

Ein Beitrag zur Auslegung von Ultraschallwandlern für Abstands- messungen

Dipl.-Ing. Rainer Hohenburg



Fakultät Maschinenbau
Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik I

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fakultät Maschinenbau am Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik I der Universität Dortmund.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. U. Schüler möchte ich meinen besonderen Dank für die Förderung der Arbeit und für wertvolle Anregungen bei der Durchführung aussprechen.

Mein Dank gilt auch insbesondere den Herren Prof. em. Dr. rer. nat. S. Kessel und Prof. Dr.-Ing. H. Crostak für die kritische Begleitung und Durchsicht der Arbeit.

Ferner spreche ich den Mitarbeitern der Firma Microsonic-Ultraschalltechnik GmbH, den Angehörigen des Hochschulrechenzentrums und der Fakultät Maschinenbau meinen Dank für die freundliche Unterstützung aus, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls, die in vielfältiger Weise zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, herzlich bedanken.

Witten, im Oktober 2002

Rainer Hohenburg

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung.....	7
2	Stand der Simulationstechnik von piezoelektrischen Ultraschallwandlern.....	8
2.1	Überblick über Simulationsmodelle von piezoelektrischen Ultraschallwandlern.....	8
2.2	Beschreibung der durchzuführenden Berechnungsschritte für die Simulationsrechnung.....	11
3	Erweiterung des Standes der Technik durch eigene experimentelle Untersuchungen.....	11
3.1	Zielsetzung und Konzepte.....	11
3.1.1	Definition „Spektrogramm“	13
3.1.2	Definition „Richtcharakteristik und Öffnungswinkel α_1 und α_2 “	14
3.1.3	Güte- und Dämpfungswerte	15
3.1.4	Geschwindigkeitsprofil auf der Wandleroberfläche	15
3.2	Ultraschallwandler.....	15
3.2.1	Aufbau der Ultraschallwandler	16
3.2.2	Fertigung der US-Wandler	17
3.3	Aufbau der Versuchseinrichtung	23
3.3.1	Gesamtdarstellung.....	24
3.3.2	Schallpegelmessgerät.....	27
3.3.3	Kondensatormikrofon	30
3.3.4	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	33
3.3.5	Frequenzgenerator.....	33
3.3.6	Halterung des Ultraschallwandlers.....	35
3.4	Messprogramme	35
3.4.1	Experimentelles Messprogramm zur Bestimmung des Spektrogramms	35
3.4.2	Experimentelles Messprogramm zur Bestimmung der Richtcharakteristik.....	37
3.5	Fehlerbetrachtung	39
3.5.1	Fehlerbetrachtung „Spektrogramm“	39

Inhalt

3.5.2 Fehlerbetrachtung „Richtcharakteristik“	40
3.6 Aus- und Bewertung der Messergebnisse	40
3.6.1 Auswertung „Spektrogramm“	41
3.6.2 Auswertung „Richtcharakteristik“	43
3.6.3 Auswertung „Geschwindigkeitsprofil“ mithilfe der Laserinterferometrie.....	53
4 Simulation von Spektrogramm und Richtcharakteristik von Ultraschallwandlern mithilfe der FEM-Berechnung	57
4.1 FEM- Berechnung	57
4.1.1 Vorbereitung (preprocessing)	58
4.1.2 Lösung (solution).....	62
4.1.3 Nachbearbeitung (postprocessing).....	62
4.2 Schalldruckberechnung.....	63
4.2.1 Berechnung „Spektrogramm“.....	65
4.2.2 Berechnung „Richtcharakteristik“	68
4.3 Aus- und Bewertung der Ergebnisse der FEM-Simulation	70
4.3.1 Bewertung „Resonanzfrequenzen“.....	70
4.3.2 Bewertung „Spektrogramme“	74
4.3.3 Bewertung „Richtcharakteristiken“	77
5 Vergleich der Ergebnisse aus Simulation, Experiment und Literatur.....	97
5.1 Vergleich „Resonanzfrequenzen“.....	98
5.2 Vergleich „Öffnungswinkel“	101
6 Zusammenfassung	105

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die gegenwärtige Situation der europäischen Industrie ist vor allem durch hohe Personalkosten, geringe personelle Flexibilität, Umweltauflagen sowie kleine nationale Märkte mit unterschiedlichen Normen und Bestimmungen gekennzeichnet. Gleichzeitig ist die Industrie auf den Export angewiesen, der häufig deutlich über 50% des Umsatzes liegt. Sowohl auf heimischen als auch auf sich ständig verändernden internationalen Märkten muss sich die Industrie einem weltweiten Wettbewerb stellen. Vor diesem Hintergrund gilt es, Wirkungsgrade und Reaktionsfähigkeit der Unternehmen in ihrer Gesamtheit zu verbessern.

Bei der Lösung dieser Langzeitaufgabe sollen Konzepte rechnerintegrierter Produktion - häufig mit dem Schlagwort Computer Integrated Manufacturing, CIM, belegt - eine wichtige Rolle spielen. Dahinter verbergen sich Leitlinien einer industriellen Entwicklung, welche die Integration von Informations- und Materialflüssen zum Ziel hat (vgl. Schüler /1/). Unbestritten ist die Notwendigkeit einer ausreichenden Qualifizierung der Mitarbeiter im Unternehmen. Dabei ist klar, dass eine solchermaßen übergreifende und interdisziplinäre Denkweise mit herkömmlichen, im Wesentlichen auf Funktionstrennung im Unternehmen ausgerichteten Qualifikationen nicht zu erreichen ist.

In den vergangenen Jahren sind daher in verschiedenen europäischen Institutionen Konzepte zur Qualifizierung von Mitarbeitern für die rechnerintegrierte Produktion entwickelt und teilweise auch erprobt worden. Gefördert wurden einige dieser Vorhaben sowohl aus Mitteln einiger Bundesländer, des Bundes und der EU; dies zum Teil unter finanzieller Beteiligung von interessierten Unternehmen.

Wenn sich diese Konzepte auch hinsichtlich der Zielgruppen (Facharbeiter, Meister/Techniker, Ingenieure, nichttechnische Mitarbeiter als Systemscheider) sowie der Aspekte unterscheiden (umfassende systemübergreifende Basisqualifizierung oder Vernetzung einzelner Systeme der Produktplanung und -entwicklung, Produktionsplanung und -steuerung, Produktfertigung und Qualitätskontrolle oder Organisation oder CIM-Strategien), so unterliegen doch alle diese Qualifizierungskonzepte dem Zwang, reales betriebliches Geschehen rechnerintegrierter Produktion

für die geforderte Lernsituation abbilden, also modellieren zu müssen. Damit treten aber vereinfacht mindestens drei grundlegende Fragestellungen auf:

- Wie weit muss unter Beachtung der fachlichen Voraussetzung der Zielgruppe und deren Fasslichkeitsniveau sowie des vertretbaren finanziellen, organisatorischen und personellen Aufwands modelliert werden?
- Wie gelangt der zu Qualifizierende widerspruchsfrei von der Modellebene in die Realität?
- Wie sieht die Realität rechnerintegrierter Produktion aus?

Bezogen auf diese Fragestellungen lassen sich bei der Entwicklung von Konzepten zur Qualifizierung von Mitarbeitern für die rechnerintegrierte Produktion prinzipiell drei Abbildungsebenen unterscheiden. (Burgmer /2/)

1. Abbildung der „Realität rechnerintegrierter Produktion“ möglichst vollständig und praxis- oder produktionsnah, also mit realen Systemen.
2. Abbildung wesentlicher Betriebsfunktionen der „Realität rechnerintegrierter Produktion“ auf möglichst praxis- und produktionsnahe Geräte, Maschinen und Funktionsmodelle.
3. Abbildung realen betrieblichen Geschehens „rechnerintegrierter Produktion“ auf Software-Simulationsmodelle.

Alle Varianten haben Vor- und Nachteile. Während Variante (1) den Vorteil hoher Realitätsnähe aufweist, liegen die Nachteile in einem erheblichen finanziellen und personellen Aufwand sowie in einer für den zu Qualifizierenden häufig nicht durchschaubaren Komplexität des Systems. Variante (3) hat diese Nachteile nicht; indessen ist bei dieser Variante das für die Qualifizierung so wichtige Prinzip der Handlungsorientierung ausschließlich auf die Arbeit am Rechner beschränkt.

Am Lehrstuhl für Technik und ihre Didaktik I wurde, basierend u.a. auf eigenen Bedarfsanalysen, die Variante (2) verfolgt. Sie wurde unter dem Aspekt einer berufsfeldspezifischen Basisqualifizierung für Facharbeiter, Meister, Techniker und Fachhochschulingenieure, die für den Einsatz in der rechnerintegrierten Produktion vorgesehen sind, entwickelt und erprobt und im Rahmen des COMETT- Programms der Europäischen Union gefördert (LTD I /3/).

In der Zwischenzeit hat sich dieses Konzept für eine hybridorientierte Basisqualifizierung für die rechnerintegrierte Produktion in den Bereichen Metall- und Elektrotechnik durchgesetzt. Wie eine Pilotstudie ergab, können wesentliche Lernziele bei der Aus- und Weiterbildung im Computer-Integrated-Manufacturing-Lernbetrieb (CIM-Lernbetrieb), wie integratives Denken und Handeln, Handhaben neuer Datenverarbeitungstechnologien und Steuerungssysteme sowie das Handhaben neuer Organisationsformen erreicht werden (IHK /4/).

Sensoren haben für die Gewinnung von Daten in automatisierten Fertigungsprozessen eine grundlegende Bedeutung. Die bislang vorhandenen Systeme basieren auf optischen und mechanischen Wirkprinzipien, wie z.B. die Gabellichtschranken des Hochregallagers zur Positionserkennung des Regalförderzeugs oder taktile Erkennungssensoren an den Werkstückübergabestationen innerhalb der Qualitätskontrolle. Zu Beginn dieser Arbeit hat es sich jedoch gezeigt, dass zum Zweck einer realitätsnahen Abbildung der Produktionskette weitere Sensoren für die Abstandsbestimmung in den CIM- Lernbetrieb implementiert werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden als weitere Sensortypen im CIM- Lernbetrieb auf Ultraschall basierende Systeme eingeführt. Dies hat mehrere Vorteile:

Für die berührungslose Abstandsmessung in einem Entfernungsbereich bis zu 10m sind die Ultraschallsensoren (US-Sensoren) in der computerunterstützten Fertigung unter schlechten optischen Umgebungsbedingungen weit verbreitet und haben somit für das Ausbildungskonzept einen hohen Realitätsbezug¹ (vgl. Hak-Soo Mok /5/).

Die US-Sensoren ergänzen die bereits im Lernbetrieb vorhandenen Sensortypen um ein System, das auf dem bisher nicht im CIM- Lernbetrieb verwendeten Ultraschall-Wirkprinzip beruht.

Da die US-Sensoren dem Bereich der Mikrosystemtechnik zuzuordnen sind, leistet diese Erweiterung im CIM- Lernbetrieb einen wichtigen Beitrag zur Aus- und Weiterbildung innerhalb dieser Schlüsseltechnologie.

Das Abstrahlverhalten von US-Sensoren muss Anforderungen von aktuellen und prognostizierbaren Entwicklungen in der realen Produktionstechnik erfüllen. Die Auslegung von US-Sensoren sowohl für ihren zweckgebundenen Einsatz in der Produktion als auch in CIM-Lernbetrieben als Abbildung industrieller Wirklichkeit setzt die Vorausbestimmbarkeit, d.h. die Simulation, ihres Abstrahlverhaltens voraus.

¹ Einsatzbereiche von US-Sensoren vgl. Folgeseite.

Die Untersuchungen dieser Arbeit konzentrieren sich auf die Erweiterung bisheriger Erkenntnisse über Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung, die nach dem Impuls-Echo-Verfahren arbeiten (vgl. Gast /6/). Die folgenden Beispiele geben einen Einblick in die Einsatzbereiche dieser Ultraschall-Sensoren:

- Füllstandsmessung von Flüssigkeiten in Tanks (vgl. Schrank /7/)
- Lageerkennung und Überwachung von Teilen
- Überwachung von Sicherheitsabständen (Kollisionsschutz)
(vgl. Warnecke /8/; Hohenburg /9/)
- Längenmessung beim automatischen Zuschnitt von Stangen und Rohren
(vgl. Sasaki /10/)
- Steuerung des Abstandes zwischen Handhabungsautomaten und Werkstück
(vgl. Manthey /11/; Manthey /12/)
- Intermittierende Abstandsmessung bei der Dreh- und Fräsbearbeitung
(vgl. Ehlers /13/; Schulz /14/)

Nach dem Impuls-Echo-Verfahren wird vom Ultraschallwandler (US-Wandler) ein Schallimpuls abgestrahlt und nach der Zeitdifferenz „ Δt “ empfangen. Die Entfernung US-Wandler - Objekt wird mithilfe der Zeitdifferenz zwischen Schallabgabe und Schallempfang bestimmt. Bei bekannter konstanter Schallgeschwindigkeit „ c “ ergibt sich der Abstand US-Wandler - Objekt „ s “ nach folgender Gleichung (vgl. Gleichung 1).

$$s = \frac{\Delta t c}{2} \quad (1)$$

Die Zeitdifferenz bestimmt sich aus dem Unterschied zwischen Sendezeitpunkt „ t_0 “ und Empfangszeitpunkt „ t_1 “.

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

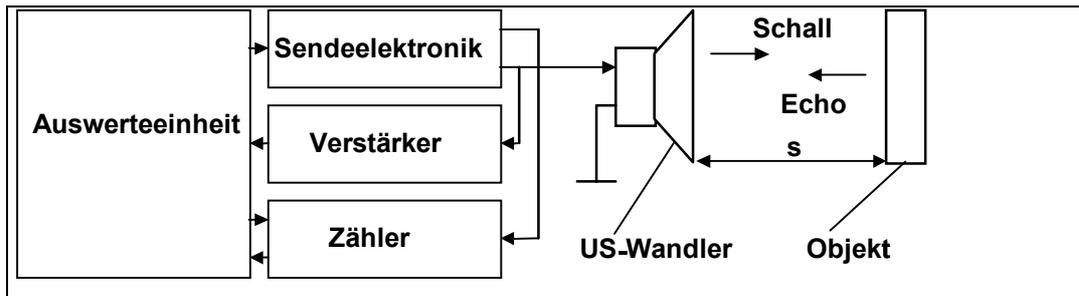


Abbildung 1.1-1: Prinzipbild eines Abstandsmesssystems mit Objekt nach dem Impuls-Echo-Verfahren²

In der Abbildung 1.1-1 ist das Prinzipbild eines akustischen Abstandsmesssystems mit dem reflektierenden Objekt dargestellt. Es besteht aus US-Wandler, Auswerteeinheit, Sendeelektronik, die das Sendesignal aufbereitet, Verstärker und Zähler, mit dessen Hilfe die Zeitdifferenz bestimmt wird.

In der Abbildung 1.1-2 ist der zeitliche Verlauf der elektrischen Spannung am US-Wandler dargestellt.

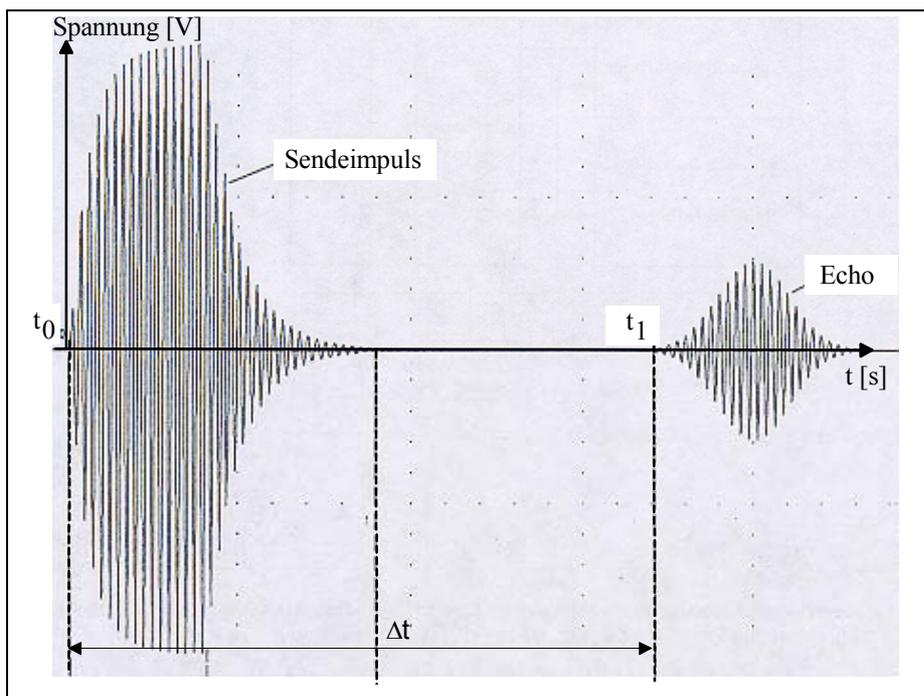


Abbildung 1.1-2: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Spannung am US-Wandler(Schnell /15/)

In der Abbildung 1.1-3 ist die Richtcharakteristik³ eines US-Wandlers dargestellt. Wird die Auswerteeinheit (vgl. Abbildung 1.1-1) auf eine Empfindlichkeit von 3dB eingestellt, so lässt sich ein Bereich von $\alpha_1=12^\circ$ überwachen.

² Abstandsmesssysteme werden auch als Abstandssensoren bezeichnet.

³ Definition siehe S. 14 .

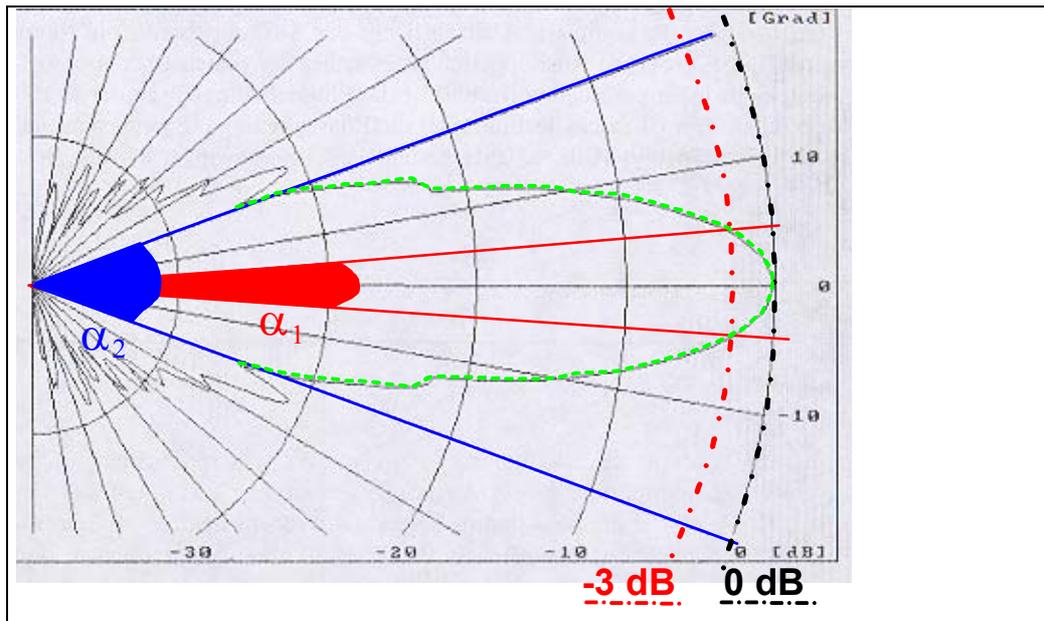


Abbildung 1.1-3: Darstellung von Richtcharakteristik und Öffnungswinkel α_1 und α_2 eines US-Wandlers (modifiziert nach Schnell /16/)

Als US-Wandler kommen in der Abstandsbestimmung überwiegend Wandler zum Einsatz, die mit piezoelektrischen Komponenten arbeiten.

Bei den im Rahmen dieses Beitrags untersuchten Objekten aus der Literatur, eigener Simulationsrechnung und eigenen Versuchen, handelt es sich um Ultraschallwandler, die als Biegeschwinger aus Aluminium ausgeführt und die innenseitig mit einer piezoelektrischen Scheibe bestückt sind (Abbildung 1.1-4).

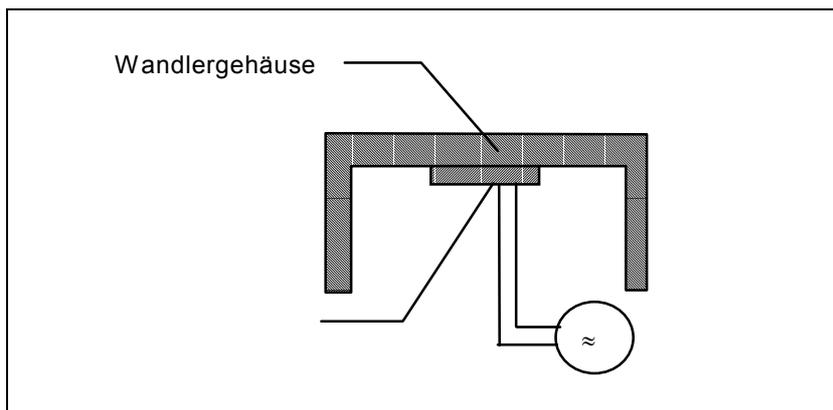


Abbildung 1.1-4: Schematische Darstellung eines Ultraschallwandlers mit elektrischer Ansteuerung

Diese US-Wandler sind gegen äußere Umgebungseinflüsse beständig, haben einen hohen Wirkungsgrad und lassen sich kostengünstig fertigen (vgl. Koch /17/).

Durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung an die piezoelektrische Scheibe wird der Schwinger in Biegeschwingungen versetzt und erzeugt ein Ultraschallfeld.

Für die Abstandsmessung ist das Abstrahlverhalten des US-Wandlers von entscheidender Bedeutung. Befindet sich im ungünstigsten Fall das Objekt außerhalb der Richtcharakteristik des US-Wandlers, so kann die Entfernung zum Zielobjekt nicht bestimmt werden (vgl. Abbildung 1.1-3). Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich -vor einer weiteren Nutzung von Abstandsmesssystemen im CIM-Lernbetrieb- zunächst eine systematische Untersuchung des Abstrahlverhaltens von US-Wandlern vorzunehmen und somit die Defizite der gegenwärtigen Forschung auszugleichen.

1.2 Zielsetzung

Aus der Zweckbestimmung von CIM-Komponenten der automatisierten Produktion und des CIM-Lernbetriebes (vgl. Kap. 1.1) ergibt sich das Ziel, einen Beitrag für die Auslegung von Ultraschallwandlern für Abstandsmessungen zu leisten. Typische Anwendungsfälle von symmetrischen als auch asymmetrischen US-Wandlern sind neben den Beispielen, die bereits in Kapitel 1.1 genannt wurden, überall dort gegeben, wo es zum Beispiel horizontal breite und vertikal schmale Raumbereiche zu vermessen oder zu überwachen gilt, wie z.B. Personenschutz in den Materialfluss- oder Fertigungsbereichen oder Kontrolle und Überwachung des Fräswerkzeuges, des Roboters oder des Werkstückes (vgl. Hohenburg /18/). Daraus leitet sich eine allgemein konstruktive Zielvorgabe ab, die sich aus den folgenden einzelnen Zielsetzungen zusammensetzt:

Zielsetzung der Arbeit ist es,

- die eigenen und aus der Literatur bekannten Berechnungsmethoden für die Simulation von US-Wandlern zu erproben.
- das Verhalten von Ultraschallwandlern in Luft hinsichtlich ihrer Frequenz- und Abstrahlcharakteristik zu simulieren und diese Ergebnisse mit den Ergebnissen eigener experimenteller Untersuchungen zu überprüfen.
- sowohl 2- als auch 3-dimensionale Simulationen, Berechnungen und Experimente durchzuführen, um das Verhalten von symmetrischen und asymmetrischen US-Wandlern zu bestimmen.
- die aus der Literatur bekannte Datenbasis für die Simulation von US-Wandlern zu ermitteln und durch Messwerte zu ergänzen, die durch eigene Experimente und Berechnungen gesichert sind.

2 Stand der Simulationstechnik von piezoelektrischen Ultraschallwandlern

Innerhalb dieses Kapitels wird zunächst ein Überblick über die gegenwärtigen Modelle von Ultraschallwandlern gegeben. Anschließend werden die relevanten Fachinhalte der Simulation von Ultraschallwandlern hinsichtlich Schwingungsverhalten und Abstrahlcharakteristik dargestellt.

2.1 Überblick über Simulationsmodelle von piezoelektrischen Ultraschallwandlern

Eine Übersicht über Arbeiten, in denen die gebräuchlichsten Modelle zur Simulation von piezoelektrischen Wandlern vorgestellt werden, findet sich in (Lerch /19/), eine systemtechnische Darstellung von Ultraschallwandlern in (Hassler /20/) und von piezoelektrischen Bauteilen in (Guntersdorfer /21/). Prinzipiell lassen sich die Modelle gemäß ihrer Abstraktionsstufen in drei Kategorien einteilen.

I. Piezoelektrischer Ultraschallmodelltyp I:

Bei dem Modelltyp I handelt es sich um eindimensionale Modelle, bei denen die Piezoplatte als Sender und Empfänger modelliert werden, von deren Oberflächen aus die Schalldruckwellen gesendet oder empfangen werden. Die Amplituden der Schalldruckwellen sind sowohl von den elektrischen Potenzialen an der Piezokeramik als auch von den Materialeigenschaften, wie z.B. den Schallwiderständen, abhängig.

Dieser Modelltyp wird vor allem für die Auslegung von Ultraschallwandlern in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt (vgl. Krautkrämer /22/; Sokolow /23/).

Für die Berechnung von asymmetrischen Schallfeldern mithilfe von dreidimensionalen Modellen ist der Modelltyp I ungeeignet.

II. Piezoelektrischer Ultraschallmodelltyp II:

Prinzipiell basiert diese Modellbildung auf der Simulation der realen US-Wandler durch elektrische Ersatzschaltbilder. Diese Ersatzschaltbilder lassen sich mit den Methoden der Netzwerktheorie lösen. Die Transformation eines US-Wandlers in ein elektrisches Ersatzschaltbild erfolgt mithilfe von Analogiebeziehungen. Hierbei wird das Gesamtsystem zunächst in elektrische, mechanische und akustische Teilsysteme zerlegt. Anschließend werden

diese Teilsysteme in ein elektrisches Gesamtsystem überführt. Hervorzuheben sind die Zweipoltheorie von Hecht (Hecht /24/), die Berechnung nach der Vierpoltheorie von Fischer (Fischer /25/) sowie das Mason- (Mason /26/) und das KLM-Modell nach Krimholtz, Leedom und Matthaei (Krimholtz /27/). Bei dem Mason- und dem KLM-Modell werden die US-Wandler als Dreitor-Netzwerke dargestellt, die sich bei gleichem Klemmverhalten nur durch den inneren Aufbau unterscheiden, beispielhafte Anwendungen des Mason-Modells finden sich in (Benkeser /28/; Goll /29/; Yamamizu /30/; Lerch /31/; Me`quio /32/; Me`quio /33/; Weinert /34/) und des KLM-Modells in (Fox /35/; Lal /36/; Lenk /37/; Shaulov /38/; Skudrzyk /39/; Datta /40/; Heyman /41/; Herbertz /42/). Eine Übersicht der Wandlermodelle gemäß der Dreitor-Netzwerke ist in (Kino /43/) gegeben.

Sämtlichen Modellen gemäß des Modelltyps II ist gemeinsam, dass es sich um eindimensionale Modelle basierend auf isotropen Materialeigenschaften handelt.

Dieser Modelltyp ist in der Elektrotechnik weit verbreitet und findet seine Anwendung in der Auslegung von elektrischen Schaltungen, in denen piezoelektrische Komponenten, z.B. als Schwingquarze (vgl. Brise /44/; Neuscheller /45/) enthalten sind. Für die Berechnung von dreidimensionalen Schallfeldern, die von piezoelektrischen US-Wandlern erzeugt werden, ist der Modelltyp II ungeeignet.

III. Piezoelektrischer Ultraschallmodelltyp III:

Bei dem Modelltyp III werden die betrachteten Objekte durch finite Elemente modelliert. Die Methode der Finiten Elemente ist ein Verfahren, das in der Kontinuumsmechanik seit langer Zeit als Näherungsverfahren zum Einsatz kommt. (Zur Entstehung der Methode der Finiten Elemente vgl. (Zienkiewicz /46/)). Grundsätzlich werden die Modelle mathematisch durch die entsprechenden Differentialgleichungen und Randbedingungen charakterisiert und anschließend mit der Methode der Finiten Elemente gelöst. Bei der Bildung von piezoelektrisch-mechanischen Systemen handelt es sich um die Modellierung von Feldproblemen (coupled-field), die mit besonderen Elementtypen beschreibbar sind (vgl. Lerch /47/; Lerch /48/; Kohnke /49/; Ostergaard /50/).

Durch die Wahl der entsprechenden Elementtypen lassen sich die Wandlertypen als 2D- (vgl. Kagawa /51/) und 3D-Modelle simulieren (vgl. Prathap /52/). In (Allik /53/; Naillon /54/; Tzou /55/; Boucher /56/; Lucas /57/) sind Beispiele für die Anwendung der Finiten Element Methode für die Berechnung von piezoelektrischen Bauteilen dargestellt. In (Craggs/58/; Estorff /59/; Estorff /60/; Fabula /61/) werden Anwendungsbeispiele für die Berechnung der Schallabstrahlung von schwingenden Strukturen beschrieben. In (Denkmann /62/; Kagawa /63/; Kagawa /64/; Kagawa /65/; Kagawa /66/ und Lerch /67/) werden Anwendungsbeispiele für die Schalldruckberechnung von piezoelektrischen Schwingern dargestellt. Die Berechnung von Resonanzfrequenzen und Schwingungsmodi mit experimentellen Ergebnissen nach der Plattentheorie finden sich in (Timoshenko /68/; Vinson /69/; Reid /70/; Reddy /71/; Love /72/; Gladwell /73/; Leissa /74/). Ein Überblick über die Implementierungsmöglichkeiten der verschiedenen dynamischen Berechnungsmethoden innerhalb der FE-Methode ist in (Cheung /75/), die FEM-Simulation des Schwingverhaltens von PXE-Scheiben in (Coursant /76/; Lerch /77/ und (Naillon /78/)) dargestellt. In (Blevins /79/) wird für die Berechnung von Eigenfrequenzen ein Überblick über die zur Zeit am Markt befindlichen FEM-Programme gegeben. Für die Simulation von symmetrisch und asymmetrisch schwingenden Strukturen und deren Abstrahlung von Schall werden Werkzeuge auf Basis der Finiten Element Methode (FEM) nach dem Ultraschallmodelltyp III eingesetzt.

2.2 Beschreibung der durchzuführenden Berechnungsschritte für die Simulationsrechnung

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit werden für die Simulationsrechnung sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch schwingender Strukturen und deren Abstrahlung von Schall die folgenden Rechnungsschritte durchlaufen, die auf der Finiten Element Methode basieren:

1. Ermittlung der Resonanzfrequenzen ausgewählter Ultraschallwandler.
2. Bestimmung der Geschwindigkeitsprofile auf den schallabstrahlenden Platten der Ultraschallwandler.
3. Berechnung der durch die Ultraschallwandler erzeugten Schallfelder.

3 Erweiterung des Standes der Technik durch eigene experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden zunächst die Zielsetzungen und Konzepte der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Anschließend wird der Untersuchungsgegenstand „US-Wandler“ sowie dessen aufwändige Herstellung gezeigt. Im nächsten Kapitel werden Aufbau und Subsysteme der Versuchseinrichtungen beschrieben. Danach wird der prinzipielle Versuchsablauf der Messzyklen „Spektrogramm“ und „Richtcharakteristik“ einschließlich Fehlerbetrachtung dargestellt. Nach der Aus- und Bewertung der Messergebnisse wird ein Ausblick über zukünftige Entwicklungsziele gegeben.

3.1 Zielsetzung und Konzepte

Die Zielsetzung der experimentellen Untersuchungen besteht darin, einerseits die Datenbasis für die eigene Simulationsrechnung durch Kennwerte zu erweitern, die bisher noch nicht veröffentlicht worden sind (vgl. Kap.1.2), und andererseits die Ergebnisse aus Literatur, eigenen Simulationsrechnungen und eigenen Experimenten zu vergleichen und zu bewerten.

In der folgenden Tabelle 3-1 sind die verwendeten FEM-Berechnungsarten mit den Rechnungselementen Resonanzfrequenz, Spektrogramm, Geschwindigkeitsprofil sowie Öffnungswinkel bzw. Schallfeldberechnung grau schattiert dargestellt.

Diesen Rechnungselementen sind die entsprechenden Ergebnisse aus der Literatur oder aus eigenen Versuchen farbig zugeordnet. So wurden zum Beispiel die Simu-

lationsergebnisse der eigenen FEM-Berechnung für die Wandlertypen mit Beschwerungsring (vgl. Kap. 3.6.2.2 und Abbildung 3.6-10) mit den Ergebnissen der eigenen experimentellen Versuchsreihen verglichen, weil aus der Literatur keine Daten vorlagen.

Um den Einfluss der Elementgröße des FEM-Modells bei der Simulationsrechnung zu quantifizieren, wurden für 2- und 3- dimensionale Modelle bei verschiedenen Elementgrößen die Berechnungen durchgeführt.

Simulations-Berechnung (Basis: FEM)	2.-dim. Modell	3-dim. Modell		
		symmetrisch		asymmetrisch
		ohne Beschwerungsring	mit Beschwerungsring	mit Ringsegmenten
Resonanzfrequenz	Lit.-Formel Lit.-Daten Eig.-Daten ²	Lit.-Formel Lit.-Daten Eig.-Daten ^{1, 2, 3}	Eig.-Daten	Eig.-Daten
Spektrogramm		Eig.-Daten	Eig.-Daten	Eig.-Daten
Geschwindigkeitsprofil		Eig.-Daten	Eig.-Daten	Eig.-Daten
Öffnungswinkel α_1		Eig.-Daten	Eig.-Daten	Eig.-Daten
Öffnungswinkel α_2		Lit.-Formel Eig.-Daten	Eig.-Daten	Eig.-Daten
Schallfeldberechnung		Eig.-Daten	Eig.-Daten	Eig.-Daten
<u>Legende</u> Lit.-Formel Formel (Simulation) aus Literatur Lit.-Daten Experimentelle Daten aus Literatur Eig.-Daten Experimentelle Daten aus eigenen Versuchen ¹ Variation von d, t ² Variation der Elementgröße ³ Variation der Dämpfung				

Tabelle 3-1: Übersicht über selbst ermittelte und veröffentlichte Schallfeldkennwerte

Grundlage der Auslegung von Ultraschallwandlern ist die Kenntnis von Spektrogramm und Richtcharakteristik (Begriffsdefinitionen vgl. Kap. 3.1.1, Kap. 3.1.2).

3.1.1 Definition „Spektrogramm“

Die grafische Darstellung des Schalldruckpegels⁴ „ L_p “ in Abhängigkeit von der Frequenz wird als Spektrogramm bezeichnet. Mithilfe der Spektrogramme lassen sich Aussagen über das Frequenzverhalten der US-Wandler treffen.

In der Abbildung 3.3-1 ist als Beispiel das Spektrogramm eines US-Wandlers mit einem Durchmesser „ d “ von 35mm und einer Plattendicke „ t “ von 1,5mm dargestellt.

Deutlich sind die Resonanzfrequenzen erkennbar:

Grundschiwingung: $f_0 = 10,950\text{kHz}$

1. rotationssymmetrische Oberschiwingung: $f_1 = 44,480\text{kHz}$

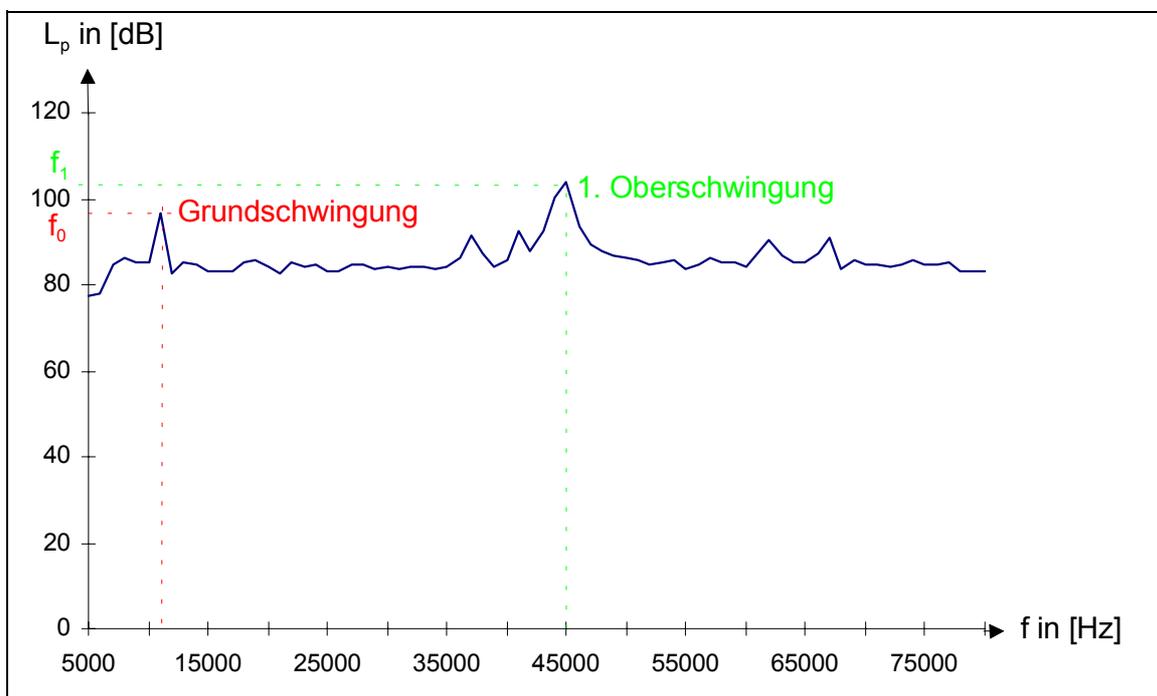


Abbildung 3.1-1: Spektrogramm eines US-Wandlers ($d=35\text{mm}$, $t=1,5\text{mm}$) gemäß Abbildung 3.2-1

Das Spektrogramm ist für die Auslegung von US-Wandlern von besonderer Wichtigkeit, weil sie in Betriebsmodi mit möglichst großem Wirkungsgrad betrieben werden; diese Modi fallen mit den Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschiwingung zusammen.

⁴ Definition siehe Seite 65.

3.1.2 Definition „Richtcharakteristik und Öffnungswinkel α_1 und α_2 “

Bei der Richtcharakteristik gemäß DIN 1320 (DIN1320 /80/) handelt es sich um die Darstellung von Richtungsfaktor oder Richtungsmaß in Abhängigkeit vom Winkel gegen eine Bezugsachse.

Für den planmäßigen Einsatz des US-Wandlers ist die Richtcharakteristik von Bedeutung (vgl. Kapitel 1, Abbildung 1.1-3, Abbildung 1.1-4 und Begleittext). Der Richtungsfaktor „ $\Gamma(\varphi)$ “ eines Schallstrahlers ist definiert als Quotient einer Schallfeldgröße, z.B. des Schalldrucks „ $p(\varphi)$ “, im Fernfeld unter einem anzugebenden Winkel „ φ “ gegen die Bezugsachse des Schallstrahlers und der gleichartigen Schallfeldgröße „ $p(0^\circ)$ “ auf der Bezugsachse bei gleichem Abstand der Aufpunkte vom Schallstrahler (vgl. Abbildung 3.3-11, Abbildung 4.2-1 und Kapitel 4.2). Das Richtungsmaß „ $D(\varphi)$ “ ist der zwanzigfache Zehnerlogarithmus des Betrages des Richtungsfaktors „ $\Gamma(\varphi)$ “. In den folgenden Gleichungen sind Richtungsfaktor und Richtmaß für den Schall dargestellt.

$$\Gamma(\varphi) = \frac{p(0^\circ)}{p(\varphi)} \qquad D(\varphi) = 20 \log \Gamma(\varphi) \quad \text{in [dB]}$$

Die Richtcharakteristik von US-Wandlern ist für deren Einsatz deshalb von großer Bedeutung, weil damit der Bereich, in dem er zur Entfernungsmessung eingesetzt werden kann, definiert wird. Als Beispiel ist in der Abbildung 1.1-3 die Richtcharakteristik eines Ultraschallwandlers mit einem Öffnungswinkel $\alpha_1=12^\circ$ dargestellt.

Aus der Literatur sind die Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ bekannt.(vgl. Abbildung 1.1-3). Der Öffnungswinkel „ α_1 “ beschreibt denjenigen Öffnungswinkel, der sich bei einer Abnahme des Schalldruckpegels um 3dB ergibt. Die rot dargestellten Strahllinien, die den Öffnungswinkel „ α_1 “ beschreiben, ergeben sich durch die Schnittpunkte mit der rot gestrichelten -3dB-Pegellinie.

Bei dem Öffnungswinkel „ α_2 “ handelt es sich um das in Symmetrieachsenrichtung fallende Hauptstrahlbündel. Er ergibt sich durch Anlegen von Strahlenlinien an den Hauptkegel der Richtcharakteristik. Der Hauptkegel wird auch als Hauptkeule bezeichnet und ist in Abbildung 1.1-3 als grün-gestrichelte Linie dargestellt.

Zwischen der Resonanzfrequenz, dem Wandlerdurchmesser und dem Öffnungswinkel „ α_2 “ eines US-Wandlers besteht ein funktionaler Zusammenhang. Mithilfe der Resonanzfrequenz „ f “, der Schallgeschwindigkeit „ c “ und des Wandlerdurchmessers „ d “ lässt sich der theoretische Öffnungswinkel „ α_2 “ des Schallfeldes für Biegeschwinger für „ $\lambda < d$ “ nach Gleichung 2 bestimmen (Koch /81/ vgl. auch Kuttruff /82/)⁵:

$$\sin \alpha_2 \approx \frac{\lambda}{d} = \frac{c}{d \cdot f} \quad (2)$$

3.1.3 Güte- und Dämpfungswerte

Für die FEM-Simulationsrechnung werden die Dämpfungs- und Gütewerte benötigt. Diese Kennwerte werden mithilfe der experimentellen Versuche „Spektrogramm“ (vgl. Kap. 3.6.1) und „Richtcharakteristik“ (vgl. Kap. 3.6.2) bestimmt.

3.1.4 Geschwindigkeitsprofil auf der Wandleroberfläche

Um die Zuordnung der Resonanzfrequenzen zu den einzelnen Schwingungsmodi gemäß des Spektrogramms zu verifizieren, wird das Geschwindigkeitsprofil auf der Wandleroberfläche mithilfe der Laserinterferometrie experimentell bestimmt. Durch Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils im Randbereich des US-Wandlers lässt sich überprüfen, ob die Geschwindigkeit vernachlässigt werden kann und somit die Einspannung als unendlich steif anzusehen ist.

3.2 Ultraschallwandler

Bei den Untersuchungsobjekten handelt es sich um symmetrisch und asymmetrisch aufgebaute Ultraschallwandler, die auf dem Markt nicht verfügbar sind.

Sie wurden daher im eigenen Labor des Lehrstuhls Technik und ihre Didaktik I der Universität Dortmund gefertigt. Die Wandlerfertigung ist ein aufwändiges Verfahren mit einer großen Bandbreite möglicher Einflussgrößen auf das Versuchsergebnis.

Daher werden die einzelnen Fertigungsschritte detailliert beschrieben.

⁵ berücksichtigt wurde der Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Frequenz und

Schallgeschwindigkeit: $\lambda = \frac{c}{f}$

3.2.1 Aufbau der Ultraschallwandler

Der US-Wandler besteht aus einem Wandlergehäuse aus Aluminium und einer Scheibe aus Blei-Zirkonat-Titanat (PXE-Scheibe⁶). Die PXE-Scheibe ist über eine Klebeverbindung stofflich mit dem Wandlergehäuse verbunden (vgl. Abbildung 3.2-1).

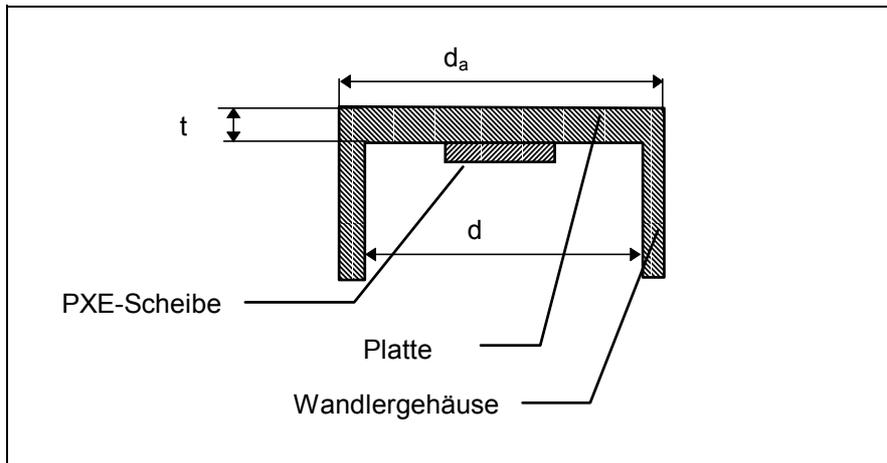


Abbildung 3.2-1: Schematische Darstellung von Geometrie und Aufbau des Ultraschallwandlers

Legt man an die PXE-Scheibe eine elektrische Wechsellspannung an, erfolgt eine Biegeverformung der Platte. Ursache ist der transversale Piezoeffekt, der Zugspannungen in Querrichtung der PXE-Scheibe hervorruft (vgl. Abbildung 3.2-2).

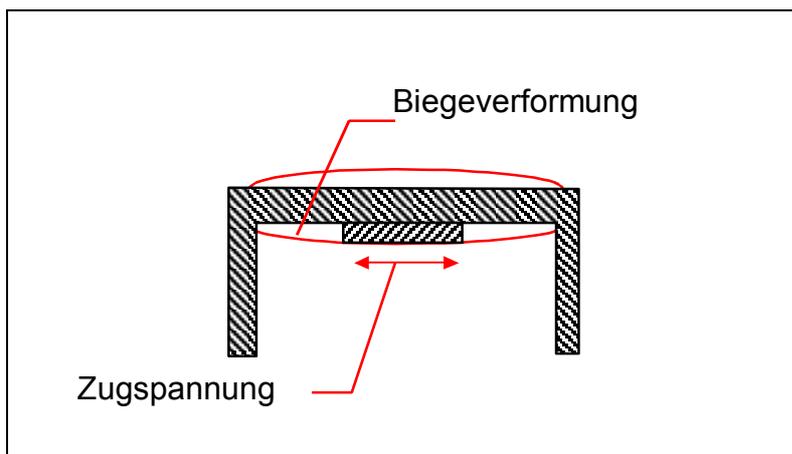


Abbildung 3.2-2: Schematische Darstellung der Verformung des Ultraschallwandlers

⁶ PXE ist die Abkürzung für Piezoxide, die als Sammelbezeichnung für piezoelektrische Werkstoffe auf Blei-Zirkonat-Titanat-Basis verwendet wird.

Für den US-Wandler gemäß Abbildung 3.2-1 ist das mechanische Ersatzmodell einer fest eingespannten Platte mit PXE-Scheibe in Abbildung 3.2-3 dargestellt.

Bei dieser Modellbildung gelten folgende Annahmen:

- Vernachlässigung der Klebeschicht
- unendliche Steifigkeit des äußeren Wandlergehäuses

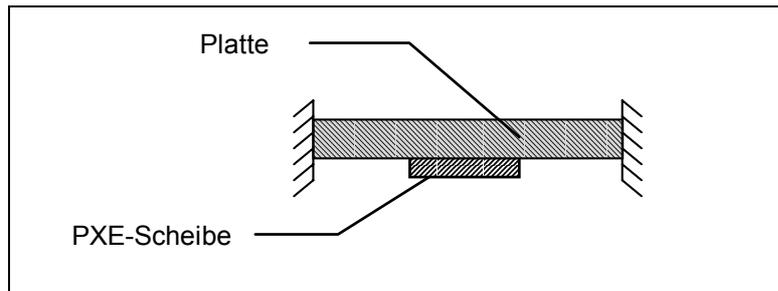


Abbildung 3.2-3: Schematische Darstellung des mechanischen Ersatzmodells des US-Wandlers

Für das Schwingungsverhalten des US-Wandlers gemäß Abbildung 3.2-3 sind die Materialkennwerte sowie der Durchmesser und die Dicke der Platte und der PXE-Scheibe von Bedeutung (vgl. Kap 3.2.2).

Um reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden PXE-Scheiben der Fa. Valvo verwendet, für die bereits Kennwerte von US-Wandlern aus der Literatur vorliegen (Koch /83/).

3.2.2 Fertigung der US-Wandler

Vor Beginn der experimentellen Arbeiten wurde der Herstellungsprozess der Versuchsobjekte einer kontinuierlichen Verbesserung unterzogen. Die folgende detaillierte Beschreibung der Fertigungsabläufe stellt den Sachstand der optimierten Wandlerfertigung dar.

3.2.2.1 Spanende Bearbeitung

Für die Fehlerbetrachtung ist es notwendig, diejenigen Fertigungsmerkmale einer besonderen Betrachtung zu unterziehen, die sich auf die Messergebnisse der Versuche auswirken.

Um die Zylinderteile auf die gewünschte Form zu bringen, werden diese mithilfe eines 15mm Bohrers auf eine Tiefe von 14,5mm bzw. 15mm vorgebohrt. Somit ergibt

sich eine Dicke der Platte von 2mm bzw. 2,5mm. Das präzise Drehen auf die gewünschten Längen und Innendurchmesser erfolgt anschließend mit der CNC-Maschine. Dieser Arbeitsschritt wirkt sich stark auf die Endergebnisse aus, da die durch das Drehen erzielten Durchmesser und Längen die Resonanzfrequenzen des US-Wandlers stark beeinflussen.

