aktives Bias-Magnetfeld. (a) Zwei rennbahnförmige EMAT-Induktoren sind auf einer 1 mm dicken ferromagnetischen Stahlplatte platziert. (b) Zwei runde, flache EMAT-Induktoren wurden außerhalb eines mit Wasser gefüllten Behälters angebracht. Die Wände, an denen sich die EMAT-Induktoren befinden, sind aus 3 mm dickem ferromagnetischem Stahl gefertigt. [45]	70
4.16	Schematische Darstellung des Stromflusses durch die beiden EMAT-Induktoren im Zeitverlauf; die Zahlen entsprechen denen in Abbildung 2.2. [45]	71
5.1	Explizit erzeugtes Barkhausenrauschen an einem massiven ferromagnetischen Stahlblock. (a) Relativ langsam ansteigender und abfallender Strom I_U im EMAT-Induktor. (b) Ausgangssignal aus der Empfängerschaltung zeigt nach 140 μ s deutliches Barkhausenrauschen. [96]	73
5.2	Dargestellt ist die Variation des Empfangszeitpunkts mit Lamb-Wellen in einer 1 mm dicken Metallplatte. Die Ultraschallsignale zeigen die Spitze-Spitze-Amplitude. (a) Aluminiumplatte. (b) Ferromagnetische Stahlplatte.	74
5.3	Variation der Stromstärke des MHz-Bursts und des langgezogenen Stroms für das Bias-Magnetfeld mit Hilfe von Puls-Echomessungen am Aufbau in Abbildung 4.12. (a) Empfangener Ultraschall-Spitzenwert am Empfängerausgang über die Stromamplituden für das Bias-Magnetfeld: Quadratische Beziehung. (b) Empfangener Ultraschall-Spitzenwert am Empfängerausgang über die Stromamplituden des MHz-Burst: Lineare Beziehung. [101]	75
5.4	Puls-Echomessungen mit einem ebenen Metallblock im Wasser als reflektierendes Objekt. (a) Strom im EMAT-Induktor. (b) Empfängerausgangssignal bei der Messung durch 30 μ m dicke Aluminiumfolie. (c) 3 mm dicke Aluminiumwand. (d) 3 mm Edelstahlwand. (e) 3 mm dicke ferromagnetische Stahlwand. [96]	77
5.5	Alle vier Abbildungen zeigen Messreihen zur 2D-Schallfeldvermessung, durchgeführt mit dem Messaufbau in Abbildung 4.12. Es besteht ein 1 mm Luftspalt zwischen EMAT und Metalloberfläche. (a) Aluminiumwand mit einer Dicke von 3 mm und einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. (b) Wand aus 3 mm Edelstahl mit einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. (c) Wand aus Edelstahl mit einer Dicke von 1,5 mm und einer Ultraschallfrequenz von 2 MHz. (d) Stahlwand mit einer Dicke von 3 mm und einer Ultraschallfrequenz von 1 MHz. [96]	79