Die Wegmesssysteme der angewendeten CNC-Drehmaschine weisen folgende Auflösung auf:

Quer-Schlitten (X-Achse): 0,01mm

Längs-Schlitten (Z-Achse): 0,005mm

Nach dem Fertigungsverfahren werden die Abmaße mit einer digitalen Schiebelehre, deren Auflösung +/- 0,01mm beträgt, überprüft.

Somit ist eine Fertigungstoleranz von 0,01mm gewährleistet.

Der größte Fehler liegt bei den Wandlertypen mit den kleinsten Abmessungen vor.

Der kleinste US-Wandler hat einen Innendurchmesser "d" von 20mm und eine Plattendicke "t" von 0,25 mm. Bei einer Fertigungstoleranz von 0,01mm ergeben sich folgende Abmessungen:

Minimale Abmessung: $(d)_{\min} = 19,99 \text{ mm}$ $(t)_{\min} = 0,24 \text{ mm}$

Maximale Abmessung: $(d)_{\max} = 20,01 \text{ mm}$ $(t)_{\max} = 0,26 \text{ mm}$

Mithilfe der Plattentheorie (Leissa /84/) lassen sich die Resonanzfrequenzen von homogenen Platten nach Gleichung 3 berechnen⁷ (vgl. Kap.4.3.1):

$$f_i = C_i \frac{4t}{d^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

Für die folgenden Überlegungen können die Parameter „ C_i , E , ρ , ν “ als konstant betrachtet werden. Aus Gleichung 3 lässt sich folgende Proportionalitätsbeziehung ableiten:

$$f \approx \frac{t}{d^2}$$

⁷ Der Index „i“ charakterisiert die „i“-te Resonanzfrequenz, C_i ist eine Konstante

Aus den obigen Gleichungen lassen sich die maximalen Frequenzabweichungen „ f/f_{\max} “ bzw. „ f/f_{\min} “ bestimmen. Die Abweichung ist der prozentuale Unterschied zwischen dem jeweils höchsten und niedrigsten Betrag von miteinander verglichenen Messergebnissen, bezogen auf den niedrigsten Wert. Die größte Abweichung ist bei denjenigen Wandlern zu erwarten, die den kleinsten Durchmesser und die größte Plattendicke aufweisen. Der kleinste untersuchte Wandlertyp hat einen Durchmesser „ d_{\min} “ von 20mm und eine maximale Dicke „ t_{\max} “ von 0,25mm.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Gleichungen dargestellt.

$$f/f_{\max} = \frac{t}{d^2} / \frac{t_{\max}}{d_{\min}^2} = \frac{0,25}{20^2} / \frac{0,26}{19,99^2} = 0,9605$$

$$f/f_{\min} = \frac{t}{d^2} / \frac{t_{\min}}{d_{\max}^2} = \frac{0,25}{20^2} / \frac{0,24}{20,01^2} = 1,0427$$

Die Abweichung der Resonanzfrequenz liegt bei den selbst hergestellten Untersuchungsobjekten aufgrund der resultierenden Fertigungstoleranzen bei ca. +/-4% .

3.2.2.2 Befestigen der PXE-Scheibe

Um die PXE-Scheiben zentrisch auf die Innenseite der Platte des US-Wandlers aufkleben zu können, werden sie mithilfe eines Zentrierzylinders fixiert (Abbildung 3.2-5).

Für die verschiedenen Innendurchmesser der zu fertigen US-Wandler, werden jeweils die entsprechenden Zentrierzylinder gefertigt (Abbildung 3.2-4). Um ein Verkleben der PXE-Scheiben mit den Zentrierzylindern zu vermeiden, wird die Aufnahme der PXE-Scheiben aus Teflon gefertigt (vgl. Abbildung 3.2-4).

In der Abbildung 3.2-5 ist ein Zentrierzylinder mit aufgesetztem US-Wandler dargestellt.

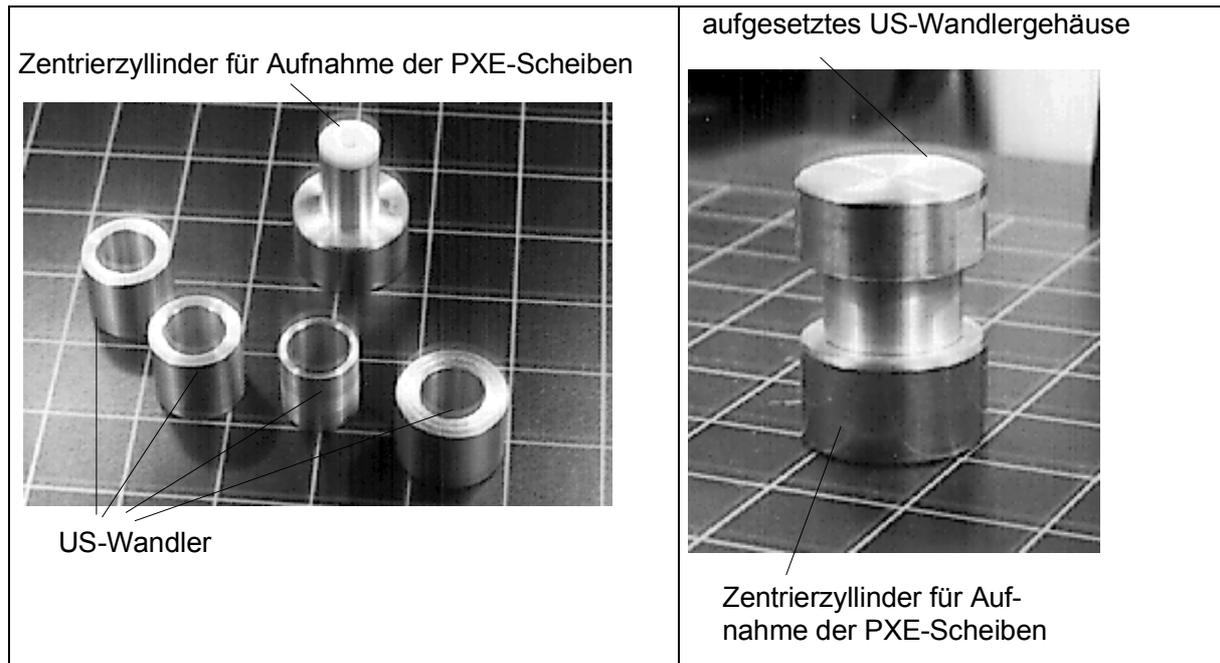


Abbildung 3.2-4: Fotografische Darstellung der US-Wandler und Zentrierzylinder

Abbildung 3.2-5: Fotografische Darstellung des aufgesetzten US-Wandlergehäuses auf den Zentrierzylinder

Als Klebemittel wird ein Zweikomponenten Epoxydharz-Kleber der Firma UHU, Typ UHU plus endfest 300 (Art. Nr. 45640) verwendet. Der Einfluss der Klebeparameter „Zeit“ und „Temperatur“ auf die Endfestigkeit der Klebeverbindung ist in der Abbildung 3.2-6 dargestellt (UHU 1994 /85/).

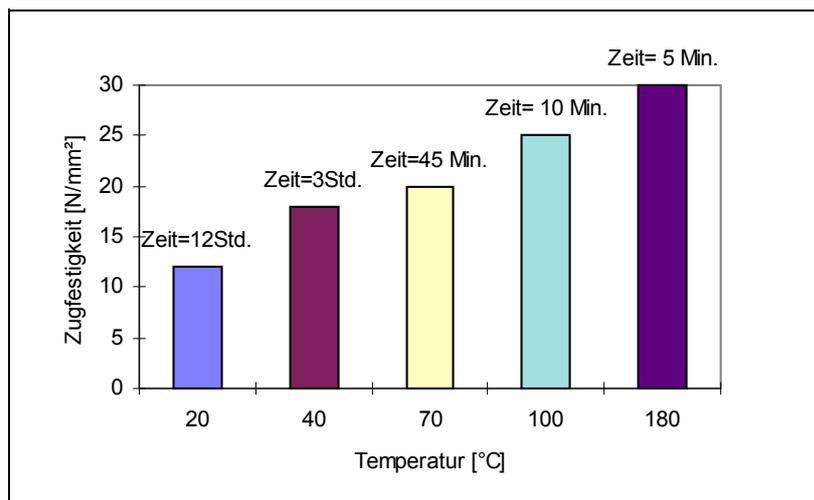


Abbildung 3.2-6: Darstellung der Einflussparameter „Temperatur“ und „Zeit“ auf die Zugfestigkeit der Klebeverbindung

Es werden folgende Klebparameter gewählt:

Klebezeit:	9 min	Temperatur: 130°C
------------	-------	-------------------

Tabelle 3-2: Klebparameter

Mit diesen Werten wird der beste Kompromiss zwischen den Forderungen „minimale Depolarisation der PXE-Scheibe“ und „maximale Endfestigkeit der Klebeverbindung“ erzielt. Der Kleber wird manuell mit einem Pinsel auf die PXE-Scheibe aufgebracht. Anschließend erfolgt der thermische Klebevorgang in einem Ofen bei einer Temperatur von 130°C und einer Verweildauer von neun Minuten.

Innerhalb des Ofens wird die Druckkraft statisch mithilfe eines Gewichtes aufgebracht (Abbildung 3.2-7). Die Parameter „Zeit“, „Temperatur“ und „Anpresskraft“ werden während des Klebens über die gesamte Fertigung konstant gehalten, um reproduzierbare Fertigungsergebnisse zu erzielen. Um die Depolarisation des Piezo-Materials zu verhindern, werden beim Kleben die Elektroden der PXE-Scheibe kurz geschlossen.

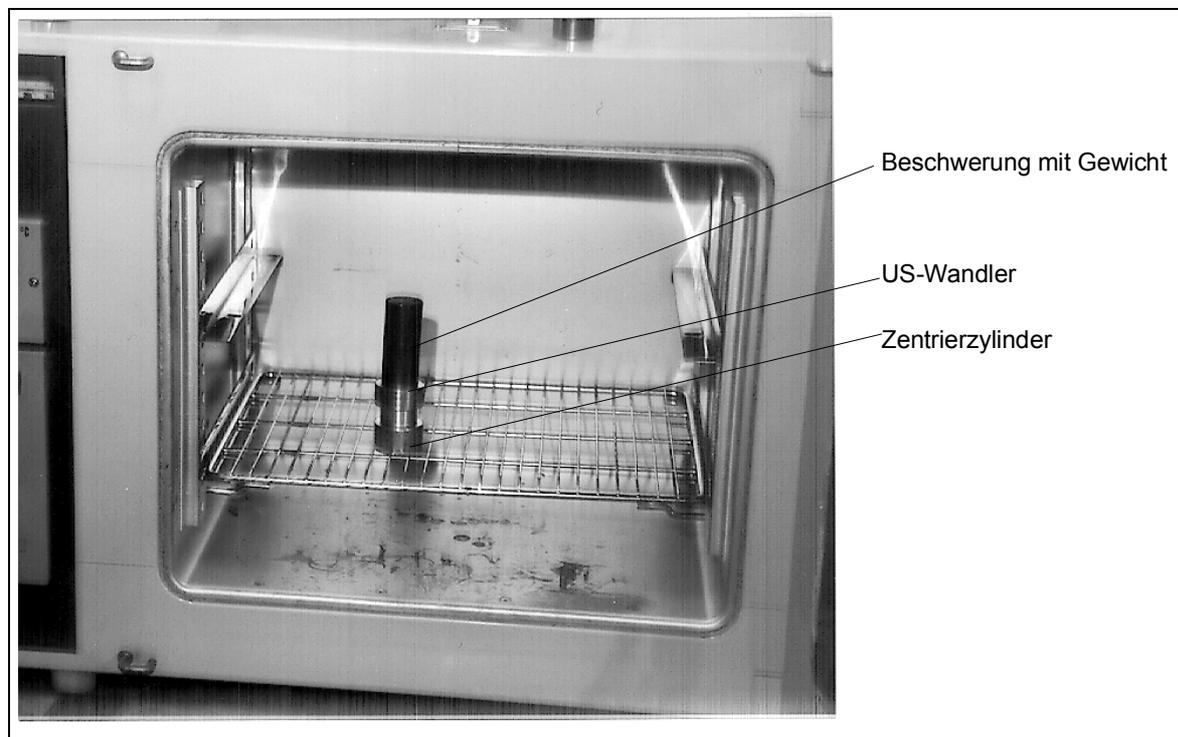


Abbildung 3.2-7: Fotografische Darstellung des US-Wandlers unter statischem Druck im Klebeofen



Abbildung 3.2-8: Fotografische Darstellung des US-Wandlers mit geklebter PXE-Scheibe

Die Kontaktierung der Piezoelektroden wird mit hochflexiblen Drähten ausgeführt. Um auf einen leitenden Kleber verzichten zu können, werden PXE-Scheiben mit einseitiger Elektrodenbelegung eingesetzt (vgl. Abbildung 3.2-8). Die Drähte werden mithilfe des Handlötverfahrens auf die Scheibe aufgebracht. Zunächst werden die versilberten Kontakte entfettet und entstaubt. Anschließend wird die Silbersulfidschicht mechanisch entfernt, um eine möglichst kurze Lötzeit zu gewährleisten. Liegt die Lötzeit bei diesen hohen Temperaturen oberhalb von 5 Sekunden, tritt bereits eine signifikante Depolarisation der PXE-Scheiben ein. Es haben sich folgende Lötparameter als optimal herausgestellt:

Lötzeit : 2 +/- 1s

Löttemperatur: 270°

Lötmaterial: Sn60PbCu2 nach DIN 8516, säurefrei, mit Flussmittel auf Kolofoniumbasis (Conrad /86/)

Während des Lötens wird der US-Wandler in einem Maschinenschraubstock fixiert (Abbildung 3.2-9).

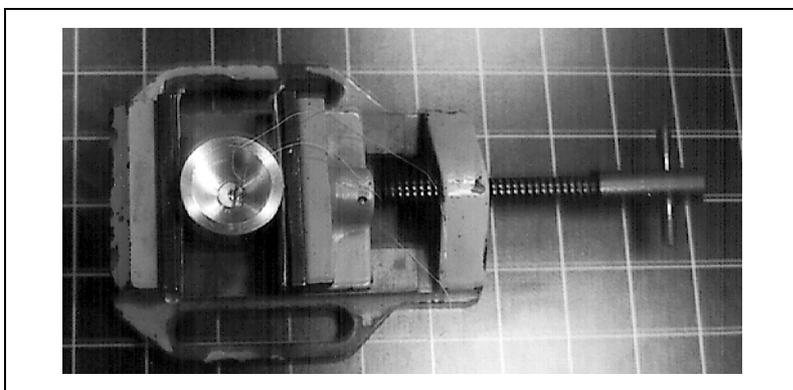


Abbildung 3.2-9: Fotografie des fixierten US-Wandlers beim Lötens der elektrischen Drähte

In der Abbildung 3.2-10 sind einige fertiggestellte US-Wandler mit verschiedenen Abmessungen dargestellt.

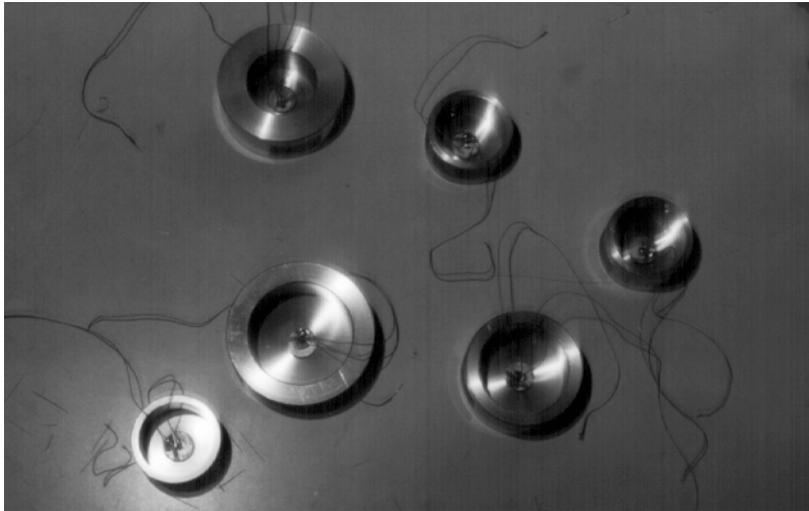


Abbildung 3.2-10: Fotografie von fertiggestellten US-Wandlern mit verschiedenen Abmessungen

3.3 Aufbau der Versuchseinrichtung⁸

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchsstand ermöglicht die Aufnahme von Versuchsreihen, die je nach Diskretisierungsgrad der Frequenz- und Winkelteilung über einen Zeitraum von 12 Stunden automatisch ablaufen.

Nach der Messung liegen die Messdaten in einem Microsoft Windows-kompatiblen Datenformat vor, so dass sie direkt als Spektrogramme und/oder Richtcharakteristika weiterverarbeitet werden können.

Bei den in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen handelt es sich um Experimente, die im Messlabor des Lehrstuhls Technik und Ihre Didaktik I, Universität Dortmund, Emil-Figge Straße 50 durchgeführt wurden.

Da es sich bei dem Schallpegelmessgerät und dem Frequenzgenerator um analoge Geräte handelt und eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit analogen und digitalen Schnittstellen zur Verfügung stand, wurde für die Steuerung die SPS mit einer Personalcomputer-Anbindung eingesetzt (Hohenburg /87/). Der Personalcomputer (PC) dient als übergeordneter Steuerrechner einschließlich Erfassung und Weiterverarbeitung der Messdaten.

Die Einbindung der weiteren Komponenten wurde durch analoge und digitale

⁸ Die Beschreibung der verwendeten Hardwarekomponenten ist im Anhang 2 dargestellt.

Schnittstellen sichergestellt.

Für die Aufnahme der Schallsignale werden Präzisionsgeräte gemäß DIN 45633 und DIN 45634 verwendet. Die Messdatenerfassung erfolgt durch SPS und PC.

3.3.1 Gesamtdarstellung

Der Versuchsstand besteht aus folgenden Komponenten (vgl. Abbildung 3.3-1; Abbildung 3.3-2)⁹:

- Schallpegelmessgerät und Mikrofon
- Personalcomputer
- Speicherprogrammierbare Steuerung
- Frequenzgenerator
- Aufnahme des Ultraschallwandlers mit Schrittmotor
- Ultraschallwandler

Für die übergeordnete Steuerung, Messdatenspeicherung, Überwachung und Auswertung wird als Hardware ein Personalcomputer verwendet. Bei der Software handelt es sich um das Betriebssystem DOS 6.2 der Fa. Microsoft, sowie Turbo Pascal 6.0 der Fa. Borland. Auf der Werkstattebene befindet sich die Speicherprogrammierbare Steuerung, die mit dem PC vernetzt ist. Auf dieser Ebene werden die folgenden Aktor- und Sensorfunktionen ausgeführt:

- Löschen des Datenspeichers im Schallpegelmessgerät
- Einlesen der Messwerte vom Schallpegelmessgerät
- Ansteuern des Frequenzgenerators
- Ansteuern des Schrittmotors zum Verfahren des Drehtisches

⁹ Die Messprogramme sind in Kapitel 3.4 dargestellt.

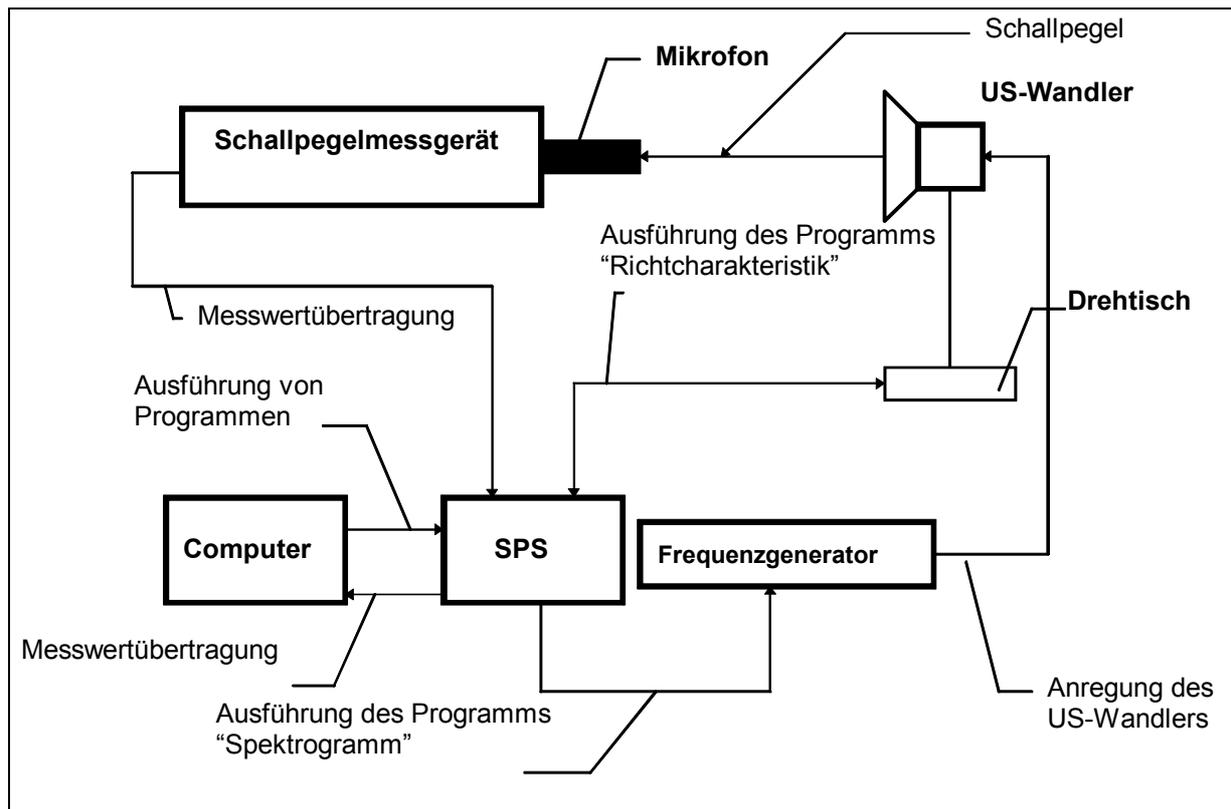


Abbildung 3.3-1: Prinzipbild des Versuchssandes



Abbildung 3.3-2: Fotografische Abbildung des Versuchssandes

Die Zielsetzung der Verwendung der Messeinrichtung ist es, die Kennwerte „Spektrogramm“ und „Richtcharakteristik“ zu bestimmen. Diese unterschiedlichen Messabläufe werden im Folgetext beschrieben.

Bei der Ausführung des Programms „Spektrogramm“ nach Abbildung 3.3-3 wird der Ultraschallwandler mit dem Signal einer definierten Frequenz angeregt. Das vom US-Wandler abgestrahlte Ultraschallsignal wird vom Schallpegelmessgerät empfangen und auf den PC übertragen und gespeichert. Anschließend wird die Frequenz erhöht. Ist die Endfrequenz noch nicht erreicht, wird der Messzyklus mit der neuen Frequenz wiederholt. Die Aufnahme des „Spektrogramms“ ist beendet, sobald die Endfrequenz erreicht ist.

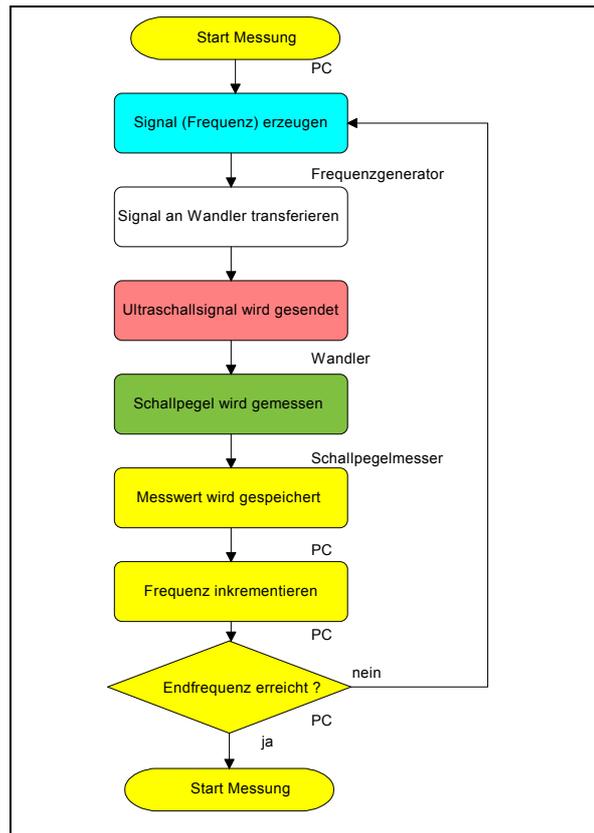


Abbildung 3.3-3: Ablaufdiagramm „Spektrogramm“¹⁰

¹⁰ Für die funktionale Symbolik der Komponenten gilt folgende Zuordnung:

gelb:PC blau:Frequenzgenerator rot:Wandler grün:Schallpegelmesser

Im Unterschied zu der obigen Programmabfolge „Spektrogramm“ wird bei der Aufnahme der „Richtcharakteristik“ nach Abbildung 3.3-4 für jeden Messdurchlauf der Drehteller, auf dem sich der Ultraschallwandler befindet, um einen Winkelschritt verfahren. Die Frequenz des Signals bleibt während der gesamten Messreihe konstant.

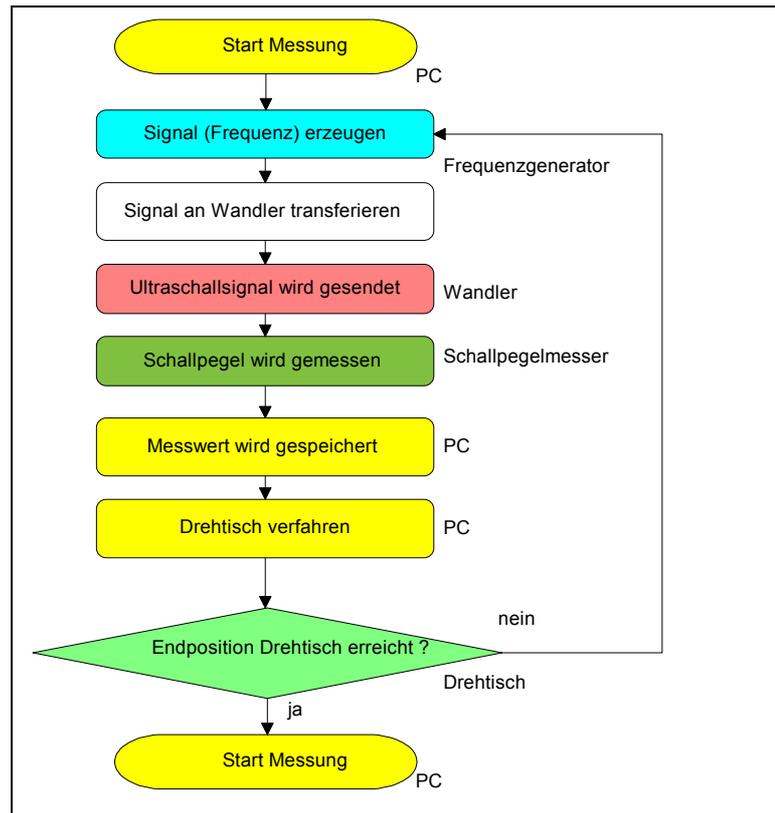


Abbildung 3.3-4: Ablaufdiagramm „Richtcharakteristik“^{10, S.26}

Im Folgetext werden die Einzelkomponenten des Versuchstandes beschrieben.

3.3.2 Schallpegelmessgerät

Für die Erfassung des Schalldruckpegels wird ein Präzisionsschallpegelmesser mit entsprechendem Messmikrofon gemäß DIN 45633 und DIN 45634 der Fa. Brüel & Kjær verwendet (vgl. Brüel /88/; Brüel /89/; DIN1320 /90/; DIN45630 /91/; DIN45633 /92/; DIN45634 /93/; Brüel /94/; Wahrmann /95/; Hansen /96/).

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wird nach jedem Messvorgang eine Kalibrierung durchgeführt. Diese erfolgt mithilfe eines Pistofons, das direkt auf das Mikrofon aufgebracht wird. Das Pistofon erzeugt einen präzisen Schalldruckpegel von 94dB +/- 0,25dB bei 1,000kHz +/- 1,5%, so dass der Präzisionsschallpegelmesser justiert werden kann (vgl. Abbildung 3.3-6).

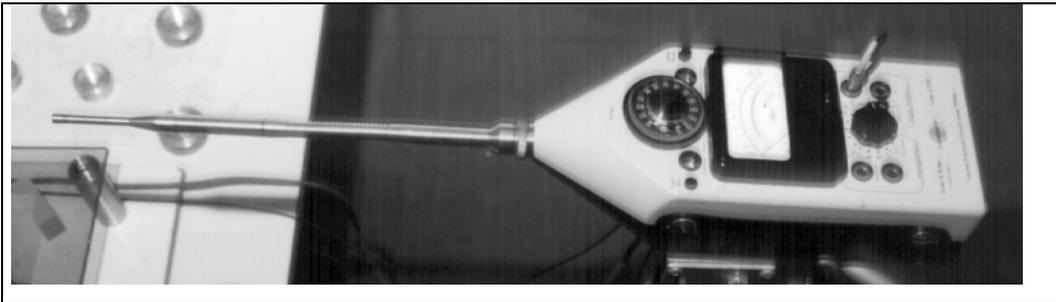


Abbildung 3.3-5: Fotografische Darstellung des Schallpegelmessers

Für die Messung des Schalldruckpegels ergibt sich für das Messsystem „Präzisionsschallpegelmesser“ unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit des Pegels (vgl. Abbildung 3.3-9) und der Richtcharakteristik des Mikrofons (vgl. Abbildung 3.3-11) eine Genauigkeit von $\pm 0,25\text{dB}$.

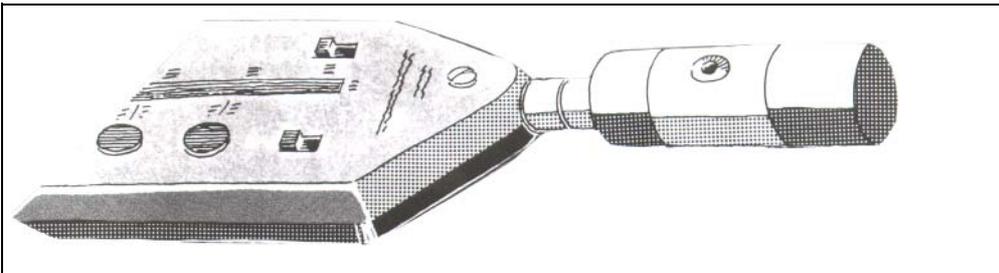


Abbildung 3.3-6: Zeichnerische Abbildung des Pistofons

Die Messungen werden mithilfe der Funktion „HOLD“ aufgenommen (vgl. DIN45633 /97/). Mithilfe dieser Funktion ist es möglich, den maximal empfangenen Schalldruckpegel in einem Messwertspeicher abzulegen. Für die automatische Messwertaufnahme wird der DC-Output- Ausgang des Schallpegelmessers über die SPS eingelesen. Am DC-Output-Ausgang liegt eine Gleichspannung an, die dem Zeigerausschlag des Pegelmessers proportional ist. Hierbei entspricht der Spannung von 1V dem vollen Zeigerausschlag von +10dB (Hansen /98/). Die analogen Spannungssignale werden mithilfe der Analog-Digitalkarte der SPS in digitale Signale und anschließend in Integer-Werte umgesetzt.

Danach werden die Integer-Werte in den PC übertragen. Dort findet die Umwandlung der erfassten Integer-Werte auf die Schalldruckwerte in dB gemäß Abbildung 3.3-7 statt. Nach jeder Messung wird der im Messspeicher abgelegte Zahlenwert gelöscht. Dies wird mithilfe eines Schließrelais durchgeführt, das parallel zu dem Löschtaster geschaltet ist. Die Ansteuerung des Relais erfolgt mithilfe der SPS.

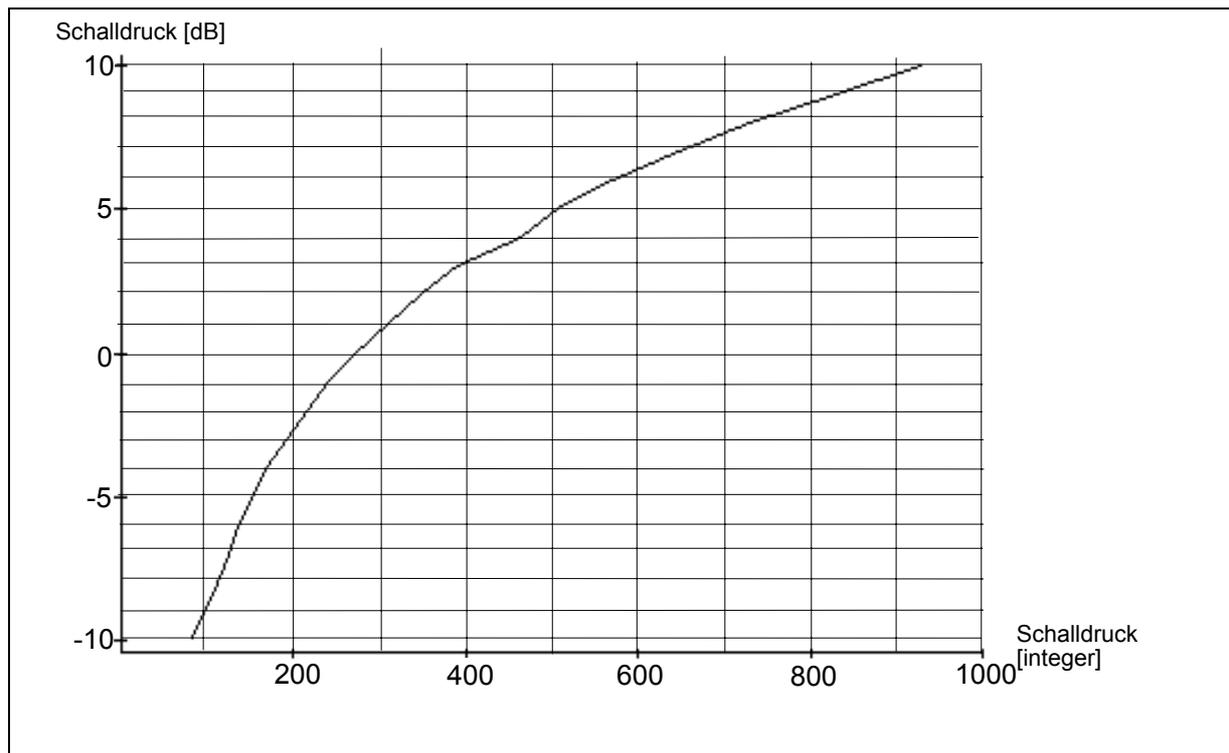


Abbildung 3.3-7: Grafische Darstellung der Umrechnungsfunktion von PC-Schalldruckdaten [integer] in Schalldruckpegel [dB]

Die analoge Eingangsbaugruppe der SPS hat eine Datenbreite von 12bit und einen Erfassungsbereich von +/- 10V. Nach der Gleichung in Tabelle 3-3 ergibt sich für die SPS eine Genauigkeit der eingelesenen elektrischen Spannungswerte von ca. 0,5%.

$12\text{bit} = 2^{12} = 4096$
$4096 \cong -10\text{V bis } +10\text{V}$
$1 \cong \frac{20\text{V}}{4096} = 0,00488\text{V}$
$1\text{V} \pm 0,00488\text{V} \text{ entspricht einer Auflösung von } \pm 0,5\%$

Tabelle 3-3: Berechnungen zur Genauigkeit der SPS-Baugruppe

Die Messungen werden im Freifeld aufgenommen. Man unterscheidet bei der Schallausbreitung zwischen Diffusfeld und Freifeld (vgl. Abbildung 3.3-8). Ein diffuses Schallfeld entsteht, wenn der Schall so oft reflektiert wird, dass der Schalldruckpegel praktisch an jeder Stelle des Raums gleich ist. Unter Freifeld versteht man die Schallausbreitung im idealisierten freien Raum, indem die Schallwellen nicht reflektiert werden. Charakteristisch für ein Freifeld ist die Abnahme des Schalldruckpegels

um 6dB bei einer Verdopplung des Messabstands. Bei dem verwendeten Versuchstand kann die Freifeldcharakteristik durch Veränderung des Abstandes zwischen US-Wandler und Mikrofon bestätigt werden (Kchouk /99/).

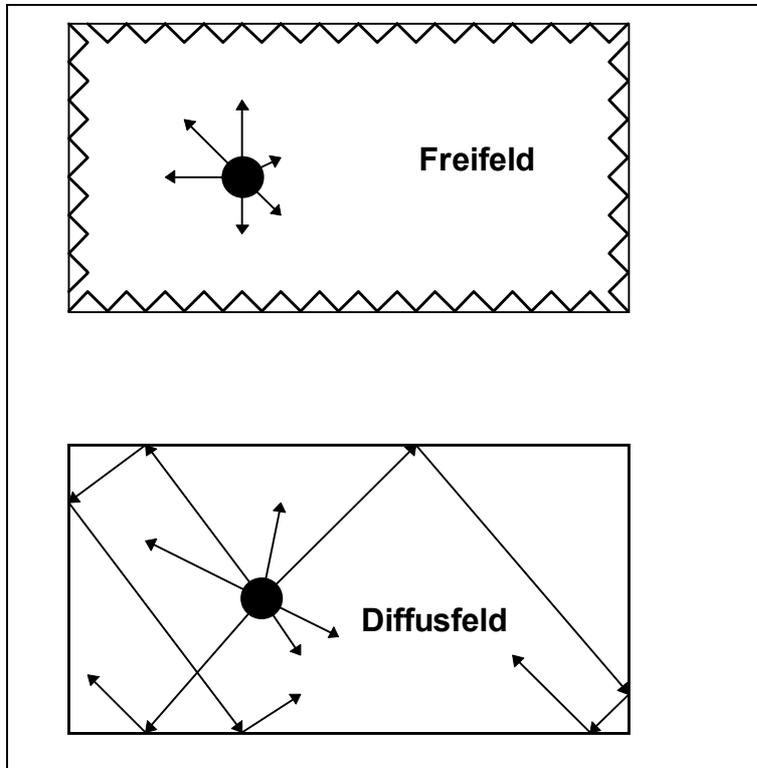


Abbildung 3.3-8: Schematische Darstellung von Diffusfeld und Freifeld

3.3.3 Kondensatormikrofon

Für die Bestimmung der Richtcharakteristik des Ultraschallwandlers werden gemäß DIN 45633 für Präzisionsschallpegelmessgeräte Mikrofontypen mit einer Empfangscharakteristik gefordert, dessen Freifeld- Übertragungsmaße sich innerhalb enger Toleranzen bewegen. Für das verwendete Mikrofon vom Typ 4135 wurde vom Hersteller eine Kalibrierungskurve aufgenommen. Sie ist in Abbildung 3.3-9 dargestellt.

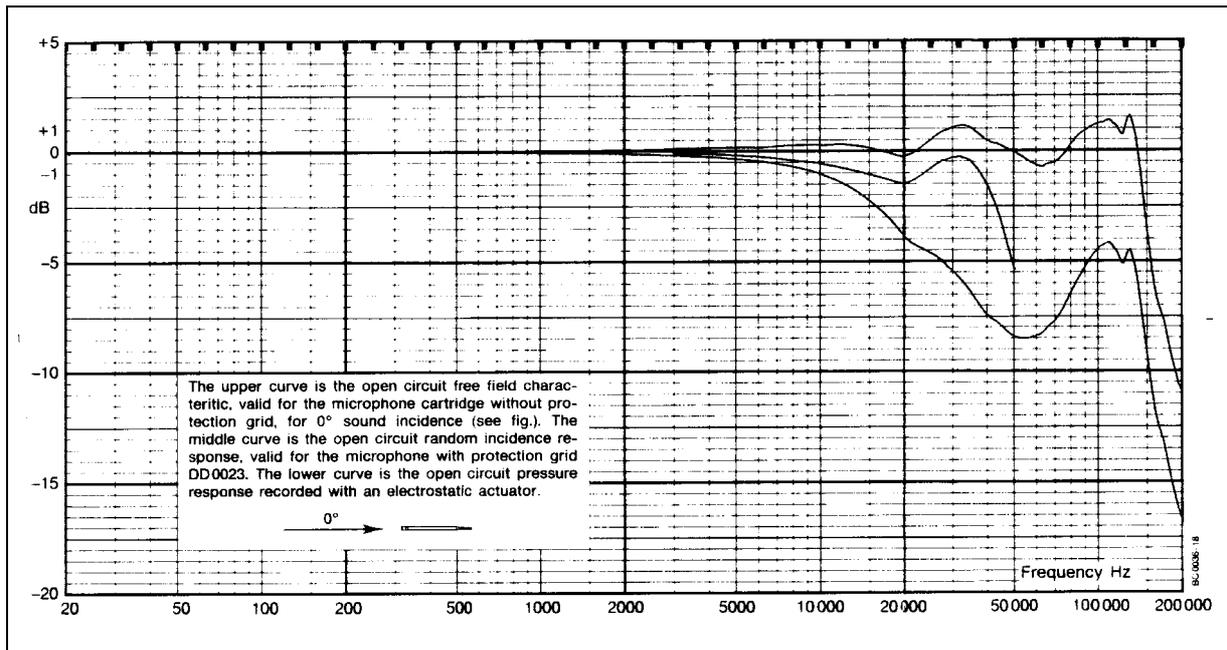


Abbildung 3.3-9: Grafische Darstellung von Schalldruckpegel und Frequenz des Mikrofons vom Typ 4135 der Fa. Brüel & Kjær (Brüel /100/)

Der Messverstärker des Schallpegelmessgeräts ist für den Bereich von 2 Hz bis 70kHz mit einem Toleranzbereich von ± 1 dB spezifiziert.

Für das Messprogramm „Spektrogramm der US-Wandler“ werden die Korrekturwerte der Freifeldcharakteristik berücksichtigt. Für die Bestimmung der Richtcharakteristik der US-Wandler ist die Richtcharakteristik des Mikrofons relevant. Die frequenzabhängige Richtcharakteristik ist in Abbildung 3.3-10 dargestellt.

Das ideale Messmikrofon für die Bestimmung der Richtcharakteristik müsste sich durch eine Kugelcharakteristik auszeichnen. Gemäß der Darstellung in Abbildung 3.3-10 hat das verwendete Mikrofon bei der Messung ohne Schutzgitter folgende Abweichungen:

Winkelbereich $\pm 30^\circ$: max. Abweichung 1dB

Winkelbereich $\pm 45^\circ$: max. Abweichung 3dB

Die Korrekturen für die Aufnahme der Richtcharakteristik wurden gemäß der Kalibrierungskurven (vgl. Abbildung 3.3-9, Abbildung 3.3-10) innerhalb der PC-Auswertung implementiert.

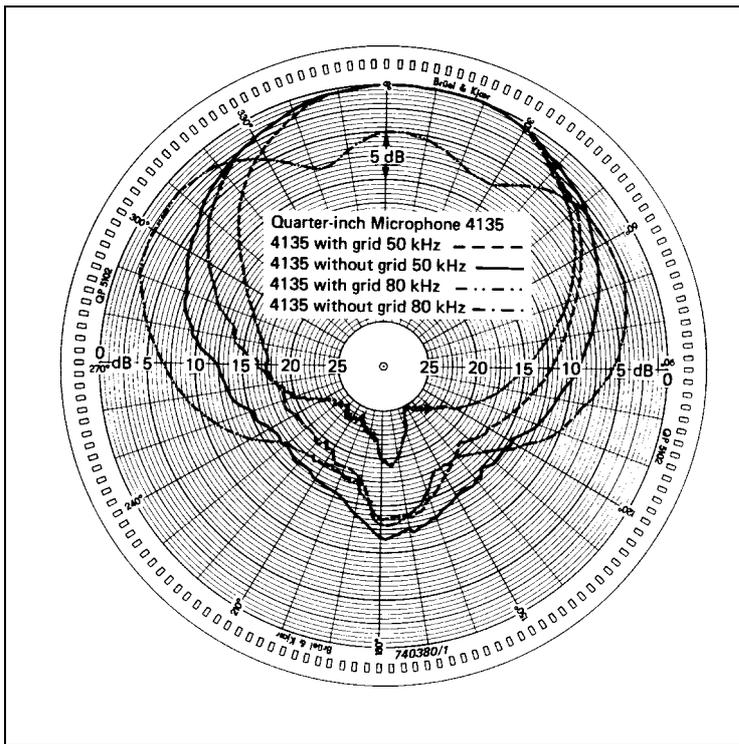


Abbildung 3.3-10: Grafische Darstellung der Richtcharakteristik des verwendeten Mikrofons Typ 4135 der Fa. Brüel & Kjær (Brüel /101/)

Die Ausrichtung zwischen Mikrophon und US-Wandler ist in der Abbildung 3.3-11 dargestellt.

Das Mikrophon wird normgemäß für die Messung unter Freifeldbedingungen direkt auf die Schallquelle, d.h. auf den Ultraschallwandler gerichtet (vgl. Abbildung 3.3-12).

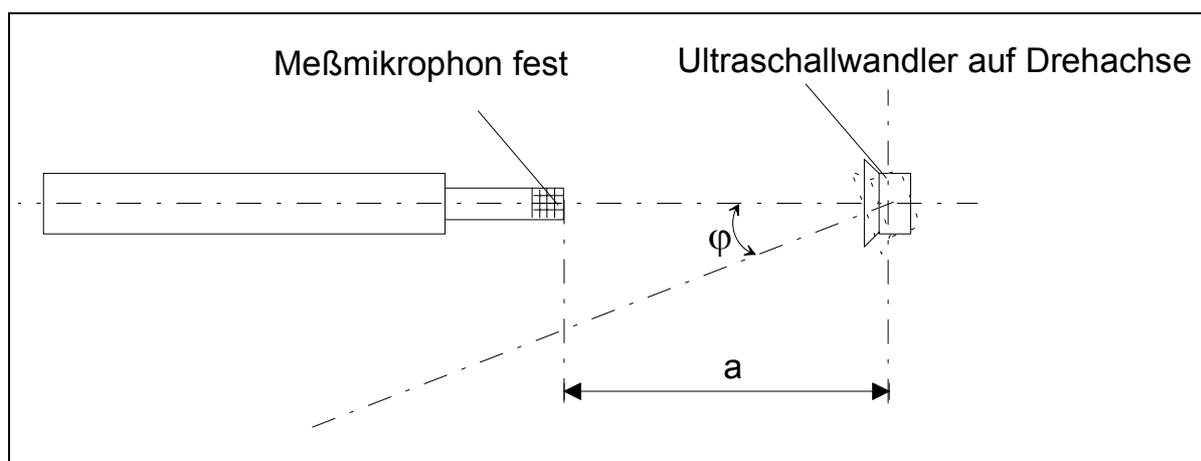


Abbildung 3.3-11: Schematische Darstellung der Ausrichtung US-Wandler - Mikrophon für die Messung „Richtcharakteristik“

Um Schallfeldstörungen durch den Bediener zu vermeiden, werden die Messungen automatisch ohne Bedienpersonal durchgeführt.

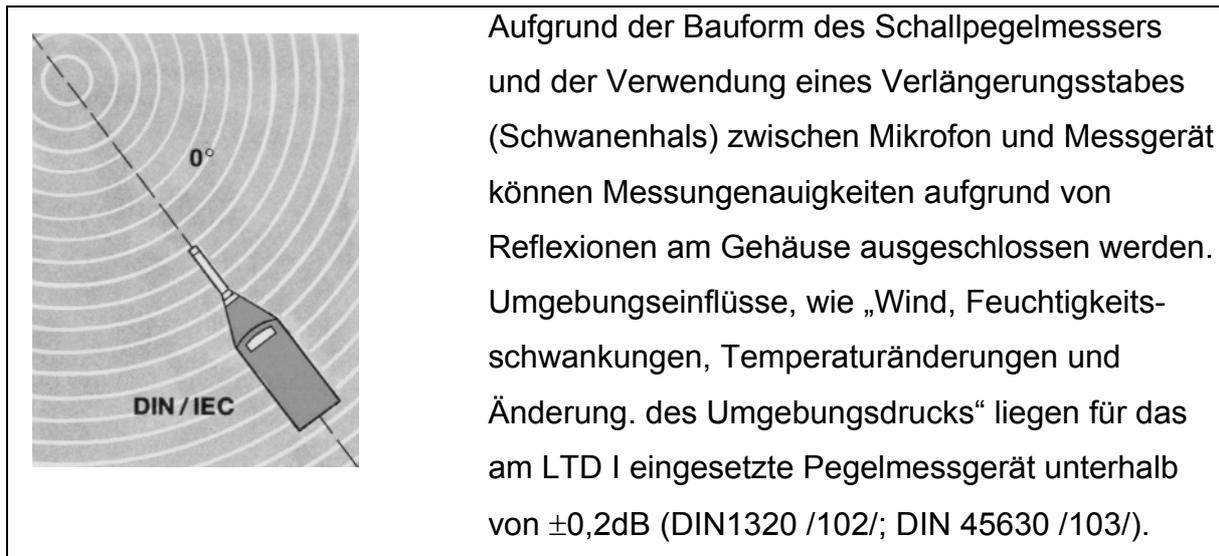


Abbildung 3.3-12:Prinzipdarstellung der Schallmessung im Freifeld

3.3.4 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Die Steuerungsaufgaben werden durch die SPS ausgeführt. Mithilfe der SPS werden die Messwerte an den Rechner übergeben. Als Programmiersprache wird die „Anweisungsliste“ (AWL) nach der Norm IEC 1131 verwendet.

Durch die SPS werden folgende Programmroutinen ausgeführt:

- Verfahren des Drehtisches gegen Uhrzeigersinn
- Verfahren des Drehtisches in Uhrzeigersinn
- Referenzfahrt des Drehtisches
- Einlesen des Schalldruckwertes über die Anlogschnittstelle
- Setzen der Digitalausgänge 1 und 2 für die Kommunikation mit den Peripheriegeräten
- Dauerstrichsignal für den Frequenzgenerator mit definierter Frequenz senden
- Impulssignal für den Frequenzgenerator mit definierter Frequenz senden.

Diese einzelnen Programmroutinen werden vom PC als übergeordnete Steuereinheit ausgelöst. Die Weiterverarbeitung der gespeicherten Werte erfolgt mithilfe des Programms Excel Version 5.0 der Firma Microsoft.

3.3.5 Frequenzgenerator

Für die Erzeugung des Sinus-Signals wird ein Funktionsgenerator der Firma TEKTRONIX benutzt. Es handelt sich um den Frequenzgeber FG 501 (Abbildung

3.3-13). Dieser Generator ist an der SPS angekoppelt und wird u.a. für das Messprogramm „Spektrogramm“ verwendet. Die Frequenz-Auflösung des

Geräts beträgt in dem entsprechenden Messbereich 1%. Für die externe Spannungssteuerung der Frequenz wird der Anschluss „VCF IN“ gewählt. So wird der maximale Frequenzwert über eine Ansteuerspannung von 10V gewählt. Am Ausgang des Frequenzgenerators liegt eine frequenzunabhängige Spitzenspannung „ U_{ss} “ von 16,4V an.

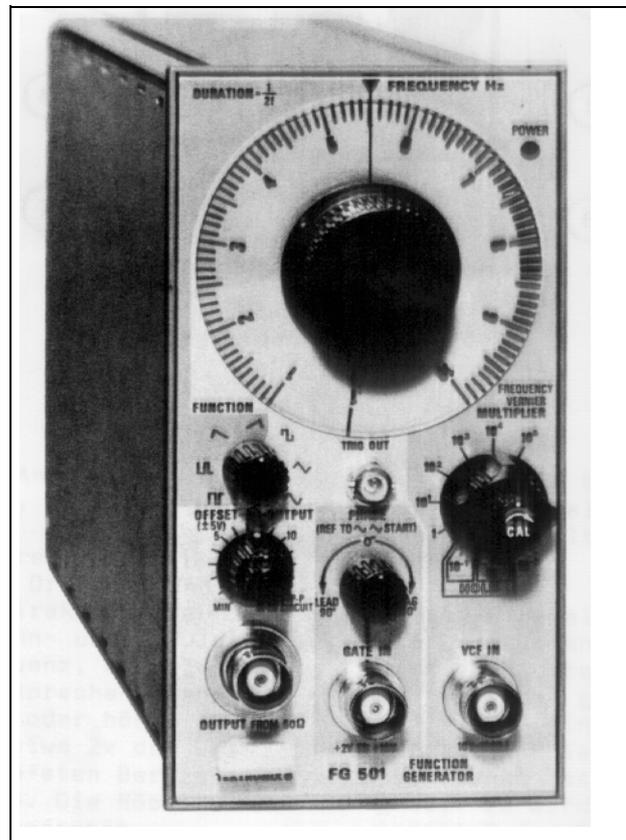


Abbildung 3.3-13: Fotografische Abbildung des Frequenzgenerators

3.3.6 Halterung des Ultraschallwandlers

Die Schallwandler werden mithilfe von vier Schrauben innerhalb einer Ringführung fixiert (vgl. Abbildung 3.3-14).

Um die Oberfläche des US-Wandlers zentrisch und parallel zu der Stirnseite der Ringführung auszurichten, wird während des Einspannens eine Zentriervorrichtung verwendet. Die Befestigungsschrauben werden mit einem definierten Drehmoment angezogen, um gleiche Einspannverhältnisse bei allen Messproben zu gewährleisten.

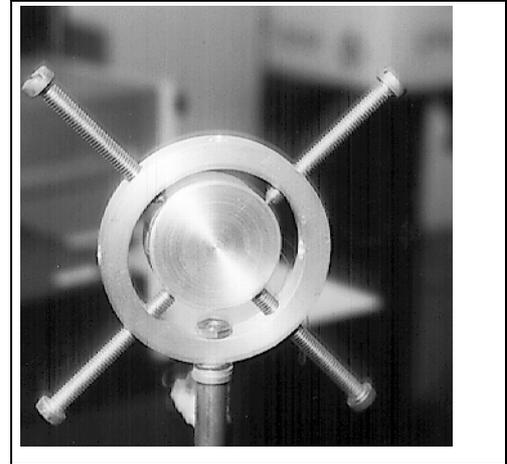


Abbildung 3.3-14: Fotografische Darstellung der Aufnahmevorrichtung für den US-Wandler

Die Ringführung ist an einer drehbar gelagerten Achse befestigt, die mithilfe des Schrittmotors verfahren werden kann (vgl. Abbildung 3.3-14 und Abbildung 3.4-2).

3.4 Messprogramme¹¹

Mithilfe des PC und der SPS werden die Messprogramme „Spektrogramm“ und „Richtcharakteristik“ durchgeführt.

3.4.1 Experimentelles Messprogramm zur Bestimmung des Spektrogramms

Gemäß des im Abbildung 3.4-1 dargestellten Ablaufdiagramms wird der Schalldruckpegel für einen definierbaren Frequenzbereich aufgenommen.

¹¹ Die Beschreibung der Programme ist im Anhang 3 dargestellt.

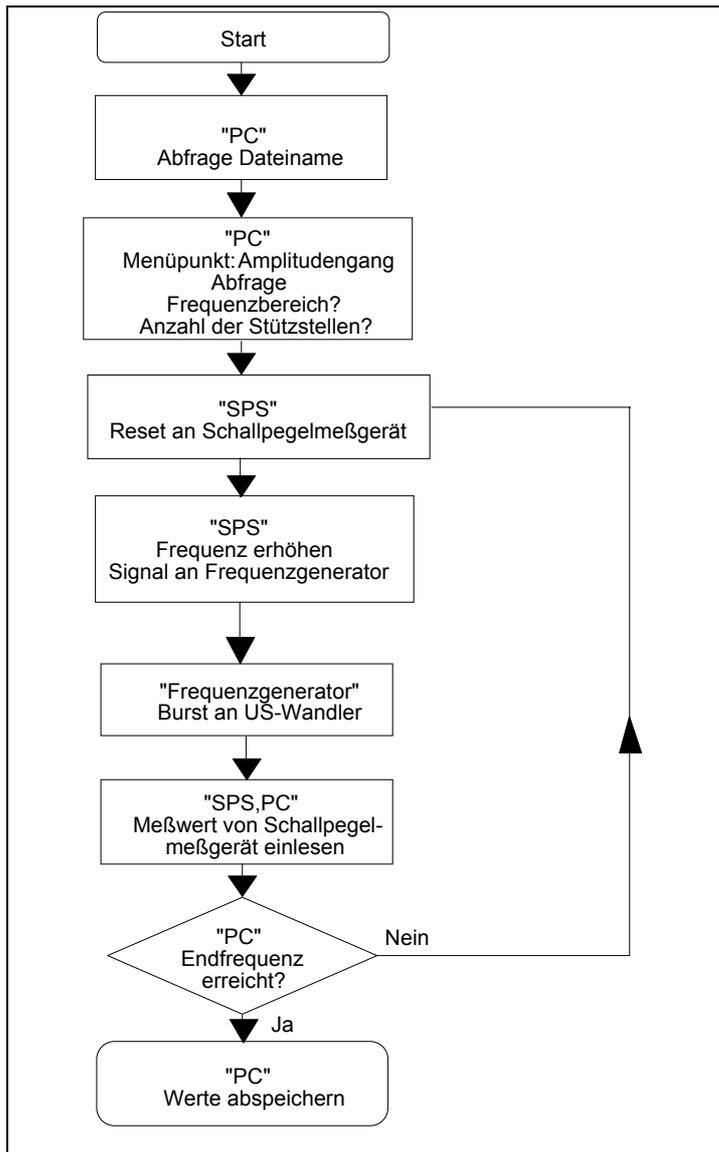


Abbildung 3.4-1: Ablaufdiagramm Messprogramm „Spektrogramm“

Zunächst wird der Ultraschallwandler mithilfe des Schrittmotors auf die 0°-Position gedreht und während der gesamten Messung dort fixiert (vgl. Abbildung 3.4-2).

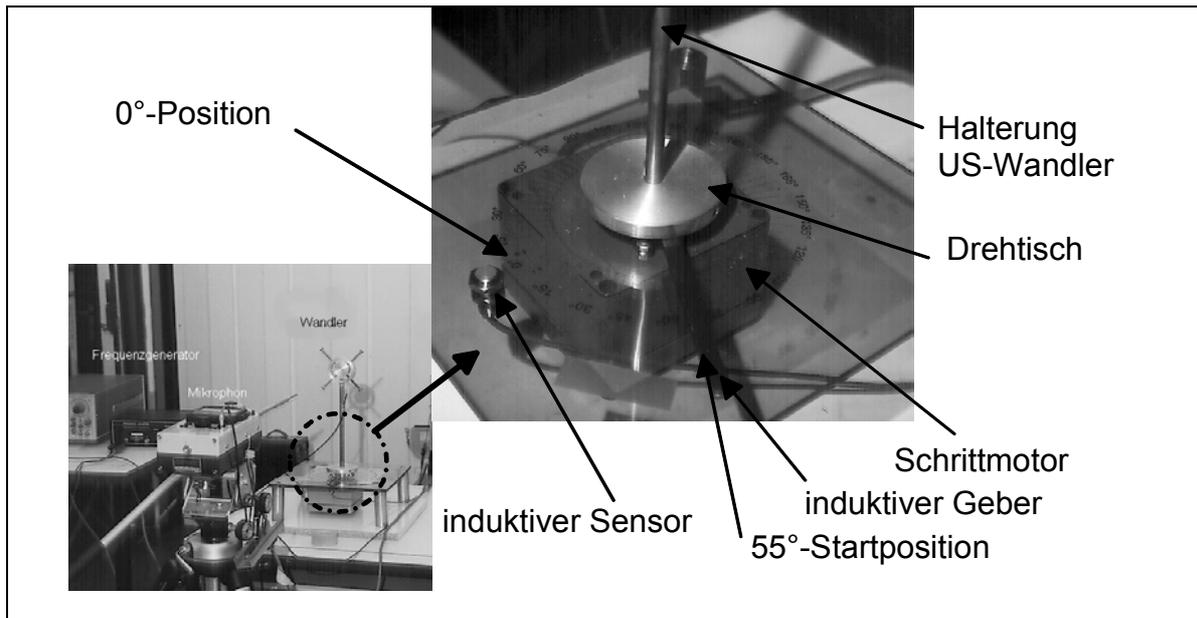


Abbildung 3.4.-2: Fotografische Darstellung des Drehtisches

Anschließend wird der US-Wandler mithilfe des Frequenzgenerators zu Schwingungen angeregt. Hierbei wird der VCO-Eingang des Frequenzgenerators genutzt. Über diesen Eingang ist es möglich, durch Anlegen einer definierten Gleichspannung eine bestimmte Frequenz zu erzeugen. Der vom Mikrofon empfangene Schalldruck wird vom Pegelmessgerät als Schalldruckpegel umgeformt und der SPS zur Verfügung gestellt. Dieser Wert wird anschließend auf den PC übertragen. Danach wird der Frequenzgenerator erneut mit einer etwas größeren Gleichspannung angesteuert, so dass der US-Wandler mit einer höheren Frequenz angeregt wird.

Überprüfungen von Soll- und Ist- Frequenzwerten mithilfe eines digitalen Frequenzmessgerätes ergaben, dass die Abweichungen unterhalb von 1% lagen. Der gemessene Schalldruck wird wiederum gewandelt und vom PC eingelesen. Diese Programmabfolge wird solange wiederholt, bis die Endfrequenz erreicht ist.

3.4.2 Experimentelles Messprogramm zur Bestimmung der Richtcharakteristik

Der Ablauf einer Messung für die Aufnahme der Richtcharakteristik geht aus dem Ablaufdiagramm gemäß Abbildung 3.4.-3 hervor.

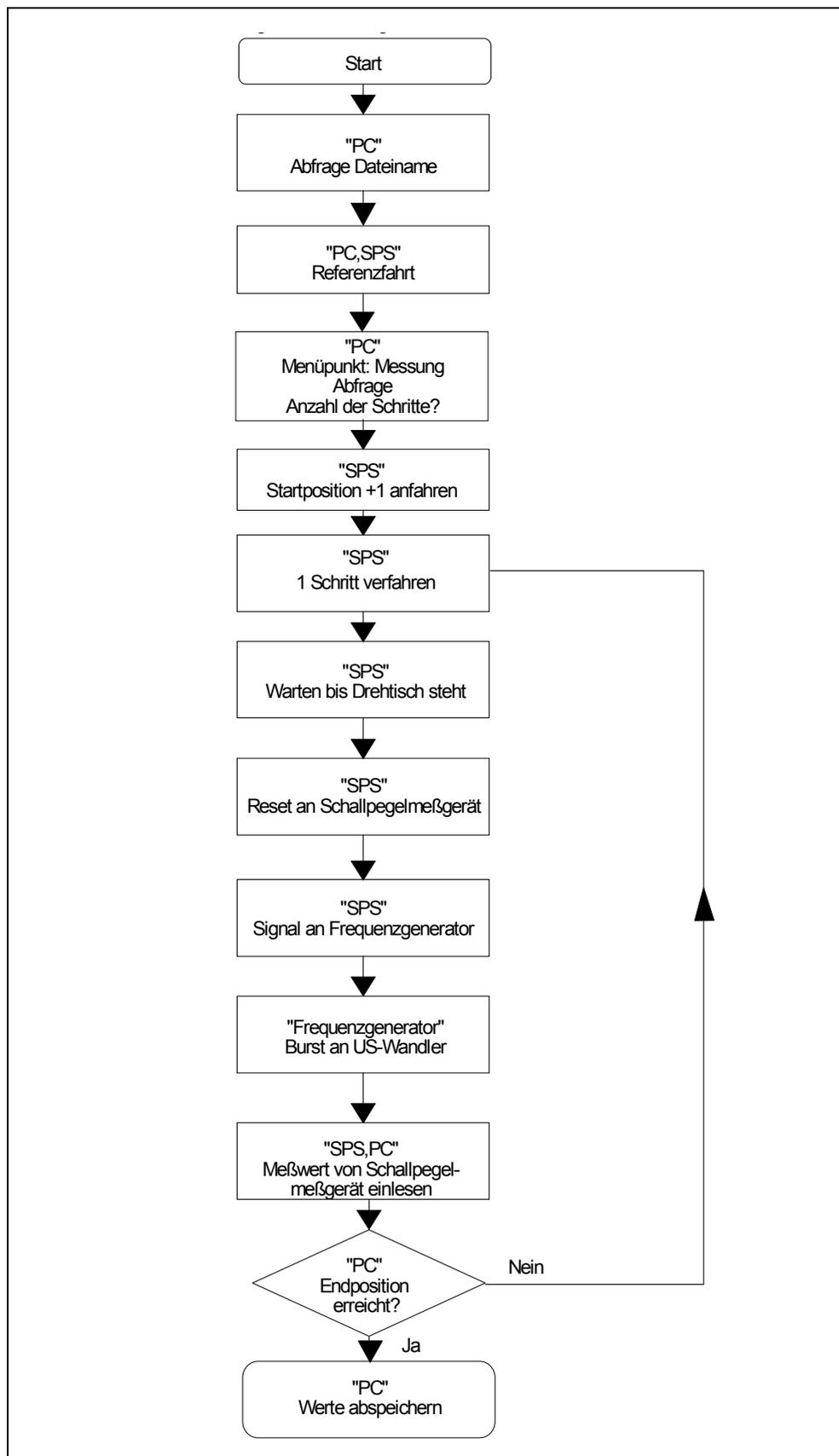


Abbildung 3.4-3: Ablaufdiagramm des Messprogramms „Richtcharakteristik“

Zunächst wird der Ultraschallwandler in die Startposition gedreht. In der Abbildung 3.4-2 ist das Beispiel für die Startposition von 55° dargestellt. Die Bezugsachse des US-Wandlers stimmt mit der des induktiven Gebers überein.

Nach einer Wartezeit von 10s wird der Analogausgang des Schallpegelmessgerätes gelöscht. Anschließend wird der Ultraschallwandler mithilfe des Frequenzgenerators zu Schwingungen angeregt. Der vom Mikrofon empfangene Schalldruck wird nun vom Pegelmessgerät als Schalldruckpegel umgeformt und als Analogwert bereitgestellt. Dieser Analogwert wird von der SPS ausgelesen und auf den PC übertragen. Nachfolgend wird der Ultraschallwandler um einen weiteren Schritt verfahren. Dies erfolgt durch Drehung des Drehtisches, der mit einem Schrittmotor verbunden ist. Die Auflösung des Motors beträgt +/- 0,10°.

Diese Schrittfolge wird solange wiederholt, bis die Endposition des Ultraschallwandlers erreicht ist. Die Hardware-Kopplung zwischen PC und SPS wird über die serielle Schnittstelle (RS232) realisiert (vgl. Kap. 3.3.1). Die Programmierung der SPS erfolgte mithilfe der Programmiersprache Anweisungsliste unter Dolog AKF der Fa. AEG. Die grafische Darstellung der entsprechenden Messkurven ist alternativ als VGA-Bildschirmdarstellung¹² oder als WMF-Grafik-Datei¹³ realisiert.

3.5 Fehlerbetrachtung

Bei der Betrachtung der Fehler ist zwischen den beiden Messverfahren „Spektrogramm“ und „Richtcharakteristik“ zu unterscheiden.

3.5.1 Fehlerbetrachtung „Spektrogramm“

Die betreffenden Ungenauigkeiten sind bereits im Rahmen der Einzelbeschreibung dargestellt worden. Prinzipiell sind die beiden Messgrößen „Frequenz“ und „Schalldruckpegel“ fehlerbehaftet. Zusammenfassend lassen sich für die Aufnahme des Spektrogramms folgende Fehleranteile superponieren:

¹² VGA-Bildschirmdarstellung: Video-Grafik-Adapter- Format mit einer Auflösung auf dem Grafik-Bildschirm von 800 x 600 Pixel.

¹³ WMF-Grafik-Datei: Windows-Meta-File-Format ist ein vektororientiertes Grafik-Speicherformat.

Einfluss auf Frequenzmessung	Fehlerbereich der Messwerte	Einfluss auf Schallpegelmessung	Fehlerbereich der Messwerte
Fertigungstoleranz Ultraschallwandler	+/- 4%	Genauigkeit des Pistofons	+/- 0,25dB
Genauigkeit des Frequenzgenerators	+/- 1%.	Auflösung Analog-Digitalwandler der SPS	+/- 5% $10\log(1,05)=0,4238 \text{ dB}$ = +/- 0,42dB
		Toleranz Messverstärker Schallpegelmessgerät	+/- 1dB
		Umgebungseinflüsse (Temperaturänderungen, Feuchtigkeitschwankungen, Wind)	+/- 0,2dB
insgesamt	+/- 5%	insgesamt	+/- 1,9dB

Tabelle 3-4: Darstellung der Fehleranteile für das Messprogramm „Spektrogramm“

3.5.2 Fehlerbetrachtung „Richtcharakteristik“

Bei der Richtcharakteristik sind die Messgrößen „Frequenz“ und „Schalldruckpegel“ in Abhängigkeit vom Winkel „ φ “ der Bezugachsen des US-Wandlers und des Mikrofons relevant.

Da bei definiertem Winkel „ φ “ die Aufnahme der Messwerte sowohl für das Messprogramm „Spektrogramm“ als auch für das Programm „Richtcharakteristik“ identisch ist, gelten dieselben Toleranzen. Zu berücksichtigen ist jedoch die Toleranz der Positionierung des Drehtellers, die durch die Auflösung des entsprechenden Schrittmotors gegeben ist.

	Einfluss auf Frequenzmessung	Einfluss auf Schallpegelmessung	Einfluss auf Winkelmessung
	vgl. Kap. 3.5.1	vgl. Kap. 3.5.1	Auflösung Schrittmotor: 0,1°
Fehlerbereich der Messwerte insgesamt	+/- 5%	+/- 1,9 dB	+/- 0,1°

Tabelle 3-5: Darstellung der Fehleranteile für das Messprogramm „Richtcharakteristik“

3.6 Aus- und Bewertung der Messergebnisse¹⁴

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden Schallwandler gemäß der in Abbildung 3.2-1 dargestellten Geometrie untersucht.

Da die Eigenfrequenzen und damit auch die Öffnungswinkel des vom US-Wandler erzeugten Schallfeldes sowohl von der Dicke als auch vom Durchmesser der Platte

¹⁴ Die Beschreibung sämtlicher Messergebnisse und die Auswertung von Güte- und Dämpfungswerte sind im Anhang 4 dargestellt.

beeinflusst werden (vgl. Gleichung 2 und Gleichung 3), werden diese Parameter variiert. Aufgrund der räumlichen Verhältnisse des CIM-Lernbetriebes wurden die Abmessungen gemäß Tabelle 3-6 gewählt.

Bei konstanten Abmaßen der PXE-Scheibe (Durchmesser: 10mm, Dicke: 1mm) werden die Durchmesser der Wandlergehäuse „d“ in einem Bereich zwischen 20mm und 35mm variiert.

Die geringste Plattendicke „t“ beträgt 0,5mm und die maximale Plattendicke 2mm.

Die Abmessungen der untersuchten US-Wandler sind in der Tabelle 3-6 zusammengefasst.

Durchmesser „d“	Plattendicke „t“
20mm	0,25mm, 0,5mm, 1mm, 1,5mm und 2mm
24mm	0,25mm, 0,5mm, 0,7mm, 1mm, 1,5mm und 2mm
25mm	0,5mm, 0,7mm, 1mm, 1,5mm und 2mm
30mm	0,5mm, 0,7mm, 1mm, 1,5mm und 2mm
35mm	0,5mm, 0,7mm, 1mm, 1,5mm und 2mm

Tabelle 3-6: Abmessungen der untersuchten US-Wandler

3.6.1 Auswertung „Spektrogramm“

Beispielhaft wird das ermittelte Spektrogramm des US-Wandlers mit einem Durchmesser „d“ von 35mm und einer Plattendicke „t“ von 1,5mm in Abbildung 3.1-1 mit den Resonanzfrequenzen der Grundschiwingung und der 1. rotationssymmetrischen Oberschiwingung dargestellt (vgl. Kap. 3.1.1).

Für die Beurteilung der experimentellen Ergebnisse werden die Ergebnisse der am LTD I durchgeführten Versuchsreihen mit denen aus der Literatur¹⁵ (Koch /104/) verglichen. In der Abbildung 3.6-4 sind die Verbindungslinien der gemessenen Resonanzfrequenzen von Wandlern mit jeweils gleichem Durchmesser der am LTD I durchgeführten Versuchsreihen durchgezogen und die der Literaturdaten gestrichelt dargestellt. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass der tolerierte Messbereich des Schallpegelmessgerätes bis Frequenzen von maximal 70kHz spezifiziert ist (vgl. Kapitel 3.3.3). Deutlich ist die Zunahme der Resonanzfrequenzen mit größerer

¹⁵ bei den von Koch /104/ publizierten Versuchsreihen handelt es sich um Wandler mit Durchmessern von 20mm, 25mm und 30mm.

Plattendicke und kleinerem Wandlerdurchmesser erkennbar.

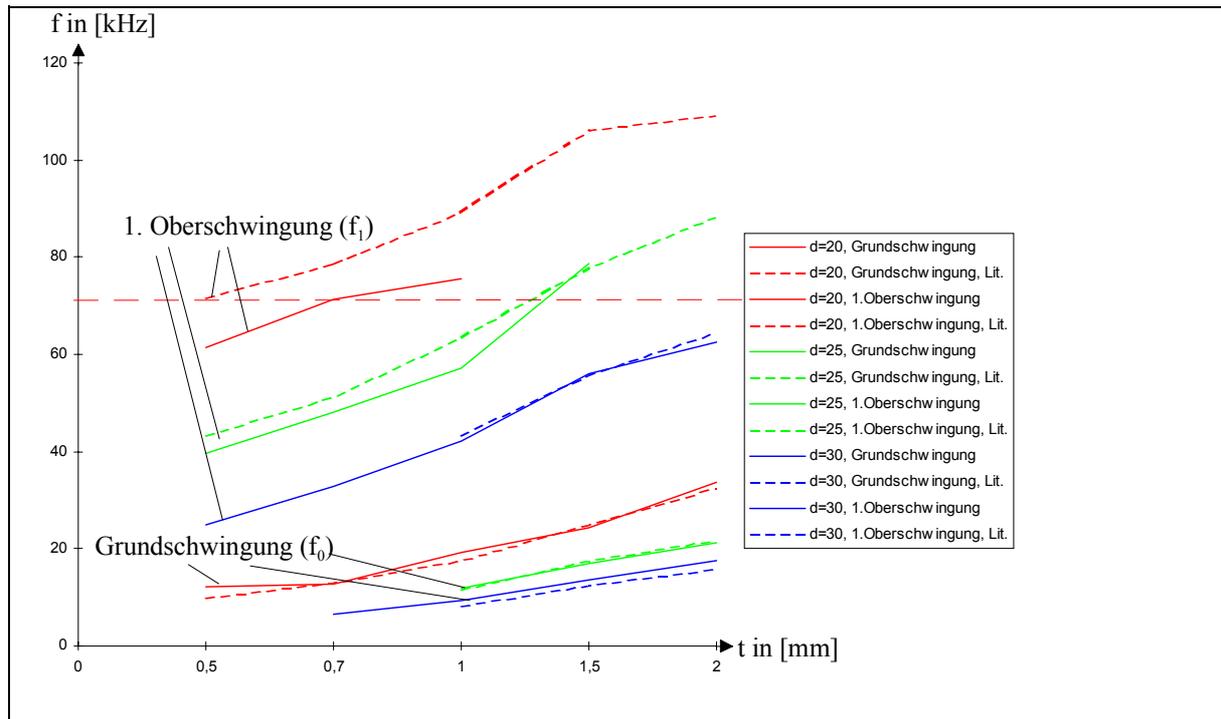


Abbildung 3.6-4: Vergleich der am LTD I gemessenen Resonanzfrequenzen der untersuchten US-Wandler (Auswahl gemäß Tabelle 3-6, durchgezogene Linie) mit den Resonanzfrequenzen aus der Literatur (gestrichelte Linie) Koch /104/16:17

Sowohl die gemessenen Resonanzfrequenzen der Grundschwingung als auch die gemessenen Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung haben eine maximale Abweichung 17,5%. Bei den publizierten Ergebnissen (vgl. Abbildung 3.6-4) wurde eine Abweichung von maximal 17% angegeben. Die größte Abweichung ist bei dem kleinsten Wandlertyp mit einem Durchmesser von 20mm und einer Plattendicke von 0,5mm zu beobachten. Diese Abweichung lässt sich mit dem relativ kleinen Durchmesser erklären, weil sich die Knotenlinie der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung sehr nahe an der Einspannung des US-Wandlers befindet.

Die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit einer Dicke von 1mm und einem Durchmesser von 20mm ist in einem Frequenzbereich oberhalb von 70kHz und damit außerhalb des tolerierten

¹⁶ Alternativ wird die Grundschwingung mit „ f_0 “ und die 1. Oberschwingung mit „ f_1 “ bezeichnet.

¹⁷ Die Daten zu den Abbildungen sind im Anhang 4 dargestellt.

Erfassungsbereiches des Messsystems.

3.6.2 Auswertung „Richtcharakteristik“

In der Abbildung 3.6-5 ist die Richtcharakteristik eines US-Wandlers aus eigenen Versuchsreihen mit einem Durchmesser „d“ von 24mm und einer Plattendicke „t“ von 1,5mm bei einer Resonanzfrequenz von $f_1 = 81,88\text{kHz}$ dargestellt. Deutlich sind die Haupt- und Nebenkeulen sowie die Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ erkennbar.

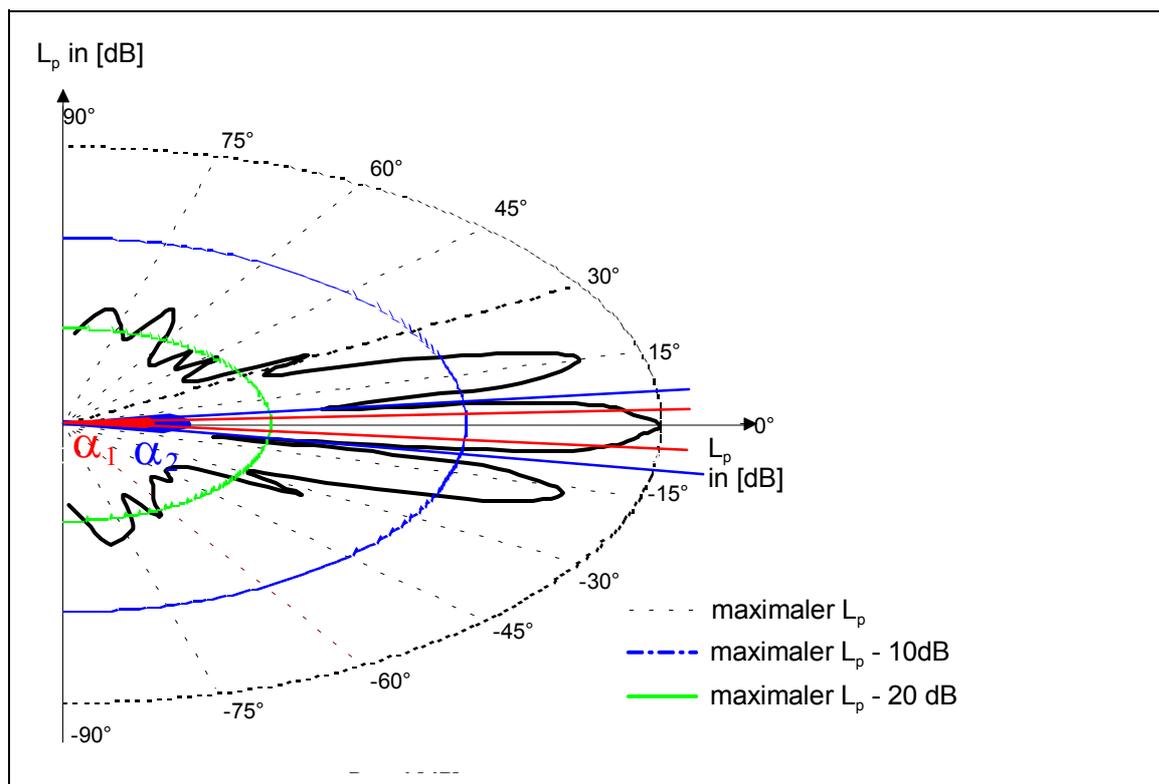


Abbildung 3.6.-5: Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1, α_2 eines US-Wandlers mit $d=24\text{mm}$ und $t=1,5\text{mm}$ gemäß Tabelle 3-6^{18;19}

Der Winkel „ α_1 “ beträgt $9,6^\circ$ bzw. „ α_2 “ = $17,0^\circ$.

In der Abbildung 3.3-6 ist das Richtdiagramm eines US-Wandlers mit deutlich größerem Plattendurchmesser (Durchmesser: 35mm, Plattendicke: 1,5mm) dargestellt. Aufgrund des größeren Plattendurchmessers ist die Resonanzfrequenz niedriger und der Öffnungswinkel der Schallabstrahlung größer (vgl. Gleichung 2 und

¹⁸ Für sämtliche Abbildungen der Richtungswinkel α_1 bzw. α_2 ist zu beachten, dass sie unmaßstäblich eingezeichnet sind.

¹⁹ Definition Schalldruckpegel „ L_p “ siehe S. 65

Gleichung 3). Bei einer Resonanzfrequenz von 44,480kHz beträgt der Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ 10,8° bzw. 22,8°.

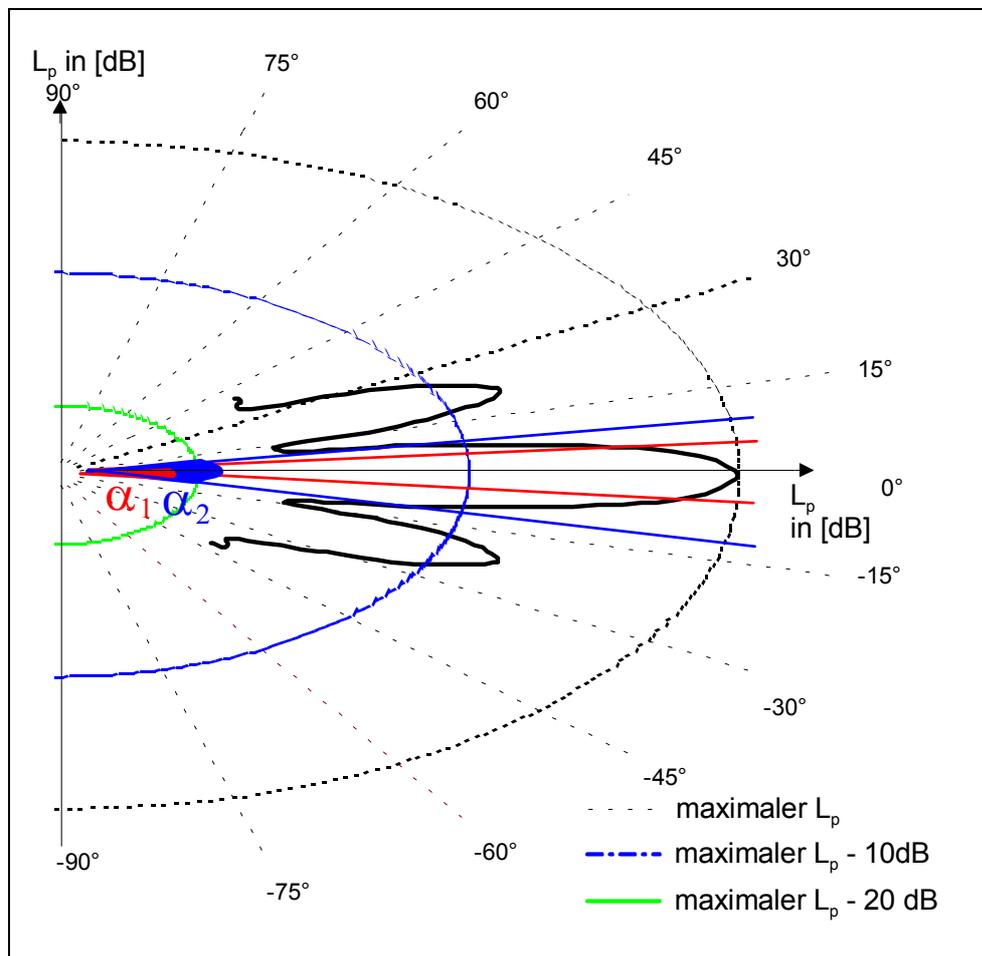


Abbildung 3.6-6: Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1 , α_2 eines US-Wandlers mit $d=35\text{mm}$ und $t=1,5\text{mm}$ gemäß Tabelle 3-6,

1.1.2.1 Messergebnisse symmetrischer US-Wandler

In der Abbildung 3.6-7 sind die theoretischen und experimentell bestimmten Öffnungswinkel „ α_2 “ für symmetrische US-Wandler mit Durchmesser von 24mm, 30mm und 35mm in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Für die theoretische Berechnung wird die aus Gleichung 2 abgeleitete Gleichung 4 herangezogen²⁰. Die Übereinstimmung der Messwerte ist hoch. So liegen die Abweichung in einem Frequenzbereich bis 70kHz bei maximal 10,7%.

$$\alpha_2 \approx \arcsin\left(\frac{c}{d \cdot f}\right) \quad (4)$$

²⁰ Gleichung 2 siehe Seite 15

Gemäß Gleichung 4 ist der Abfall des Öffnungswinkels „ α_2 “ mit steigender Frequenz „ f “ erkennbar.

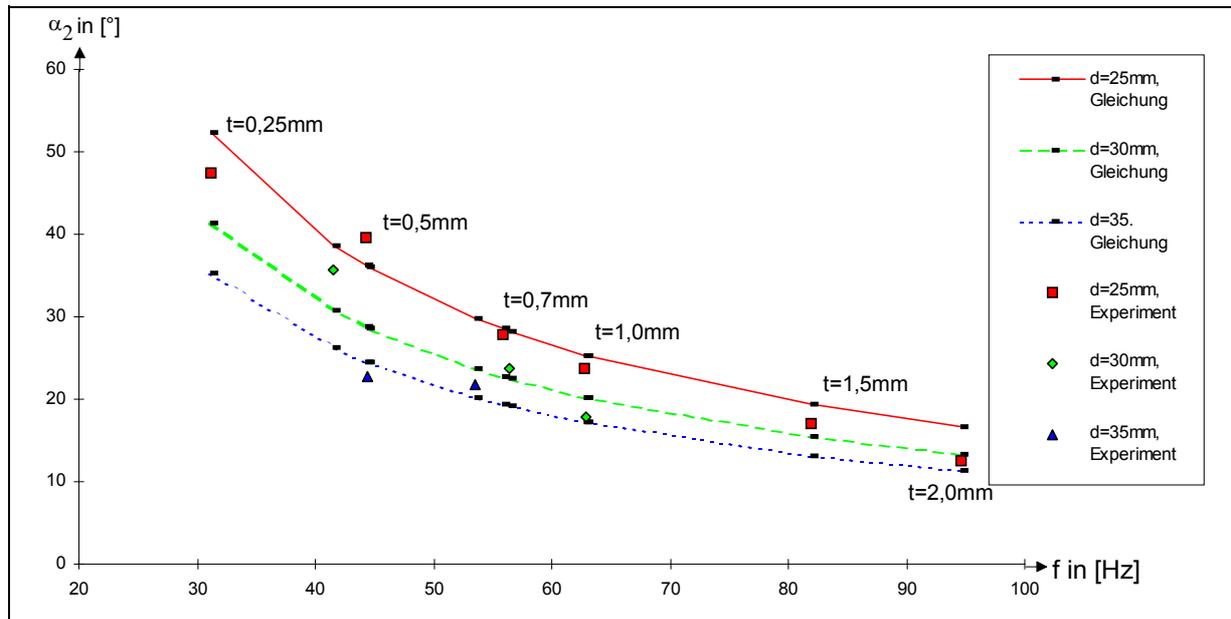


Abbildung 3.6-7: Öffnungswinkel α_2 als Funktion von f aus den Experimenten am LTD I für US-Wandler mit Durchmesser d von 25, 30 und 35 mm und Gleichung 4.21; 17, S.43

In der Abbildung 3.6-8 sind die Öffnungswinkel „ α_1 “ für die US-Wandler mit einem Durchmesser „ d “ von 24 mm und einer Plattendicke „ t “ zwischen 0,25 mm und 1,0 mm dargestellt.

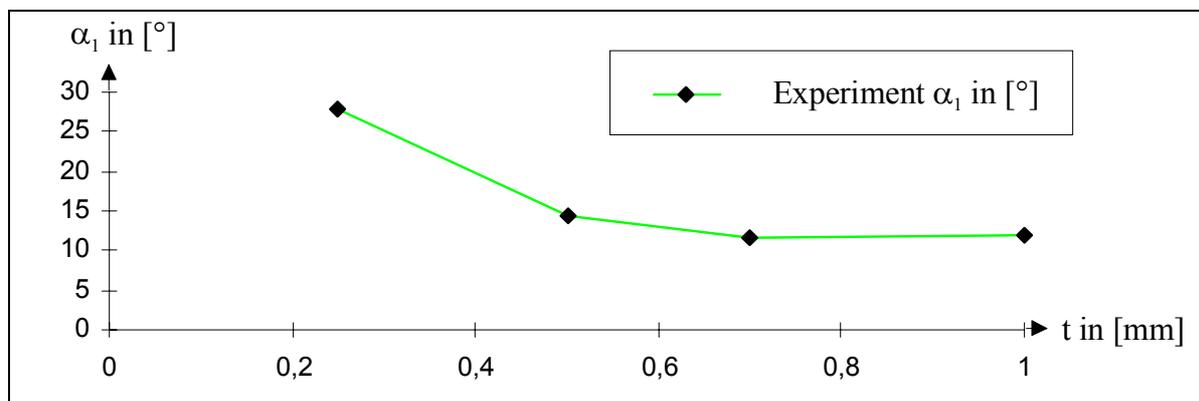


Abbildung 3.6-8: Öffnungswinkel α_1 als Funktion der Dicke t aus den Experimenten am LTD I für mehrere US-Wandler mit einem Durchmesser d von 24 mm¹⁷, S.43

Beachtet man das Verhalten der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ in Abbildung 3.6-7 und Abbildung 3.6-8, so ist ein ähnliches Verhalten beider Öffnungswinkel zu beobachten. Der Öffnungswinkel „ α_2 “ ist zirka doppelt so groß wie der Öffnungswinkel „ α_1 “.

²¹ Die experimentelle Ermittlungen der Öffnungswinkel ist im Anhang 1 dargestellt.

In der Abbildung 3.6-9 sind die Richtcharakteristika von mehreren Wandlern mit einem Durchmesser von 24mm und einer Plattendicke zwischen 0,25mm und 2,0mm dargestellt. Bemerkenswert sind die mit zunehmender Plattendicke anwachsenden Nebenkeulen. Für den US-Wandler mit einer Plattendicke von 2mm beträgt die Empfindlichkeit der Nebenkeulen gegenüber der Hauptkeule nur 3dB. Dies hat zur Folge, dass dieser Wandlertyp für eine Abstandsmessung, die nach dem „ α_1 “ oder „ α_2 “ Winkel ausgewertet, ungeeignet ist. Bei Anwendung von Wandlern mit dieser Richtcharakteristik kann nicht unterschieden werden, ob die Signale von der Haupt- oder Nebenkeule ausgehen. Damit ist eine eindeutige Richtungszuordnung und damit eine sichere Entfernungsbestimmung zwischen US-Wandler und reflektierendem Objekt nicht möglich. Da der Übergang von Haupt- zu Nebenkeulen durch große Pegelverluste begrenzt wird, werden in diesem Bereich keine Echo-Signale empfangen, d.h. der US-Wandler ist in diesem Bereich „blind“ und es kommt zu Fehlmessungen.

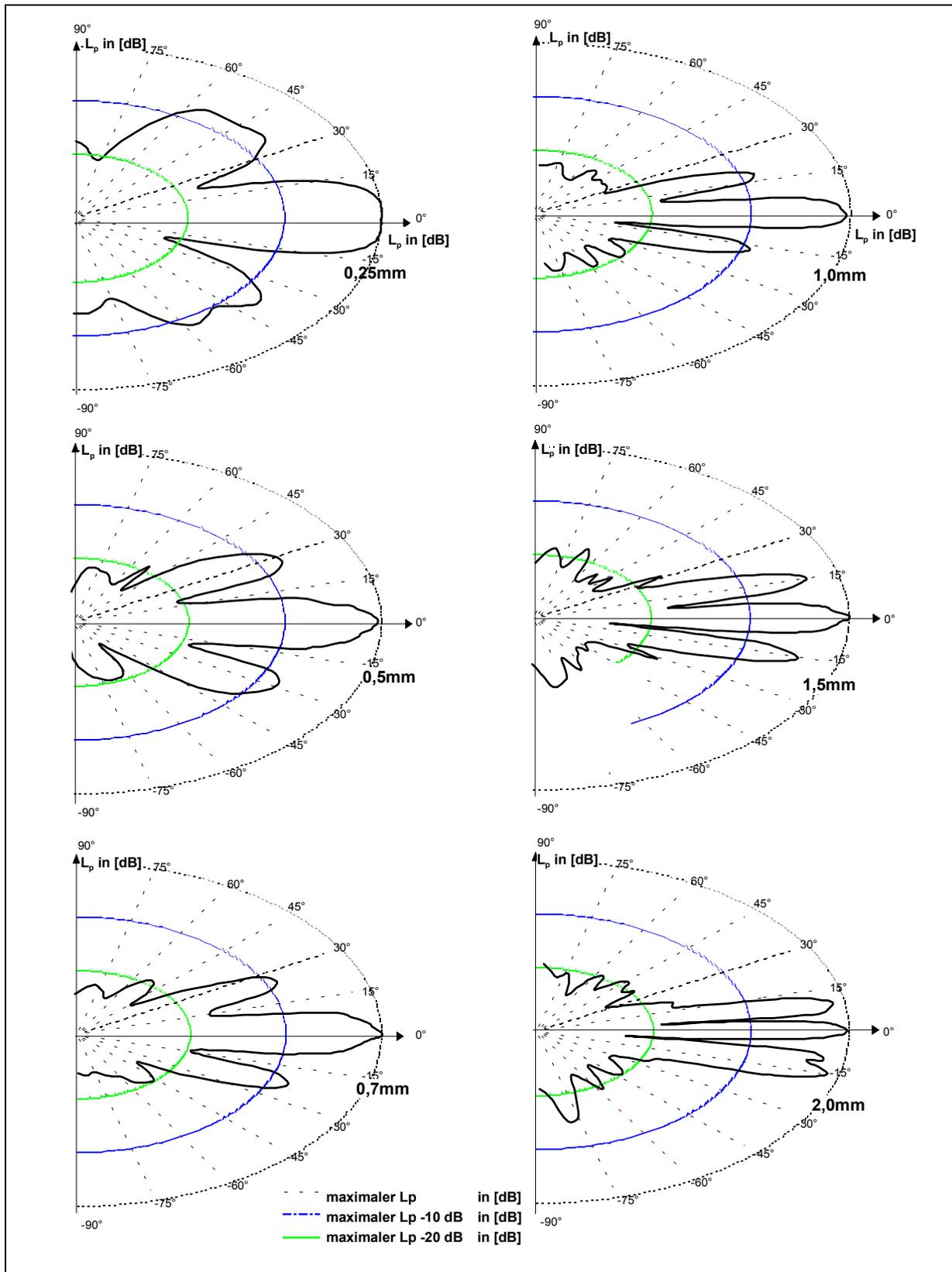


Abbildung 3.6-9: Richtcharakteristika aus den Experimenten am LTD I für mehrere US-Wandler mit einem Durchmesser „ d “ von 24mm und Plattendicken „ t “ von 0,25mm; 0,5mm; 0,7mm; 1,0mm; 1,5mm und 2,0mm

3.6.2.2 Messergebnisse von Wandlern mit Beschwerungsringen

Um das Schwingungsverhalten und damit das Abstrahlverhalten von Ultraschallwandlern zu beeinflussen, wird in der Praxis die schwingende Platte mit sogenannten Beschwerungsringen versteift (vgl. Mágori /105/). Dieses Konstruktionsprinzip hat den Vorteil, dass die Wandlertypen gemäß der in Abbildung 3.2-1 dargestellten Geometrie verwendet und lediglich durch Aufkleben eines Beschwerungsringes erweitert werden können.

Im Rahmen der am LTD I durchgeführten Experimente wurde exemplarisch ein Wandlertyp mit den in Abbildung 3.6-10 dargestellten geometrischen Abmessungen untersucht. Dieser US-Wandler mit dem großen Plattendurchmesser von „d“=35mm hat im Gegensatz zu den kleineren Wandlertypen den Vorteil, dass der Beschwerungsring relativ leicht zentriert und fixiert werden kann.

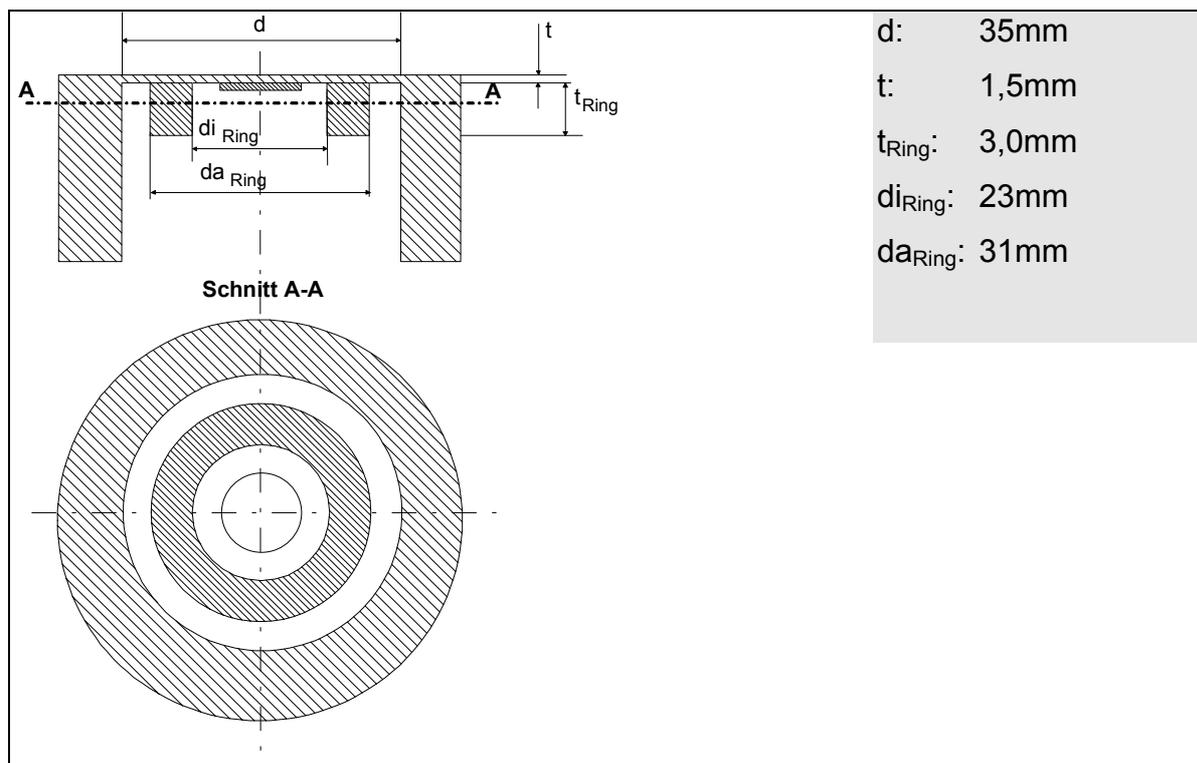


Abbildung 3.6-10: Schnittdarstellung des am LTD I hergestellten US-Wandlers mit Beschwerungsring

Analysiert man die Richtcharakteristika von zwei geometrisch ähnlichen Wandlern, die sich nur durch den Beschwerungsring unterscheiden (vgl. Abbildung 3.6-11, Abbildung 3.6-6), lässt sich Folgendes feststellen:

Bedingt durch die niedrigere Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des Wandlers mit Beschwerungsring ist der Öffnungswinkel „ α_1 “

deutlich größer als der Öffnungswinkel des geometrisch gleichen US-Wandlers ohne Beschwerungsring.