5.6	Serie von Ultraschallamplituden über die Änderung der Entfernung mit einem EMAT im Puls-Echo-Betrieb (1 mm Luftspalt; Versuchsaufbau siehe Abbildung 4.12). Ein langer Glasstab (in y -Richtung) mit einem Durchmesser von 5 mm wurde entlang der z -Achse des EMAT schrittweise verschoben; als Wandmaterial für den Tank diente 3 mm Edelstahl. [96]	80
5.7	Empfängerausgangssignale der EMATs 1, 2, 4 und 5 für die in Abbildung 5.8 gezeigte 3D-Lokalisierung. Der Strom I_{RF} für die Emission wird in EMAT 4 bei 0 μ s ausgelöst; daher sendet EMAT 4 aktiv und empfängt auch (siehe abweichende Artefakte nach 20 μ s). Die roten Linien zeigen die vergrößerte und gefilterte Hüllkurve der blauen HF-Signale. Die schwarzen Gaußfunktionen markieren den Bereich des Echobeginns und ergeben eine radiale Dicke (Unsicherheit) der resultierenden POE-Schale. [96]	81
5.8	3D-Lokalisierung einer 10 mm Metallkugel, die sich in einem mit Wasser gefüllten Metallbehälter befindet. (a) Anordnung des EMAT-Arrays und der Metallkugel. (b) Lokalisierungsergebnisse der Metallkugel aus den Signalen in Abbildung 5.7. (c) Seitenansicht der Lokalisierungsergebnisse der Metallkugel aus den Signalen in Abbildung 5.7. [96]	82
5.9	Messung der konstruktiv und destruktiv überlagerten Ultraschallemission durch die EMATs 1 und 2, hier gemessen mit EMAT 3 und 4. (a) Maximale Ultraschallamplitude über die Zeitverzögerung t_{p12} zwischen den EMAT-Induktoren 1 und 2. (b) Die von den EMATs 3 und 4 empfangenen Signale bei $t_{p12} = \pm 750$ ns, entsprechend der gestrichelten senkrechten Linie in Abbildung 5.9(a). (c) Messung wie in Abbildung 5.9(b) mit einem Luftspalt von 1 mm zwischen allen vier EMATs und der Stahloberfläche. (d) Messung wie in Abbildung 5.9(b) mit einem Luftspalt von 1,5 mm zwischen allen vier EMATs und der Stahloberfläche. [93]	84
5.10	Messung des selektiven Lamb-Wellen-Empfangs mit zwei EMATs. Die Spannung am Empfängerausgang ist proportional zum Ultraschallsignal. (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus. Ein einzelner EMAT sendet bidirektional Ultraschall und die beiden Echos von beiden Kanten werden von zwei EMATs empfangen. (b) Messergebnisse für den selektiven Empfang. Die blauen und die roten Signalverläufe zeigen die beiden Roh-Echos. Die grünen und schwarzen Signalverläufe wurden nachträglich mit einem Zeitversatz von ± 1250 ns und einer Überlagerung am Computer ermittelt. [93]	85
5.11	Messergebnisse von der Kombination aus gerichtetem Aussenden und Empfangen von Lamb-Wellen. (a) Die Verschiebung zwischen den EMATs 1 und 2 betrug $t_{p12} = 750$ ns und das Empfangssignal des EMAT-Induktors 1 wurde für das Summensignal um $5/4\lambda$ verschoben. (b) Der Sendezeitversatz $t_{p12} = -1250$ ns und das Empfangssignal des EMAT-Induktors 1 wurde um $3/4\lambda$ verschoben und für das Summensignal invertiert. [93]	87

5.12	Die beiden Kurven in der Abbildung zeigen den berechneten und den gemessenen 1D-Ausschnitt des Ultraschallfeldes von Abbildung 3.8(c) (weiße gestrichelte Linie). [93]	88
5.13	Rekonstruierte Geometrie der Stahlplattenkante. Die durchgezogene blaue Linie zeigt die mit dem EMAT gemessene Kante, die gestrichelte rote Linie zeigt die mit einem Messschieber gemessene Kante. [93]	89
5.14	Die blaue Linie zeigt die maximale Spitze-Spitze-Amplitude des empfangenen Lamb-Wellen-Ultraschallsignals über unterschiedliche Verzögerungszeiten. Die rote Linie stellt den elektrischen Strom im R-EMAT-Induktor dar, der zum Zeitpunkt des Ultraschallempfangs gemessen wurde. [45]	90
5.15	Ungefilterte Einzelmessung des Lamb-Wellen-Ultraschallempfangssignals mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld bei einer Verzögerungszeit t_d von 5 ms. [45]	91
5.16	Die blaue Linie zeigt die maximale Spitze-Spitze-Amplitude des empfangenen longitudinalen Ultraschallsignals über die Zeit t_d . Die rote Linie stellt die elektrische Stromamplitude im R-EMAT-Induktor dar, die zum Zeitpunkt des Ultraschallempfangs gemessen wurde. [45]	92
5.17	Bandpassgefilterte Einzelmessung des longitudinalen Ultraschallempfangssignals mit einem EMAT ohne aktives Bias-Magnetfeld bei einer Verzögerungszeit t_d von 5 ms. [45]	92
7.1	Neuartiges EMAT-Konzept mit nur einem Linienleiter als Ultraschallquelle. (a) Die Kupferspule ist ohne Deckel dargestellt, somit ist im Inneren der Induktor zu sehen. (b) Die Kupferspule ist komplett zusammengebaut.	100
1	Vorderseite der letzten Version der EMAT-Treiberschaltung	121
2	Rückseite der letzten Version der EMAT-Treiberschaltung mit aufgesteckter Empfängerschaltung	122
3	Letzte Schaltplanversion der EMAT-Treiberplatine.	123
4	Letzte Schaltplanversion der EMAT-Empfängerschaltung.	124