Der US-Wandler ohne Beschwerungsring hat bei einer Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung von 44,480kHz den Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ von 10,8° bzw. 22,8°. Der US-Wandler nach Abbildung 3.6-10 mit Beschwerungsring hat eine Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung von 33kHz und den Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ von etwa 16° bzw. 30°.

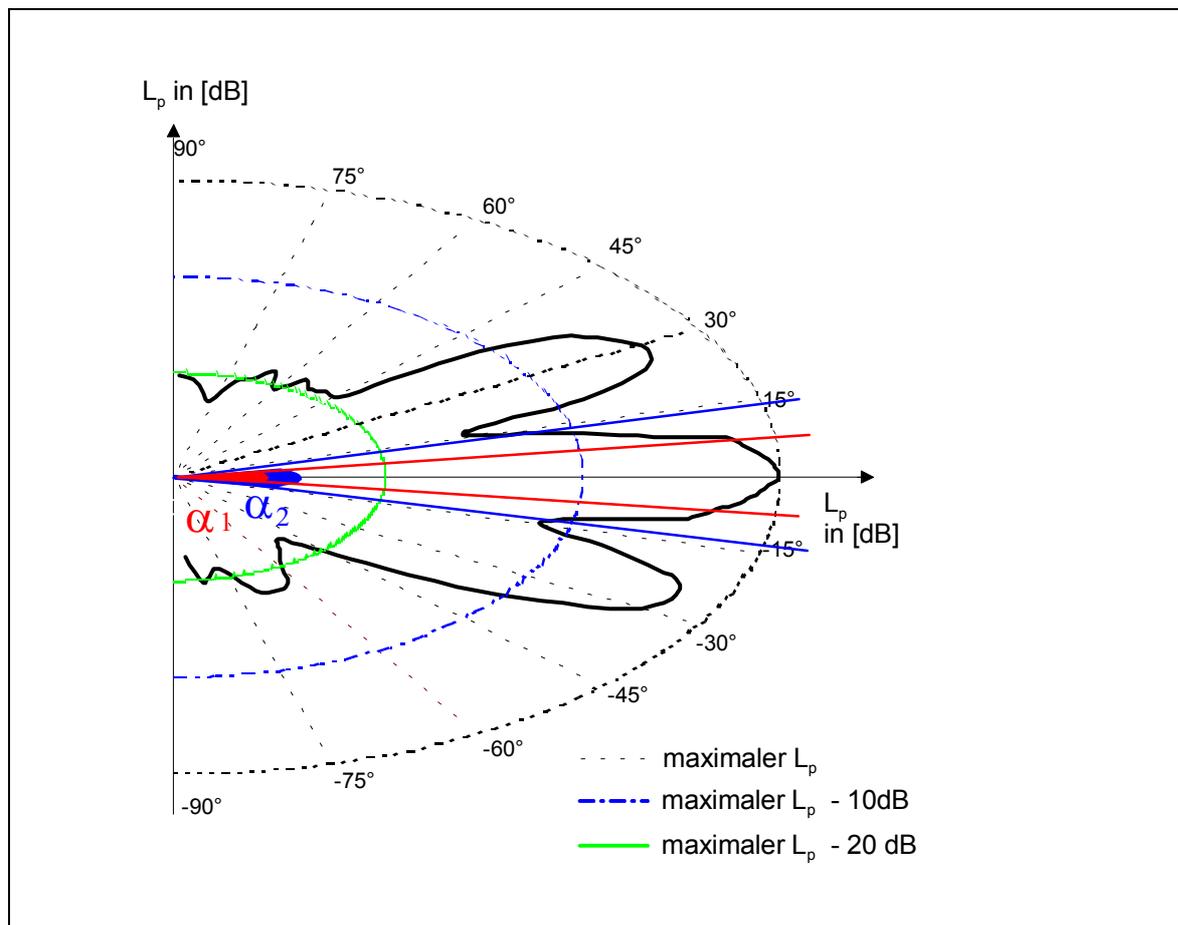


Abbildung 3.6-11: Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1 , α_2 eines US-Wandlers mit Beschwerungsring gem. Abbildung 3.6-10

3.6.2.3 Messergebnisse von Wandlern mit Beschwerungsringsegmenten

Für die Erzeugung von asymmetrischen Schallfeldern wurden Wandlertypen verwendet, die sich von den Wandlern gemäß Abbildung 3.6-10 dadurch unterscheiden, dass die Geometrie der Beschwerungsringe verändert wurde.

Die Geometrie des US-Wandlers ist in der Abbildung 3.6-12 dargestellt.

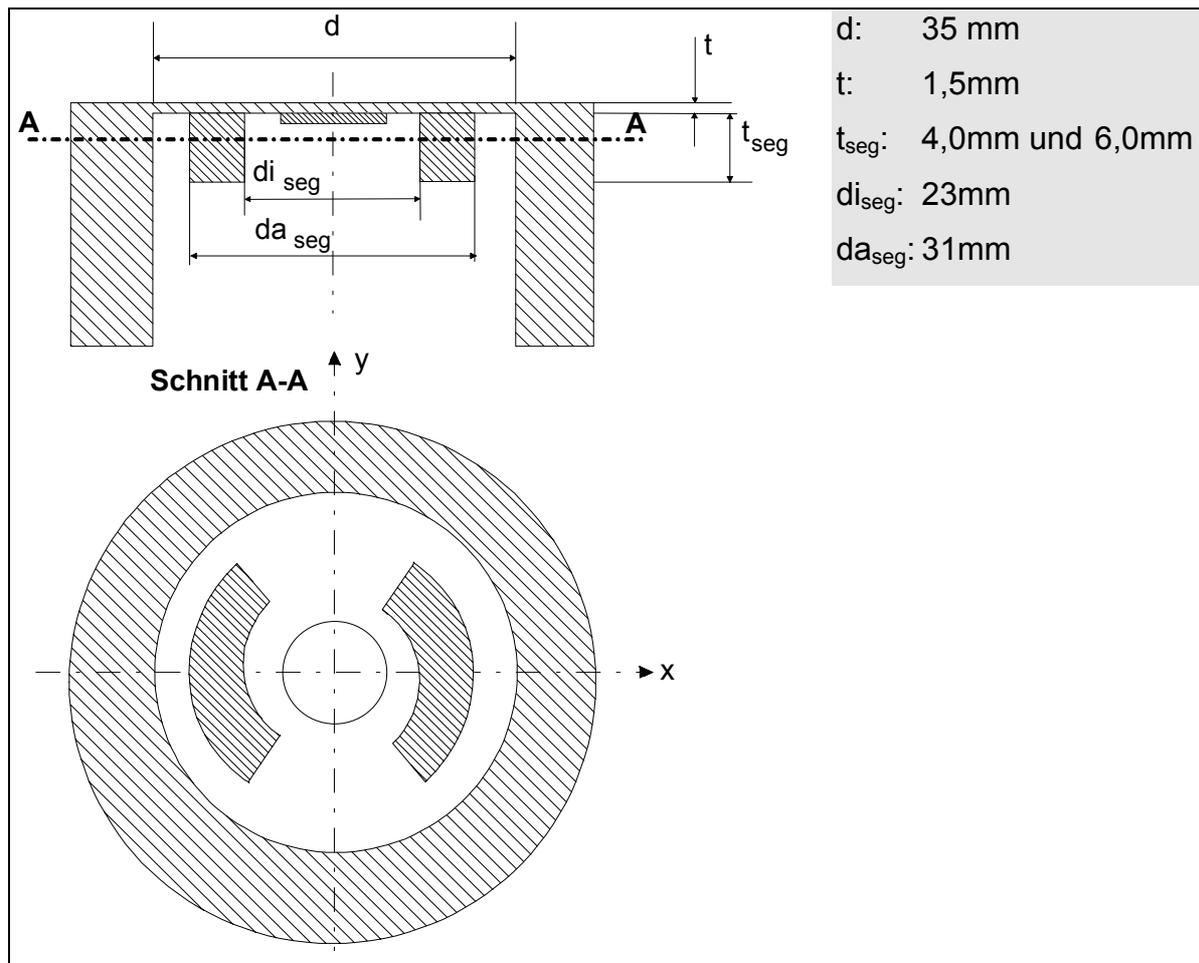


Abbildung 3.6-12: Schnittdarstellung des am LTD I hergestellten US-Wandlers mit Beschwerungsringsegmenten

In der Abbildung 3.6-13 ist der Einfluss der Segmentdicke auf die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung dargestellt.

Obwohl die Bezeichnung der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für diesen US-Wandler sachlich nicht korrekt ist, wird der Begriff aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Messergebnissen beibehalten. Während die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit einem Plattendurchmesser „d“ von 35mm und einer Dicke „t“ von 1,5mm ohne Ringsegmente 44,480kHz beträgt, fällt die Resonanzfrequenz für einen US-Wandler mit der Segmentdicke „t_{seg}“ von 4mm auf 44,400kHz, bzw. für den US-Wandler mit der Segmentdicke von 6mm auf 41,010kHz ab. Dieser Effekt lässt sich mit der zunehmenden Masse der schwingenden Platte erklären.

Aufgrund der asymmetrischen Wandlergeometrie ergeben sich je nach Orientierung der Wandlerachse unterschiedliche Richtcharakteristiken²². Bei der Aufnahme der Messdaten wurden die US-Wandler jeweils um 90° um ihre Symmetrieachse

²² Bei den Bezeichnungen liegt die Koordinatendefinition gemäß Abbildung 3.6-12 zugrunde. Wird der Wandler beim Vermessen um die x-Achse gedreht, handelt es sich um die vertikale Richtcharakteristik, bzw. bei der Drehung um die y-Achse um die horizontale Richtcharakteristik.

gedreht. Die Richtcharakteristika des US-Wandlers mit einer Segmentdicke „ t_{seg} “ von 6 mm sind in der Abbildung 3.6-14 und Abbildung 3.6-15 dargestellt.

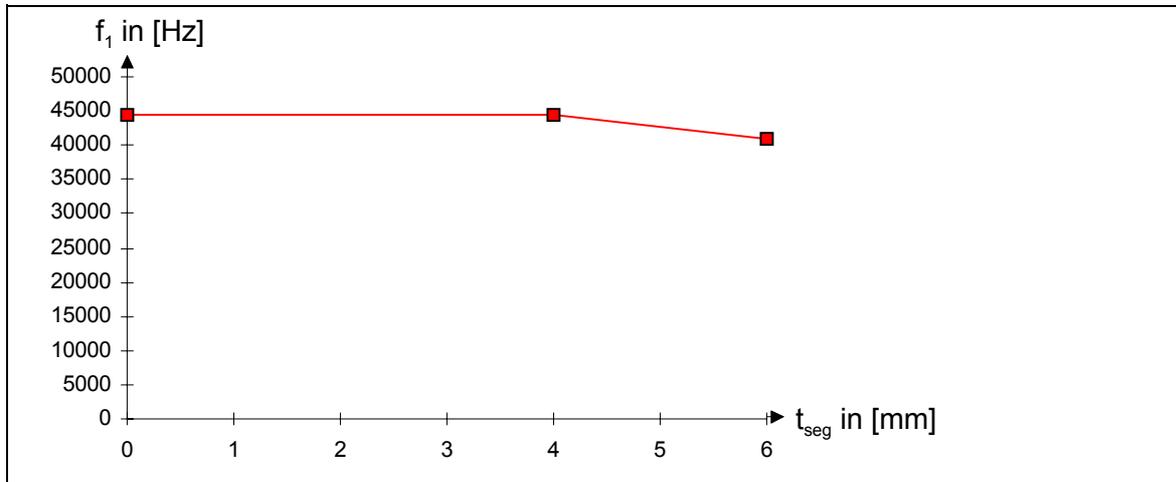


Abbildung 3.6-13: Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTD I für mehrere US-Wandler gemäß Abbildung 3.6-12^{17, S.42}

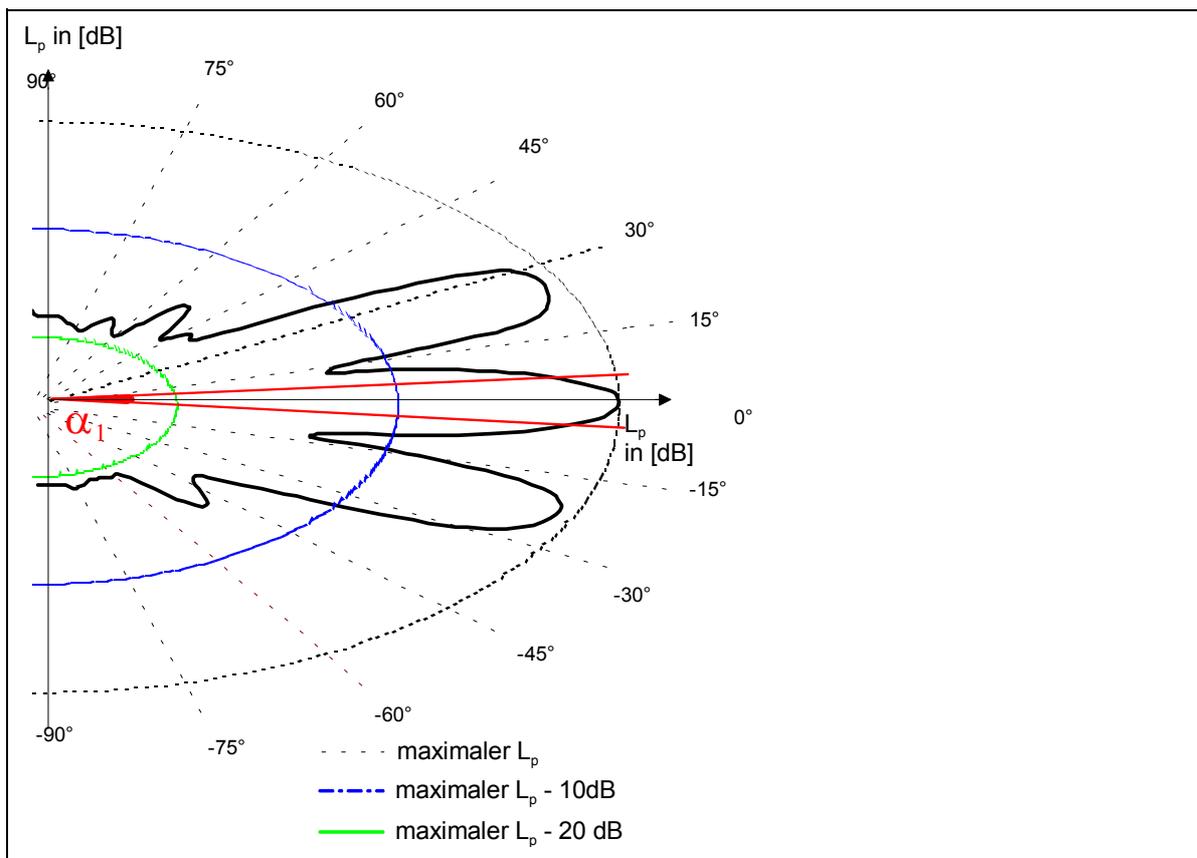


Abbildung 3.6-14: Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1 eines US-Wandlers mit $t_{\text{seg}}=6,0\text{mm}$ gemäß Abbildung 3.6-12, bei der Vermessung wurde der US-Wandler um die x-Achse gedreht^{22, S.50}

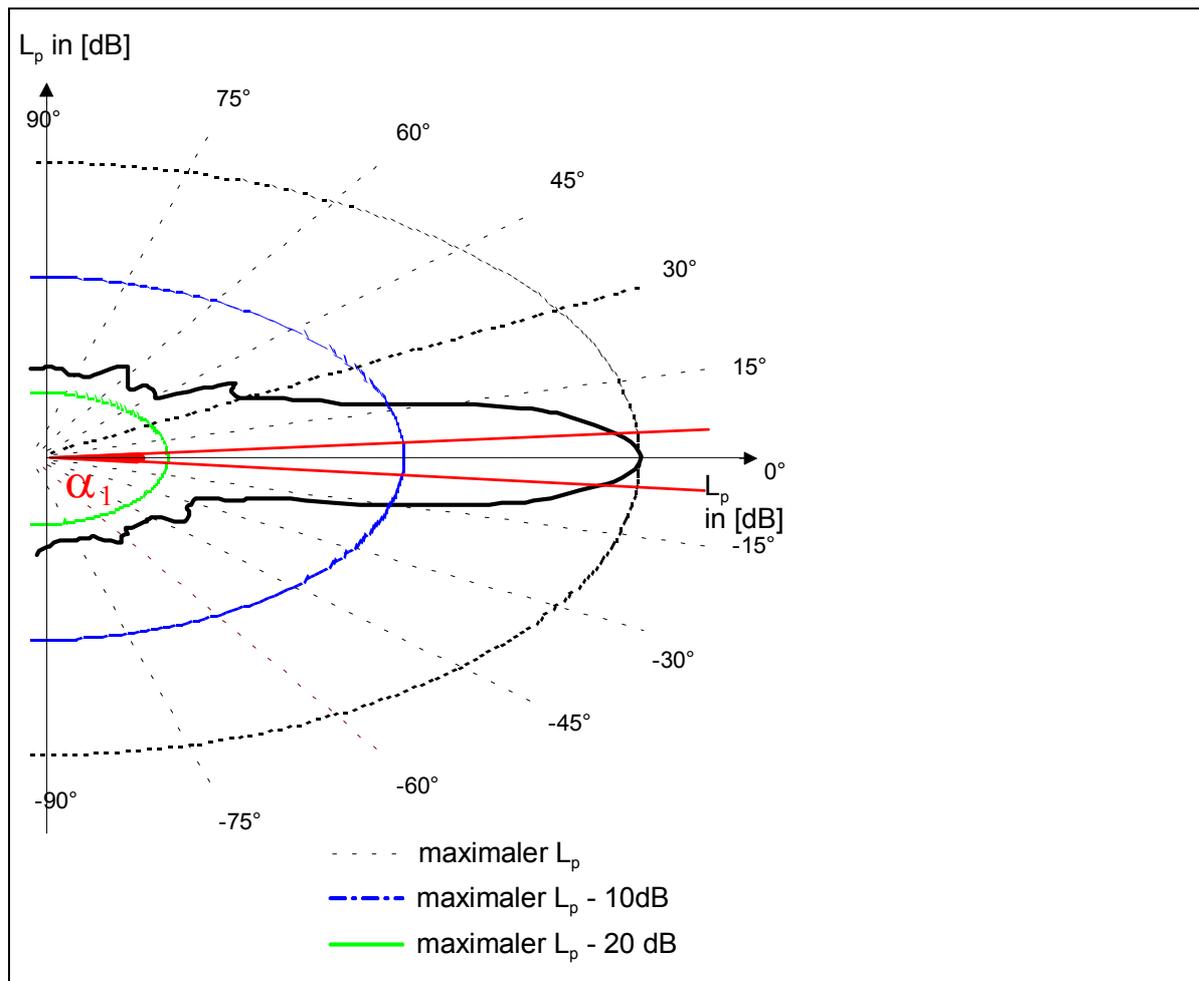


Abbildung 3.6-15: Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1 eines US-Wandlers mit $t_{\text{seg}} = 6,0 \text{ mm}$ gemäß Abbildung 3.6-12, bei der Vermessung wurde der US-Wandler um die y-Achse gedreht^{22, S.50}

In der Abbildung 3.6-16 bzw. Abbildung 3.6-17 sind die Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ dargestellt. Da es sich um asymmetrische Schallfelder handelt, sind die Öffnungswinkel in horizontaler und vertikaler Orientierung dargestellt^{22, S.50}. Für den US-Wandler ohne Segmente ($t_{\text{seg}} = 0 \text{ mm}$) sind die Öffnungswinkel in horizontaler und vertikaler Richtung identisch und betragen $10,8^\circ$ bzw. $27,8^\circ$.

Aufgrund der mit steigender Segmentdicke abnehmenden Resonanzfrequenz (vgl. Abbildung 3.6-13) verhalten sich die Öffnungswinkel „ α_1 “ ansteigend. Hierbei vergrößern sich besonders die Öffnungswinkel in der horizontalen Ebene von $10,8^\circ$ auf 17° . Ähnliches lässt sich für die Öffnungswinkel „ α_2 “ beobachten, die mithilfe des Übergangs von der Haupt- zu der Nebenkeule definiert werden. Der vertikale Öffnungswinkel „ α_2 “ ist für die US-Wandler mit Segmentdicken von $4,0 \text{ mm}$ bzw. $6,0 \text{ mm}$ mit 27° , bzw. 26° relativ konstant (vgl. Abbildung 3.6-17).

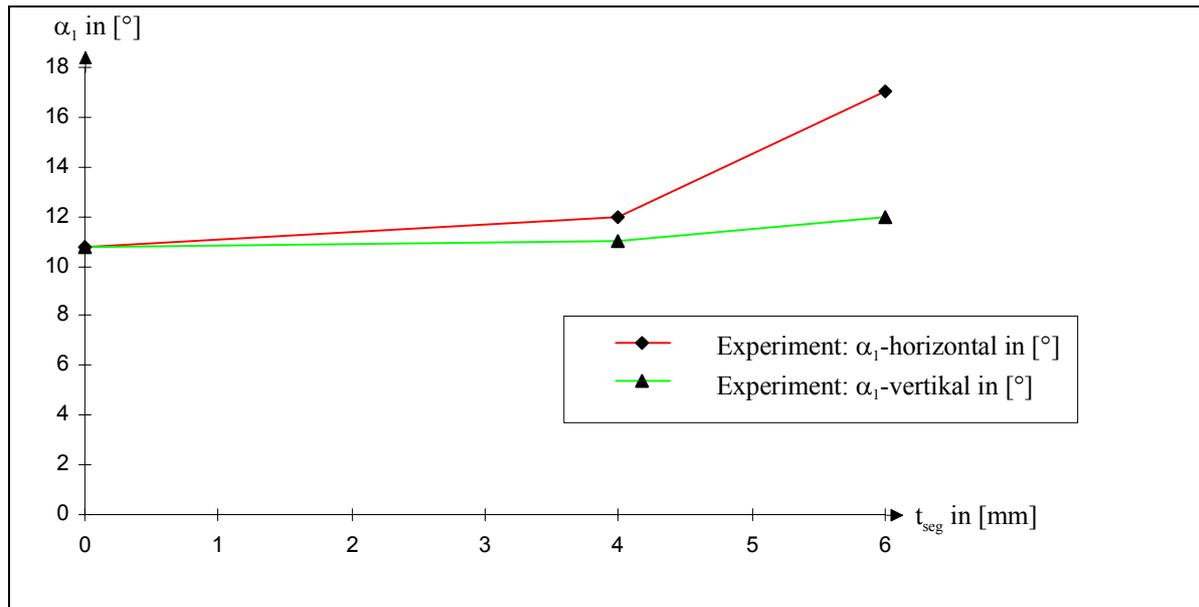


Abbildung 3.6-16: Vergleich von $\alpha_1(t_{\text{seg}})$ horizontal/vertikal als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTD I für mehrere US-Wandler gemäß Abbildung 3.6-12^{22, S.50}

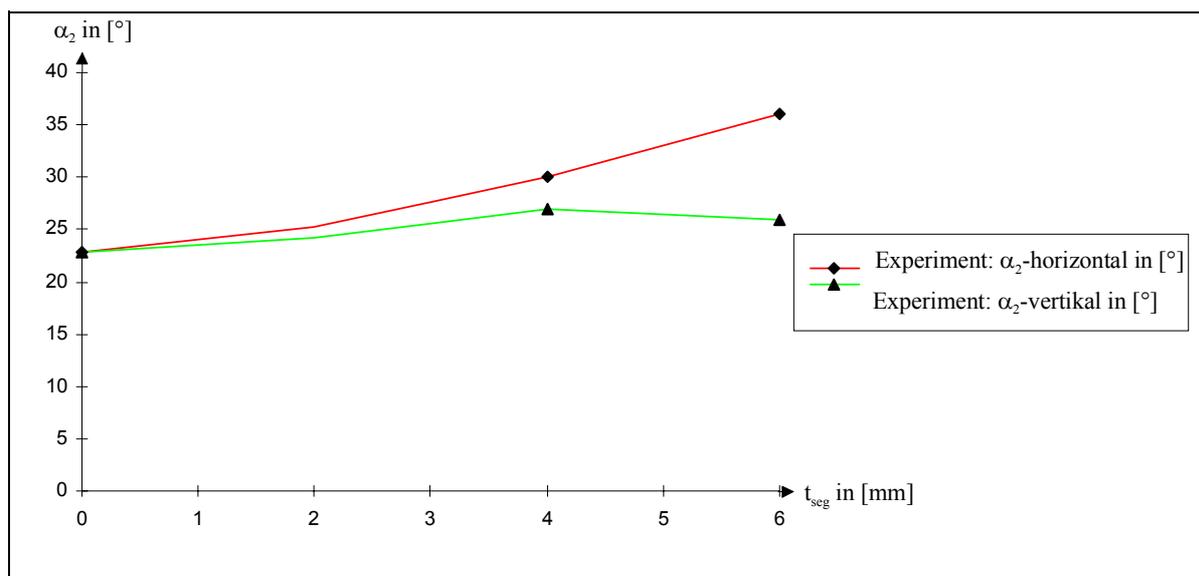


Abbildung 3.6-17: Vergleich von $\alpha_2(t_{\text{seg}})$ horizontal/vertikal als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTD I für mehrere US-Wandler gemäß Abbildung 3.6-12^{22, S.50}

3.6.3 Auswertung „Geschwindigkeitsprofil“ mithilfe der Laserinterferometrie

Die laserinterferometrischen Untersuchungen wurden mithilfe der Unterstützung des Lehrstuhls für Qualitätswesen der Universität Dortmund durchgeführt. Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsamplituden auf den Wandleroberflächen wurde ein Laser-Doppler-Interferometer der Fa. Polytec vom Typ OFV 1100 verwendet. Die Genauigkeit der verwendeten Messapparatur liegt deutlich oberhalb von 99% (Polytec /106/, vgl. auch Kreis /107/).

Die Zielsetzungen der Laserinterferometrie-Experimente lassen sich in quantitativer und qualitativer Hinsicht unterscheiden:

- Die qualitative Zielsetzung besteht in der Überprüfung der Schwingungszustände von Grund- und 1. rotationssymmetrischer Oberschwingung.
- Im Rahmen der quantitativen Zielsetzung wird die Hypothese bei der Definition des mechanischen Ersatzmodells überprüft, ob die Geschwindigkeit der Plattenoberfläche im Bereich der Einspannung tatsächlich vernachlässigt werden kann.

Die Geschwindigkeitsdaten ergeben sich direkt aus den experimentellen Untersuchungen der Laserinterferometrie.

In der Abbildung 3.6-18 und Abbildung 3.6-19 sind die Geschwindigkeitsverteilungen des US-Wandlers mit einem Durchmesser von 35mm und einer Plattendicke von 1,5mm dargestellt. Deutlich ist der Einfluss der Einspannung bzw.

Wandleraußenwand in den Geschwindigkeitsverteilungen erkennbar. Die Geschwindigkeit in diesem Bereich ist nahezu Null und kann im Rahmen der Simulation vernachlässigt werden. Die Schwingungszustände sind nach den Geschwindigkeitsprofilen eindeutig den Modi „Grundschiwingung“ und „1. rotationssymmetrischer Oberschwingung“ zuzuordnen.

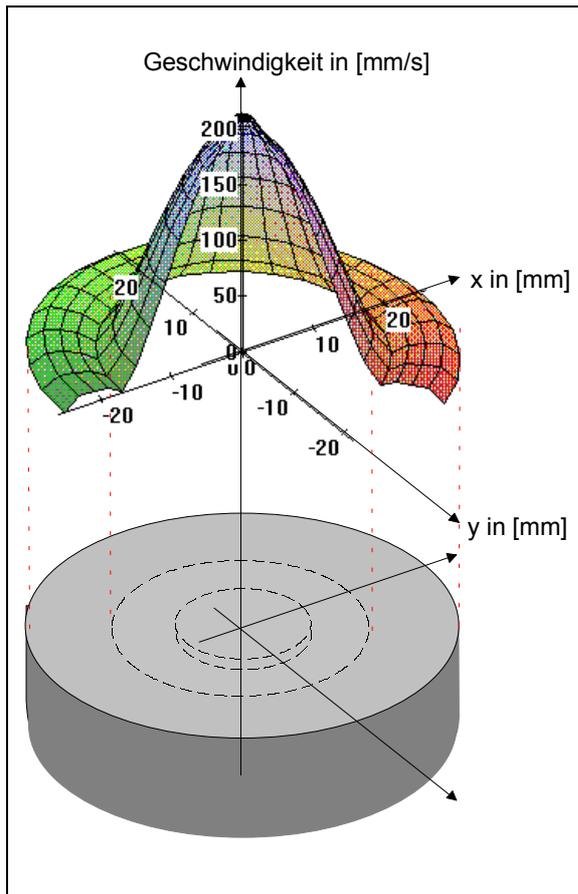


Abbildung 3.6-18: Darstellung der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung der Grundschiwingung des US-Wandlers mit $d=35\text{mm}$ und $t=1,5\text{mm}$

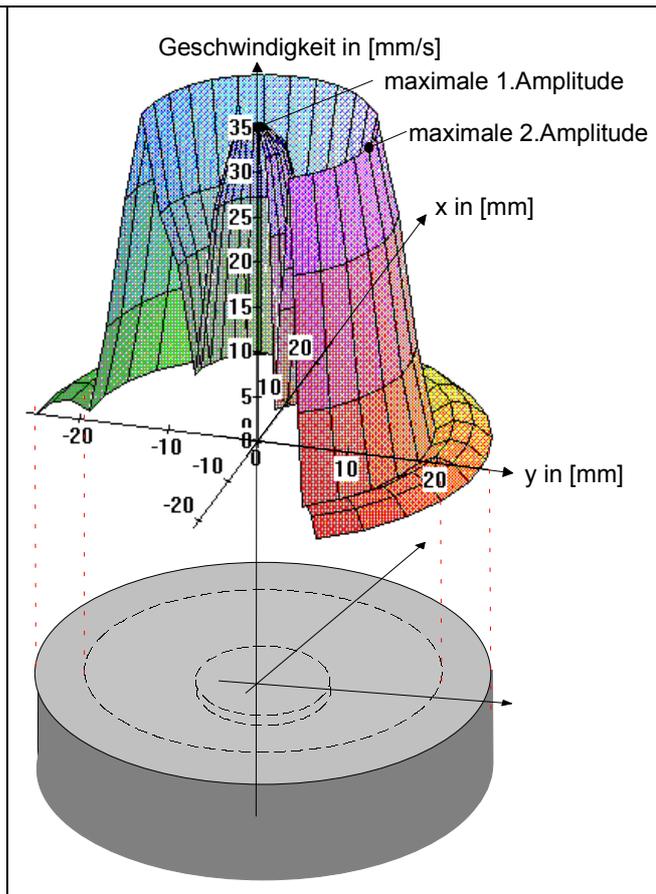


Abbildung 3.6-19: Darstellung der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung der 1. rotationssymmetrischen Oberschiwingung des US-Wandlers mit $d=35\text{mm}$ und $t=1,5\text{mm}$

Zur Anpassung von FEM-Simulationsrechnung mithilfe der Dämpfungskoeffizienten und Experiment ist es notwendig, die Verschiebungsdaten aus den Geschwindigkeitsdaten zu berechnen.

Wird der US-Wandler harmonisch mit der Kreisfrequenz „ ω “ angeregt, schwingt jeder Punkt auf der Plattenoberfläche mit einer Auslenkung „ $A(x,y)$ “, bzw. einer maximalen Amplitude „ $A_{\max}(x,y)$ “ gemäß folgender Gleichungen. Die Auslenkung ist bei der Resonanzfrequenz maximal.

$$A(x,y) = A_{\max}(x,y) \sin(\omega t)$$

Die Ableitung dieser Funktion nach der Zeit entspricht der Geschwindigkeit „ $c(x,y)$ “ des Punktes.

$$c(x,y) = A_{\max}(x,y) \omega \cos(\omega t)$$

Wird der US-Wandler harmonisch mit der Kreisfrequenz „ ω “ angeregt, kann aus der Geschwindigkeitsamplitude „ $c_{\max}(x,y)$ “ die Amplitude der Auslenkung „ $A_{\max}(x,y)$ “ bestimmt werden.

$$A_{\max}(x,y) = \frac{v(x,y)}{\omega}$$

Für ausgewählte US-Wandler sind die maximalen Amplituden der Auslenkungen, die bei den jeweiligen Resonanzfrequenzen ermittelt wurden, in der Tabelle 3-7 aufgetragen.

US-Wandler	Grundfrequenz		1. rotationssymmetrische Oberschwingung		
	Abmessungen in [mm]	Resonanzfrequenz in [kHz]	Betrag der Amplitude in [nm]	Resonanzfrequenz in [kHz]	max. Betrag der 1. Amplitude in [nm]
d=25; t=1	11,90	1299,88	56,98	52,11	40,84
d=30; t=1	8,99	1811,55	41,56	96,08	80,71
d=35; t=1,5	10,90	3157,64	44,480	125,86	115,36

Tabelle 3-7: Gemessene maximale Amplituden der Auslenkung der Plattenoberfläche ausgewählter US-Wandler in der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung ²³

Der obigen Tabelle ist zu entnehmen, dass die Schwingungsamplituden mit zunehmendem Wandlerdurchmesser steigen und die Amplituden der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung kleiner sind als die der Grundschnwingungen.

²³ Für die Zuordnung der 1. und 2. Amplitude vgl. Abbildung 3.6-19

4 Simulation von Spektrogramm und Richtcharakteristik von Ultraschallwandlern mithilfe der FEM-Berechnung²⁴

Gegenstand der folgenden Simulation von Ultraschallwandlern ist die Bestimmung der Resonanzfrequenzen und der Schalldruckverteilung im Fernfeld. Die Berechnungen des Verschiebungsfeldes auf der Wandleroberfläche erfolgen mit der Methode der Finiten Elemente. Die Schalldruckverteilung im Fernfeld und deren Druckmaxima in Abhängigkeit von der Frequenz wird mithilfe des Huygens-Fresnelschen-Integrals bestimmt.

4.1 FEM- Berechnung

Die Finite Element Methode ist ein Näherungsverfahren zur Lösung von Randwertaufgaben, d.h. zur Lösung von Differentialgleichungen mit deren Randbedingungen.

Die FEM-Berechnung wird mithilfe des Finite Elemente- Programms „Ansys 5.0“ der Fa. Swanson durchgeführt (Ansys /108/). Unter einer Vielzahl von den auf dem Markt befindlichen FEM-Programmsystemen erfüllt das gewählte Programm zum gegenwärtigen Zeitpunkt hinsichtlich der folgenden Kriterien ein Optimum (Hohenburg /109/).

- Dokumentation der verwendeten Algorithmen
- Simulation von piezoelektrischen Materialien
- Berechnung von dynamischen Lastfällen mithilfe der Frequenzganganalyse
- Offene Programmierschnittstelle zur Weiterverarbeitung von Ergebnisdaten
- geringe Hardwarevoraussetzungen.
- Modellierung von 2- und 3D- Modellen²⁵

²⁴ Die mathematischen Herleitungen sind im Anhang 1 dargestellt.

²⁵ Die 3D-Modellierung ist für die Simulationsrechnung der asymmetrischen Wandler eine notwendige Voraussetzung.

Gemäß der Schrittfolge beim Berechnen von FEM-Problemen werden die wichtigsten Modellierungsparameter im Rahmen der Vorbearbeitung (preprocessing), der Lösung (solution), und der Nachbearbeitung (postprocessing) dargestellt.

Die Modelldaten für die Vorbearbeitung werden zunächst mithilfe eines Editors als Textdatei erstellt. Anschließend wird diese Textdatei vom FEM-System als Stapeldatei (Batchdatei) zum Erstellen von Geometrie- und Materialdaten eingelesen. Die in dem FEM-System vorhandene Datenstruktur wird danach gemäß der definierten Berechnungsart und der sonstigen Lösungs-Parameter einem Lösungslauf unterzogen. Anschließend werden die Lösungsdaten weiterhin zum Teil grafischen Auswertemethoden unterzogen oder wie bei der Schalldruckberechnung weiterverarbeitet. Hierbei steht eine FORTRAN-ähnliche Programmiersprache (APDL) zur Verfügung.

4.1.1 Vorbearbeitung (preprocessing)

Bei den untersuchten Ultraschallwandlern handelt es sich um Biegeschwinger, bestehend aus einem Verbund aus passiver Schicht, z.B. Aluminium, und einer aktiven piezoelektrischen Schicht. Aufgrund der vorliegenden Geometrie (die Plattendicke ist viel kleiner als die Stärke der Gehäusewandung) kann das Gehäuse des US-Wandlers vernachlässigt werden. Somit ergibt sich das mechanische Ersatzmodell einer eingespannten Platte (vgl. Kapitel 3.2.1, Abbildung 3.2-3).

4.1.1.1 Elementtypen

Für die Modellierung der 3D-Modelle werden die Elementtypen „Solid 45“ und „Solid 5“ verwendet. Hierbei handelt es sich um achteckige Volumenelemente mit 8 Knoten und einem linearen Verschiebungsansatz ohne Rotationsfreiheitsgrade. Die Elemente lassen sich durch quadratische Zusatzfunktionen erweitern. Damit kann es zu Inkompatibilitäten mit Nachbarelementen kommen, d.h. zu Spalten oder Überlappungen zum Nachbarelement. Mathematisch sind diese Elemente nicht zulässig, weil die Bildung von Spalten oder Überlappungen von Nachbarelementen bei der FEM-Berechnung zu großen Fehlern führen kann (vgl. Abbildung 4.1-1).

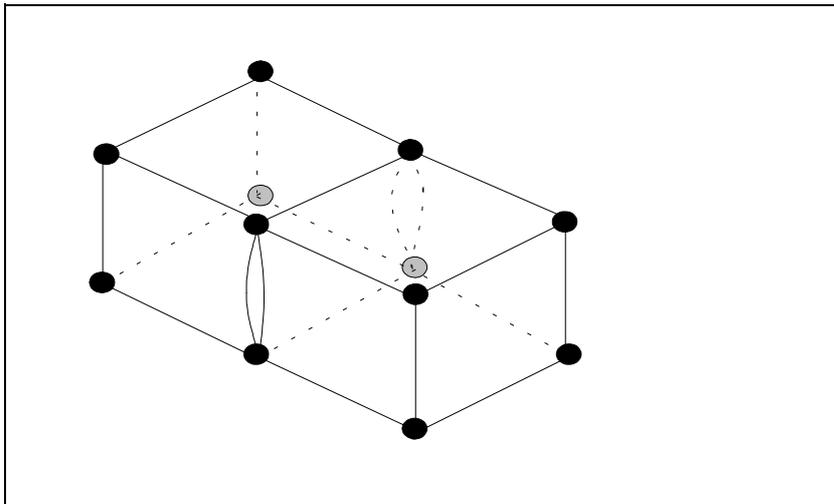


Abbildung 4.1-1: Schematische Darstellung des 3D-Elementtyps bestehend aus 4 Knoten

Nach den Berechnungen aus der Literatur (Müller /110/) soll die Verwendung von Elementtypen Solid 45 bzw. Solid 5 zu Simulationsergebnisse führen, die sich durch eine hohe Übereinstimmung mit experimentellen Messungen auszeichnen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsläufe mit der Ansys-Version 5.0 ergaben jedoch unabhängig von der Anwahl der quadratischen Zusatzfunktionen dieselben guten Ergebnisse. Für weitere Simulationsrechnungen, die auf der vorliegende Modellbildung basieren, kann daher auf quadratische Zusatzfunktionen verzichtet werden.

Aufgrund der einfachen Verschiebungsfunktionen ist die Anzahl der Freiheitsgrade und somit die erforderliche Wavefront bei der Ansys 5.0-Version relativ gering. Für genauere Approximationen des Verformungszustandes ist eine Verfeinerung der Vernetzung sinnvoll. Damit lassen sich Genauigkeiten erzielen, die sonst nur mit Elementtypen erzielt werden, die mit Rotationsfreiheitsgraden oder sogar mit quadratischen Verschiebungsfunktionen ausgestattet sind (vgl. Schliekmann /111/). Beim Elementtyp Solid 5 handelt es sich um eine Erweiterung des Elements Solid 45, bei dem zusätzlich "gekoppelte Feldberechnungen" möglich sind (vgl. Ansys /112/). Mit diesem Elementtyp wurde die piezoelektrische Schicht modelliert. Um die Anzahl der Freiheitsgrade zu minimieren, wurde die andere „passive“ AI-Schicht aus dem Elementtyp Solid 45 aufgebaut.

4.1.1.2 Materialdaten

Die für die Berechnung erforderlichen Materialparameter werden im ersten Teil der Eingaberoutine bereitgestellt. Für das Aluminium Material sind das die Kennwerte E-Modul, Querkontraktionszahl und Dichte. Die piezoelektrische Schicht besteht aus dem Werkstoff Blei-Zirkonat-Titanat. Dieser Werkstoff hat einen hohen piezoelektrischen Effekt und ist für elektroakustische Wandler gut geeignet (Bauer /113/). Der Kristallaufbau des Werkstoffs gehört nach der Nomenklatur von Schoenflies zu den hexagonalen Systemen vom Typ 6mm (IEEE /114/, Nyde /115/. Da die Syntax des FEM-Systems Ansys für den Aufbau der Materialmatrizen nicht konform nach IEE Std 176-1978 (Kohnke /116/) ist, wurden die Materialdaten entsprechend transformiert.

4.1.1.3 Knoten und Elemente, Vernetzung

Für die Erstellung des FEM-Modells gibt es zwei Möglichkeiten: entweder die direkte Generierung einzelner Knoten und Elemente oder das räumliche Modellieren (Solid Modelling), wobei das FEM-Modell, d.h. die Knoten und Elemente mithilfe eines Netzgenerators erzeugt werden. Es stehen zwei Verfahren zur Verfügung: Beim „Button-up-Verfahren“ werden mithilfe von Punkten (keypoints) die Linien, Flächen und Punkte erzeugt (vgl. Müller /117/). Beim „Top-down-Verfahren“ werden direkt einfache geometrische Körper, wie Quader, Zylinder usw. erzeugt, die mittels boolescher Operationen kombiniert werden können.

Die Methode der räumlichen Modellierung bietet den Vorteil, dass mit geringem Aufwand die Netzdichte und die Geometriedaten wie Durchmesser, Dicke der Platten, usw. variiert werden können. Diese FEM-3D-Teil- und 3D-Vollmodelle (vgl. Abbildung 4.1-2 und Abbildung 4.1-3) werden mithilfe des räumlichen Modellierens und des Button-up-Verfahrens erzeugt und anschließend mit dem automatischen Netzgenerator vernetzt.

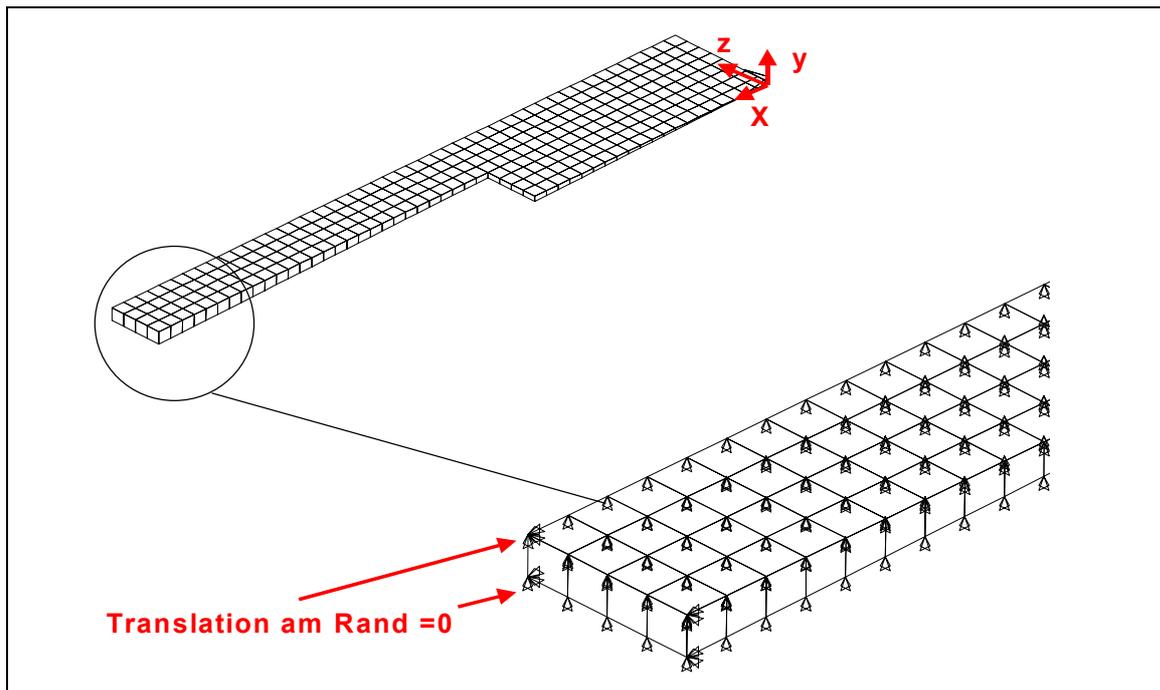


Abbildung 4.1-2: Vergrößerte Darstellung der Vernetzung des FEM-3D-Teilmodells

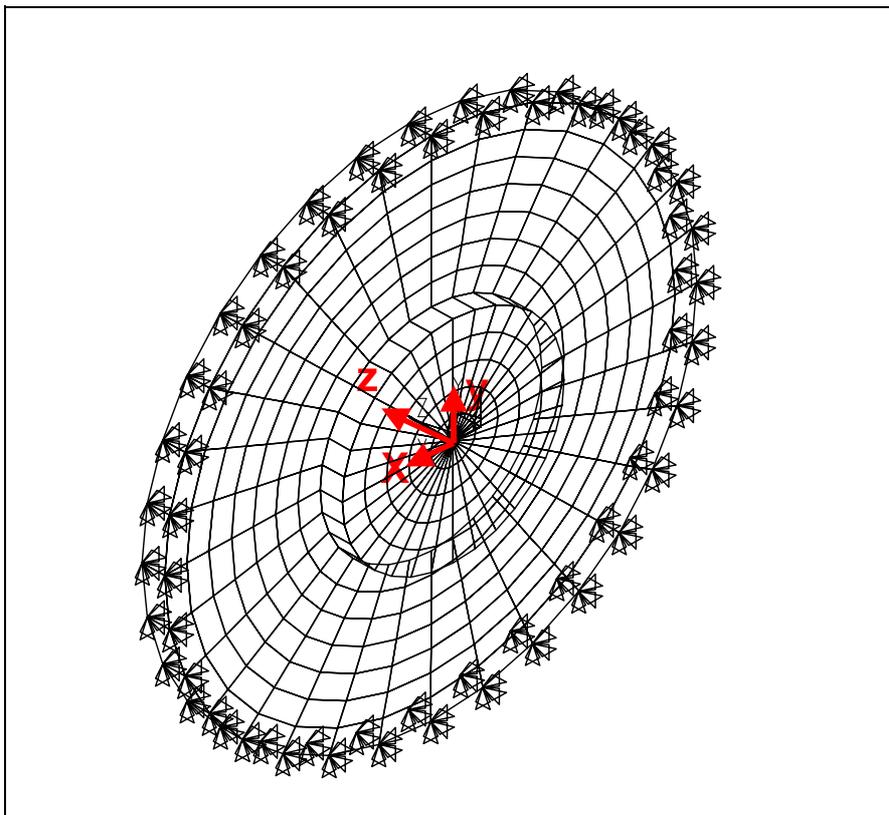


Abbildung 4.1-3: Darstellung der Vernetzung des FEM-3D-Vollmodells

Für die Berechnung der symmetrischen Schwinger wird das 3D-Teilmodell verwendet, um Rechenzeit zu sparen und ggf. höhere Vernetzungsdichten zu erzeugen, die

mit dem FEM-3D-Vollmodell aufgrund der beschränkten Wavefront-Version nicht realisierbar sind.

In der Abbildung 4.1-2 ist das 3D-Teilmodell dargestellt. In der abgebildeten Vergrößerung sind die in der Schnittlinie liegenden kinematischen Zwangsbedingungen dargestellt.

4.1.2 Lösung (solution)

Innerhalb des Lösungs-Teils (solution) werden die Randbedingungen und Berechnungsarten gemäß Tabelle 4-1 definiert.

1.	Randbedingungen- und Lasten
1.1	Randbedingungen feste Einspannung am Rand, d.h. Translation in x,y,z-Richtung =0 (vgl. Abbildung 4.1-2), Rotationen sind mit dem vorhandenen Elementtyp nicht implementierbar
1.2	Symmetrierandbedingungen beim 3D-Teilmodell an den Schnittflächen (vgl. Abbildung 4.1-2)
1.3.	Lasten Potenzial an der aktiven Piezoschicht in z-Richtung (vgl. Abbildung 4.1-2, Abbildung 4.1-3)
2.	Berechnungsart
2.1	Harmonische Frequenzganganalyse für die Berechnung der Antwort auf eine sinusförmig verlaufende Belastung.

Tabelle 4-1: Randbedingungen und Berechnungsarten innerhalb des FEM-Lösungsteiles

Die Wechselwirkung zwischen mechanischen Dehnung und elektrischem Potential an der piezokeramischen Schicht wird mithilfe eines FEM-Algorithmus berechnet, der mit der Berechnung von Temperatureffekten vergleichbar ist.

4.1.3 Nachbearbeitung (postprocessing)

Die Knotenverschiebungen auf der Oberfläche des US-Wandlers lassen sich mithilfe des Ansys-Postprozessors grafisch oder tabellarisch ausgeben.

Für die Berechnung des Schalldruckverlaufs über der Frequenz sowie die Schallcharakteristik im Fernfeld werden eigene Nachlaufprogramme (Postprozessoren)

erstellt. Hierbei handelt es sich um Makros, die mittels der Ansys Parametric Design Language (APDL) programmiert sind. Die Berechnung der Schalldruckwerte erfolgt gemäß der in Kapitel 4.2 dargestellten Berechnungsformeln.

4.2 Schalldruckberechnung²⁶

Die Schalldruckpegel der US-Wandler werden im Rahmen der Nachbearbeitung (Postprocessing) gemäß Kapitel 4.1 berechnet. Die Schalldruckpegel bilden die Basis für die Berechnung von Spektrogramm und Richtcharakteristik.

Stenzel /118/ hat die Schallabstrahlung im Fernfeld einer konphas schwingenden Platte in kartesischen Koordinaten (vgl. Abbildung 4.2-1) berechnet. Für die Bestimmung der Schalldruckamplitude „p“ gilt die Vereinfachung nach Gleichung 5 unter folgenden Voraussetzungen:

1. Der Aufpunkt „A“ liegt in hinreichend großer Entfernung zum Strahler.
2. Die Abmessungen des Strahlers sind in jeder Richtung groß zu der Wellenlänge.
3. Die strahlende Fläche besitzt einen Mittelpunkt, der mit dem Koordinatenanfangspunkt zusammenfällt. Die Amplituden und Phasen der Geschwindigkeiten „v“ einzelner Plattenpunkte sind spiegelbildlich zum Plattenmittelpunkt, d.h. $v(x,y) = v(-x,-y)$.

Zu berücksichtigen sind hierbei die Dichte „ρ“, die Schallgeschwindigkeit „c“, die Wellenzahl „k“ und die Wellenlänge „λ“.

$$p = \frac{\rho c}{\lambda r} \int_F v(x,y) \cos[k(x \cos \alpha + y \cos \beta)] dF \quad (5)$$

²⁶ Die Anpassung der Dämpfungswerte ist im Anhang 4.2.1, die Grundgleichung der Schallabstrahlung im Anhang 1.2 dargestellt.

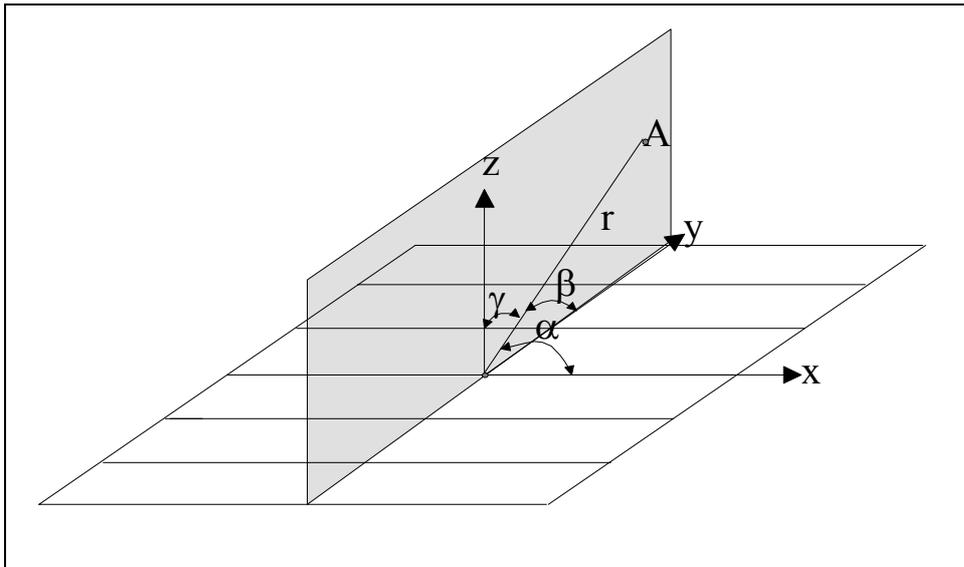


Abbildung 4.2-1: Berechnung der Schallabstrahlung in kartesischen Koordinaten

Für die Schalldruckberechnung in der z-y- Ebene mit $\alpha = 90^\circ$ und $\beta + \gamma = 90^\circ$ lässt sich die Lösung weiter vereinfachen (vgl. Abbildung 4.2-1, Ebene grau schattiert). Es gilt folgende Lösung:

$$p = \frac{\rho c}{\lambda r} \int_{\mathbb{F}} v(x, y) \cos[ky \sin \gamma] dF$$

bzw. mit der Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ergibt sich

$$p = \frac{\rho c k}{2\pi \cdot r} \int_{\mathbb{F}} v(x, y) \cos[ky \sin \gamma] dF \quad (6)$$

Auf der z-Achse ist der Winkel $\gamma = 0$ und somit lässt sich die Schallamplitude nach Gleichung 7 folgendermaßen bestimmen.

$$p = \frac{\rho c k}{2\pi \cdot r} \int_{\mathbb{F}} v(x, y) dF = \frac{\rho c}{\lambda r} \int_{\mathbb{F}} v(x, y) dF = \frac{f \rho}{r} \int_{\mathbb{F}} v(x, y) dF \quad (7)$$

Die Amplituden der Geschwindigkeiten lassen sich aus den Amplituden der Verschiebungen „ $u(x, y)$ “ folgendermaßen berechnen:

$$v(x,y) = 2\pi \cdot f \cdot u(x,y)$$

Der Schalldruckpegel „ L_p “ in Dezibel (dB) ist der logarithmierte Schalldruckeffektivwert „ \tilde{p} “, der auf den Bezugswert für den Effektivwert des Schalldrucks „ \tilde{p}_0 “ der menschlichen Hörschwelle bei 1000 Hz bezogen wird:

$$L_p = 20 \log \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0} \quad [\text{dB}] \quad \text{mit } \tilde{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$$

Für harmonische, zeitveränderliche Schalldruckwerte ergibt sich zwischen Effektiv- „ \tilde{p} “ und Amplitudenwert „ p “ folgender Zusammenhang:

$$\tilde{p} = \frac{p}{\sqrt{2}}$$

4.2.1 Berechnung „Spektrogramm“

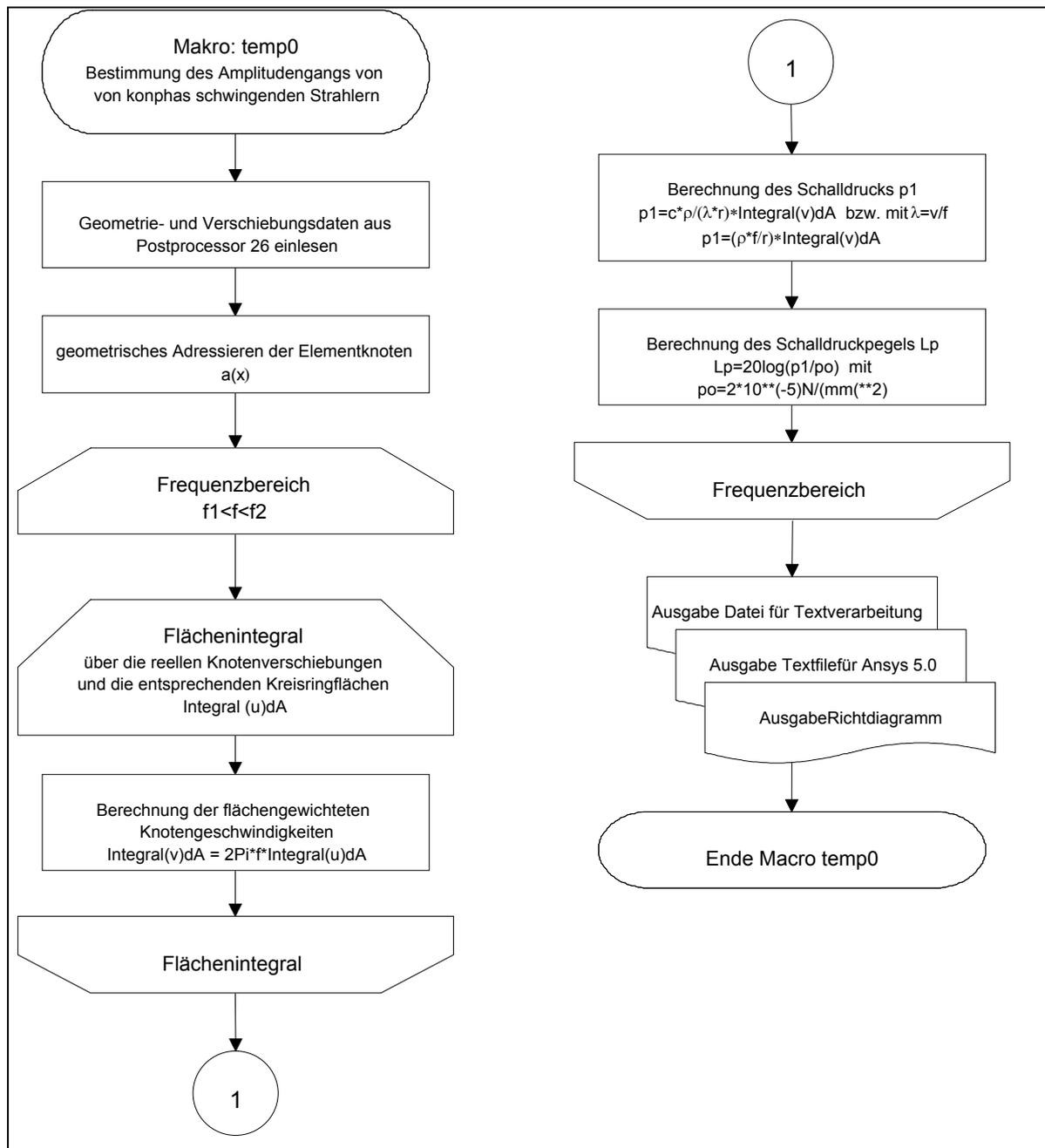
Formelzeichen	Variable gemäß APDL ²⁷	Benennung, Größe
ρ	rho	Dichte
F	F	Fläche
L_p	Lp	Schalldruckpegel
p	p	Schalldruckamplitude
\tilde{p}	p1	Schalldruckeffektivwert
\tilde{p}_0	P0	Bezugswert für den Effektivwert des Schalldrucks, oder Schalldruck der menschlichen Hörschwelle
π	Pi	Konstante: 3,14
γ	gamma	Winkel
φ	phi	Winkel

Tabelle 4-2: Variablen- und Kompatibilitätsliste

²⁷ Die Dokumentation der Formeln ist an die Schreibweise der fortranähnlichen Programmiersprache „APDL“ angelehnt, so steht beispielsweise das „*“-Zeichen für die Multiplikation, das „**“-Zeichen für die Exponentialschreibweise. Das Listing eines APDL-Files ist im Anhang 3.3 dargestellt.

Grundlage für die Berechnung des Spektrogramms ist es, die Schalldruckpegel für den Aufpunkt zu berechnen, der sich im Abstand „ r “ (vgl. Abbildung 4.2-1) auf der Symmetrieachse der Plattenoberfläche des Ultraschallwandlers befindet. Da das Spektrogramm die Schalldruckpegelwerte für mehrere Frequenzen darstellt, sind diese Berechnungen für mehrere Frequenzen innerhalb des Frequenzintervalls durchzuführen. Der Rechnungsablauf ist in dem Flussdiagramm gemäß Abbildung 4.2-2: dargestellt. Für die Zuordnung der Variablen ist die Variablen- und Kompatibilitätsliste (Tabelle 4-2) zu beachten.

Zunächst werden die Geometrie- und Verschiebungsdaten aus dem Lösungsteil des FEM-Programms eingelesen. Da die Vernetzung mithilfe des Vernetzungsgenerators durchgeführt wird und somit die Vergabe der Knotennummern unterschiedlich erfolgt, werden die Knoten zunächst geometrisch adressiert und in einer Tabelle abgelegt.

Abbildung 4.2-2:: Flussdiagramm zur Berechnung des Makros „Spektrogramm“^{27, S.65}

Somit werden auch die Verschiebungsdaten mithilfe dieser Tabelle eingelesen. Für die Bestimmung des Flächenintegrals $\int_F u(x,y)dF$ (vgl. Abbildung 4.2-2:) werden die Knotenverschiebung $u(x,y)$ und das zugehörige Flächensegment $\int_F dF$ miteinander multipliziert.

In der Abbildung 4.2-3 sind für die Knoten 390, 389 und 388 exemplarisch die zugehörigen Flächensegmente schraffiert dargestellt. Für die Berechnung von symmetrischen Strukturen werden ausschließlich die Knoten auf der x-Achse berücksichtigt und somit als

Flächensegmente $\int_F dF$ geschlossene

Kreisringe berücksichtigt.

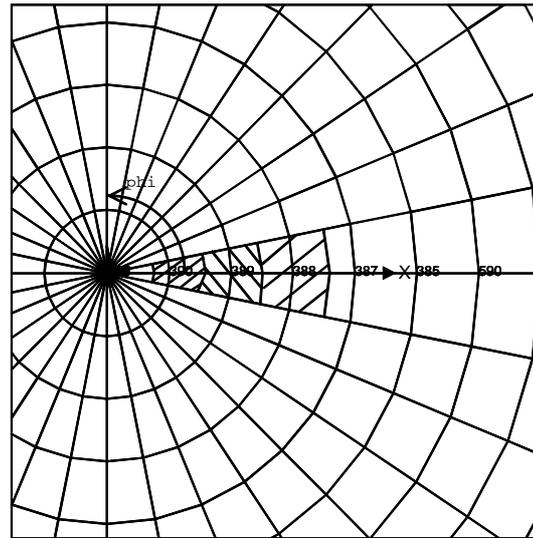


Abbildung 4.2-3: Darstellung der Flächensegmente des FEM-3D-Vollmodells für die Knoten 390, 389 und 388.

Aus den flächengewichteten Verschiebungen werden anschließend die flächengewichteten Geschwindigkeiten berechnet. Da der Schalldruckpegel ausschließlich für den Aufpunkt auf der z-Achse berechnet wird, erfolgt die Berechnung gemäß Gleichung (7). Das Spektrogramm setzt sich aus den Schalldruckpegelwerten für verschiedene Frequenzen innerhalb eines Frequenzbereichs zusammen. Aufgrund der Schmalbandigkeit der Signale beträgt die Schrittweite der abgetasteten Frequenzen 100Hz.

4.2.2 Berechnung „Richtcharakteristik“

Die Richtcharakteristik für eine feste Frequenz ergibt sich durch die Berechnung der Schalldruckpegel für verschiedene Aufpunkte, die sich auf einer Halbkreisbahn mit dem Abstand r um den Mittelpunkt der Plattenoberfläche befinden. Die Adressierung der Knotennummern und die Berechnung der zugehörigen Flächensegmente erfolgt in gleicher Weise wie beim Makro "Spektrogramm". Basis der Berechnung der Schalldruckpegelwerte ist Gleichung 6, das entsprechende Flussdiagramm ist in Abbildung 4.2-4 dargestellt.²⁸

²⁸ Weitere Berechnungen sind im Anhang 3.3 dargestellt.

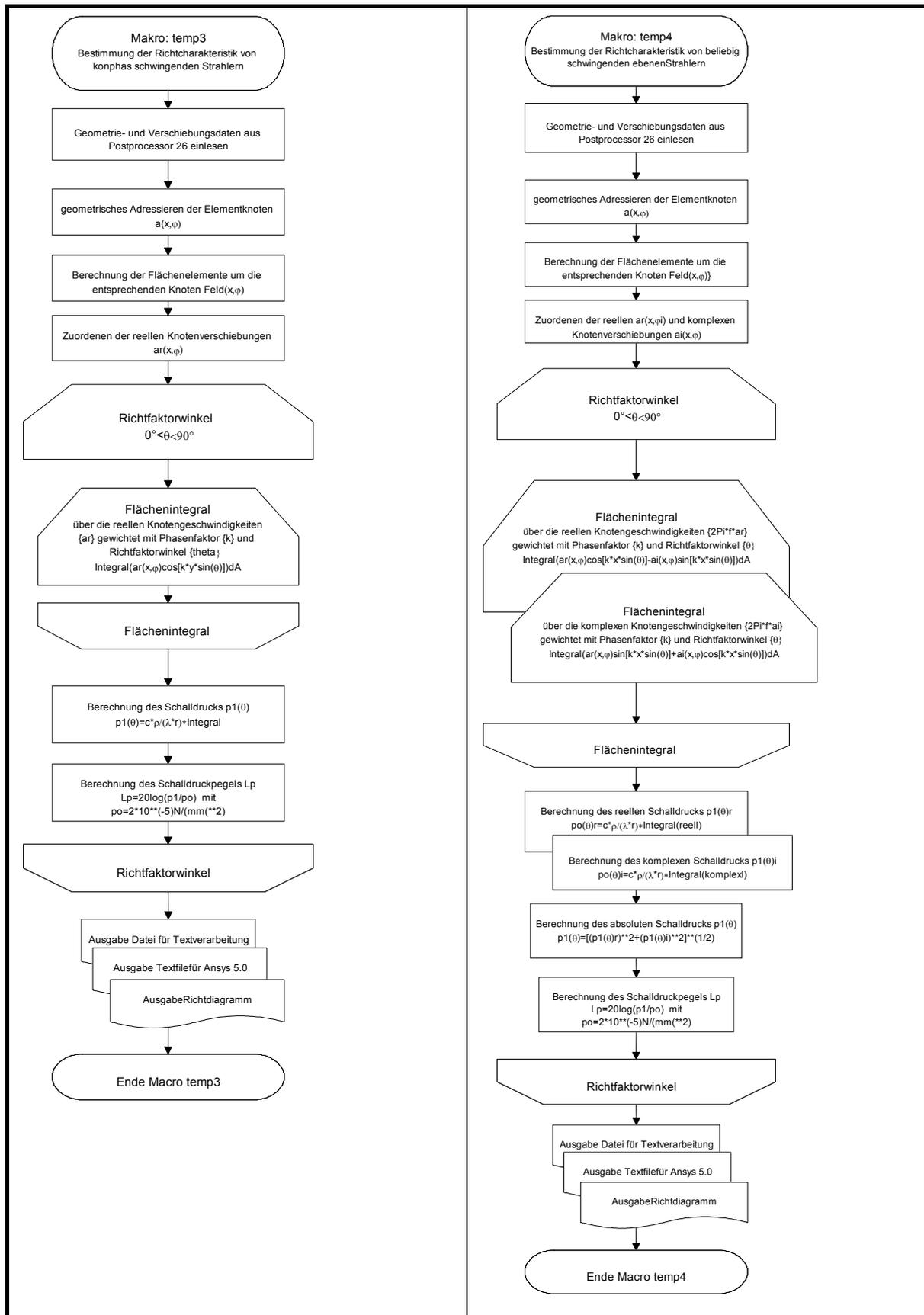


Abbildung 4.2-4: Flussdiagramme der Makros für die Bestimmung der Richtcharakteristiken

4.3 Aus- und Bewertung der Ergebnisse der FEM-Simulation

4.3.1 Bewertung „Resonanzfrequenzen“

Wie bereits in Kapitel 3.2 dargestellt, lassen sich die Resonanzfrequenzen von homogenen Platten nach Gleichung 3 berechnen. Um grobe Fehler bei der FEM-Simulation zu vermeiden, wurden die Ergebnisse der FEM-Simulation mit den Ergebnissen der Berechnung nach Gleichung 3 verglichen; Basis dieser Berechnung ist eine homogene Platte. Bei der FEM-Berechnung wird ein rotationssymmetrischer Schichtverbund simuliert, der aus einer piezoelektrischen und einer Aluminium-Schicht besteht. Die Geometrie- und Materialparameter sind in der Tabelle 4-3 dargestellt. Somit ist ein ähnlicher Einfluss der einzelnen Geometrie- und Materialparameter auf die Resonanzfrequenz zu erwarten wie bei der homogenen Platte.

Um die Rechnerzeit zu verkürzen, wurde das FEM-Simulationsmodell als 3D-Teilmodell verwendet.

PXE-Scheibe:		Al-Schicht:		
Dicke :	1mm	Dicke:	t	1mm
Durchmesser:	10mm	Durchmesser:	d	30mm

Tabelle 4-3: Geometrie- und Materialdaten für die vergleichende Untersuchung eines US-Wandlers gemäß Abbildung 3.2-1

Beim 3D-Teilmodell handelt es sich um einen $1,5^\circ$ -Auschnitt des Schwingers unter Berücksichtigung der Symmetrierandbedingungen (vgl. Abbildung 4.3-1).

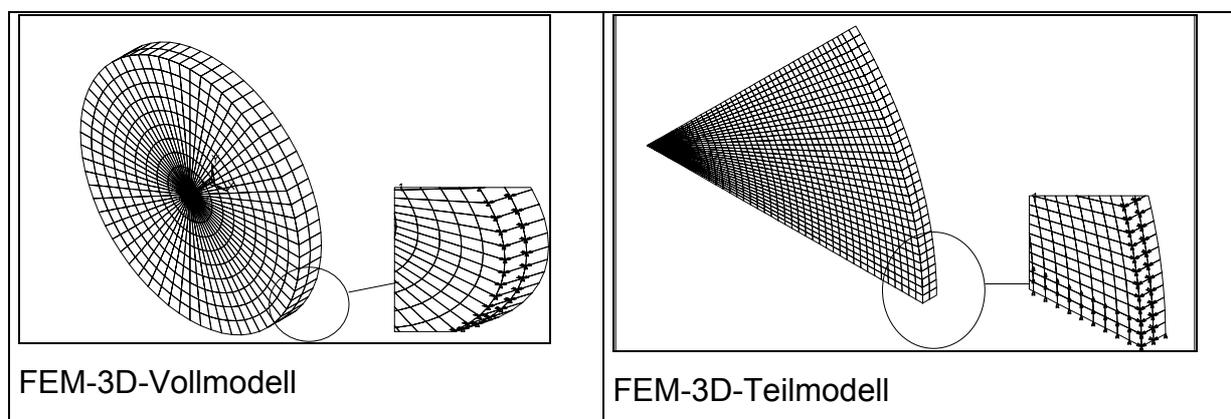


Abbildung 4.3-1: Darstellung der FEM-3D-Voll- und 3D-Teilmodelle mit den entsprechenden Symmetrierandbedingungen

Bei der Vergleichsberechnung wurden jeweils die folgenden Parameter variiert: Plattendicke „t“; Plattendurchmesser „d“, E-Modul „E“, Dichte „ρ“²⁹.

Variation der Elementgröße

Um den Einfluss der Vernetzungsdichte zu untersuchen, werden die Ergebnisse des FEM-3D-Teil- und 3D-Vollmodells bei verschiedenen Elementgrößen verglichen. Beim 3D-Teilmodell handelt es sich um einen 1,5°-Auschnitt des Schwingers, in dessen Schnittebenen zusätzliche Randlasten aufgetragen sind (vgl. Abbildung 4.3-1). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.3-2 dargestellt.

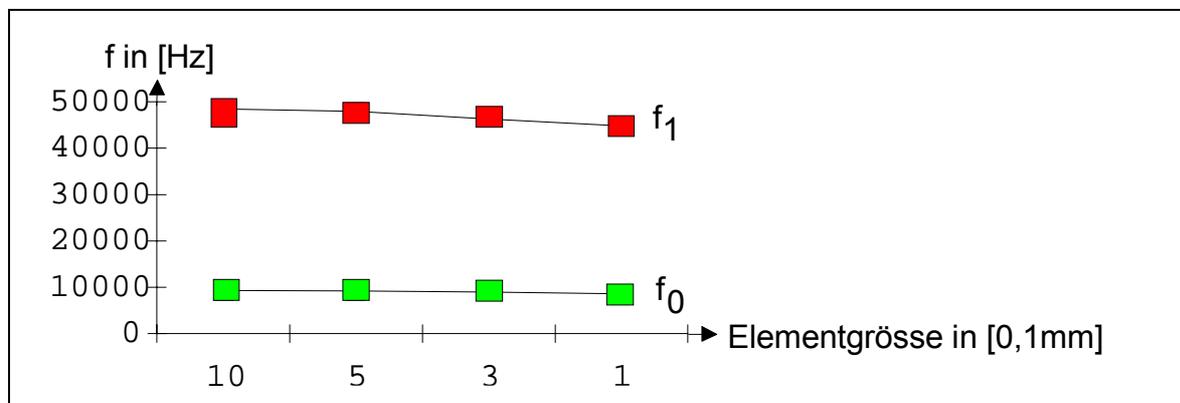


Abbildung 4.3-2: Auswirkung der Variation der Elementgröße des FEM-3D-Teilmodells des US-Wandlers mit den Abmessungen gemäß Tabelle 4-3 (d=30mm) auf die Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

FEM-3D-Teilmodell			FEM-3D-Vollmodell		
Elementgröße in [mm]	Resonanzfrequenz der Grundschwingung f ₀ [Hz]	Resonanzfrequenz der 1.Oberschwingung f ₁ [Hz]	Elementgröße in [mm]	Resonanzfrequenz der Grundschwingung f ₀ [Hz]	Resonanzfrequenz der 1.Oberschwingung f ₁ [Hz]
1	9284	48415	1	9378	46249
0,5	9255	47884			
0,3	8964	46249			
0,1	8662	44792			

Tabelle 4-4: Auswirkung der Variation der Elementgröße des FEM-Modells des US-Wandlers mit den Abmessungen gemäß Tabelle 4-3 (d=30mm) auf die Resonanzfrequenzen

Da für den Berechnungslauf nur eine begrenzte Wavefront-Version zur Verfügung stand, konnte die Vernetzungsdichte nicht beliebig erhöht werden. Vergleicht man die

²⁹ Die Beschreibung sämtlicher Messergebnisse mit der Variation von Plattendicke, -durchmesser und -dichte, ist im Anhang 4 gekennzeichnet.

Resonanzfrequenzen des am größten vernetzten 3D-Teilmodells³⁰ mit einer Elementgröße von 0,1mm mit den übrigen in Tabelle 4-4 und Abbildung 4.3-1 dargestellten Voll- und Teil-Modellen, ergibt sich für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung „f₁“ beim FEM-3D-Vollmodell eine maximale Abweichung von 3,2% (46249Hz statt 44792Hz) und beim 3D-Teilmodell mit einer Elementgröße von 1mm eine maximale Abweichung von 8% (48415Hz statt 44792Hz).

In der Abbildung 4.3-3 sind die Ergebnisse der FEM-Simulationsrechnung und der Literatur (Koch /119/) dargestellt. Um die Dauer der Simulationsrechnungen in Grenzen zu halten, wurde als Grundlage der FEM-Simulationsrechnung ein 3D-Teilmodell mit einer Elementgröße von 0,25mm gewählt.

Die Verbindungslinien der Ergebnisse der FEM-Simulationsrechnung sind durchgezogen, die der publizierten Ergebnisse als gestrichelte Linien dargestellt. Grundsätzlich sind die Frequenzbeträge der eigenen Simulationsrechnung größer als die der Literatur, bei denen es sich um experimentell bestimmte Werte handelt. Wird die FEM-Berechnung mit kleineren Elementgrößen durchgeführt, sind ebenfalls niedrigere Resonanzfrequenzen zu erwarten (vgl. Abbildung 4.3-2).

Aufgrund des eingeschränkten Messbereiches der eigenen Versuchseinrichtung werden im Rahmen der Fehlerdiskussion die Messwerte bis zu einem Frequenzbereich von 70 kHz betrachtet (vgl. Kap. 3.3). Für diesen Bereich ergibt sich für den Schwinger mit einem Durchmesser von 25mm (t: 1mm) eine maximale Abweichung³¹ von 8,6% für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung und für den Schwinger mit einem Durchmesser von 30mm (t: 1,5mm) für die Grundschwingung die größte Abweichung von 14,1%.

³⁰ Das am größten vernetzte Teilmodell ist in Tabelle 4-4 grün gekennzeichnet.

³¹ Basis für die Bestimmung der Abweichungen sind die Kenndaten der Wandler mit den entsprechenden Abmessungen (Durchmesser und Plattendicke).

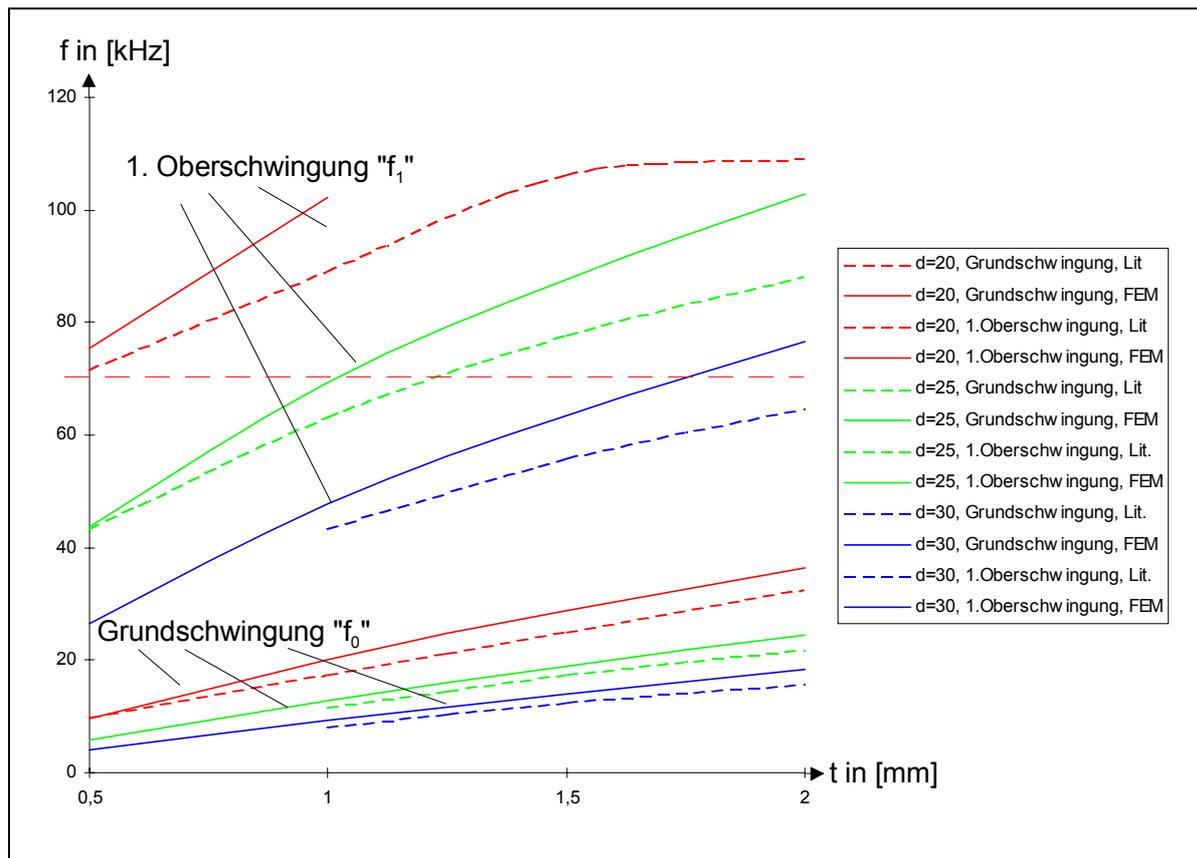


Abbildung 4.3-3: Vergleich der berechneten Resonanzfrequenzen der FEM-Simulation (durchgezogene Linie) mit den experimentell bestimmten Resonanzfrequenzen aus der Literatur (gestrichelte Linie) /Koch /119/ für symmetrische US-Wandler unterschiedlicher Durchmesser „d“ als Funktion der Plattendicken „t“

In der Abbildung 4.3-4 sind die eigenen experimentellen Versuchsergebnisse mit denen der Simulationsrechnung gegenübergestellt. Als Grundlage der FEM-Simulationsrechnung wurde ein 3D-Teilmodell mit einer Elementgröße von 0,25mm gewählt. Wie bereits im vorherigen Vergleich liegen für die höheren Frequenzen sowie mit zunehmenden Durchmessern und Dicken der US-Wandler die experimentellen Messwerte der eigenen Versuchsreihen niedriger als die entsprechenden Vergleichswerte der FEM-Simulationsrechnung. Innerhalb des Erfassungsbereichs von 70kHz ergibt sich für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung zwischen den eigenen experimentellen und FEM-simulierten Messdaten eine maximale Abweichung von 20,9% ($d=25\text{mm}$, $t=1,0\text{mm}$). Für denselben US-Wandler beträgt die Abweichung bei der Grundschiwingung 7,9%.

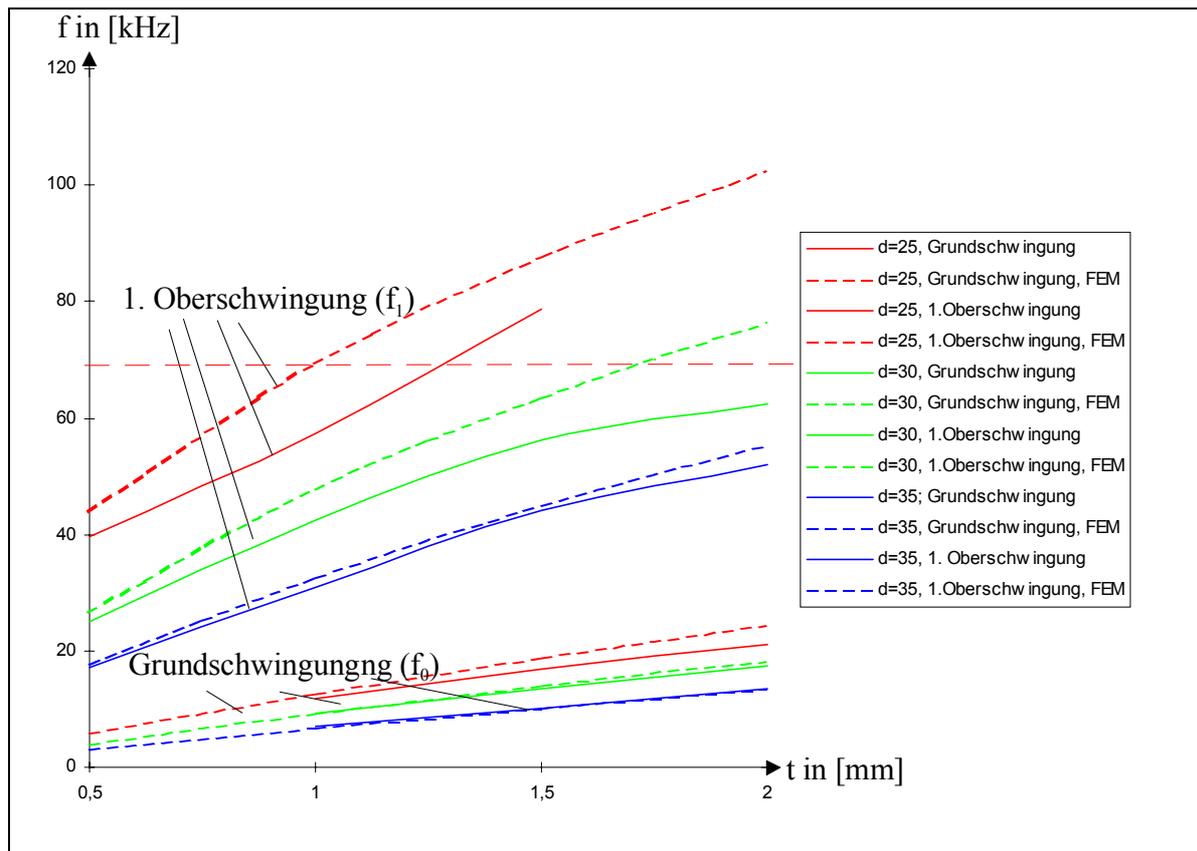


Abbildung 4.3-4: Vergleich der am LTD I gemessenen Resonanzfrequenzen der untersuchten US-Wandler (Auswahl gemäß Tabelle 3-6, durchgezogene Linie) mit den Resonanzfrequenzen der FEM-Simulationsrechnung (gestrichelte Linie)

Der Vergleich sämtlicher Messergebnisse ist in Kapitel 5.1 dargestellt.

4.3.2 Bewertung „Spektrogramme“

Für das in Abbildung 4.3-5 dargestellte 3D-Teilmodell wird zunächst eine harmonische Analyse für den Frequenzbereich von 1kHz bis 100kHz in 1kHz-Schritten durchgeführt.

Basierend auf den Ergebnissen der harmonischen Analyse wurden die Schalldruckpegel im Fernfeld berechnet. Hierbei bezieht sich der Schalldruckpegel auf die Mittelachse des Schwingers in 0,2m Entfernung vom Mittelpunkt des US-Wandlers. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.3-6 dargestellt. Deutlich sind die Resonanzstellen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung zu erkennen.

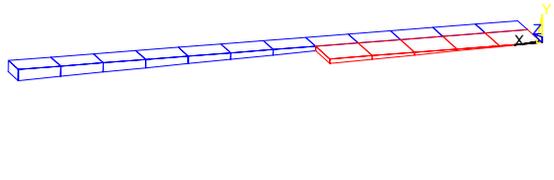
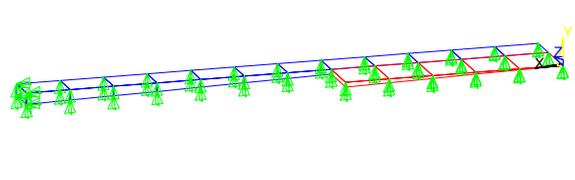
	
PXE-Scheibe	3D-Teilmodell
Durchmesser: 10mm	Winkel: 1,25°
Dicke :1mm	Verfahren: harm.Analyse
Al-Schicht:	$\xi = 0,008$
Durchmesser :24mm	Bereich: 1kHz <math>f < 101\text{kHz}</math>
Dicke :0,7mm	Schrittweite: 1kHz

Abbildung 4.3-5: Geometrie- und Berechnungsdaten für das FEM-3D-Teilmodell (1,5°) für den US-Wandler gemäß Abbildung 3.2-1³²

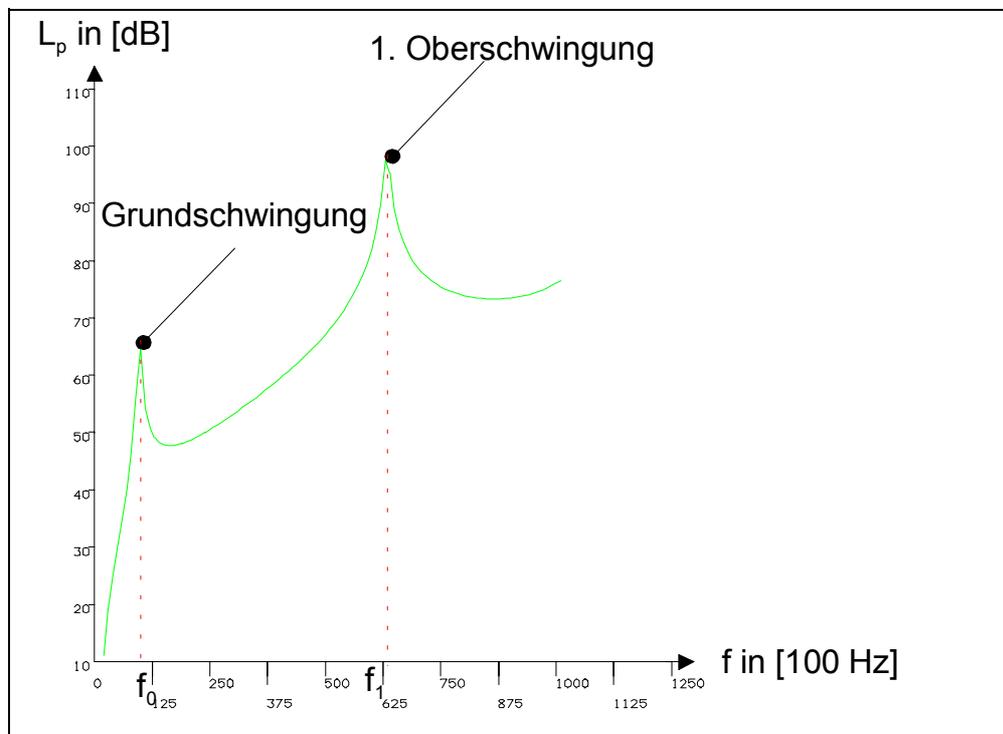


Abbildung 4.3-6: Spektrogramm des US-Wandlers gemäß Abbildung 4.3-5 und Abbildung 3.2-1

Im Rahmen einer weiteren Rechnung wurden um die ersten beiden Resonanzstellen die Schalldruckpegel mit einer geringeren Schrittweite abgetastet. Das Ergebnis ist für die Grundschiwingung in Abbildung 4.3-7 und für die 1. rotationssymmetrische Oberschiwingung in Abbildung 4.3-8 dargestellt.

³² In der linken oberen Darstellung des FEM-Teilmodells ist die PXE-Scheibe rot, die Al-Schicht blau dargestellt. In der rechten oberen Darstellung ist nochmals das FEM-Teilmodell dargestellt, jedoch zusätzlich mit den in grün gekennzeichneten Randlasten, um die Symmetrie- und Einspannbedingungen zu erfüllen.

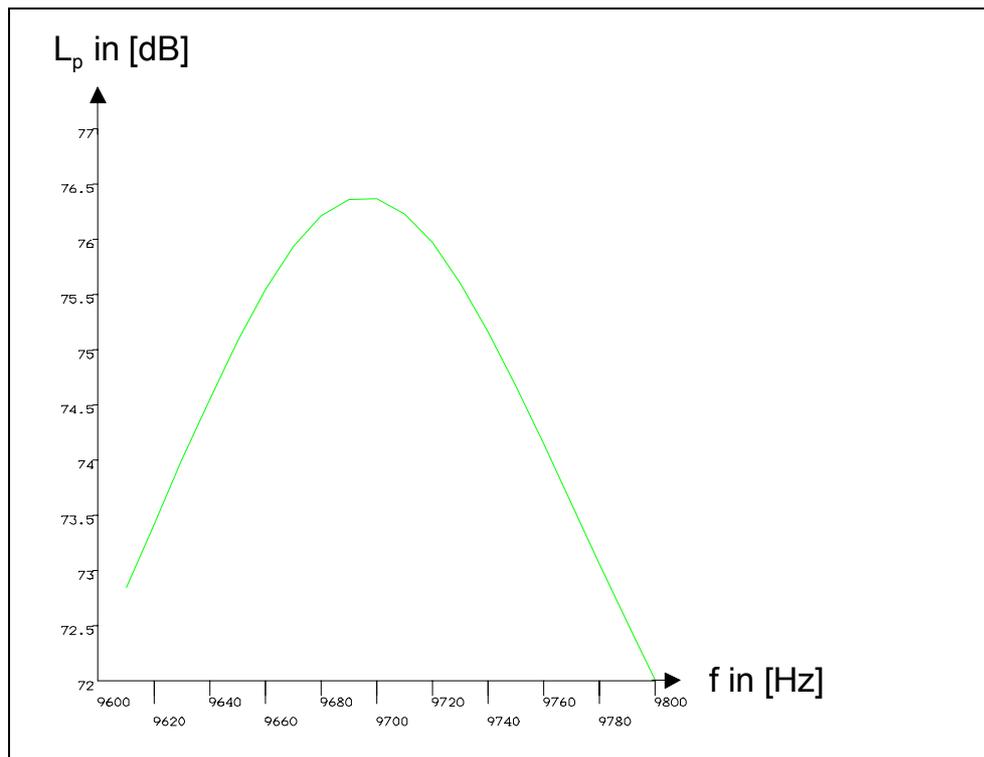


Abbildung 4.3-7: Spektrum der Grundschiwingung f_0 des US-Wandlers gemäß Abbildung 4.3-5 und Abbildung 3.2-1

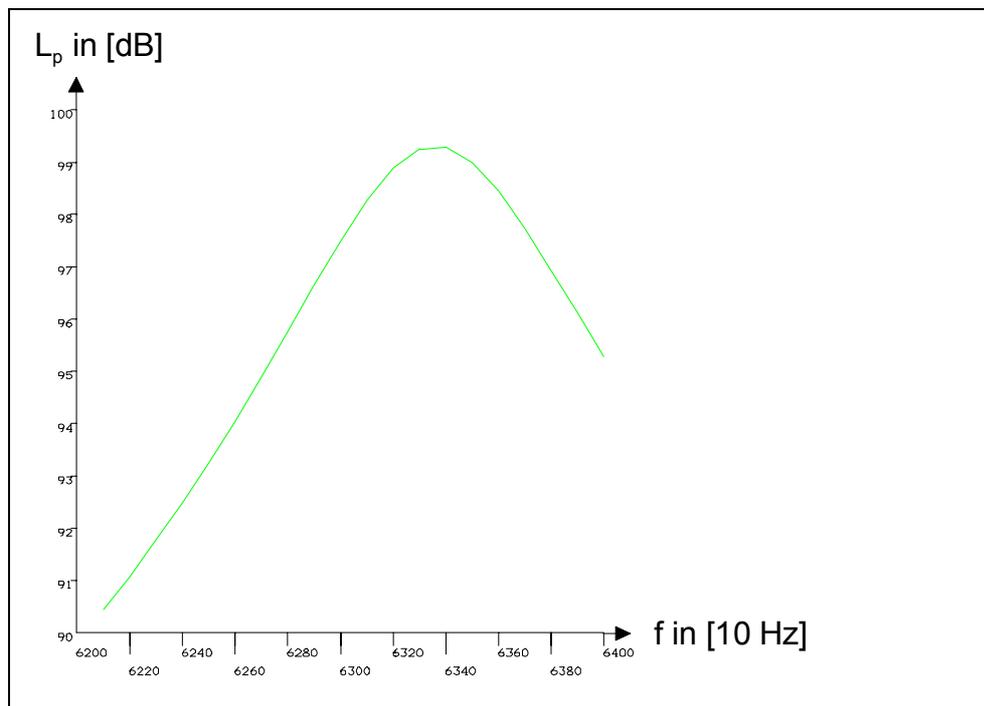


Abbildung 4.3-8: Spektrum der 1. rotationssymmetrischen Oberschiwingung f_1 des US-Wandlers gemäß Abbildung 4.3-5 und Abbildung 3.2-1

Die Grundschiwingung hat eine Resonanzfrequenz von 9,7kHz, einen Schalldruckpegel von 76,4dB und die 1. rotationssymmetrische Oberschiwingung hat eine Resonanzfrequenz von 63,4kHz und einen Pegel von 99,2dB.

4.3.3 Bewertung „Richtcharakteristiken“

4.3.3.1 Rotationssymmetrische, ebene Biegeschwinger

Wesentliche Merkmale der Richtcharakteristiken sind die bereits erwähnten Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ (vgl. Abbildung 1.1-3). Die Ergebnisse der Simulationsrechnung lassen sich in qualitativer und quantitativer Hinsicht unterscheiden. Für die Überprüfung der Zuordnung von Grund- und 1. rotationssymmetrischer Oberschwingung sind die Simulationsergebnisse der zugehörigen Verschiebungsprofile hilfreich. Die qualitative Auswertung der Richtcharakteristika lässt eine grobe Zuordnung der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ und eine Beurteilung der Ausprägung von Haupt- und Nebenkeulen zu. Die qualitative Bewertung von Haupt- und Nebenkeulen ist eine notwendige Überprüfung, da US-Wandler mit ausgeprägten Nebenkeulen für den Einsatz in Abstandssensoren ungeeignet sind (vgl. Abbildung 3.6-9 mit Begleittext).

4.3.3.1.1 Qualitative Auswertung

In der Abbildung 4.3-9 ist das FEM-3D-Vollmodell für den US-Wandler mit einem Durchmesser „ d “=24mm und den verschiedenen Dicken „ t “= 1,0mm; 0,7mm, 0,5mm und 0,25mm der Al-Schicht dargestellt.

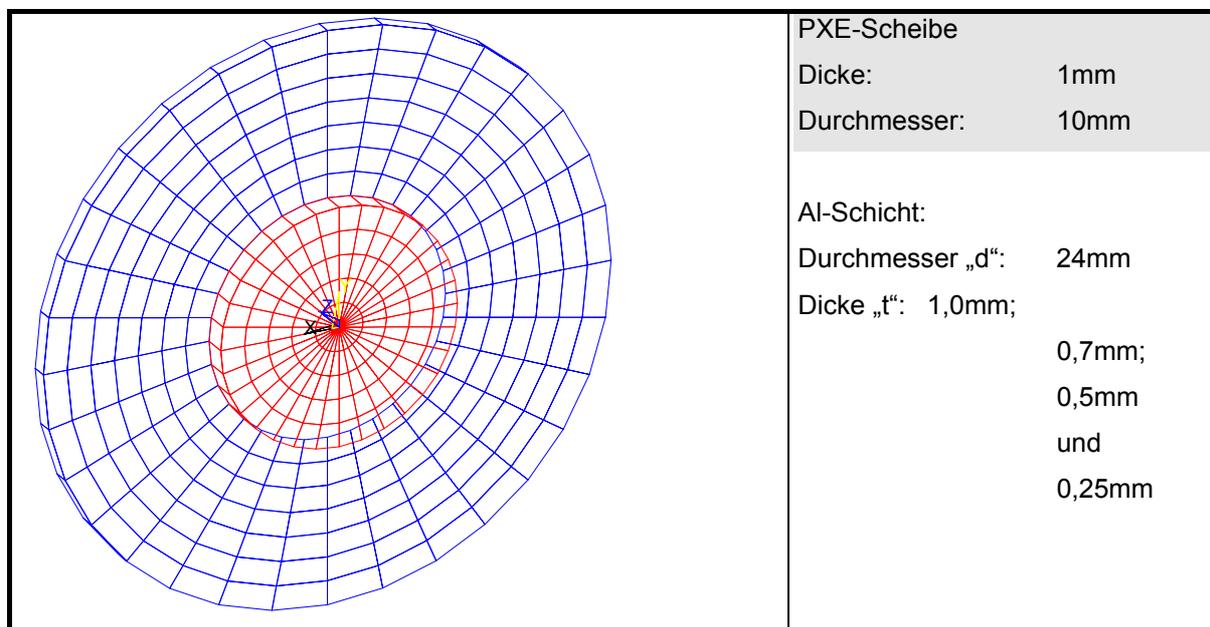


Abbildung 4.3-9: Geometriedaten für das FEM-3D-Vollmodell für den US-Wandler gemäß Abbildung 3.2-13³³

Die durch FEM-Simulation berechneten Richtcharakteristiken von Ultraschallwandlern mit unterschiedlichen Resonanzfrequenzen sind in der Abbildung 4.3-10 und

³³ In der linken Darstellung des FEM-3D-Vollmodells ist die PXE-Scheibe rot, die Al-Schicht blau dargestellt. Das Vollmodell mit den Randlasten ist in Abbildung 4.1-3 dargestellt.