Tabellenverzeichnis

2.1	Skintiefen für Eisen ($\sigma = 11,7 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1000$) und Aluminium ($\sigma = 37 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1$) bei verschiedenen Frequenzen.	10
2.2	Erläuterung: „Coils-only“ bedeutet, dass kein Permanentmagnet oder zusätzlicher Elektromagnet verwendet wird; „Luftspalt“ ist der Abstand zwischen dem EMAT-Induktor und der Oberfläche des Prüfkörpers; „Puls-Echo fähig“ bedeutet, dass ein einzelner Induktor in der Lage ist, einen Ultraschallimpuls auszusenden und fast augenblicklich ein entsprechendes Echo zu empfangen; „Ferromagnetischer Prüfkörper“ bedeutet, dass der EMAT mit ferromagnetischem Stahl (zusätzlich zu anderen Metallen wie Aluminium) ausreichend funktioniert; „Direktionaler Ultraschall“ bedeutet, dass die Lamb-Welle effektiv in eine bestimmte Richtung gesendet und empfangen wird; „Solid-state“ bedeutet, dass die leistungsstarke Schaltung auf wartungsfreien Halbleitern basiert, anstatt auf unzuverlässigen Funkenstrecken oder Vakuumröhren wie Thyratrons; und mm Wellenlänge / MHz Frequenz“ bedeutet, dass die Ultraschall-Lamb-Wellen bei MHz-Frequenzen auftreten und nicht bei längeren Wellenlängen (cm) bei niedrigeren kHz-Frequenzen. [93]	27
5.1	Parameter der 3D-Lokalisierung (Abbildung 5.8). Aufgelistet sind die Positionen der vier aktiven EMATs und der Mittelpunkt der wahren und rekonstruierten Position der Metallkugel. Die Laufzeit geht von EMAT 4 als einzigen Emitter aus, während die EMATs 1, 2, 4 und 5 Ultraschall empfangen haben. Die wahre Position der EMATs liegt bei $z = -1 \text{ mm}$ (Luftspalt), jedoch ist der Luftspalt für die Ultraschalllaufzeit unerheblich. [96]	83

Abkürzungsverzeichnis

ATE	Allgemeine T heoretische E lektrotechnik
DFG	Deutsche F orschungsgemeinschaft
ECT	E ddy C urrent T esting
EMAT	E lectromagnetic A coustic T ransducer
FEM	F inite E lemente M ethode
FET	F eldeffekttransistor
MFL	M agnetic F lux L eakage
PCB	P rinted C ircuit B oard
POE	P ossible O rigin of the E cho
Triac	T riode for A lternating C urrent
ZfP	Z erstörungsfreie P rüfung