Abbildung 4.3-11 dargestellt. Die Änderung der Frequenzen ergibt sich durch Variation der Dicke „t“ der Al-Schicht von 1,0mm bis 0,25mm. Der Anstieg der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ mit geringerer Plattendicke und steigender Resonanzfrequenz ist deutlich erkennbar (vgl. auch Abbildung 4.3-17).

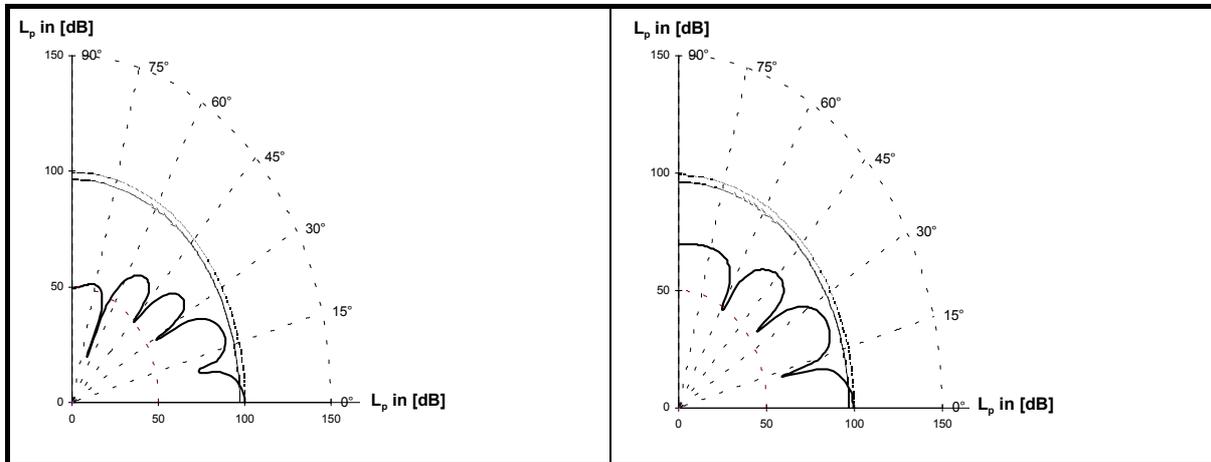


Abbildung 4.3-10: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit $t=1,0\text{mm}$ (links) und $t=0,7\text{mm}$ (rechts) gemäß Abbildung 4.3-9

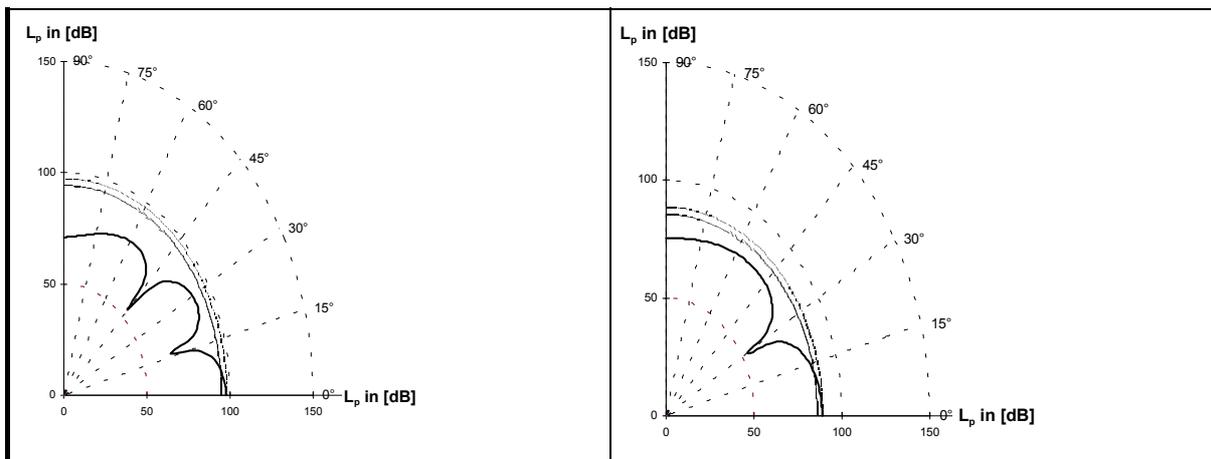


Abbildung 4.3-11: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit $t=0,5\text{mm}$ (links) und $t=0,25\text{mm}$ (rechts) gemäß Abbildung 4.3-9

In der Tabelle 4-5 sind die Resonanzfrequenzen und Schwingungsmodi und in den Abbildung 4.3-12 bzw. Abbildung 4.3-13 die Verschiebungsprofile am Beispiel des US-Wandlers mit einer Plattendicke „t“ der Al-Schicht von 0,7mm dargestellt. Dieses Beispiel wurde gewählt, weil die einzelnen Schwingungsmodi bei diesem US-Wandler besonders gut erkennbar sind.

Pos.	Resonanzfrequenz in [Hz]	Modus
1	9796	Grundschiwingung
2	20793	Resonanzfrequenz
3	20793	Resonanzfrequenz
4	51666	Resonanzfrequenz
5	51666	Resonanzfrequenz
6	63969	rotationssymmetrische Oberschiwingung
7	76821	Resonanzfrequenz
8	76821	Resonanzfrequenz
9	79056	Resonanzfrequenz
10	79056	Resonanzfrequenz

Tabelle 4-5: Resonanzfrequenzen des US-Wandlers mit einer Plattendicke von 0,7mm gemäß Abbildung 4.3-9

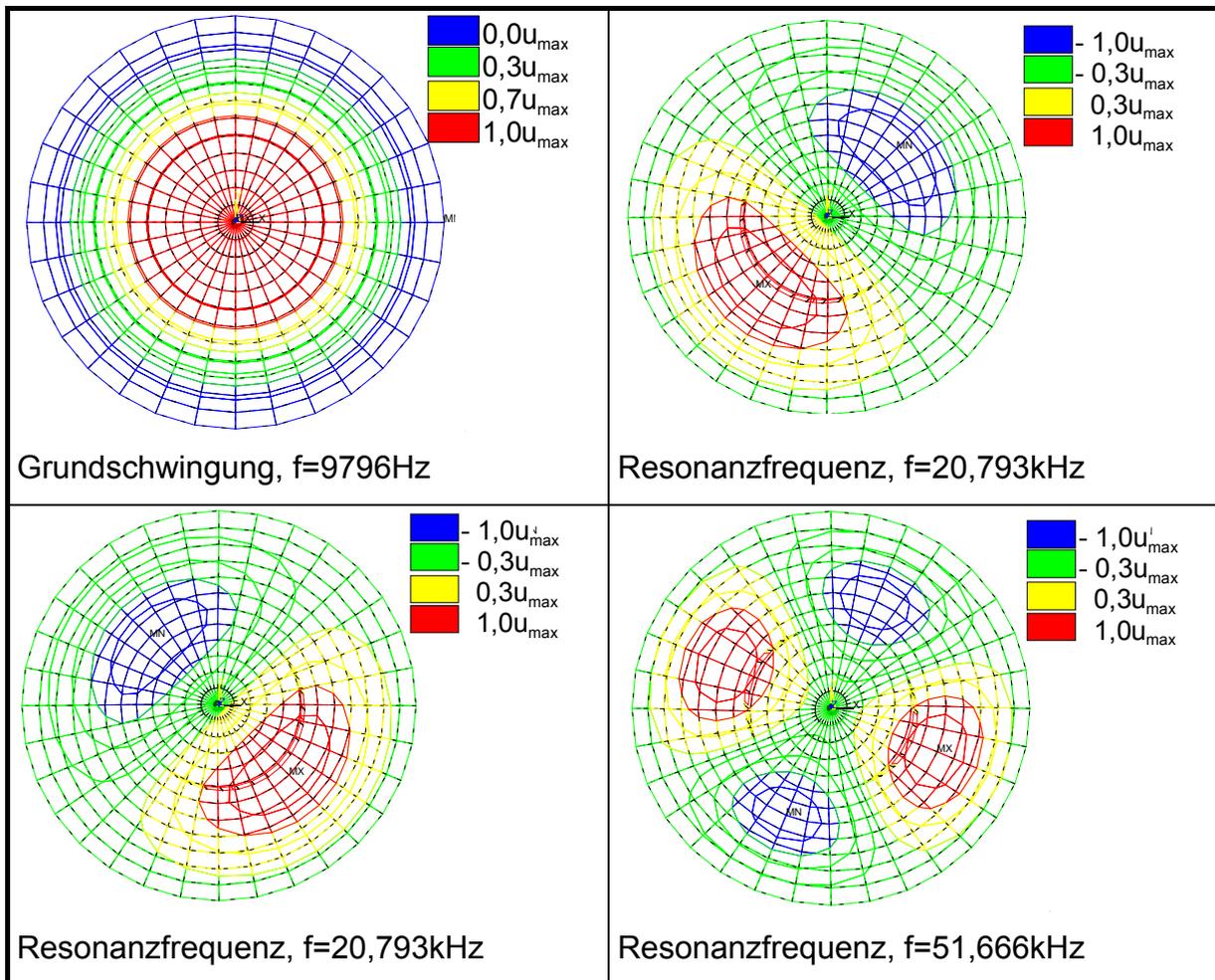


Abbildung 4.3-12: Verschiebungsprofile des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-5 mit $d=24\text{mm}$, $t=0,7\text{mm}$ für die Schwingungen der 1.-4. Resonanzfrequenzen³⁴

³⁴ Die gleichfarbigen Linien kennzeichnen die Gebiete gleicher Verschiebungen. Für die Grundschiwingung beispielsweise kennzeichnet das rot dargestellte Gebiet die maximale Verschiebung „ u_{max} “ und das grün dargestellte Gebiet die Verschiebung von „ $0,3u_{\text{max}}$ “.

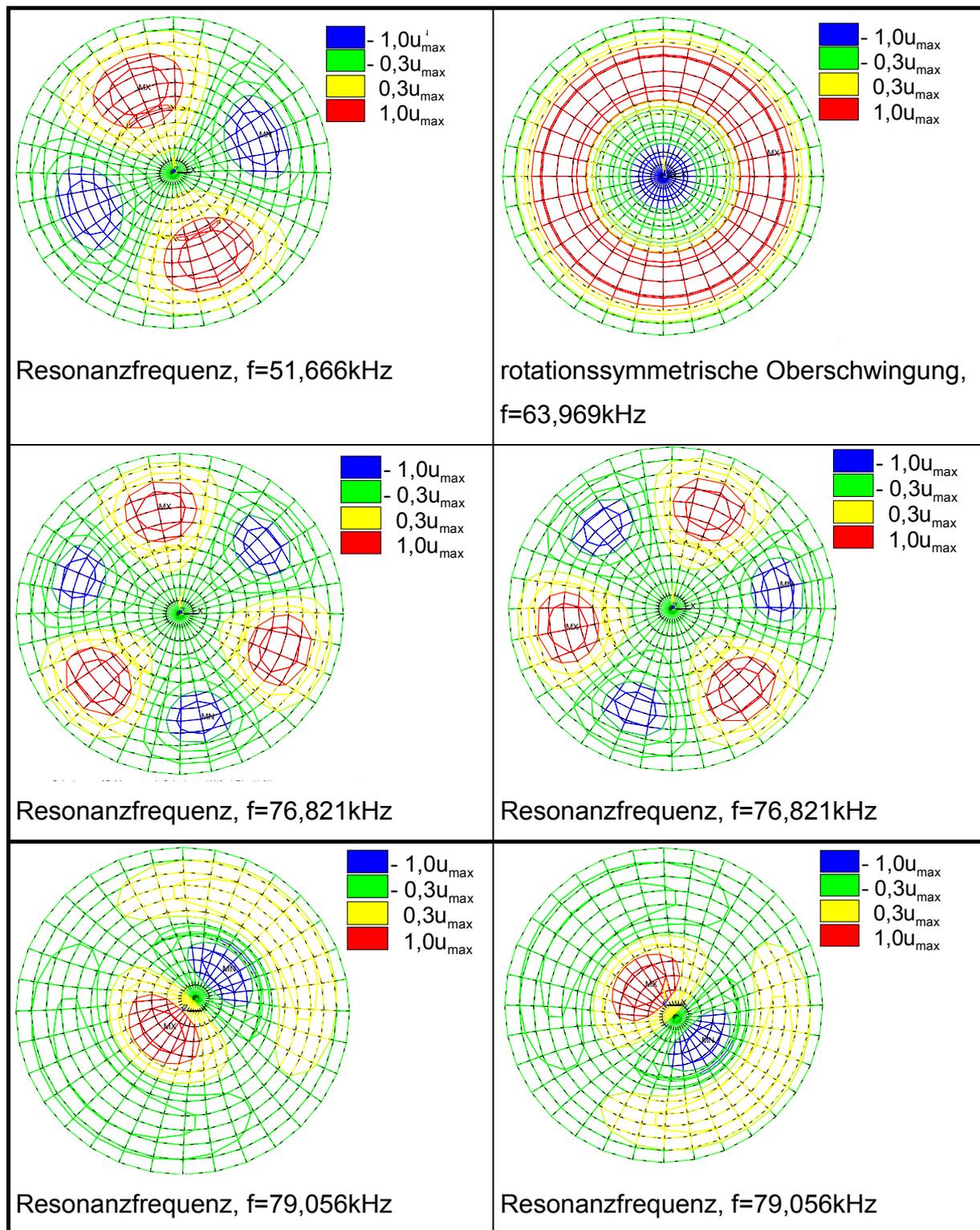


Abbildung 4.3-13: Verschiebungsprofile des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-5 mit $d=24\text{mm}$, $t=0,7\text{mm}$ für die Schwingungen der 5.- 10. Resonanzfrequenzen^{34,S. 79}

Durch die Auswertung der Verschiebungsprofile sind die Resonanzfrequenzen von Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung identifizierbar.

Der Schwingungszustand der Grundschwingung bei 9796 Hz ist anhand des symme-

trischen Verschiebungsprofils mit dem einzigen Nulldurchgang am Rand (vgl. Abbildung 4.3-12 oben links, blau dargestellt) erkennbar.

Bei der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung liegt ein weiterer symmetrischer Nulldurchgang vor; die zugehörige Knotenlinie ist durch den grün-gelben Farbübergang gekennzeichnet (vgl. (vgl. Abbildung 4.3-12 oben rechts). Die Resonanzfrequenz beträgt 63,969kHz.

Die Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit einem Durchmesser „d“ von 35mm und einer Dicke „t“ von 1,5mm ist in Abbildung 4.3-14 dargestellt. Die Resonanzfrequenz der 1. Oberschwingung „f₁“ ist 51,172kHz und der Öffnungswinkel „α₁“ bzw. „α₂“ beträgt 13° bzw. 26°.

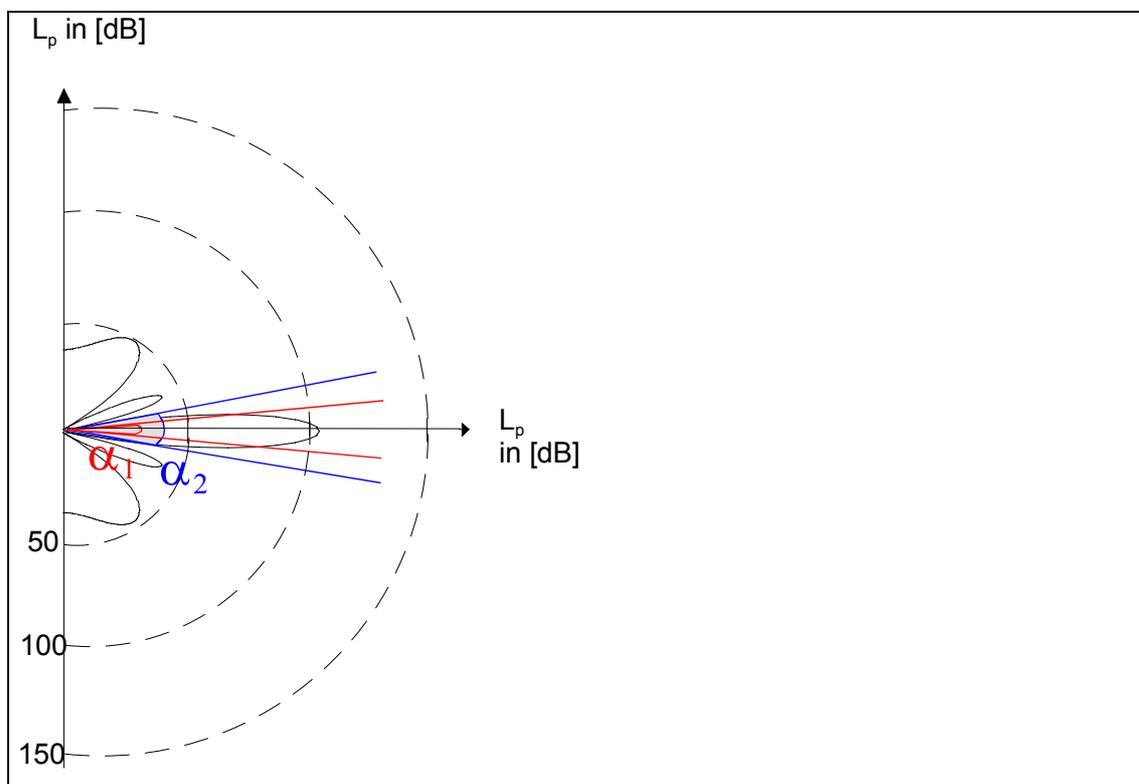


Abbildung 4.3-14: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik der 1.rotationssymmetrischen Oberschwingung ($f_1=51,172\text{kHz}$) des US-Wandlers mit Öffnungswinkel α_1 , α_2 eines US-Wandlers ($d=35$ und $t=1,5\text{mm}$) gem. Abbildung 3.2-1^{18, S.43}

In Kapitel 3.6.2 sind die experimentell bestimmten Kennwerte des US-Wandlers mit einem Durchmesser „d“ von 35mm und einer Dicke „t“ von 1,5mm dargestellt. Der Öffnungswinkel „α₁“ bzw. „α₂“ beträgt 10,8° bzw. 22,8° und die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung „f₁“ ist 44,480kHz.

4.3.3.1.2 Quantitative Auswertung

Aufgrund der Frequenzabhängigkeit des Öffnungswinkels gemäß Gleichung 2 werden exemplarisch die Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung in Abhängigkeit der Plattendicke „t“ des Schwingers ermittelt. Bei dem Untersuchungsobjekt handelt es sich um einen symmetrischen Schwinger mit einem Durchmesser von 24mm, bei dem die Plattendicke „t“ zwischen 0,25mm und 1,0mm variiert wird (Abmessung vgl. Abbildung 4.3-9). Die Ergebnisse der FEM-Simulation sind in der Abbildung 4.3-15 dargestellt.

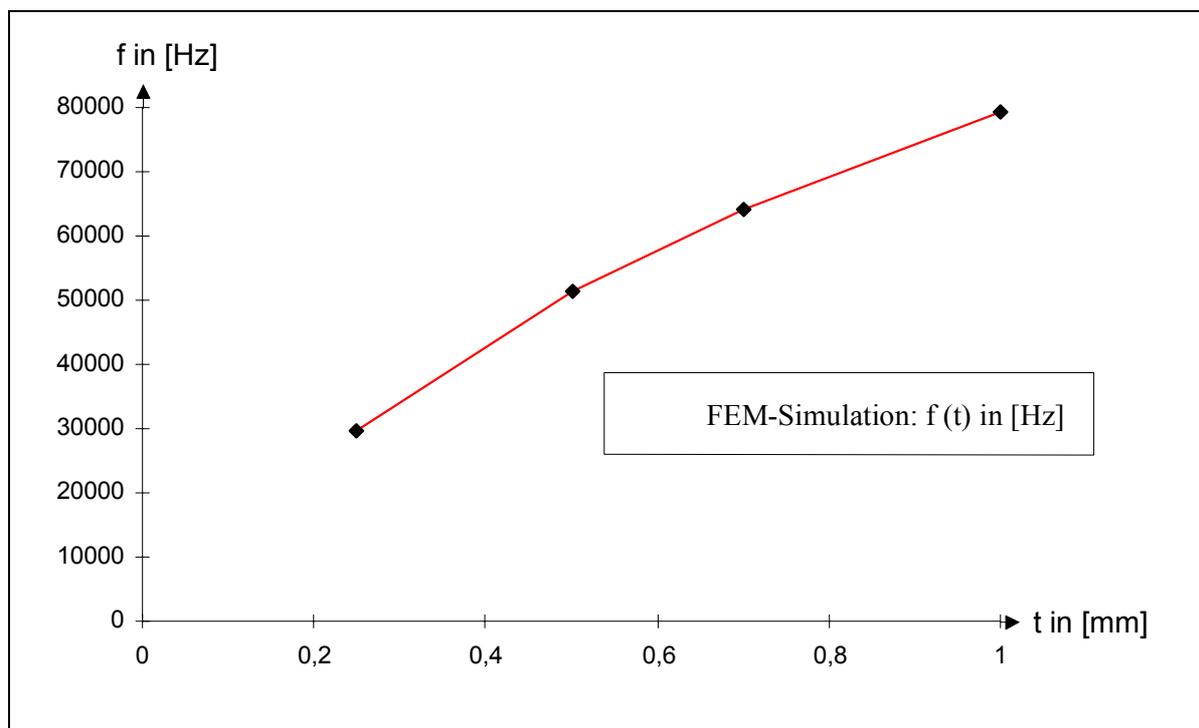


Abbildung 4.3-15: Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-9 mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ als Funktion verschiedener Plattendicken $t=0,2\text{mm}$ bis $t=1,0\text{mm}$

Deutlich ist der Anstieg der Resonanzfrequenz mit steigender Plattendicke erkennbar. Dieser Effekt wurde bereits in Gleichung 3 berücksichtigt. In der Abbildung 4.3-16 werden für dieselben Wandlertypen die Öffnungswinkel „ α_1 “ für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung in Abhängigkeit der Plattendicke „t“ dargestellt. Berücksichtigt man den zuvor dargestellten Zusammenhang zwischen der Plattendicke und der Resonanzfrequenz sowie den Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und Öffnungswinkel gemäß Gleichung 2, so ist dieses abfallende Verhalten des Öffnungswinkels mit steigender Plattendicke zu erwarten.

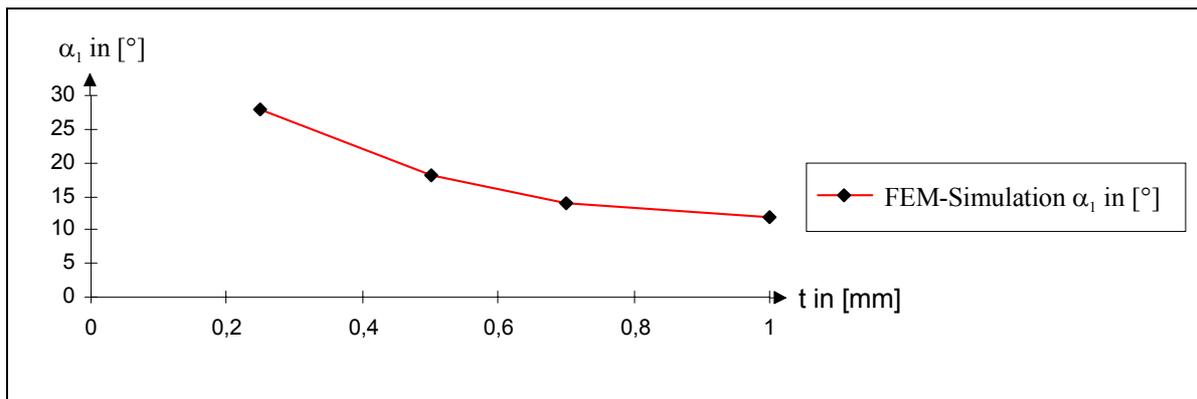


Abbildung 4.3-16: Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-9 mit einem Durchmesser „d“=24mm als Funktion verschiedener Plattendicken $t=0,2\text{mm}$ bis $t=1,0\text{mm}$

In der Abbildung 4.3-17 ist das Verhalten der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung dargestellt. Qualitativ zeigen beide Kurvenverläufe mit steigender Resonanzfrequenz eine Verringerung der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “. Aufgrund ihrer Definition sind die Öffnungswinkel α_1 , die über den 3dB-Abfall definiert werden (Definition vgl. Kap: 3.1.2), deutlich kleiner als die Öffnungswinkel „ α_2 “, die über den Übergang von der Haupt- zu der Nebenkeule definiert werden (vgl. Richtcharakteristiken in Abbildung 4.3-11). Bei den Untersuchungsobjekten handelt es sich ebenfalls um Wandlertypen mit einem Durchmesser „d“ von 24mm und einer Dicke „t“ zwischen 0,25mm und 1,0mm.

Bei den untersuchten Wandlertypen sind die Öffnungswinkel „ α_2 “ zirka doppelt so groß wie die Öffnungswinkel „ α_1 “.

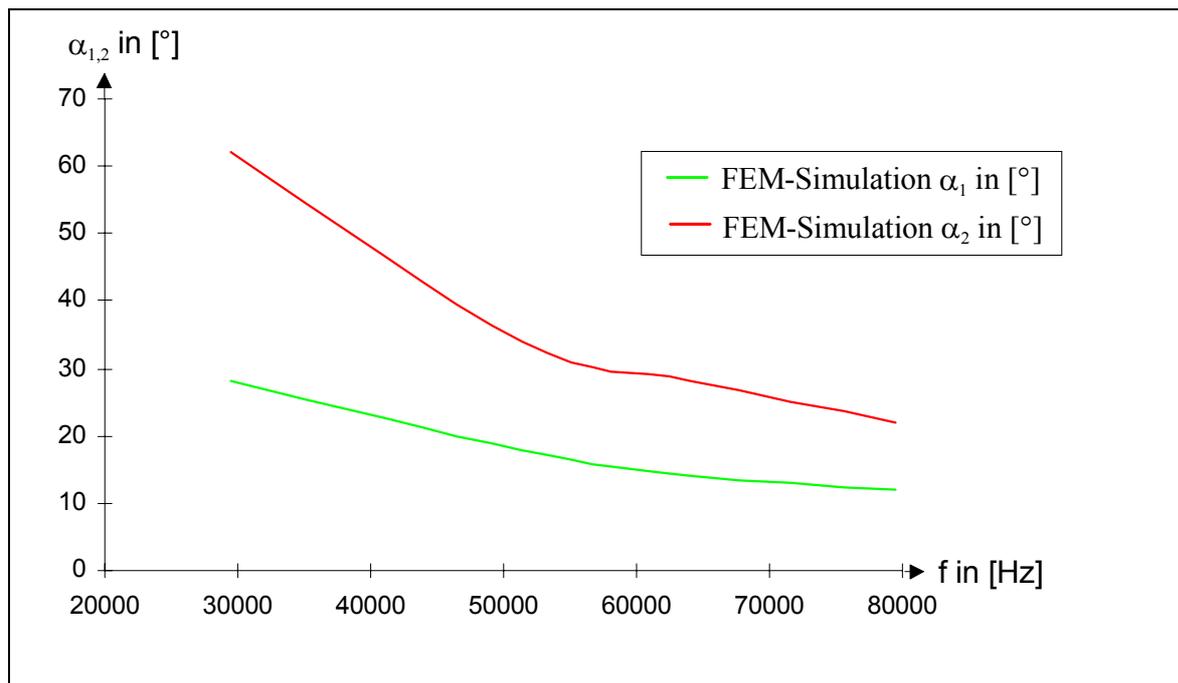


Abbildung 4.3-17: Öffnungswinkel α_1 und α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-9 mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ und verschiedenen Plattendicken t als Funktion der Resonanzfrequenzen f_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

In der Abbildung 4.3-18 sind die Ergebnisse der FEM-Simulation und der theoretischen Berechnung für den Öffnungswinkel „ α_2 “ gemäß Gleichung 2 dargestellt.

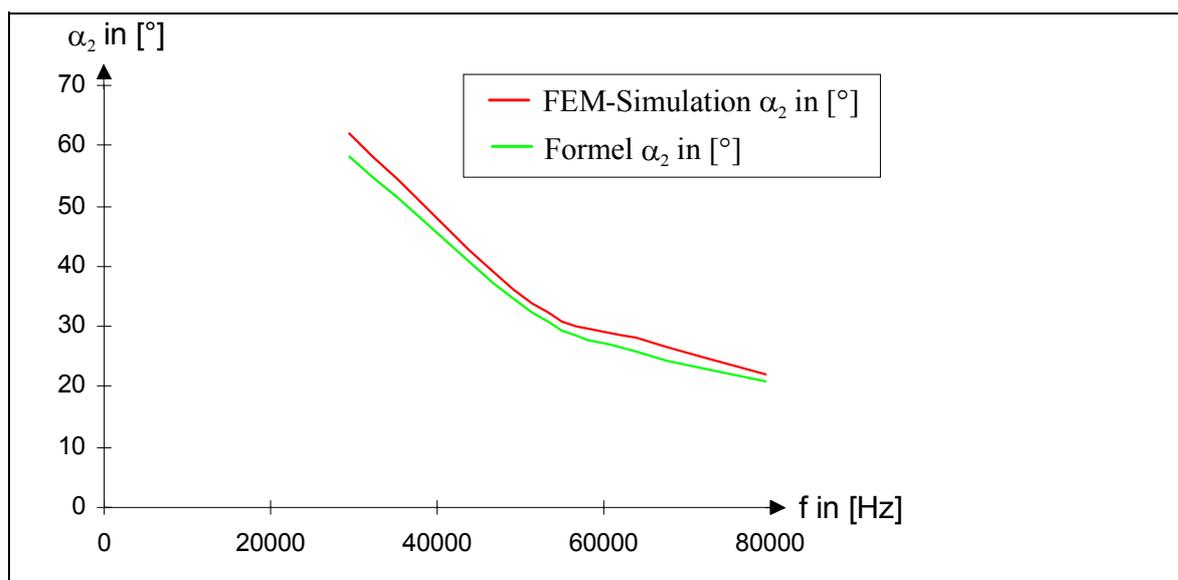


Abbildung 4.3-18: Vergleich von α_2 aus FEM-Simulation und Formel gemäß Gleichung 2 für versch. US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-9 mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ und verschiedenen Plattendicken t als Funktion der Resonanzfrequenzen f_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

Nach der Gleichung 2 ist mit steigender Resonanzfrequenz eine Abnahme des Öffnungswinkels „ α_2 “ zu erwarten. Die Übereinstimmung der beiden Rechenmethoden ist sehr hoch. Die maximale Abweichung liegt bei 63,969kHz und beträgt ca. 7,5%. Voraussetzung der Auslegung von Wandlern nach dieser Berechnungsgrundlage ist jedoch die Kenntnis der Resonanzfrequenzen (vgl. Kap. 4.3.1), die sich nach dem FEM-Verfahren mit steigender Vernetzungsdichte zu niedrigeren Frequenzwerten bewegen (vgl. Abbildung 4.3-2). Werden die Geometrie- und Materialparameter des US-Wandlers vorgegeben, so ist bei der Bestimmung des Öffnungswinkels „ α_2 “ bereits die Abweichung zu berücksichtigen, die sich durch die Bestimmung der Resonanzfrequenzen ergibt.

4.3.3.2 Biegeschwinger mit Beschwerungsring

Um das Schwingungsverhalten zu beeinflussen, wird die Al-Schicht des US-Wandlers durch einen innenliegenden Beschwerungsring versteift (vgl. auch Mágori /120/). In der Abbildung 4.3-19 ist das FEM-Volumenmodell dargestellt.

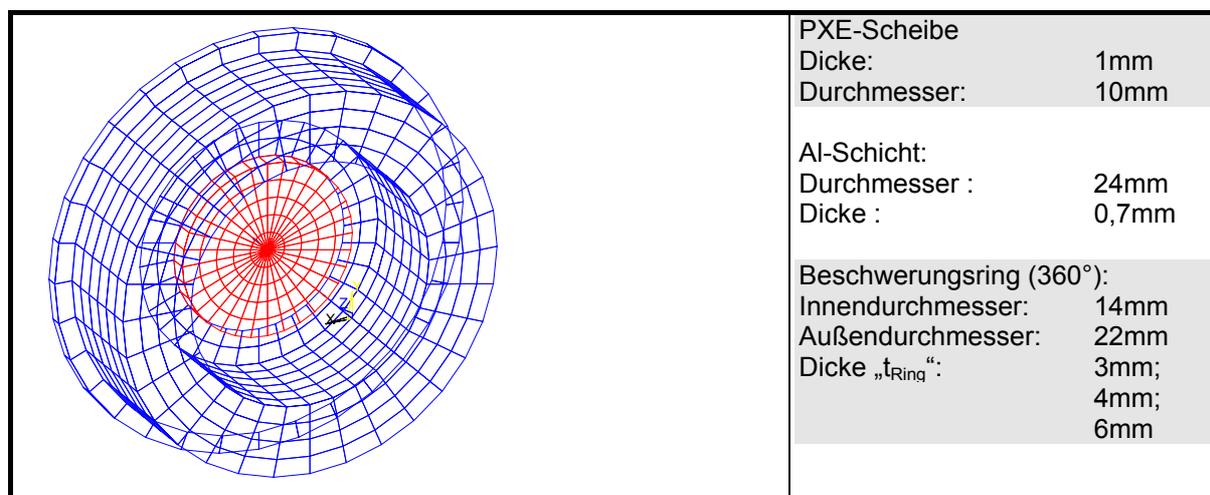


Abbildung 4.3-19: Geometriedaten für das FEM-3D-Vollmodell für den US-Wandler mit Beschwerungsring ³⁵

Basis der Berechnung ist der US-Wandler mit einem Durchmesser von 24mm und einer Dicke von 0,7mm.

³⁵ In der linken Darstellung des FEM-Vollmodells ist die PXE-Scheibe rot, die Al-Schicht und der Beschwerungsring blau dargestellt.

4.3.3.2.1 Qualitative Auswertung

In der Tabelle 4-6 sind die Resonanzfrequenzen und Schwingungsmodi und in den Abbildung 4.3-20 bis Abbildung 4.3-22 sind die Verschiebungsprofile des US-Wandlers mit den Abmessungen gemäß Abbildung 4.3-19 und der Dicke des Beschwerungsringes „ t_{Ring} “ von 6mm dargestellt.

Pos.	Resonanzfrequenz in [Hz]	Modus
1	28414	Grundschiwingung
2	51025	Resonanzfrequenz
3	51025	Resonanzfrequenz
4	56801	1. rotationssymmetrische Oberschiwingung
5	62324	Resonanzfrequenz
6	62324	Resonanzfrequenz
7	66571	Resonanzfrequenz
8	66571	Resonanzfrequenz
9	68236	Resonanzfrequenz
10	68236	Resonanzfrequenz

Tabelle 4-6: Resonanzfrequenzen des US-Wandlers mit einer Dicke des Beschwerungsringes von 6mm gemäß Abbildung 4.3-19

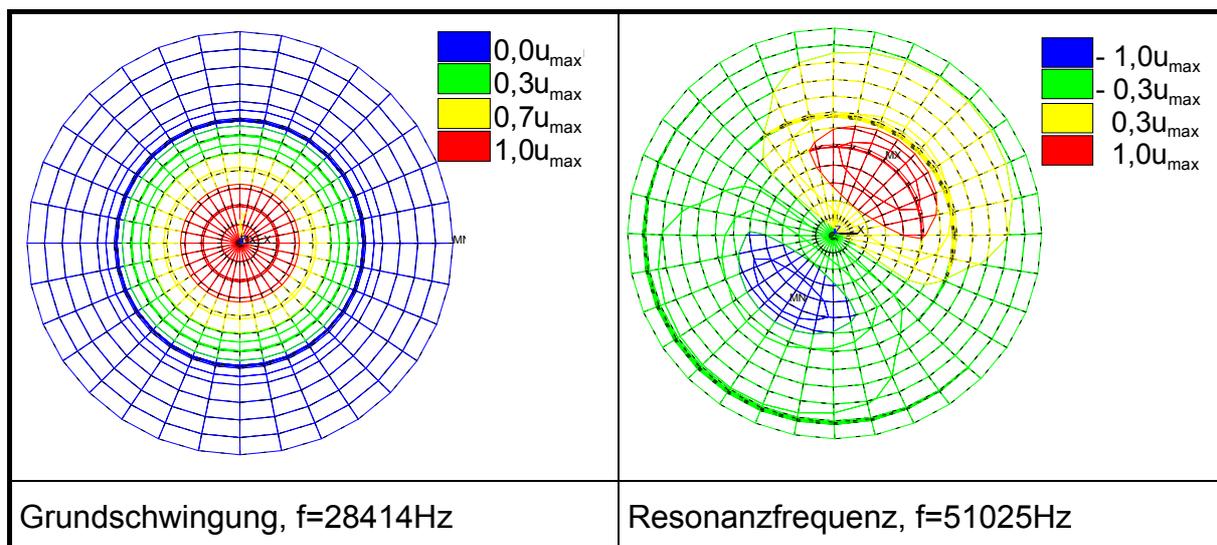


Abbildung 4.3-20: Verschiebungsprofile des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-6 mit einer Dicke des Beschwerungsringes von $t_{\text{Ring}}=6\text{mm}$ der 1. - 2. Resonanzfrequenzen^{34, S.79}

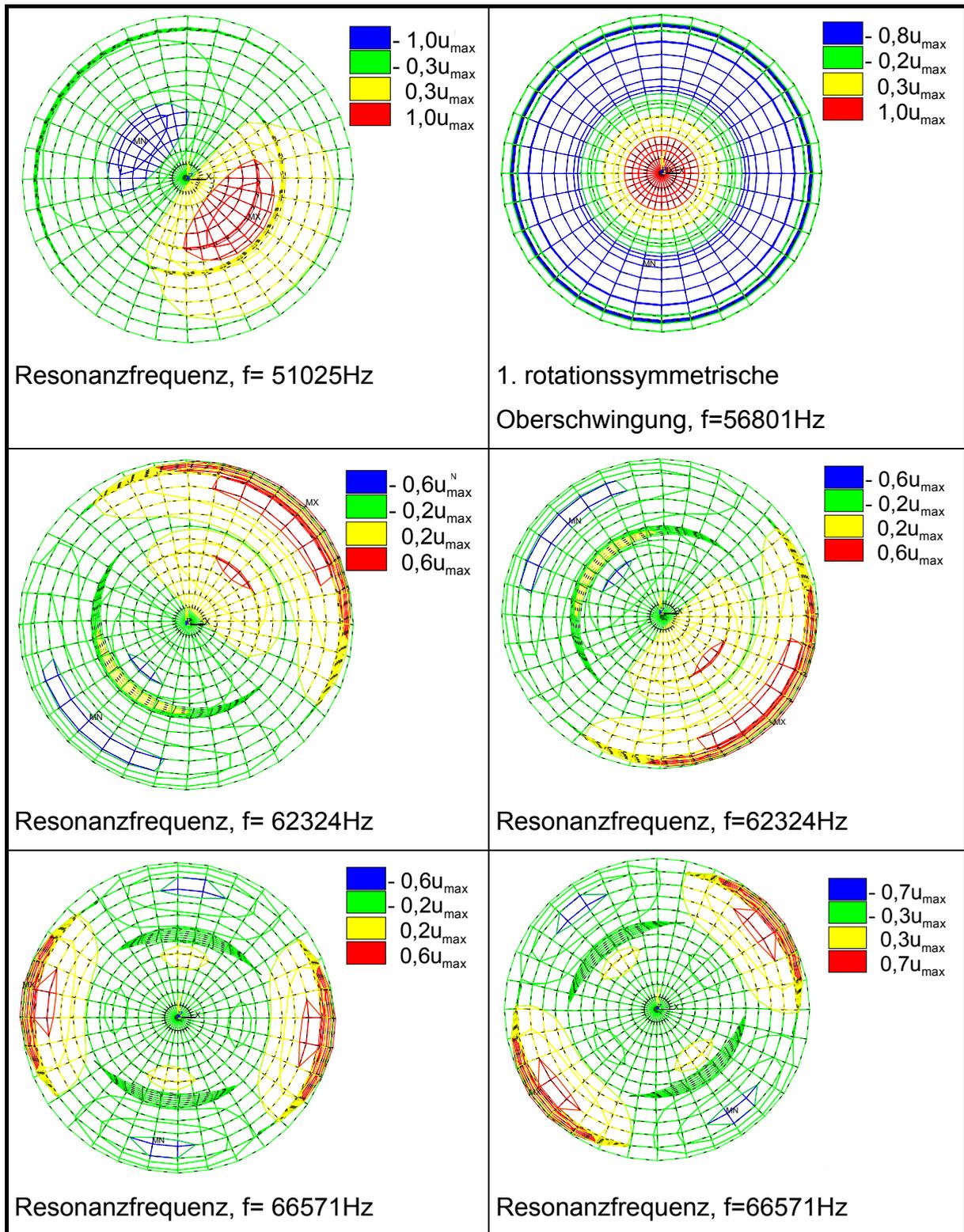


Abbildung 4.3-21: Verschiebungsprofile des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-6 mit einer Dicke des Beschwerungsringes von $t_{\text{Ring}}=6\text{mm}$ der 3. -8. Resonanzfrequenzen^{34,S.79}

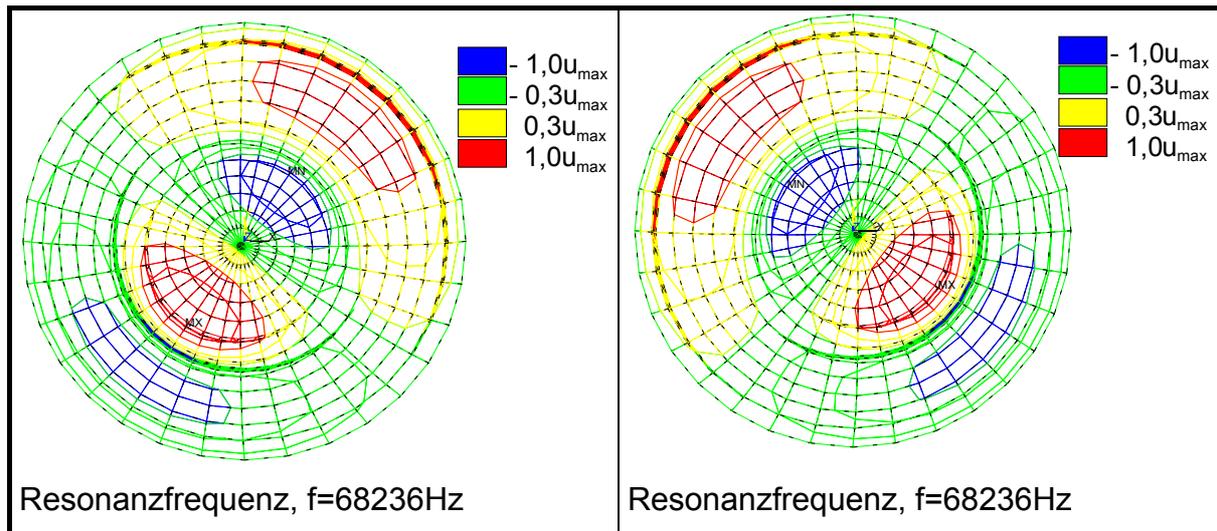


Abbildung 4.3-22: Verschiebungsprofile des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-6 mit einer Dicke des Beschwerungsringes von $t_{\text{Ring}}=6\text{mm}$ der 9. - 10. Resonanzfrequenzen^{34, S.79}

Bemerkenswert sind die Resonanzfrequenzen der einzelnen Modi. Vergleicht man die Resonanzfrequenz der Grundschiwingung, so liegt der Wert des US-Wandlers mit Beschwerungsring bei 28,414kHz und der des US-Wandlers ohne Ring bei 9,796kHz.

Dieser Effekt lässt sich mit der größeren Masse des US-Wandlers mit dem Beschwerungsring erklären. Bei der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung beträgt die Resonanzfrequenz des US-Wandlers mit Beschwerungsring 56,801kHz und die des US-Wandlers ohne Beschwerungsring 63,969kHz. Während der US-Wandler ohne Beschwerungsring zwischen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung vier gemischte Schwingungsmodi aufweist, finden sich bei dem mit Beschwerungsring nur zwei gemischte Modi. Dieser Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass die erste rotationssymmetrische Oberschwingung für den US-Wandler mit Beschwerungsring bereits energetisch günstiger ist als weitere gemischte Schwingungsmodi, wie bei dem US-Wandler ohne Beschwerungsring. Prinzipiell machen die Verschiebungsprofile deutlich, dass die Schwingungsidentifikation mithilfe von Verschiebungsprofilen unabdingbare Voraussetzung dafür ist, die Grund- und 1. rotationssymmetrische Oberschwingung zu identifizieren. In der Abbildung 4.3-23 ist die Richtcharakteristik des US-Wandlers für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung bei einer Resonanzfrequenz von $f_1=56,801\text{kHz}$ dargestellt. Der Öffnungswinkel „ α_2 “ beträgt 30° . Die Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers mit einem Durchmesser von 35mm ($t=1,5\text{mm}$) und einem 3mm starken Beschwerungsring ist in der

Abbildung 4.3-24 dargestellt. Die Resonanzfrequenz ist 31,528kHz und der Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ beträgt 19° bzw. 39°.

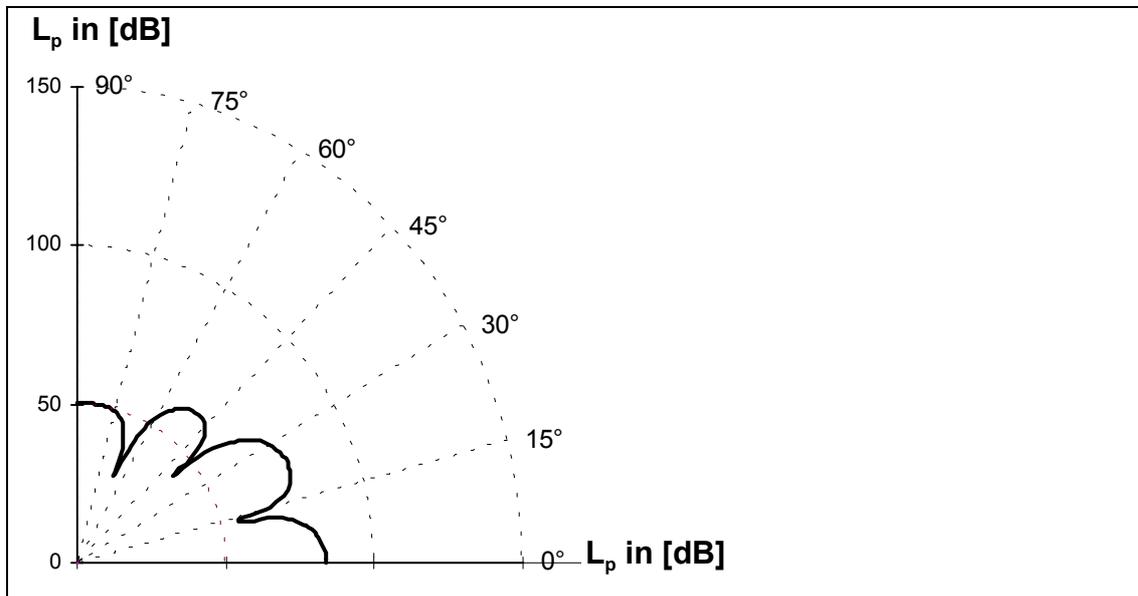


Abbildung 4.3-23: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers gemäß Abbildung 4.3-19 mit der Dicke des Beschwerungsringes von $t_{\text{ring}}=6\text{mm}$

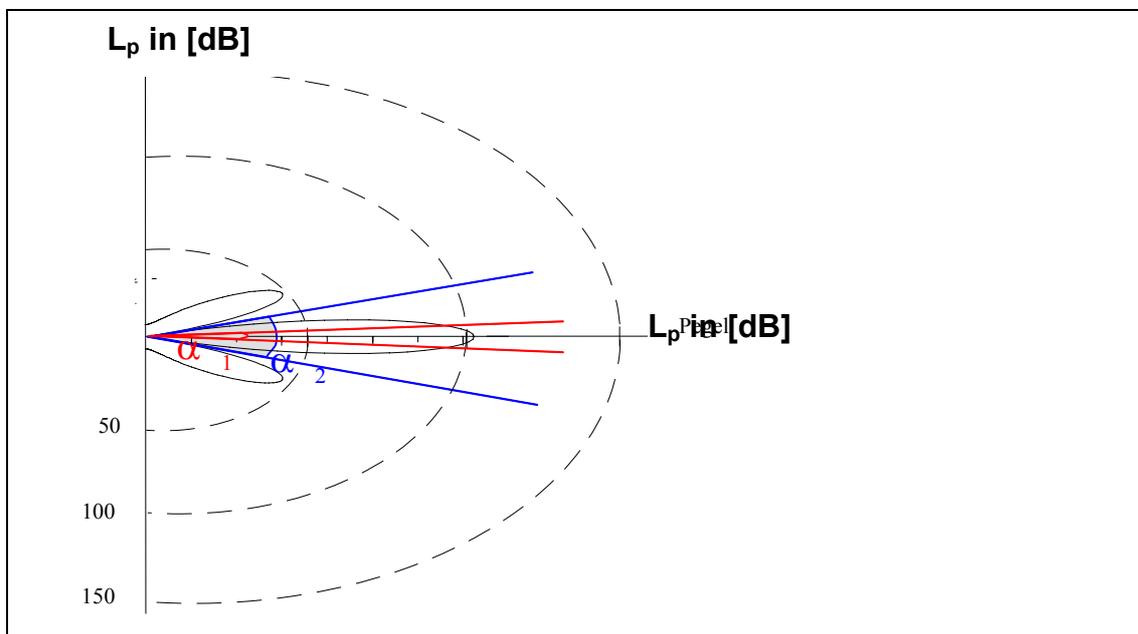


Abbildung 4.3-24: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik mit Öffnungswinkel α_1 , α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung ($f_1=31,528\text{kHz}$) des US-Wandlers mit einem Durchmesser $d=35$ und einer Dicke $t=1,5\text{mm}$ sowie der Dicke des Beschwerungsringes von $t_{\text{ring}}=3,0\text{mm}$

Im Vergleich zu dem US-Wandler ohne Beschwerungsring (Abbildung 4.3-14), dessen Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung 51,172kHz beträgt, ist die Resonanzfrequenz des US-Wandlers mit

Beschwerungsring bei 31,528kHz deutlich geringer. Demzufolge ist der Schallöffnungswinkel des US-Wandlers ohne Ring deutlich kleiner: Statt $\alpha_1=19^\circ$ bzw. $\alpha_2=39^\circ$ betragen die Öffnungswinkel $\alpha_1=13^\circ$ bzw. $\alpha_2=26^\circ$. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verwendung von Beschwerungsringen bei den untersuchten und simulierten Wandlern eine Verringerung der Resonanzfrequenzen und eine Vergrößerung der Öffnungswinkel α_1 bzw. α_2 mit sich bringt.

4.3.3.2.2 Quantitative Auswertung

In der Abbildung 4.3-25 ist das Ergebnis der Simulation von Wandlern mit einem Durchmesser „d“ von 24mm, einer Plattendicke „t“ von 0,7mm und unterschiedlichen Beschwerungsringen dargestellt.

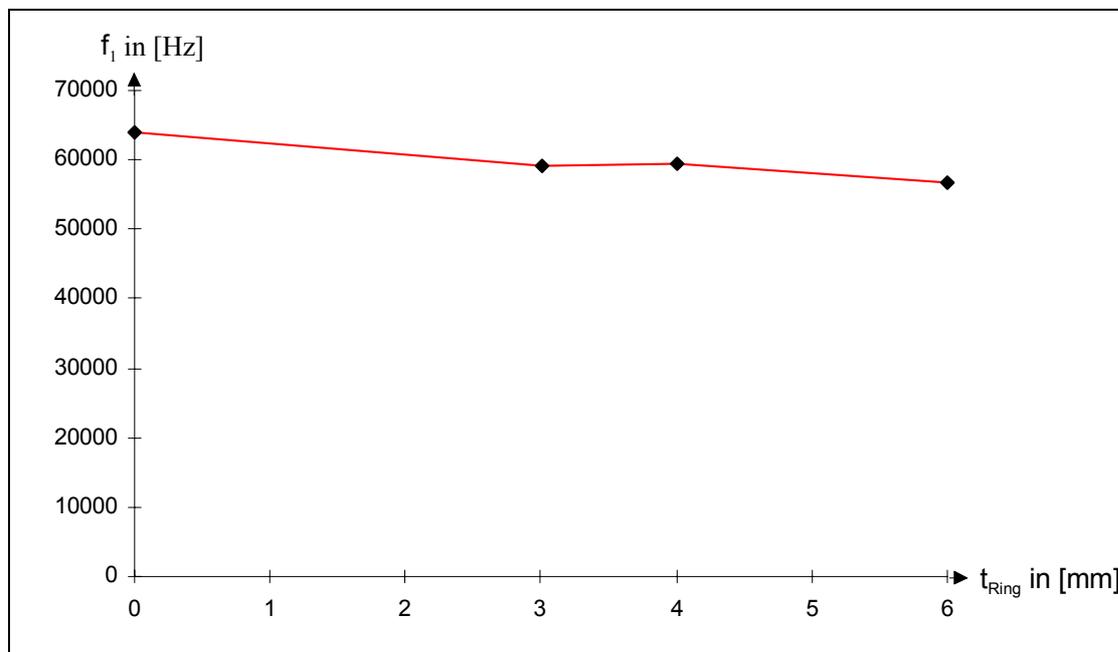


Abbildung 4.3-25: Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-19 als Funktion der Dicke der Beschwerungsringe von $t_{\text{ring}}=0,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$

Die Beschwerungsringe wurden in der Dicke variiert. Mit zunehmender Beschwerungsringdicke sinken die Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung geringfügig ab. Während die Resonanzfrequenz des US-Wandlers ohne Beschwerungsring 63,969kHz beträgt, hat der US-Wandler mit dem dicksten Beschwerungsring (6mm) eine Resonanzfrequenz von 56,801kHz. Der Unterschied beträgt zirka 11,2%.

Die Darstellung der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ in Abhängigkeit der Dicke der Beschwerungsringe ist in der Abbildung 4.3-26 dargestellt.

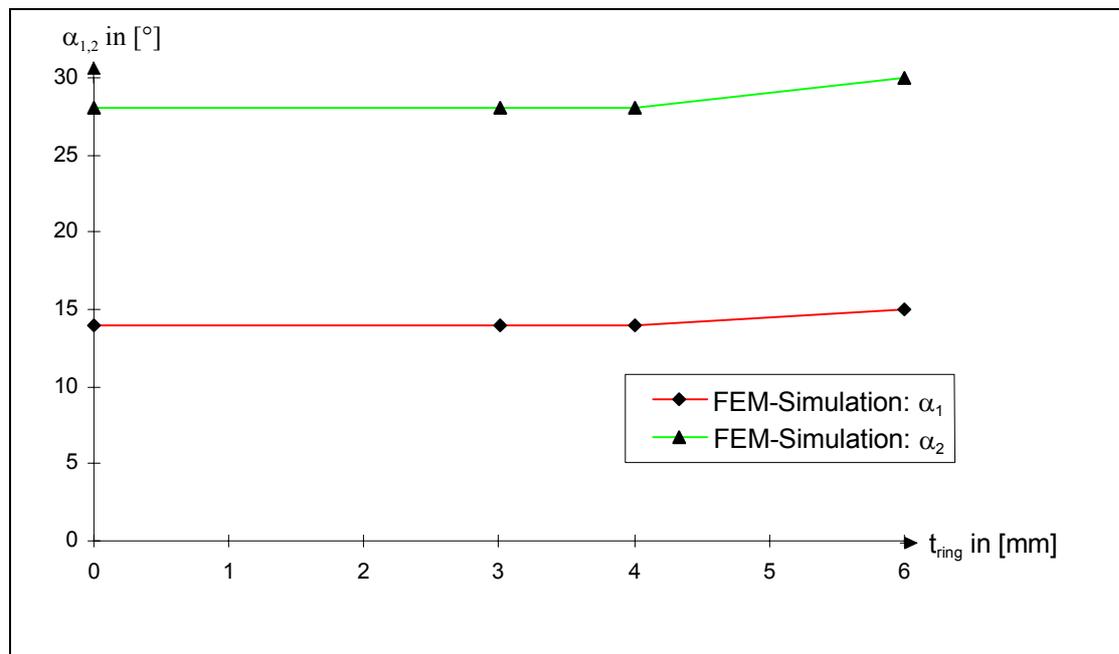


Abbildung 4.3-26: Öffnungswinkel α_1 und α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler gemäß Abbildung 4.3-19 als Funktion der Dicke der Beschwerungsringe von $t_{\text{ring}}=0,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$

Die Grafik macht deutlich, dass sich der Öffnungswinkel nur eingeschränkt mithilfe der verwendeten Beschwerungsringe beeinflussen lässt. Während der US-Wandler ohne Beschwerungsring einen Öffnungswinkel „ α_1 “ von 14° aufweist, hat derjenige mit dem dicksten Beschwerungsring ($t_{\text{ring}}=6\text{mm}$) einen Öffnungswinkel „ α_1 “ von 15° . Diese Veränderung ist auf die abnehmenden Resonanzfrequenzen (vgl. Abbildung 4.3-25) von Wandlern mit dickeren Beschwerungsringen zurückzuführen.

4.3.3.3 Biegeschwinger mit Beschwerungsringsegmenten

Wird die Aluminium-Schicht des Biegeschwingers mit Beschwerungsringsegmenten versteift, lassen sich asymmetrische Richtcharakteristiken erzielen.

4.3.3.3.1 Qualitative Auswertung

Das FEM-Volumenmodell des mit Beschwerungsringsegmenten versteiften US-Wandlers ist in Abbildung 4.3-27 dargestellt. Der US-Wandler hat einen Durchmesser „ d “ von 24mm und einer Dicke „ t “ von $0,7\text{mm}$. Die Beschwerungsringsegmente bestehen aus demselben Material wie die Al-Schicht und haben eine Ausschnittgröße von 90° . Sie sind mittig zwischen PXE-Scheibe und Außenrand

aufgebracht und haben die Dicke „ t_{seg} “ von 2mm, 3mm und 6mm und einen Innen- bzw. Außendurchmesser von 14mm, bzw. 22mm (Abmessungen, FEM-Modell vgl. Abbildung 4.3-27).

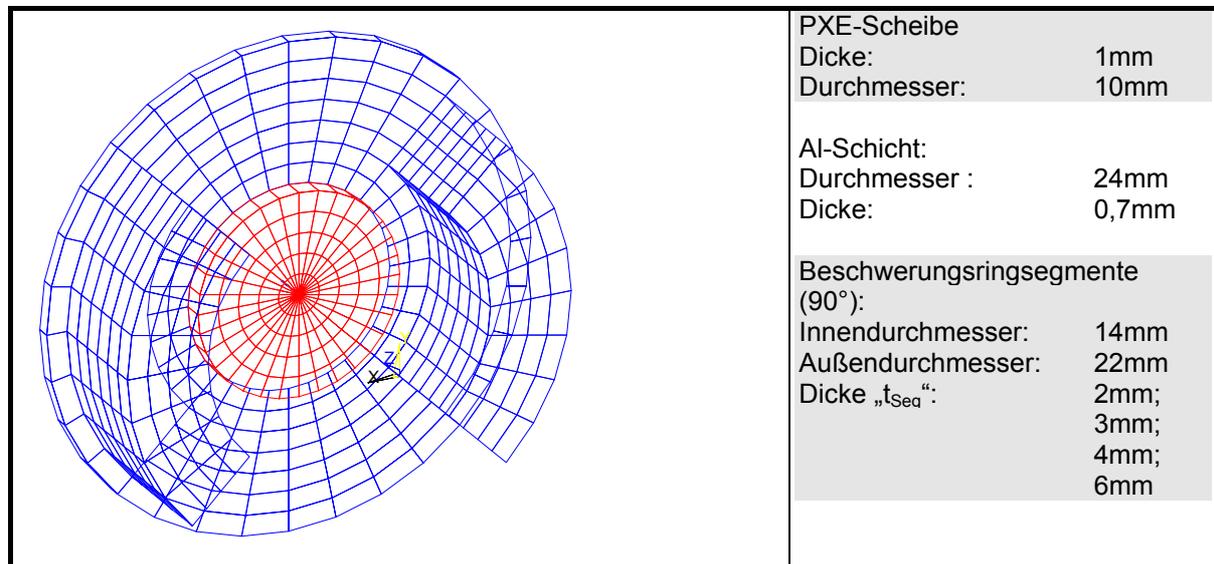


Abbildung 4.3-27: Geometriedaten für das FEM-3D-Vollmodell für den US-Wandler mit Beschwerungsringsegment ³⁶

In der Tabelle 4-7 sind die Resonanzfrequenzen und Schwingungsmodi und in den Abbildung 4.3-28 bzw. Abbildung 4.3-29 die Verschiebungsprofile des US-Wandlers mit den Abmessungen gemäß Abbildung 4.3-27 und der Dicke des Beschwerungsringsegmente von 6mm dargestellt.

Pos.	Resonanzfrequenz in [Hz]	Modus
1	13252	Grundschiwingung
2	18394	Resonanzfrequenz
3	31025	Resonanzfrequenz
4	32147	1. rotationssymmetrische Oberschiwingung
5	47761	Resonanzfrequenz
6	52525	Resonanzfrequenz
7	56594	Resonanzfrequenz

Tabelle 4-7: Resonanzfrequenzen des US-Wandlers mit einer Dicke des Beschwerungsringsegmentes von 6mm gemäß Abbildung 4.3-27

³⁶ In der linken Darstellung des FEM-Vollmodells ist die PXE-Scheibe rot, die Al-Schicht und das Beschwerungsringsegment blau dargestellt.

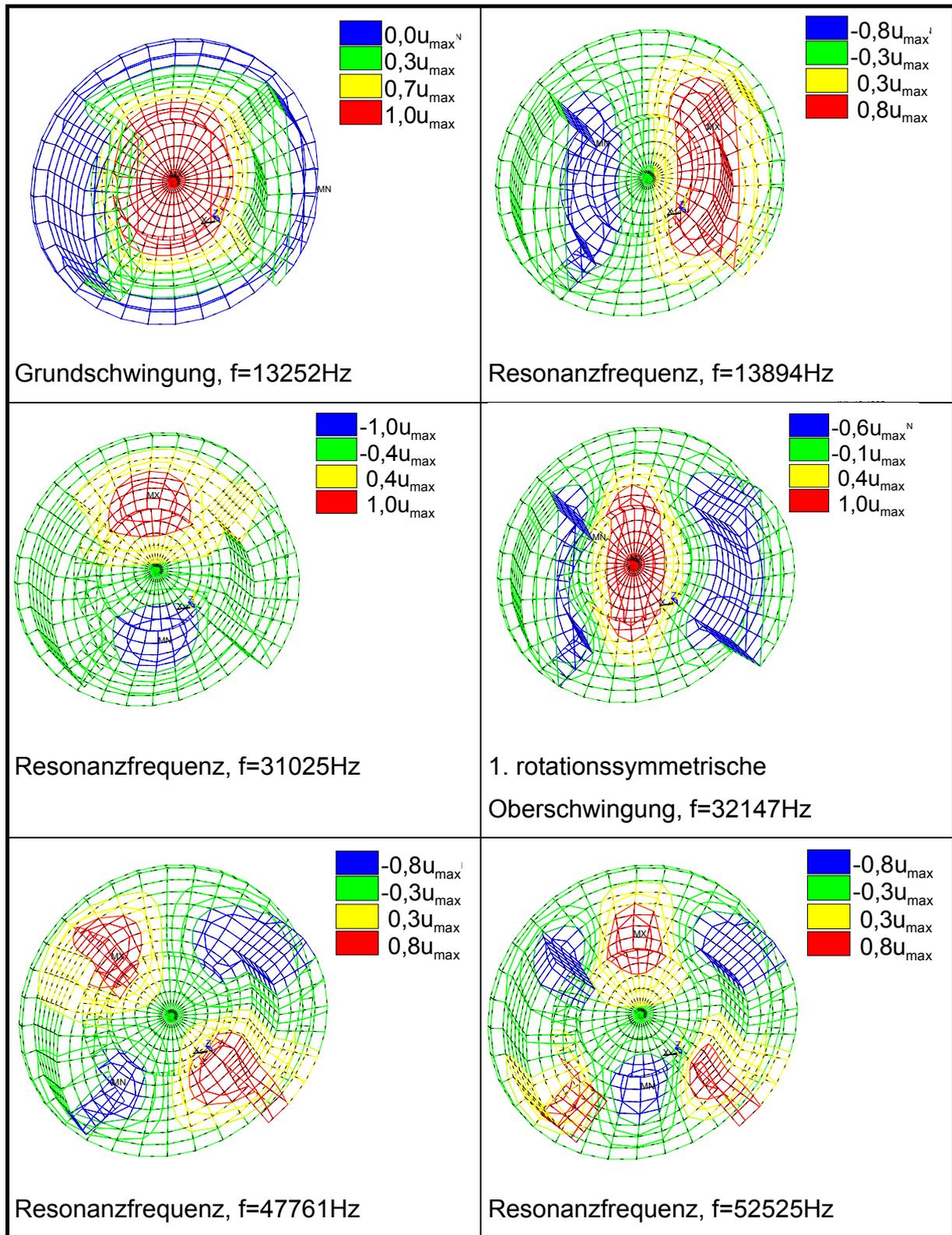


Abbildung 4.3-28: Verschiebungsprofile der US-Wandler gemäß Tabelle 4-7 des US-Wandlers mit einer Dicke des Beschwerungsringsegmentes von $t_{\text{seg}}=6\text{mm}$ der 1. - 6. Resonanzfrequenzen^{34, S.79}

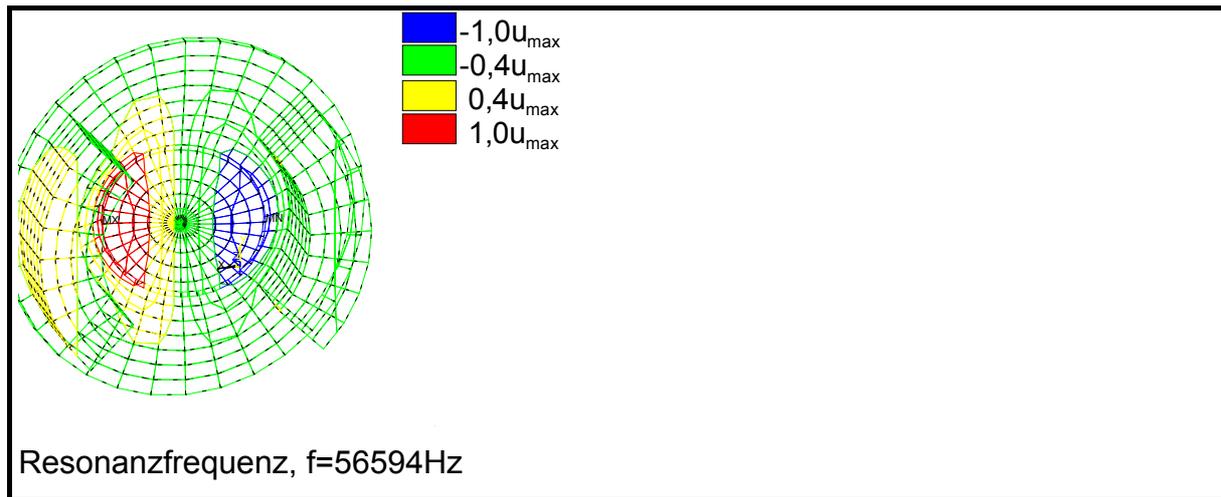


Abbildung 4.3-29: Verschiebungsprofile der US-Wandler gemäß Tabelle 4-7 des US-Wandlers mit einer Dicke des Beschwerungsringsegmentes von $t_{\text{seg}}=6\text{mm}$ der 7. Resonanzfrequenz^{34, S.79}

Vergleicht man diese Verschiebungsprofile mit denen des US-Wandlers ohne Beschwerungsring (vgl. Abbildung 4.3-12), wird die asymmetrische Geometrie besonders deutlich. In den Abbildungen 4.3-30 und 4.3-31 sind die Verschiebungsprofile der Grundschwingungen nochmals vergrößert dargestellt.

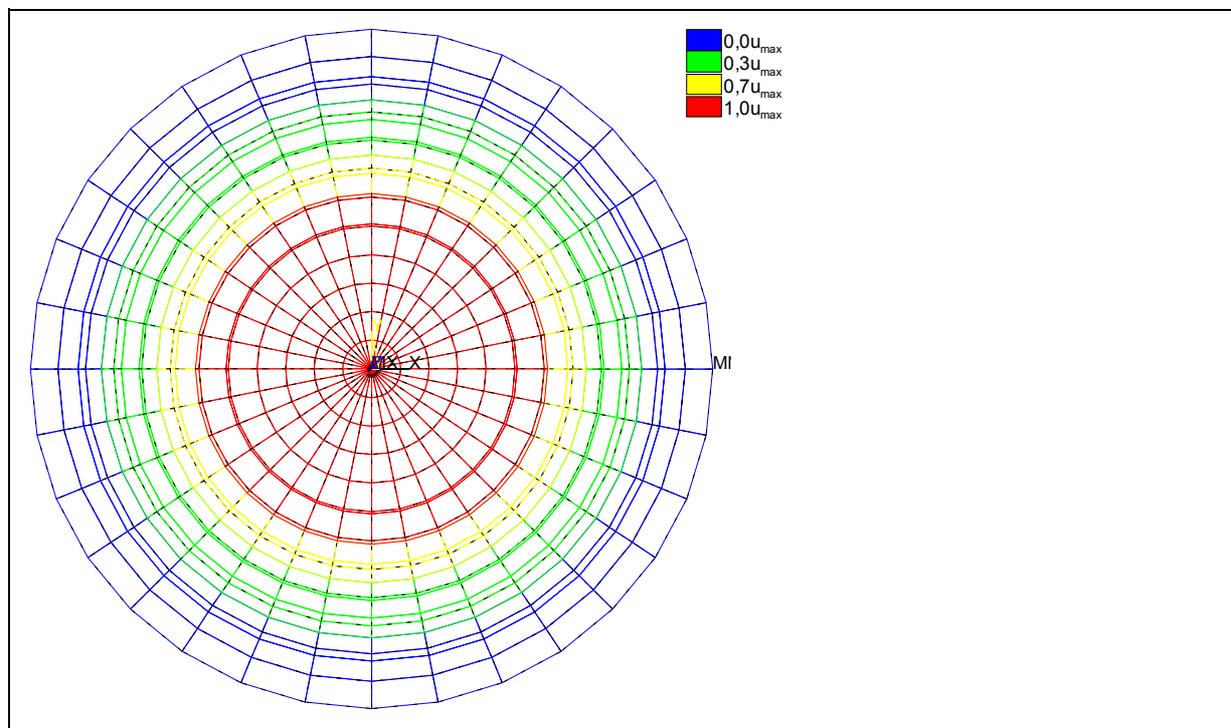


Abbildung 4.3-30: Verschiebungsprofil (vergrößert) des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-5 des US-Wandlers mit $d=24\text{mm}$, $t=0,7\text{mm}$ für die Grundschwingung

Während das Verschiebungsprofil der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers ohne Beschwerungsring eine kreisrunde Knotenlinie (vgl. Abbildung 4.3-30) aufweist, hat die Verformungsstruktur des US-Wandlers mit Beschwerungsringsegment eine ellipsenförmige Knotenlinie (vgl. Abbildung 4.3-31).

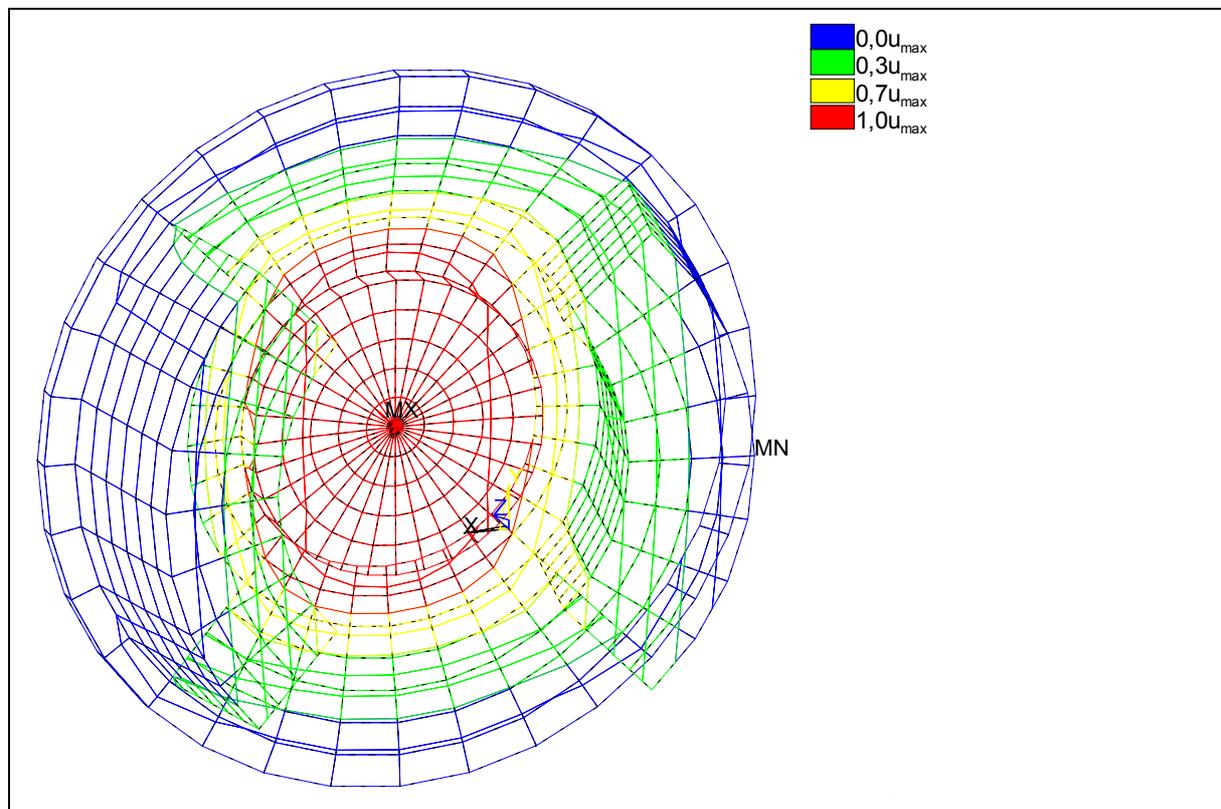


Abbildung 4.3-31: Verschiebungsprofile (vergrößert) der US-Wandler gemäß Tabelle 4-7 des US-Wandlers mit einer Dicke des Beschwerungsringsegmentes von $t_{\text{seg}}=6\text{mm}$ für die Grundschiwingung

Bei dem entsprechenden US-Wandler mit Beschwerungsringsegment beträgt die Resonanzfrequenz der Grundschiwingung 13,252kHz und die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung 32,147kHz.

In der Abbildung 4.3-32 ist die Richtcharakteristik in horizontaler und vertikaler Ebene für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung bei einer Resonanzfrequenz von $f_1=32,147\text{kHz}$ dargestellt.

Im Vergleich zum US-Wandler ohne Beschwerungsring sind die Resonanzfrequenzen geringer und damit die Öffnungswinkel größer (vgl. Abbildung 4.3-10). Die Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit 63,969kHz (ohne Beschwerungsringsegmente) bzw. 32,147kHz (mit 6mm dicken Beschwerungsringsegmenten) unterscheiden sich fast um das Doppelte.

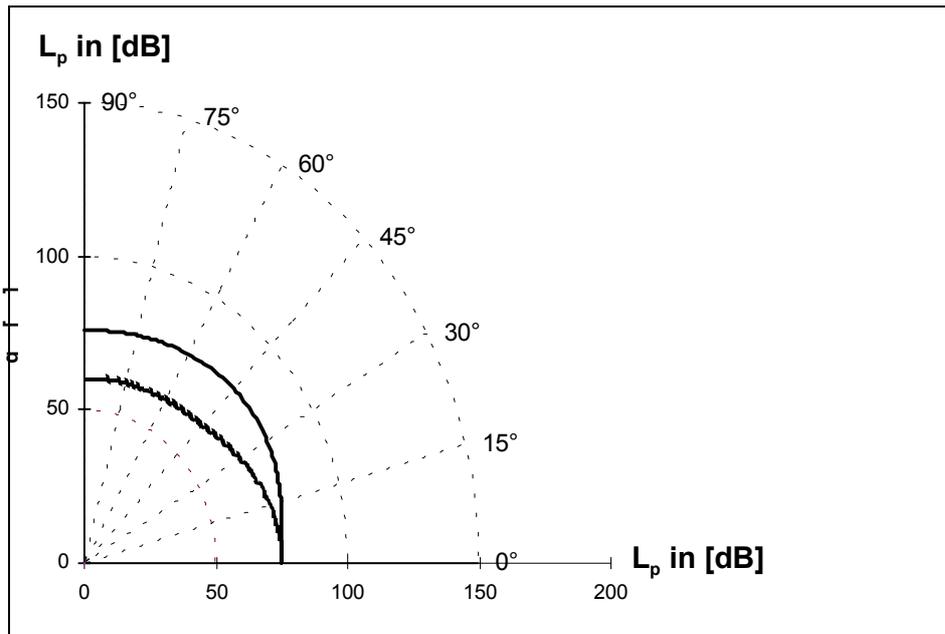


Abbildung 4.3-32: Ergebnis der Simulation der Richtcharakteristik der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung des US-Wandlers gemäß Tabelle 4-7 mit einer Dicke des Beschwerungsringsegmentes von $t_{\text{ring}}=6\text{mm}$ ^{22, S.50}

4.3.3.3.2 Quantitative Auswertung

In der Abbildung 4.3-33 ist das Ergebnis der Simulation eines US-Wandlers mit einem Durchmesser von 35mm und verschiedenen Beschwerungsringsegmenten mit einer Dicke zwischen 2mm und 6mm dargestellt (sonstige Abmessungen vgl. Abbildung 4.3-27).

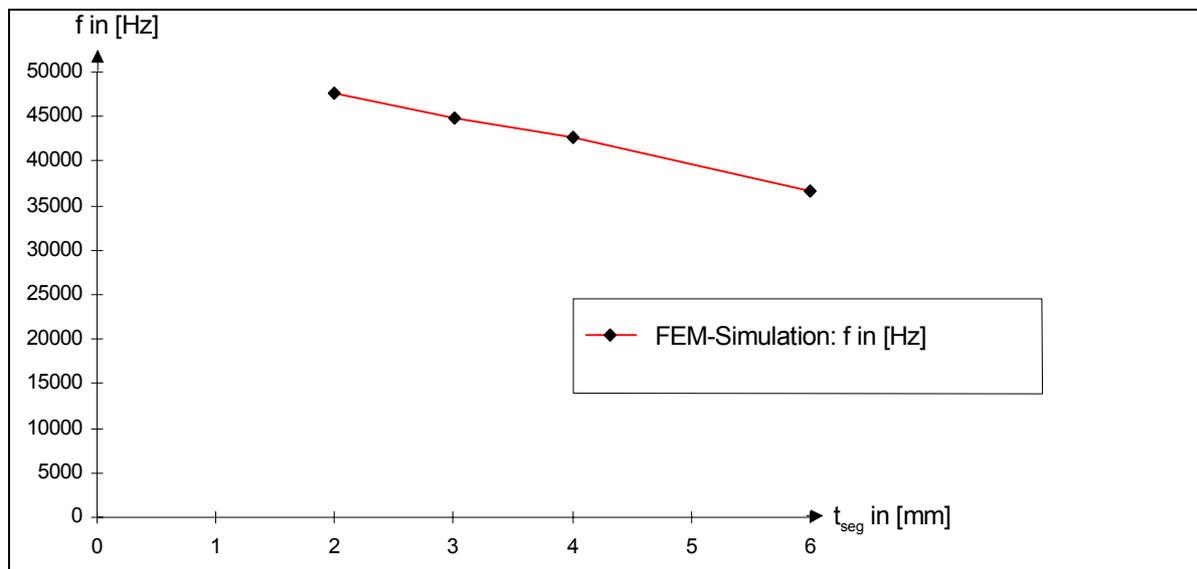


Abbildung 4.3-33: Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler mit einem Wandlerdurchmesser $d=35\text{mm}$ mit einer Dicke $t=1,5\text{mm}$ (sonst. Abmessungen gemäß Abbildung 4.3-27) als Funktion der Dicke der Beschwerungsringsegmente von $t_{\text{seg}}=2,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$

Während die Vergrößerung der Plattendicke „ t “ zu einer Erhöhung der Resonanzfrequenzen führt (vgl. Abbildung 4.3-15), bewirkt eine Vergrößerung der

Segmentdicke „ t_{seg} “ eine Verringerung der Resonanzfrequenzen.

Der Einfluss der Segmentdicke auf die Öffnungswinkel α_1 in horizontaler, bzw. vertikaler Richtung ist in Abbildung 4.3-34 dargestellt. Mit zunehmender Segmentdicke „ t_{seg} “ steigt der Öffnungswinkel „ α_1 “ sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Dieser Einfluss lässt sich mit dem Frequenzverhalten erklären: sinkt die Resonanzfrequenz mit zunehmender Segmentdicke, so steigt der Öffnungswinkel gemäß Gleichung 2 (vgl. Abbildung 4.3-17).

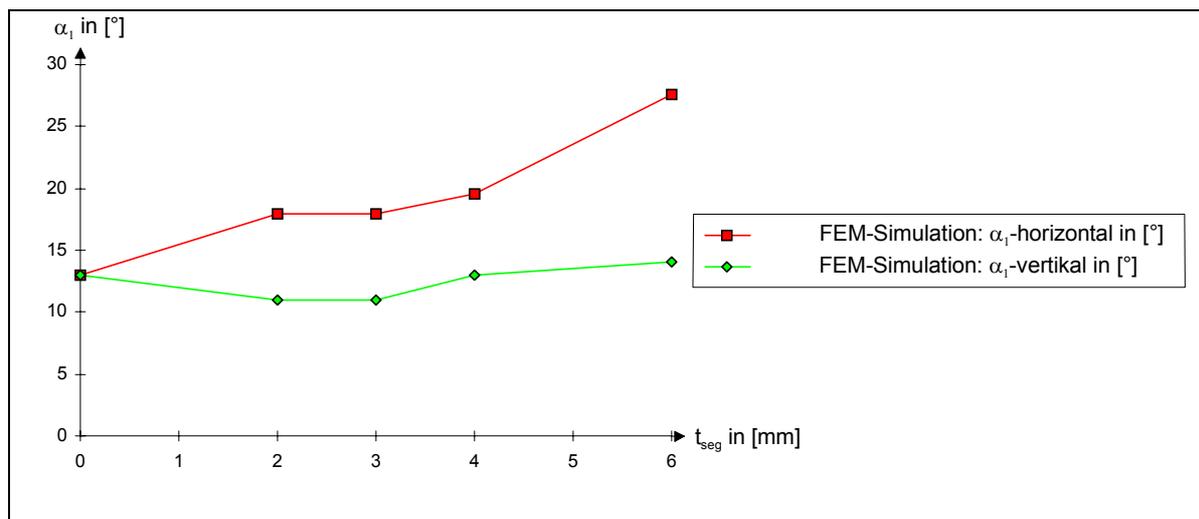


Abbildung 4.3-34: Öffnungswinkel α_1 horizontal/vertikal der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung aus FEM-Simulation verschiedener US-Wandler mit einem Wandlerdurchmesser $d=35\text{mm}$ mit einer Dicke $t=1,5\text{mm}$ (sonst. Abmessungen gemäß Abbildung 4.3-27) als Funktion der Dicke der Bescherwungsringsegmenten von $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; $2,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$ ^{22, S.50}

Der Vergleich der Ergebnisse aus der FEM-Simulation mit bereits publizierten und Ergebnissen aus den eigenen Experimenten ist in Kapitel 5.2 dargestellt.

5 Vergleich der Ergebnisse aus Simulation, Experiment und Literatur³⁷

Zielsetzung dieses Kapitels (vgl. Kap. 1.2) ist es, die Ergebnisse aus Simulation, Experiment und Literatur zu vergleichen und einer Bewertung zu unterziehen. In der folgenden Tabelle 5-1 sind die Berechnungsbereiche grün und gelb markiert, deren Ergebnisse bereits vorgestellt sind. Die Ergebnisse aus den rot markierten Berechnungs- und Untersuchungsbereichen werden nachfolgend besprochen.

³⁷ Die Beschreibung sämtlicher Messergebnisse ist im Anhang 4 dargestellt

	3-dim. Modell		
Berechnungen	symmetrisch		asymmetrisch
	ohne Beschwerungsring	mit Beschwerungsring	mit Ringsegmente
Resonanzfrequenz	FEM ² Eig.-Daten ¹ Eig.-Daten ¹ Eig.-Daten ¹ Lit.-Daten FEM Eig.-Daten ¹ Formel FEM	FEM ³	FEM ⁴ Eig.-Daten ⁴ Eig.-Daten ⁴ FEM
Öffnungswinkel α_1	FEM ² Eig.-Daten ² Eig.-Daten ² FEM	FEM ³	FEM ⁴ Eig.-Daten ⁴ Eig.-Daten ⁴ FEM
Öffnungswinkel α_2	FEM ² Eig.-Daten ² Eig.-Daten ² Formel FEM	FEM ³	Eig.-Daten ⁴ Eig.-Daten ⁴ FEM
Legende			
Berechnungsverfahren			
Eig.-Daten	Ergebnisse der eigenen experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 3)		
FEM	Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnung (vgl. Kapitel 4)		
Eig.-Daten FEM	Vergleich der Ergebnisse (vgl. Kapitel 5)		
Wandlerabmessungen			
¹	20mm < d < 35mm; 0,5mm < t < 2,0mm		
²	d=24mm; 0,5mm < t < 2,0mm		
³	d=35mm, t: 1,5mm, 0mm < t _{ring} < 6,0mm		
⁴	d=35mm, t: 1,5mm, 0mm < t _{seg} < 6,0mm		

Tabelle 5-1: Darstellung der dokumentierten Untersuchungen.

5.1 Vergleich „Resonanzfrequenzen“

In der Abbildung 5.1-1 sind die Resonanzfrequenzen der Grund- und der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für die Ultraschallwandler mit einem Plattendurchmesser von 20mm, 25mm und 30mm dargestellt. Im folgenden Text werden die Ergebnisse in dem Bereich bis zu einer Resonanzfrequenz von 70kHz betrachtet. Die Resonanzfrequenzen der Simulationsrechnung sind sowohl für die Grund- als auch für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung größer als die Ergebnisse aus Experiment und Literatur.

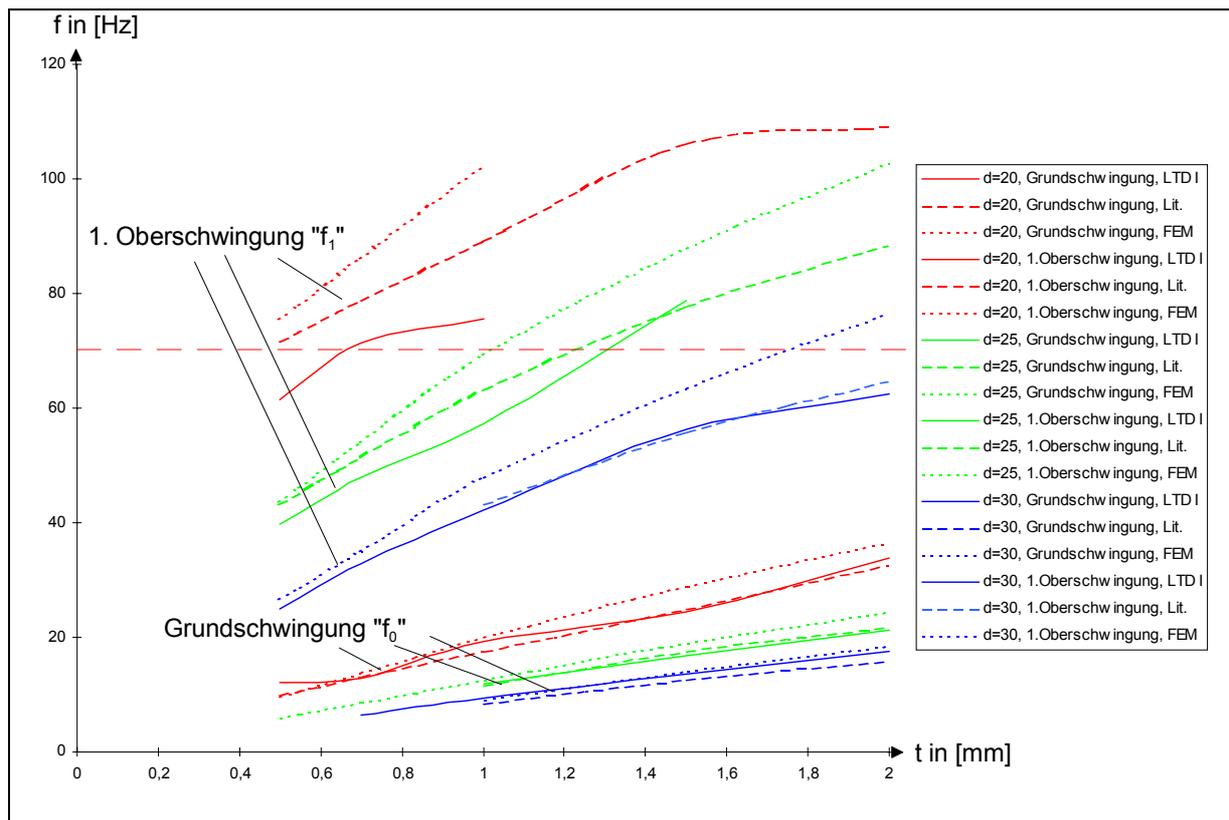


Abbildung 5.1-1: Vergleich der am LTD I gemessenen Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Resonanzfrequenzen aus der Literatur (Koch /121/) und FEM-Simulationsrechnung als Funktion der Plattendicke³⁸

Dieser Effekt (vgl. Kapitel 4.3) wurde bereits bei der Variation der Elementgrößen im Rahmen der FEM-Simulationsrechnung beobachtet. Mit zunehmender Vernetzungsdichte und abnehmender Größe der FEM-Elemente sinkt der Wert der Resonanzfrequenz. Bei dieser Simulationsrechnung wurde ein FEM-Teilmodell mit einer Elementgröße von 0,25mm gewählt. Im Rahmen einer Vergleichsrechnung verringerte sich die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung bei einer Erhöhung der Vernetzungsdichte um den Faktor 5 von 47,884kHz auf 44,792kHz, also um 6,9% (vgl. Tabelle 4-4).

Die maximale Abweichung bei diesem Vergleich gemäß Abbildung 5.1-1 beträgt zwischen den Ergebnissen aus Literatur und FEM-Simulationsrechnung (1. rotationssymmetrische Oberschwingung, $d=30\text{mm}$, $t=1,5\text{mm}$) 12,0% (55,8kHz bzw. 63,4kHz). Die Abweichung der Literaturdaten und experimentellen Daten sind geringer. Für den o.g. US-Wandler ($d=30\text{mm}$, $t=1,5\text{mm}$) ist die Differenz 0,7% (56,172kHz(exp.), bzw. 55,8kHz(Lit.)). Die maximale Abweichung zwischen

³⁸ Die Daten zu den Abbildungen sind im Anhang 4 dargestellt.

experimentellen und Literatur- Werten ergibt sich für den US-Wandler mit einem Durchmesser „ d “=20mm und einer Plattendicke „ t “=0,5mm und beträgt 17,5% (12,125kHz(exp.), bzw. 10,0kHz (Lit.)).

In der Abbildung 5.1-2 sind die experimentellen und Simulations-Ergebnisse der Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung von Wandlern mit einem Durchmesser „ d “=35mm und einer Plattendicke von 1,5mm dargestellt, die mit Ringsegmenten der Dicken „ t_{seg} “ von 2,0mm; 3,0mm; 4,0mm und 6,0mm verstärkt wurden.

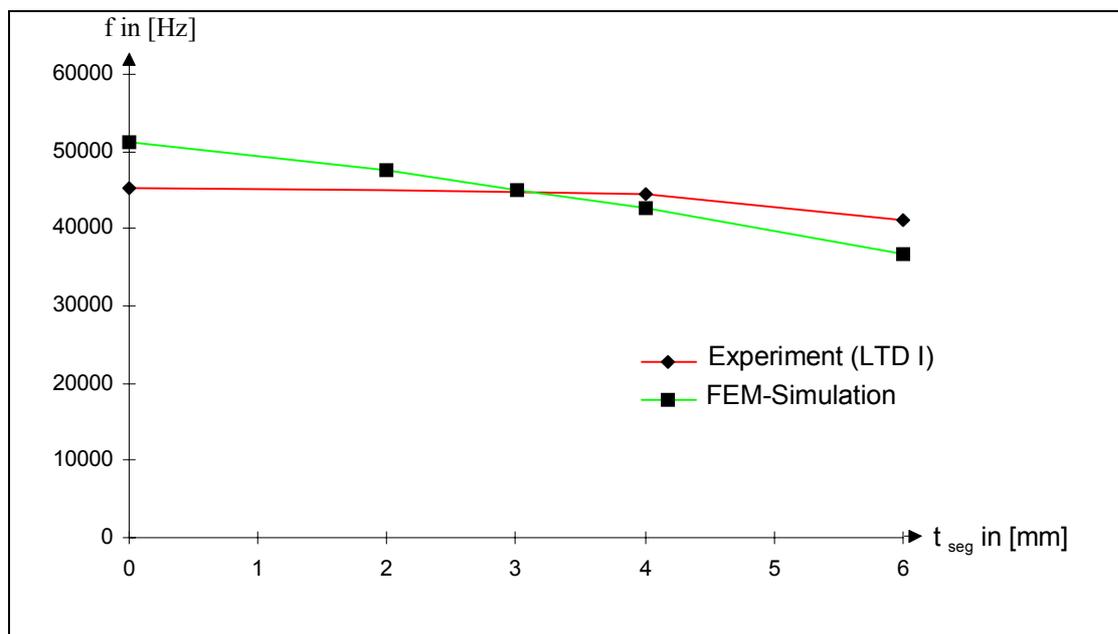


Abbildung 5.1-2: Vergleich der am LTD I gemessenen Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für Wandlertypen mit $d=35\text{mm}$, $t=1,5\text{mm}$ und den Ergebnissen der FEM-Simulationsrechnung als Funktion der Beschwerungsringsegmentdicken t_{seg} ^{38, S.99}

Für beide Kurvenverläufe ist ein Abfall der Resonanzfrequenzen mit zunehmender Dicke der Ringsegmente feststellbar. Für die US-Wandler ohne Ringsegment beträgt die Differenz der Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung ca. 15,0% (45,480kHz (Exp.) bzw. 51,172kHz (FEM)).

Der Unterschied bei den Wandlern mit Ringsegmenten ist geringer: die Differenz beträgt für die US-Wandler mit 4mm dicken Segmenten 4% (44,400kHz (Exp.) bzw. 42,596kHz (FEM)), und bei den Wandlern mit 6mm dicken Segmenten 10,7% (41,010kHz (Exp.) bzw. 36,611kHz (FEM)).

Der Einfluss der Dicke der Segmente wirkt sich nach der Simulationsrechnung deutlich stärker auf die Resonanzfrequenzen aus: die Resonanzfrequenzen nach den ex-

perimentellen Untersuchungen fallen von 44,480kHz um ca. 7,8% auf 41,010kHz; bei der FEM-Simulationsrechnung sinken die Resonanzfrequenzen von 51,172kHz auf 36,611kHz- dies bedeutet eine Änderung um 39,8%. Nach diesen Ergebnissen ist die Verstärkung der Al-Schicht durch Ringsegmente ein geeignetes Mittel, die Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung signifikant zu beeinflussen und damit die Richtcharakteristik zu verändern. Dieses Phänomen erklärt sich mit der zunehmenden Masse bei steigender Dicke der Segmente.

5.2 Vergleich „Öffnungswinkel“

Das Ergebnis des Vergleichs zwischen FEM-Simulationsrechnung und eigenen Experimenten ist in der Abbildung 5.2-3 dargestellt.

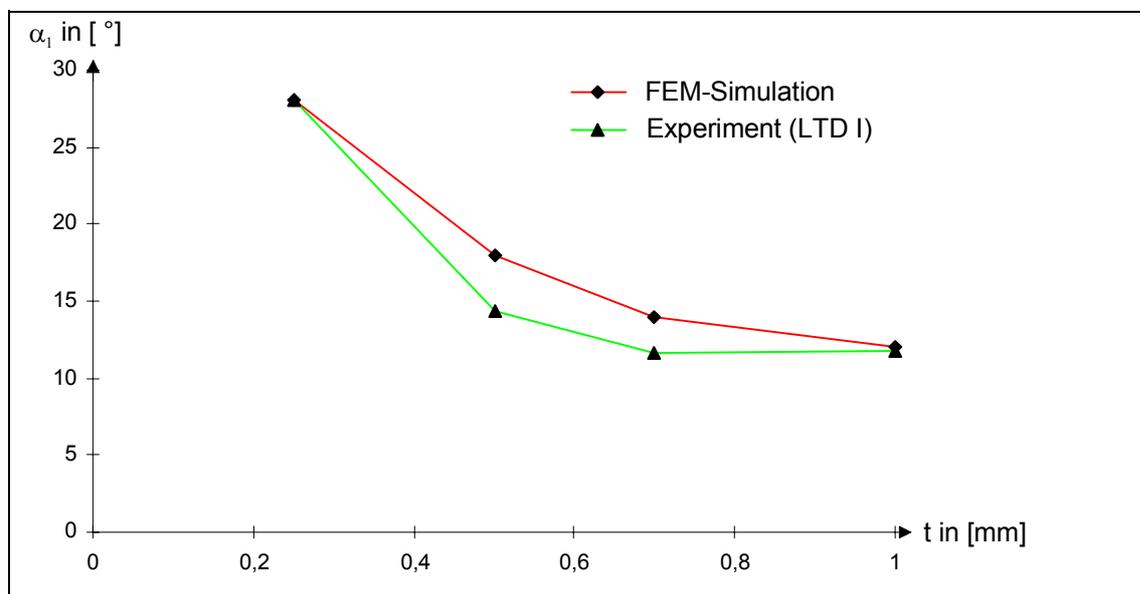


Abbildung 5.2-3: Vergleich der am LTD I gemessenen Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ als Funktion der Plattendicken $t=0,25\text{mm}$; $0,5\text{mm}$; $0,7\text{mm}$; $1,0\text{mm}$ ^{38, S.99}

Aufgetragen ist der Öffnungswinkel „ α_1 “ in Abhängigkeit von der Dicke der Wandlerplatte. Bei dem Untersuchungsobjekt handelt es sich um einen US-Wandler mit einem Durchmesser von 24mm und einer Dicke zwischen 0,25mm und 1,0mm (Abmessungen vgl. Abbildung 4.3-9).

Die Öffnungswinkel „ α_1 “ aus der FEM-Berechnung sind für die US-Wandler mit einer Plattendicke „t“ von 0,5mm bzw. 0,75mm größer als die Öffnungswinkel „ α_1 “ aus den Ergebnissen der experimentellen Messungen. Wird die Vernetzungsdichte des FEM-Modells erhöht, ist eine größere Abweichung zwischen Simulationsrechnung und Experiment zu erwarten, weil bereits im Rahmen der Berechnung der Resonanzfre-

quenzen festgestellt wurde, dass sich mit steigender Vernetzungsdichte die Resonanzfrequenzen zu niedrigeren Werten bewegen (vgl. Abbildung 4.3-2) und damit die Öffnungswinkel ansteigen (vgl. Abbildung 4.3-18). Die maximale Abweichung zwischen FEM-Simulation und Experiment liegt bei dem US-Wandler mit der Plattendicke von 0,5mm vor. Der Öffnungswinkel „ α_1 “ der Simulation beträgt 18° , der experimentell bestimmte Öffnungswinkel ist $14,3^\circ$; die Abweichung beträgt ca. 25,9%. Für die Wandlertypen mit einer Dicke der Al-Schicht „ t “ von 0,25mm bzw. 1,0mm ist die Abweichung minimal: sie beträgt 0% bzw. 1,7%. Im Unterschied zu Abbildung 5.2-3 werden in Abbildung 5.2-4 für dieselben Wandlertypen (Abmessungen vgl. Abbildung 4.3-9) die Öffnungswinkel „ α_2 “ dargestellt.