Anhang

Schaltpläne und Platinen

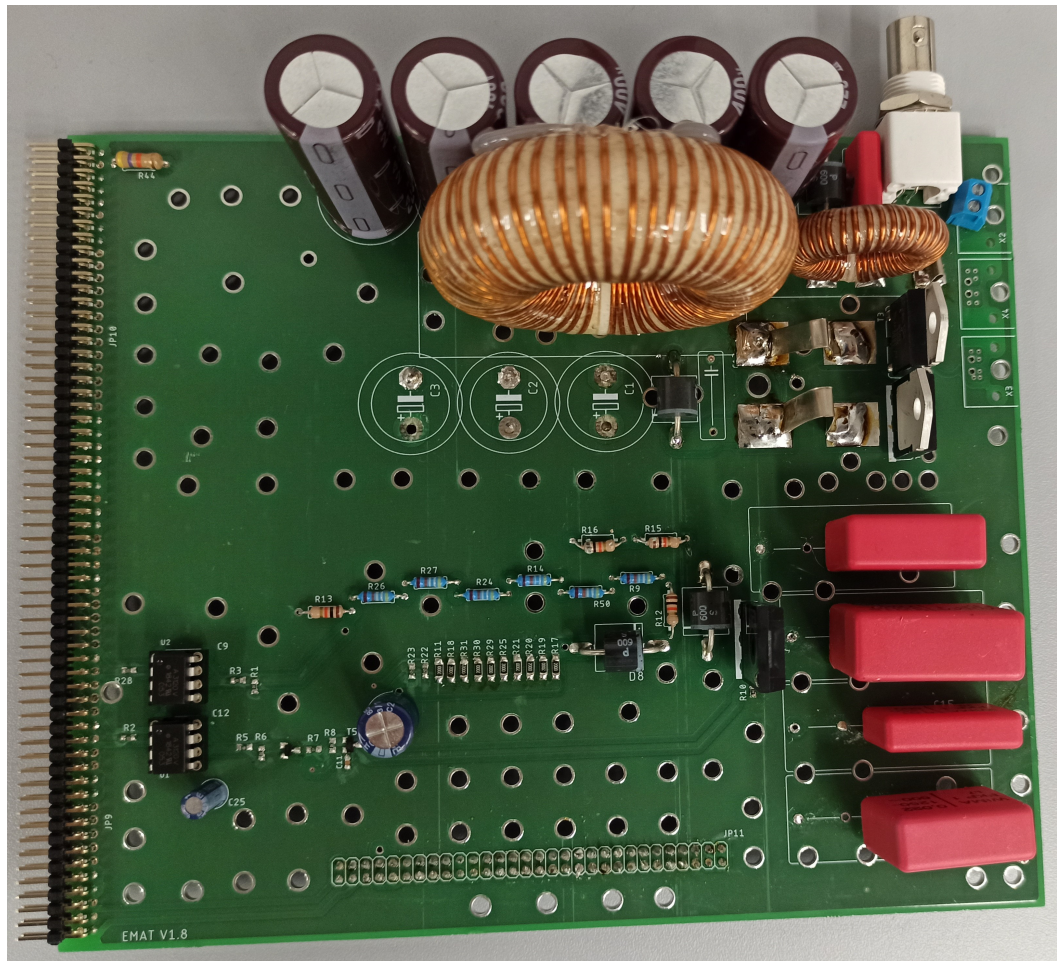


Abbildung 1: Vorderseite der letzten Version der EMAT-Treiberschaltung

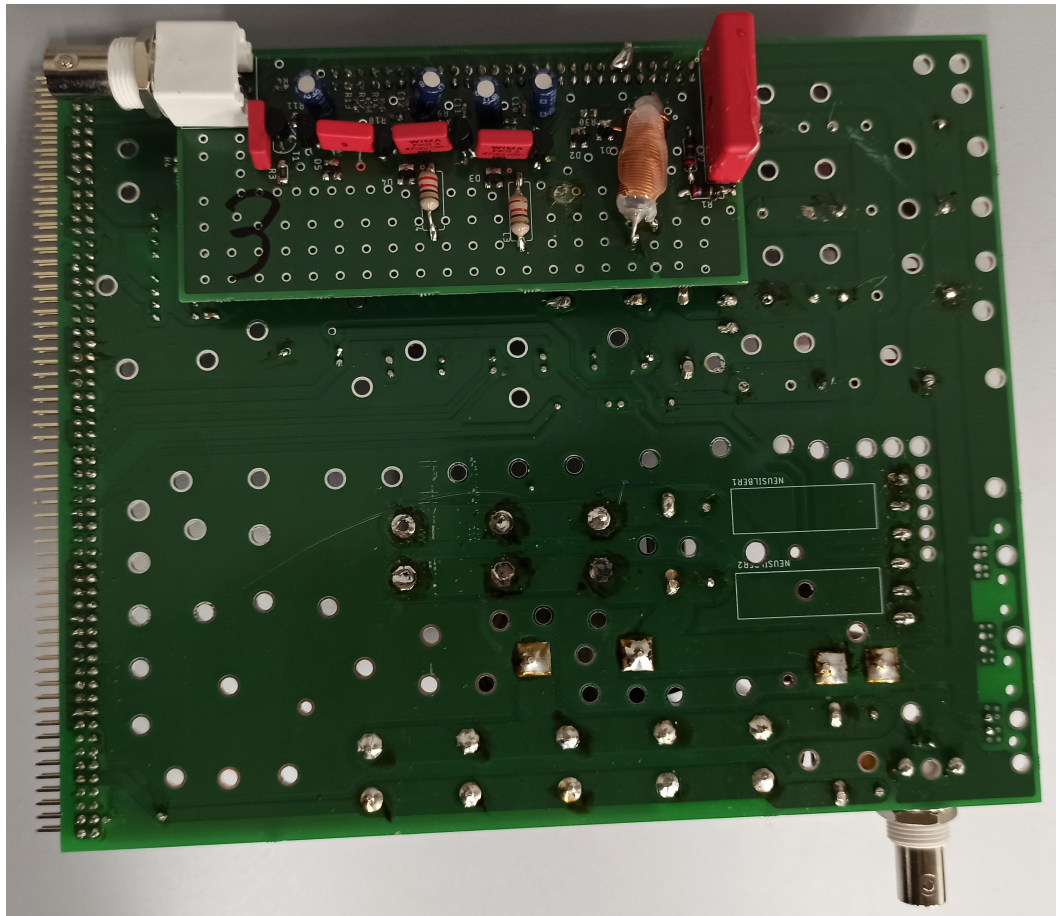


Abbildung 2: Rückseite der letzten Version der EMAT-Treiberschaltung mit aufgesteckter Empfängerschaltung

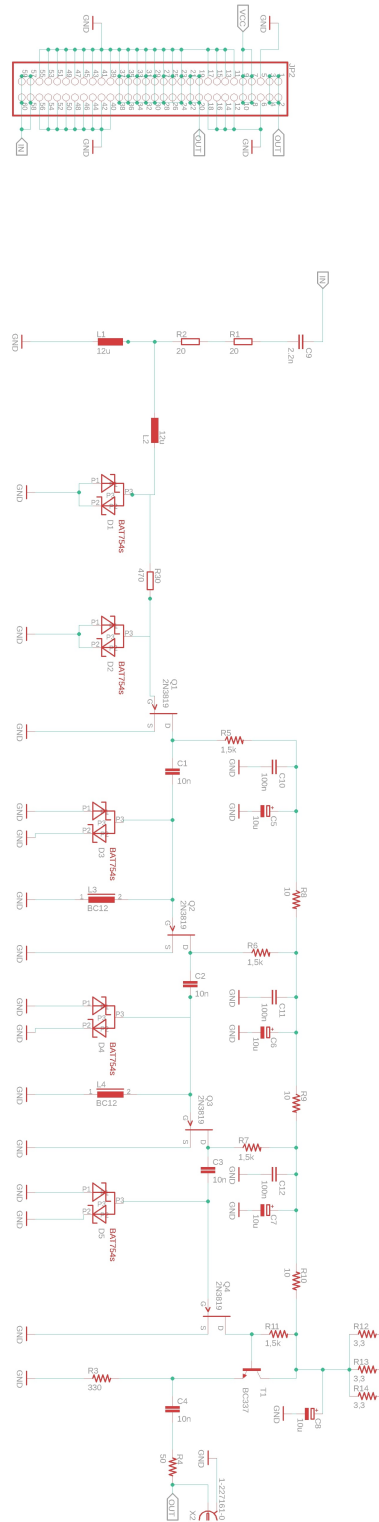


Abbildung 4: Letzte Schaltplanversion der EMAT-Empfängerschaltung.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/78088

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230510-122930-8

Alle Rechte vorbehalten.