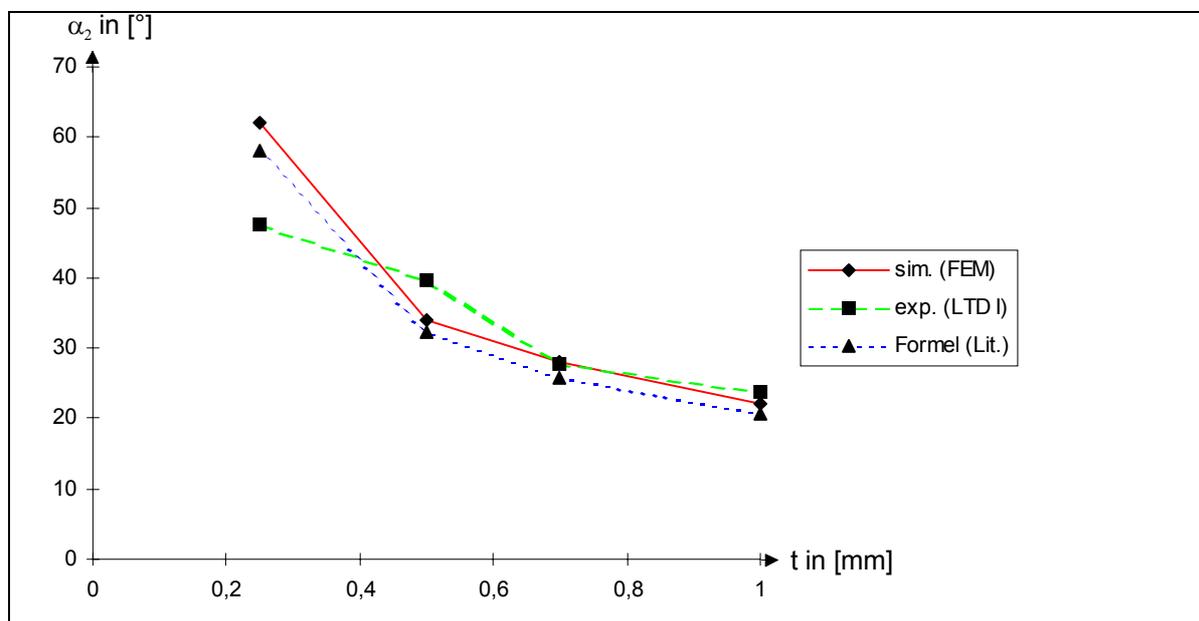


Abbildung 5.2-4: Vergleich der am LTD I gemessenen Öffnungswinkel α_2 der 1. rotations-symmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation und Berechnung gemäß Gleichung 4 für US-Wandler mit dem Durchmesser $d=24\text{mm}$ als Funktion der Plattendicken $t=0,25\text{mm}$; $0,5\text{mm}$; $0,7\text{mm}$ und $1,0\text{mm}$ ^{38, S.99}

Die Funktion „Formel (Lit.)“ basiert auf der formelmäßigen Berechnung nach Gleichung 2. Der Unterschied zwischen Simulations- und Formel-Ergebnis ist bei der Plattendicke von 0,7mm maximal und beträgt ca. 7,5% (α_2 (Fem): $28,0^\circ$, α_2 (Formel): $25,9^\circ$).

Die Differenz von Simulations- und experimentellem Ergebnis ist für den Öffnungswinkel „ α_2 “ deutlich geringer als für den Öffnungswinkel „ α_1 “ (vgl. Abbildung 5.2-3). Die maximale Abweichung zwischen FEM-Simulation und Experiment beträgt für den Bereich der Plattendicke zwischen 0,5mm und 1,0mm 16,5% (α_2 (sim): 34° , α_2 (exp.): $39,6^\circ$). Für diesen Bereich weichen die Formel-Berechnungen von den experimentellen Ergebnissen noch weiter ab: die Differenz zwischen Formel-

Berechnung und Experiment beträgt für den US-Wandler mit einer Dicke von 0,5mm ca. 18,1% (α_2 (exp.): $39,6^\circ$, α_2 (Formel): $32,44^\circ$). Für den US-Wandler mit einer Dicke der Al-Schicht von 0,25mm ergibt sich ein maximaler Abstand zwischen Simulation (α_2 : 62°) und Experiment (α_2 : $47,5^\circ$) von $14,5^\circ$ bzw. 23,4%.

In der Abbildung 5.2-5 sind die vertikalen und horizontalen Öffnungswinkel „ α_2 “ von Wandlern mit einem Plattendurchmesser von 35mm in Abhängigkeit der Dicke der Ringsegmente „ t_{seg} “ aufgetragen.

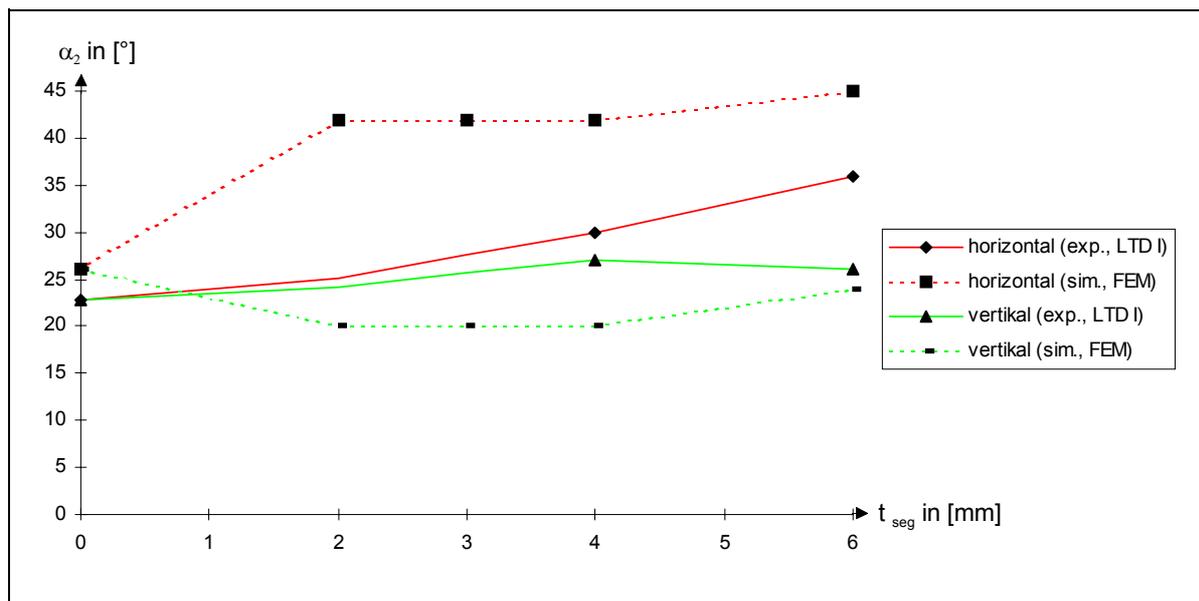


Abbildung 5.2-5: Vergleich der am LTD I gemessenen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=35\text{mm}$, Plattendicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Beschwerungsringsegmentdicken $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; 2,0mm; 3mm; 4mm und 6mm^{22, S.50; 38, S.99}

Die Abweichung von experimentellen und Simulations-Ergebnissen für den US-Wandler ohne Ringsegmente beträgt ca. 14%: Der Öffnungswinkel der Simulation beträgt 26° , der Öffnungswinkel aus dem Experiment beträgt $22,8^\circ$.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen variiert die vertikale Abstrahlung „ α_2 “ zwischen $22,8^\circ$ und 27° . Die Simulationsrechnung ergibt einen Abfall des Winkels „ α_2 “ von 26° auf 20° , der für den US-Wandler mit einer Segmentdicke von 6mm wieder auf 24° ansteigt.

Im Gegensatz zum vertikalen Öffnungswinkel wird der horizontale Öffnungswinkel mit steigender Segmentdicke deutlich größer. Im Rahmen der Simulation ergibt sich eine Vergrößerung des Winkels „ α_2 “ von 26° auf 45° . Die experimentellen Ergebnisse ergeben ein ähnliches Bild: der Öffnungswinkel steigt von $22,8^\circ$ auf 36° an. Der

sprunghafte Anstieg des Simulationsergebnisses von 26° auf 42° für den US-Wandler mit einer Segmentdicke von 0mm auf 2mm kann im Rahmen der Experimente nicht bestätigt werden; bei der experimentellen Untersuchung ergibt sich ein Sprung von $22,8^\circ$ auf $25,2^\circ$.

Vergleicht man die Ergebnisse von Simulation und Experiment, ergibt sich für den US-Wandler mit 6mm dicken Segmenten in horizontaler Richtung eine Abweichung von 25% (exp.: 36° bzw. Sim.: 45°) und in vertikaler Richtung eine Abweichung von 7,7% (exp.: 26° bzw. Sim.: 24°).

In der Abbildung 5.2-6 ist das Verhalten des Öffnungswinkels „ α_1 “ dargestellt.

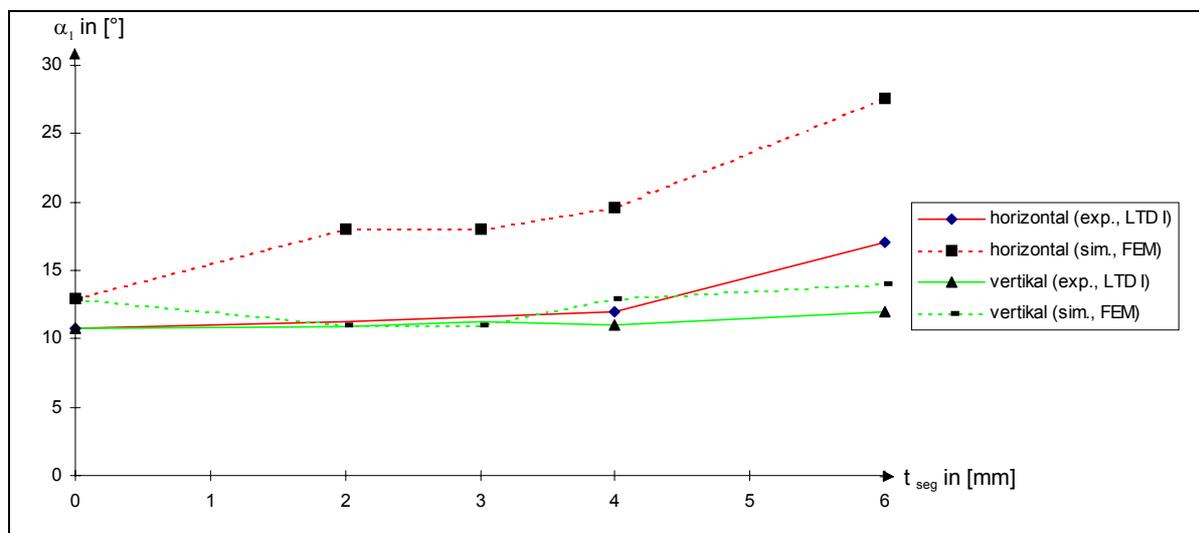


Abbildung 5.2-6: Vergleich der am LTD I gemessenen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=35\text{mm}$, Plattendicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Beschwerungsringsegmentdicken $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; $2,0\text{mm}$; 3mm ; 4mm und 6mm ^{22, S.50; 38, 38, S.99}

Im Vergleich zu den Öffnungswinkel „ α_2 “ liegen die Winkel „ α_1 “ auf einem niedrigeren Niveau (vgl. Abbildung 5.2-5). Die Ergebnisse aus Simulation und Experiment des Öffnungswinkels α_1 des US-Wandlers ohne Beschwerungsringsegmente differieren sehr stark: „ α_1 “ aus dem Experiment beträgt $10,8^\circ$, das Ergebnis der Simulation beträgt 13° ; Dies entspricht einer Differenz von ca. 20,3%.

Die anderen Öffnungswinkel in vertikaler Ausrichtung unterscheiden sich für die Wandlertypen mit 4mm bzw. 6mm starken Beschwerungsringsegmenten geringfügig. Für den US-Wandler mit dem 4mm starken Beschwerungsringsegmenten beträgt der experimentell bestimmte Winkel 11° (exp.) bzw. der aus der FEM-Simulation berechnete Winkel 13° (FEM). Für den US-Wandler mit 6mm dicken Beschwerungsringsegmenten beträgt der horizontale Öffnungswinkel „ α_1 “ 12° (exp.) bzw. 14° (FEM). Dies entspricht einer maximalen Abweichung von ca. 16,7%. Die Unter-

schiede für die horizontale Abstrahlung sind deutlich größer. Für den Wandlertyp mit dem Beschwerungsringsegment von 6mm Dicke wird ein experimenteller Wert von 17° gemessen; das Ergebnis der Simulation hingegen beläuft sich auf einen Winkel von $27,6^\circ$. Qualitativ verhalten sich die Verläufe der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ ähnlich. Zwischen horizontaler und vertikaler Abstrahlung lassen sich mit zunehmender Dicke deutliche Unterschiede feststellen; während sich die Abstrahlung in vertikaler Richtung nur geringfügig verändert, werden die Öffnungswinkel „ α_1 “ bzw. „ α_2 “ deutlich größer.

6 Zusammenfassung

Gemäß der Zielsetzung der Arbeit (vgl. Kap. 1.2) liegt im Ergebnis primär ein Werkzeug vor, dass die Simulation von piezoelektrischen Ultraschallwandlern in Luft mit beliebigen dreidimensionalen Schallfeldern ermöglicht.

Während der Bearbeitung des Themas hat sich gezeigt, dass bisher keine aussagekräftigen Messergebnisse von piezoelektrischen Ultraschallwandlern in Luft gemäß Abbildung 1.1-4 publiziert worden sind. Daher wurden sowohl eigene Wandlertypen hergestellt als auch spezielle Versuchseinrichtungen entwickelt, die einerseits für die Simulationsrechnungen Kennwerte lieferten, andererseits eine Beurteilung der Simulationsergebnisse möglich machten.

Aufgrund der modular aufgebauten Simulationsrechnung, die sich aus den Berechnungsschritten „Spektrogramm/Eigenfrequenz“, „Verschiebungs-/Geschwindigkeitsprofil“ sowie „Schallfeld“ zusammensetzt, wurde das Ergebnis jeder einzelnen Simulationsphase durch die experimentellen Untersuchungen „Schalldruckpegelmessung“, „Laserinterferometrie“ und „Schallfeldmessung“ überprüft (vgl. Abbildung 6.1).

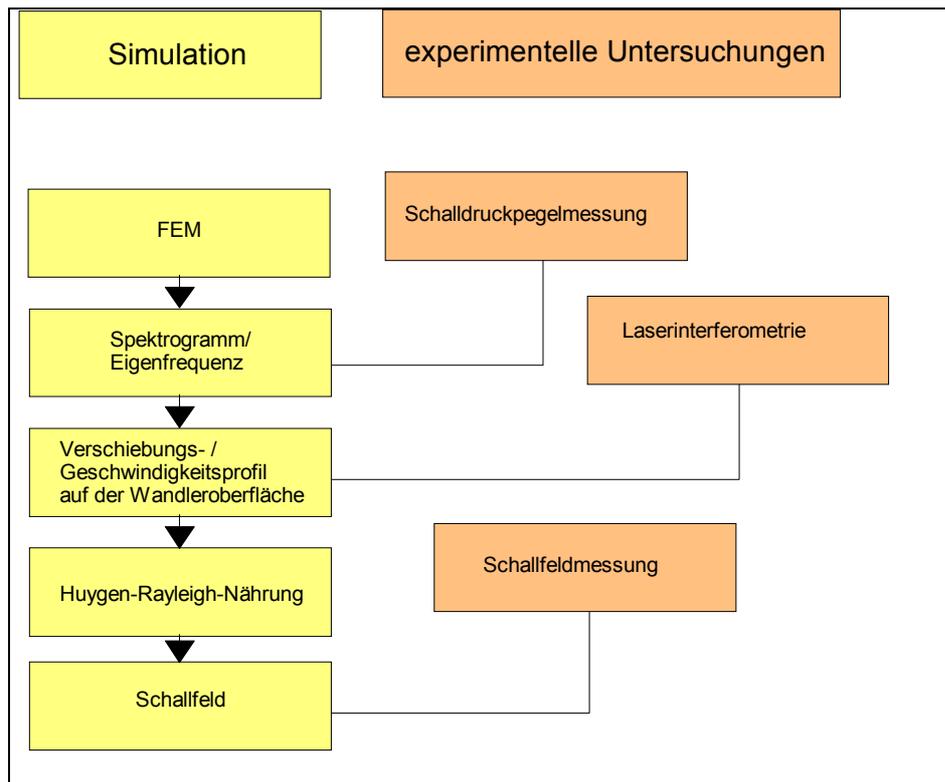


Abbildung 6.1: Darstellung der Phasen der Simulationsrechnung mit den zugehörigen Phasen der experimentellen Untersuchungen

Für den Bereich der Herstellung liefern die verwendeten experimentellen Module einen wertvollen Beitrag für die Einhaltung, Optimierung und Verbesserung der Produktqualität. Eine weiterführende interessanter Forschungsansatz im Bereich der Konstruktion wäre beispielsweise die Entwicklung einer rückläufigen Konstruktionsschleife, in der durch Variation von konstruktiven oder materiellen Parametern Designvarianten entwickelt werden, die hinsichtlich vorgegebener dreidimensionaler Richtcharakteristiken Optima darstellen.

In dieser Weiterführung wäre eine anwendungsspezifische, kurzfristige und preisgünstige Wandlerherstellung denkbar, bei der Dank zuverlässiger Simulationsergebnisse auf umfangreiche experimentelle Untersuchungen verzichtet werden könnte.

Außerdem leistet dieser Beitrag aus didaktischer Sicht durch die Auswahl der Simulations- und experimentellen Untersuchungsverfahren eine doppelte Funktion: Einerseits lassen sich die einzelnen Module als in sich geschlossene Lehr- und Lerneinheit besser verstehen als ein abgeschlossenes Gesamtsystem und andererseits bietet die direkte Zuordnung von theoretischem Simulationsmodul und praktischer Untersuchungsmethode den Lernenden eine anschauliche Verifikations- bzw.

Falsifikationsmöglichkeit. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen können diese Module durch andere Simulations- oder Experiment- Untersuchungen ersetzt werden.

Literatur

- /1/ Schüler, U. (Hrsg.) et al.: CIM-Lehrbuch (1994). Braunschweig/Wiesbaden 1994.
- /2/ Burgmer, M.: Criteria of training in the field of Computer Integrated Manufacturing (1995). Berlin/Heidelberg/New York 1995.
- /3/ LTD I: Der Lernbetrieb - Entwicklung eines Medienverbundsystems für die technische Aus- und Weiterbildung im Bereich computerintegrierter Fertigung. In: EU-Projekt, *COMETT1*, Programmtyp E&T (Education and Training), Subprogramme Area: Strand D : Complementary measures, Referenznummer 1293, Universität Dortmund, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik I, Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Schüler, 1990.
- /4/ Industrie und Handelskammer (IHK) Münster: Gestaltung eines Aus- und Weiterbildungskonzeptes für die rechnerintegrierte Produktion (CIM) im Handwerk, Schwerpunkt Basisqualifizierung (1990). Studie im Auftrag der IHK Münster, Universität Dortmund, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik I, 1991, Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Schüler, 1990.
- /5/ Hak-Soo Mok: Ein System zur Auswahl von Sensoren für automatische Montagesysteme. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1986, S. 109.
- /6/ Gast, Th., Ehlers, D.: Längenmessung mit Ultraschall. In: Messen und Prüfen/automatik, Nov. 1983, S. 676-681.
- /7/ Schrank, W.: Füllstandsmessung mit intelligenten Ultraschallmeßgeräten. In: 1. Kongreßmesse für industrielle Meßtechnik, Messen und Verarbeiten von elektrischen und nichtelektrischen Größen, Wiesbaden, 6-8 Oktober 1987.
- /8/ Warnecke, H. J., Langen, A.: New Ultrasonic Sensors for Robotic Application Based on Beam Forming. In: Proc. Int. Conf. Robot Vision and Sensory Controls, Feb. 1988, IFS (conferences) Ltd. And authors, ISBN 0-948507-780, S. 149-160.
- /9/ Hohenburg, R., Preuß, R., Schulte, J.: Offenlegungsschrift DE 4114180A1, Int. Cl. H04R17/00; 5.11.92, München, S. 1.
- /10/ Sasaki, K., Takano, M., Akeno, K.: Ultrasonic Range Sensor Assists 6-DOF Manipulator by Locating Objects in 3-dimensional Space. In: Proceedings International Symposium on Industrial Robots, April 1988, S. 211-220.
- /11/ Manthey, W., Plontke, J., Kroemer, N.: Luftultraschallsensorzeile. 33 internationales wissenschaftliches Kolloquium, Vortragsreihe A2/A3, Ilmenau, DDR, 24-28 10 1988, 2, S. 63-66.
- /12/ Manthey, W., Kroemer, N.: Ultraschallsensoren auf der Basis piezoelektrischer Polymere. *Technisches Messen tm*, 56, 1989, 10, R. Oldenburg Verlag, S. 377-384.
- /13/ Ehlers, D.: Ein Beitrag zur Bestimmung von Abständen in Luft mit Ultraschall (1985). Berlin 1985.
- /14/ Schulz, Ch.: Ultraschall-Distanzsensoren-Aspekte und Probleme ihrer Anwendung. 3. Fachtagung Microelektronik, Technologie, Applikation, Karl-Marx-Stadt, DDR, 20-22 Oktober 1987. In: Wissenschaftliche Tagungen der TU Karl-Marx-Stadt, 5/1988, S. 275-279.

-
- /15/ Schnell (Hrsg.) et al.: Sensoren in der Automatisierungstechnik (1991). Frankfurt 1991, S. 48.
- /16/ Schnell (Hrsg.) et al.: Sensoren in der Automatisierungstechnik (1991). Frankfurt 1991, S. 42.
- /17/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988, S. 1ff.
- /18/ Hohenburg, R. (Vortrag): Leistungsmerkmale ausgewählter FEM-Programme (1994). In: FEM-Anwenderkreis, Universität Dortmund 1994.
- /19/ Lerch, R: Simulation Piezoelektrischer Wandler. Fortschritte der Akustik-DAGA '87, VDE-Verlag, Berlin, 1987, S. 61-77.
- /20/ Hassler, D., Köhl, W.: Beitrag zur Systemtheorie der Ultraschall-Puls-Echo-Technik (Teil 1 und 2). In: Ultraschall 5, Stuttgart, New York, 1984, S. 44-49.
- /21/ Guntersdorfer, M., Kleinschmidt, P., Veith.: Application of Piezoceramics in Relais. In: Electrocomponent Science and Technology, 1976, Vol. 3, London, 1976, S. 1-13.
- /22/ Krautkrämer, J., Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall (1961). 3. Aufl., Heidelberg/New York 1975, S. 20; 132.
- /23/ Sokolow, S.J.: Zur Frage der Fortpflanzung ultraakustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern. ENT 6 (1929) 454-461.
- /24/ Hecht, H.: Die elektroakustischen Wandler (1961). 5. Aufl., Leipzig 1961
- /25/ Fischer, F. A.: Grundzüge der Elektroakustik (1959). 2. Aufl., Berlin 1959.
- /26/ Mason, W. P.: Electro-mechanical transducers and wave filters (1942). 3. Aufl., Toronto 1948.
- /27/ R. Krimholtz, D.A. Leedom, G.L. Matthaei: New Equivalent Circuits for Elementary Piezoelectric Transducers. In: Electron.Lett., 6, No 13, 25.6.1970, S. 398-399.
- /28/ Benkeser, P.J.: A Pulse-Echo Ultrasound Tapered Phased Transducer. In: Proceedings of the Thirteen Annual Northeast Bioengineering Conference, Pennsylvania, USA, March 12-13, 1987, S. 286-288
- /29/ Goll, J.H.: The Design of Broad-band fluid-loaded transducers. In: IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics. Vol. SU-26, Nov. 1979, S. 385-393.
- /30/ Yamamizu, S., Chubachi, N.: Ultrasonic transducer composed of two piezoelectric layers with variable weighting. Proceedings of the 5th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tokyo, 1984. In: Papanese Journal of Applied Physics, Vol. 24, 1985, Supplement 24-1, S. 68-70.
- /31/ Lerch, R.: Optimierung von Ultraschallwandlern, Fortschritte der Akustik, DAGA, 1984, S. 175-179.
- /32/ Me`quio, C., Coursant, R.H., Pesque´, P.: Simulation of the Acousto-elastic Response of Piezoelectric Structures by Means of a Fast Fourier-Transform Algorithm. In: ACTA Electronica, 25, 4, 1983, S. 311-321.
- /33/ Me`quio, C., Coursant, R.H., Pesque´, P.: Methodology for the Characterisation and Design of Linear Arrays of Ultrasonic Transducers. In: ACTA Electronica, 25, 4, 1983, S. 325- 340.

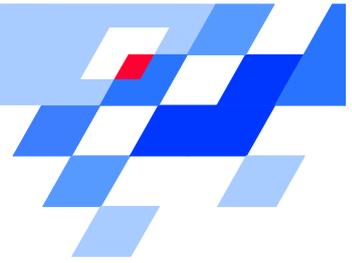
-
- /34/ Weinert, R.W.: Very High-Frequency Piezoelectric Transducers. In: IEEE transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-24, 1977, 1, S. 48-54.
- /35/ Fox, M.D., Donnelly, J.F.: Simplified method for determining piezoelectric constants for thickness mode transducers. In: Journal of the Acoustic Society of America, 64, 1978, 5, S. 1261-1265.
- /36/ Lal, R., Das-Gupta, D.K.: Transient Analysis of Piezoelectric Transducers. In: Ferroelectrics, 76, 1987, 3-4, S. 369-376.
- /37/ Lenk, A., Erler, W.: Piezoelektrische Schwingungsaufnehmer. In: Hochfrequenz und Elektroakustik, Bd. 68, 1959, S. 64-74.
- /38/ Shaulov, A. A., Rosar, M. E., Smith, W.A., Singer, B. M.: Composite Piezoelectrics for Ultrasonic transducers. In: ISAF 1986, Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics. Bethlehem, USA, June 8-11, 1986, S. 231- 234.
- /39/ Skudrzyk, E., J.: Vibrations of a System with a Finite Number of Resonances. In: The Journal of the Acoustical Society of Amerika, Vol. 30, No. 12, Dec. 1958, S. 1140-1152.
- /40/ Datta, S., Hunsinger, B.J., Malocha, D.C.: A Generalized Model for Periodic Transducers with Arbitrary Voltages. In: IEEE Transactions sonics Ultrasonics, SU-26, 1979, 3, S. 235- 242.
- /41/ Heyman, J.S.: Phase Insensitive Acousoelectric Transducer. In. Journal of the Acoustical Society of America, 64, 1978, S. 243-249.
- /42/ Herbertz, J., Jain, S.K.: Zur meßtechnischen Charakterisierung von Ultraschall-Leistungswandlern. In: Fortschritte der Akustik, 11.Tagung der deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik (DAGA), Stuttgart, 25-18 März 1985, S. 803-807.
- /43/ Kino, G.S.: Acoustic waves, Devices, Imaging & Analog Processing (1987). New Jersey 1987, S. 29-47.
- /44/ Brise, W.: Aufbau, Eigenschaften und Anwendungen von Schwingquarzen, In: Schwingquarze- ein unverzichtbares Bauelement in der Elektronik. 1. Aufl., Berlin 1987, S. 7-50.
- /45/ Neuscheler, F.: Schwingquarz-Daten- mit Netzwerk-Analysatoren gemessen. In: Elektronik 19/18.9.87, S.155-162.
- /46/ Zienkiewicz, O.C.: Methode der finiten Elemente (1979). 2. Aufl., München, Wien 1984, S. 22.
- /47/ Lerch, R.: Simulation piezoelektrischer Körper mit der Finite-Element-Methode. In: Deutsche Akustik Gesellschaft: Fortschritte der Akustik. 1986, Berlin, S. 797-801.
- /48/ Lerch, R.: Piezoelectric and Acoustic finite Elements as Tools for the Development of Electroacoustic Tranducers. In: Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht, Bd. 17, 1988, Nr. 6, S. 284-290.
- /49/ Kohnke, (Ed.), Houston, P.: ANSYS User`s Manual for Revision 5.0: Volume IV Theory, : Swanson Analysis Systems, Inc., 1992, S. 11.
- /50/ Ostergaard, D. F., Pawlak, T. P.: Three-dimensional finite elements for analysing piezoelectric structures (1986). In: IEEE-Ultrasonic Symposium, Nov.17-19, Williamsburg (VA) 1986.
- /51/ Kagawa, Y., Yamabuchi, T.: Finite Element Approach for Electromechanical Device Problems with Arbitrary Electrode Configuration. In: Institute of Electronical and Electronic Engineers, IEEE Proc. `75 ISCAS, S. 21-24.

-
- /52/ Prathap,G.: The FEM in Structural Mechanics. Dordrecht/Boston/London 1993.
- /53/ Allik, H., Hughes,T. J. R. : Finite Element Method for Piezoelectric Vibration. In: International Journal for numerical methods in engineering, Vol. 2, 1979, S. 151-157.
- /54/ Naillon, M., Coursant, R. H., Besnier, F.:Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method. In: ACTA Electronica, 25, 4 (1983), S. 341-362.
- /55/ Tzou,H.S.,Tseng,C.I.,American Society of Mechanical Engineers. In: ASME Paper No.88-WA/CIE-2,1988,S. 1-8.
- /56/ Boucher,D., Lagier,M., Maerfeld,C.: Computation of the Vibrational Modes for Piezoelectric Array Transducers using a Mixed Finite Element-Perturbation Method. In: IEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-28, No.5, Sept.1981.
- /57/ Lucas, I.: Transformation of Energy in Piezoelectric Drive Systems. Siemens Forschungs und Entwicklungs Bericht, Bd.4 (1975), Nr.6, S. 373-379.
- /58/ Craggs, A.: The Use of Simple Three-Dimensional Acoustic Finite Elements for Determining the Natural Modes and Frequencies of Complex Shaped Enclosures. In: Journal of Sound and Vibration, 1972, 23, (3), S. 331-339.
- /59/ Estorff, O.v., Homm, A., Bartels, F.: Numerical and Experimental Study of Noise generated by a Vibrating Plate. In. International Conference: Spacecraft Structures and Mechanical Testing, Noordwijk, The Netherlands, 24-26 April, 1991, S. 83-87.
- /60/ Estorff, O. v., Coyette, J.-P., Guisset, P.: Neue Entwicklungen zur Berechnung der Schallabstrahlung mit Boundary Elementen. In: XXIII. Internationaler FEM-Kongreß 1994, 14/15 Nov., Baden-Baden.
- /61/ Fabula, Th.,Schroth, A.:Simulation des dynamischen Verhaltens mikromechanischer Membranen: VDI-Berichte Nr.960, 1992, S. 795-802.
- /62/ Denkmann, W.J., Nickell, E., Stickler, D.C.:Analysis of Structural-Acoustic Interactions in Metal-Ceramic Transducers. In: IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. AU-21, No.4, Aug.1973, S. 317-324.
- /63/ Kagawa,Y.,Omote,T.:Finite Element Simulation of Acoustic Filters with variable Circular Cross-Section. In: FASE 75, Premier Congres European D'Acoustique, Paris, 1975, S. 363- 371.
- /64/ Kagawa,Y.,Yamabuchi,T.:Finite Element Approach for a Piezoelectric Circular Rod. In: IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-23, No.6, Nov.1976, S. 379-385.
- /65/ Kagawa,Y.,Yamabuchi,T.: Finite Element Simulation of a Composite Piezoelectric Ultrasonic Transducer.In: IEEE Transactions On Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-26, No.2, March 1979, S. 81- 88.
- /66/ Kagawa,Y.:A Finite Element Approach to Electromechanical Problems with an Application to Energy-Trapped and Surface-Wave Devices. In: IEEE Transactions On Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-23, No.4, July 1976, S. 263- 273.
- /67/ Lerch, R.:Simulation Piezoelektrischer Wandler. Fortschritte der Akustik-DAGA '87,VDE-Verlag,Berlin, 1987, S. 61-77.

- /68/ Timoshenko, S.: Vibration Problems in Engineering. Fourth Edition, New York, London, Sydney, Toronto, 1974.
- /69/ Vinson, J.R.: The Behavior of Thin Walled Structures: Beams, Plates, and Shells. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1989.
- /70/ Reid, W. P.: Free Vibrations Of A Circular Plate. In: J. Soc. Industr. Appl. Math., Vol.10.No4, Dec, 1962, S. 668-673.
- /71/ Reddy, J.N., Asce, M.: Exact Solutions of Moderately Thick Laminated Shells. In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.110, May 1984, S. 794-809.
- /72/ Love, A. E. H. : Free Vibrations and Deformation of a Thin Elastic Shell. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Vol. 179A, Feb. 1988, S. 491- 546.
- /73/ Gladwell, G.M.L: The Vibration Of Mechanical Resonators (II, 1989): Rings, Discs, and Rods of Arbitrary Profile, Boston, 1989.
- /74/ Leissa, A.W.: Vibration of Plates (1969). Washington, D.C. 1969, S. 7- 36.
- /75/ Cheung, Y. K., Leung, A. Y. T.: Finite Element Methods in Dynamics (1991). Dordrecht, Boston, London 1991, S. 151-156.
- /76/ Coursant, R.H., Eyraud, P., Fink, M., Tellier, J. M.: Preparation and Characterisation of Lead Titanate and Lead Metaniobate Pizoceramics for Ultrasonic Transducer Design. In: ISAF '86 Proceedings of the sixth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Nethlehem, USA, June 8-11, 1986, S. 442-447.
- /77/ Lerch, R.: Berechnung des Schwingungsverhaltens piezoelektrischer Körper mit einem Vektorprozessor. In: Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht Bd.15 (1986) Nr.5, S. 234-238.
- /78/ Naillon, M., Coursant, R. H., Besnier, F.: Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method. In: ACTA Electronica, 25, 4 (1983), S. 341.
- /79/ Blevins, R., D.: Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. In: R. E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1996, S. 426-450.
- /80/ N.N.: DIN 1320 : Akustik- Allgemeine Begriffe (1974). Berlin, Köln 1974.
- /81/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988, S. 143.
- /82/ Kuttruff, H.: Physik und Technik des Ultraschalls (1988). Stuttgart 1988, S. 48, 90.
- /83/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988.
- /84/ Leissa, A.W.: Vibration of Plates (1969). Washington, D.C. 1969, S. 7.
- /85/ UHU: Produktbeschreibung Typ UHU plus / endfest 300 (1994). In: Produktbeschreibung (Art. Nr. 45640), UHU , Brühl 1994.
- /86/ Conrad Electronic: Produktbeschreibung Sn60PbCu2 nach DIN 8516, säurefrei, mit Flußmittel auf Kolophoniumbasis (Art.Nr.812803), 1994.
- /87/ Hohenburg, R., Götz, S., Burgmer, M, : KS-Funktionen der AEG A120 : Teil 1, Teil 2 (1992), Seligenstadt, 1992.
- /88/ Brüel & Kjaer: Condenser Microphones and Microphone Preamplifiers for Acoustic Measurement- Data Handbook. Naerum (Denmark), Rev. 1982, S. 45 ff.

-
- /89/ Brüel & Kjaer: Daten und Fakten: Kondensatormikrofonkapseln - Typen 4133- 4180 (1993). Quickborn, 1993.
- /90/ N.N.: DIN 1320 : Akustik- Allgemeine Begriffe (1974). Berlin, Köln 1974.
- /91/ N.N.: DIN 45630 Blatt 1:Grundlagen der Schallmessung:Physikalische und subjektive Größen von Schall (1971). Berlin, Köln 1971.
- /92/ N.N.:DIN 45633 Blatt 2: Präzisionsschallpegelmesser: Sonderanforderungen für die Anwendung auf kurzdauernde und impulshaltige Vorgänge (Impulsschallpegelmesser) (1969). Berlin, Köln 1969.
- /93/ N.N. :DIN 45634 :Schallpegelmesser und Impulsschallpegelmesser: Anforderungen Prüfung (1974). Beuth-Verlag,Berlin, Köln, September 1974.
- /94/ Brüel & Kjaer: Schallmessung (1984). Naerum(Denmark) 1984.
- /95/ Wahrmann, C.G. :Impulse Noise Measurement. In: Brüel & Kjaer Technical Review, No.1, 1969, S. 7-13.
- /96/ Hansen, K.S. : Details in the Construction of a Piezo-electric Microphone. In: Brüel & Kjaer Technical Review, No.1, 1969, S. 19-25.
- /97/ N.N.:DIN 45633 Blatt 2: Präzisionsschallpegelmesser: Sonderanforderungen für die Anwendung auf kurzdauernde und impulshaltige Vorgänge (Impulsschallpegelmesser) (1969). Berlin, Köln 1969.
- /98/ Hansen, K.S. : Details in the Construction of a Piezo-electric Microphone. In: Brüel & Kjaer Technical Review, No.1, 1969, S. 19.
- /99/ Kchouk, Slim: Einfluß der Variation von Geometrie und Materialparametern auf die Richtcharakteristik von Luftultraschallwandlern. In: Studienarbeit (unveröffentlicht), Universität Dortmund, LTD I, Univ.- Prof. Dr.-Ing. U. Schüler, 1990.1996, S. 56.
- /100/ Brüel & Kjaer: Calibration Chart Condenser Microphone Type 4135 , Serial No:1806984 (23. 9.1994). Naerum (Denmark) 1994.
- /101/ Brüel & Kjaer: Condenser Microphones and Microphone Preamplifieres for Acoustic Measurmenet- Data Handbook. Naerum (Denmark), Rev. 1982, S. 45 ff.
- /102/ N.N.: DIN 1320 : Akustik- Allgemeine Begriffe (1974). Berlin, Köln 1974.
- /103/ N.N.: DIN 45630 Blatt 1:Grundlagen der Schallmessung:Physikalische und subjektive Größen von Schall (1971). Berlin, Köln 1971.
- /104/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988, S. 137.
- /105/ Mágori, V.: Ultraschallwandler. Deutsches Patent P2541492, 9.Oktober 1980.
- /106/ Polytec Inferometer (Typ OFV 1100)- Datenblatt. Polytec GmbH Waldbronn 1994.
- /107/ Kreis, Th., Jüptner, W., Geldmacher, J.: Methoden zur quantitativen Auswertung von Interferenzmustern- Ein Vergleich. In: Waidelich (Hrsg.): Laser in der Technik, Springer Verlag, Heidelberg 1992, S. 55-62.
- /108/ Ansys. Revision 5.0, PC-Version (1994). Swanson Analysis Systems Inc. Houston (PA).
- /109/ Hohenburg, R. (Vortrag): Leistungsmerkmale ausgewählter FEM- Programme (1994). In: FEM-Anwenderkreis, Universität Dortmund.

-
- /110/ Müller, R., Rehfeld, I., Katheder, W.: Fem für Praktiker(1994). 2. Aufl. Esslingen 1995, S. 307-336.
- /111/ Schliekmann: FE-Simulation für dentale Implantate. In: Cad-Fem User`s Meeting-Tagungsband, Miesbach 1994, S. 12.
- /112/ Ansys. Revision 5.0, PC-Version (1994). Swanson Analysis Systems Inc. Houston (PA), Volume IV, S. 11
- /113/ Bauer, A., Gesemann, H. J., Helke, G., Schreckenbach,W.: Technologie und Anwendungen von Ferroelektrika (1976). Leipzig 1976, S. 341-343.
- /114/ IEEE Standard on Piezoelectricity. In: Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1. 1984, Vol. Su-31, No. 1, S. 8.
- /115/ Nyde J. F.: Physical Properties of Crystals:Their Representation by Tensors and Matrices (1969). London 1969, S. 300.
- /116/ Kohnke, (Ed.), Houston, P.: ANSYS User`s Manual for Revision 5.0: Volume IV Theory, : Swanson Analysis Systems, Inc., 1992, S. 17-18 (theory).
- /117/ Müller, R., Rehfeld, I., Katheder, W.: Fem für Praktiker(1994). 2. Aufl. Esslingen 1995, S. 399-405.
- /118/ Stenzel, H., Brosze, O.: Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen. 2. Auflage, Berlin 1958., S. 9.
- /119/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988, S. 137.
- /120/ Mágori, V.: Ultraschallwandler. Deutsches Patent P2541492, 9.Oktober 1980.
- /121/ Koch, J: Piezoxide (PXE): Eigenschaften und Anwendungen (1988). Heidelberg: 1988, S. 137.



Ein Beitrag zur Auslegung von Ultraschallwandlern für Abstands- messungen

Anhang

Dipl.-Ing. Rainer Hohenburg



Fakultät Maschinenbau
Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik I

Inhalt

Anhang 1	Mathematische Herleitungen/Formeln	1
Anhang 1.1	Dämpfung	1
Anhang 1.2	Schallabstrahlung	2
Anhang 1.3	Bestimmung der Öffnungswinkel α_1 und α_2	2
Anhang 2	Hardwarekomponenten	4
Anhang 2.1	Schallpegelmessgerät	4
Anhang 2.2	Kondensatormikrofon.....	6
Anhang 2.3	SPS.....	7
Anhang 2.4	Laserinterferometrieeinrichtung	8
Anhang 3	Software-Dokumentation	9
Anhang 3.1	Listing Turbo-Pascal-Messprogramm - Ultraschall-Messplatz	9
Anhang 3.2	Listing SPS-Messprogramm - Ultraschall-Messplatz.....	34
Anhang 3.3	Listing FEM-Batch-File	41
Anhang 4	Daten aus Experiment, Simulation, und Literatur	48
Anhang 4.1	Daten zu Kapitel 3: Experimentelle Untersuchungen	48
Anhang 4.2	Daten zu Kapitel 4: FEM-Simulationsberechnungen	53
Anhang 4.2.1	Anpassung der Dämpfungswerte.....	53
Anhang 4.2.2	Auswertung „Resonanzfrequenzen“	58
Anhang 4.2.3	Auswertung „Güte- und Dämpfungswerte“	74
Anhang 4.3	Daten zu Kapitel 5: Ergebnis-Vergleich	77

Anhang 1 Mathematische Herleitungen/Formeln

Anhang 1.1 Dämpfung

Für das Aufstellen der Dämpfungsmatrix „[C]“ wird sehr häufig eine Linearkombination von Massen- „[M]“ und Steifigkeitsmatrix „[K]“ angenommen. Die Dämpfungskoeffizienten „ α “ und „ β “ werden experimentell bestimmt

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

In der folgenden Abbildung ist der Verlauf des Dämpfungsmaßes „D“ in Abhängigkeit der Kreisfrequenz „ ω “ dargestellt.¹ Dämpfungen dieser Art werden auch als Rayleigh-Dämpfung bezeichnet.

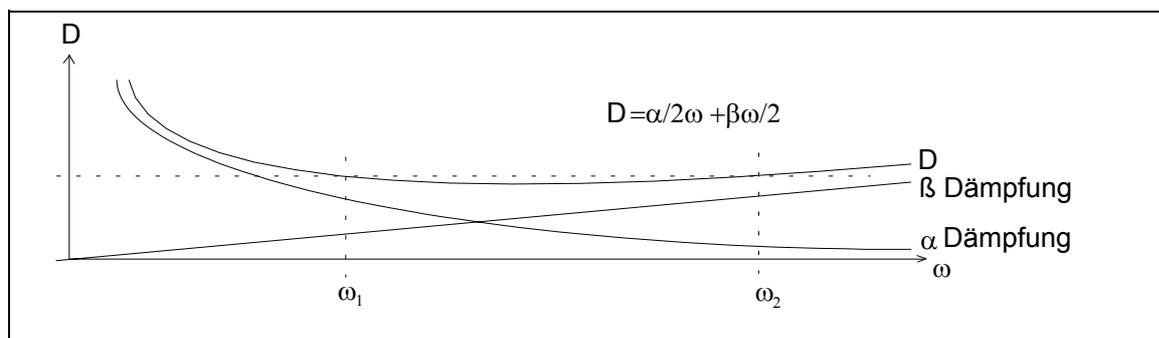


Abbildung 1-i: Rayleigh- Dämpfung

Durch Umrechnung ergeben sich für die Dämpfungskoeffizienten folgende Gleichungen:

$$\alpha = 2\omega_1 \left(D_1 - \frac{\beta\omega_1}{2} \right) \qquad \beta = \frac{2D}{\omega_1 + \omega_2}$$

¹ Die Indices 1 bzw. 2 kennzeichnen die linken und rechten Halbwerte, die sich durch den Anstieg des geringsten Dämpfungsmaßes um den Faktor $\sqrt{2}$ ergeben.

Anhang 1.2 Schallabstrahlung

Nach folgender Gleichung lässt sich der Schalldruck „p“ als Wechselgröße für einen beliebigen Aufpunkt mit dem Abstand „r“ von der Schallquelle, die sich mit der Geschwindigkeit $v(x,y)$ bewegt, berechnen. Hierbei ist „c“ die Schallgeschwindigkeit, „ρ“ die Dichte des Mediums, „λ“ die Wellenlänge, „ω“ die Kreisfrequenz², „k“ die Kreiswellenzahl³ und „F“ die Fläche der Schallquelle.

$$p = \frac{i \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot e^{i\omega t} \int_F v(x,y) \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} dF$$

Anhang 1.3 Bestimmung der Öffnungswinkel α_1 und α_2

Die Bestimmung der Öffnungswinkel „ α_1 “ und „ α_2 “ aus den Experimenten und den FEM-Simulationen erfolgt mithilfe einer tabellarischen Auswertung. In der Tabelle 1-i ist der Auszug der Ergebnisse der FEM-Simulationsrechnung des US-Wandlers mit einem Durchmesser von 24mm und einer Dicke von 1,0mm dargestellt. Der Öffnungswinkel α_1 wird über den 3dB- Abfall des maximalen Pegelwertes bestimmt. Dieser Winkelbereich ist in der Tabelle 1-i grün dargestellt und beträgt ca. $\pm 6^\circ = 12^\circ$. Der Öffnungswinkel α_2 wird über des in Symmetrieachsenrichtung fallende Hauptschallbündel definiert. Der Winkelbereich ist in der Tabelle 1-i rot eingezeichnet und hat einen Wert von ca. $\pm 11^\circ = 22^\circ$.

² $\omega = 2\pi f$

³ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Winkel α in [°]	L_p in [dB]	Öffnungswinkel α_1 in [°]	Öffnungswinkel α_2 in [°]
0	100.0000000	Abfall um 3dB -> $\alpha_1 = \pm 6^\circ = 12^\circ$	Bereich der Hauptkeule -> $\alpha_2 = \pm 11^\circ = 22^\circ$
1	99.8300875		
2	99.7142025		
3	99.3619966		
4	98.7589454		
5	97.877546		
6	96.6707277		
7	95.0577569		
8	92.8914007		
9	89.8673549		
.....		
.....		
89	49.6148282		
90	49.5185800		
91	49.484111		

Tabelle 1-i: Bestimmung der Öffnungswinkel α_1 und α_2 der Simulationsrechnung für den US-Wandler mit $d=24\text{mm}$, $t=1,0\text{mm}$

In der Abbildung 1-ii ist das Richtdiagramm des US-Wandlers ($d=24\text{mm}$; $t=1,0\text{mm}$) mit den Öffnungswinkeln α_1 bzw. α_2 dargestellt⁴.

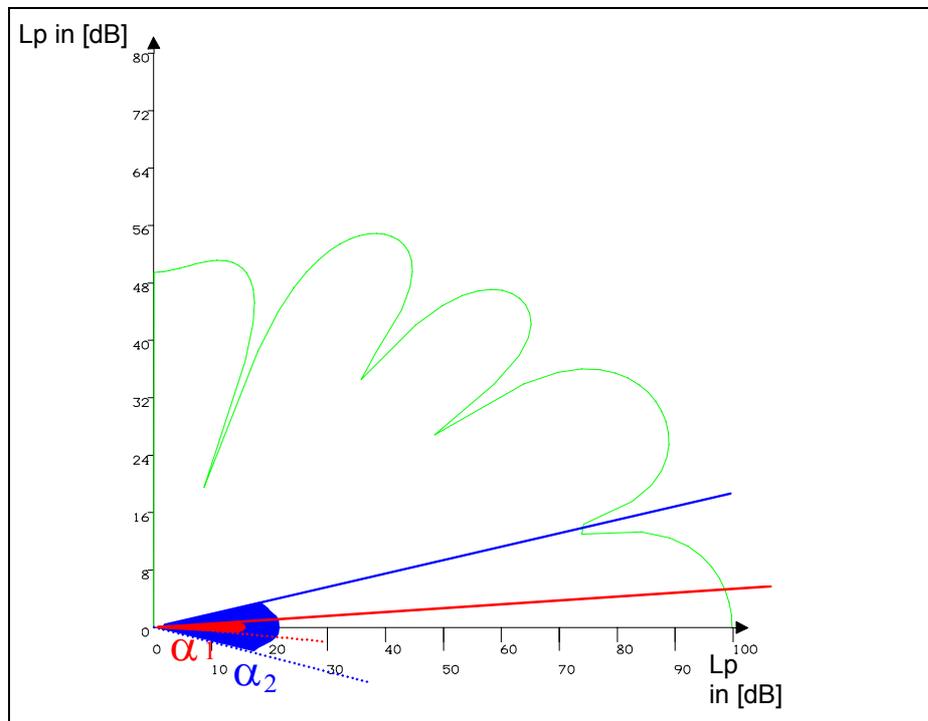


Abbildung 1-ii: Darstellung der Öffnungswinkel α_1 bzw. α_2

⁴ Die Öffnungswinkel α_1 bzw. α_2 sind zeichnerisch nicht maßstabsgetreu dargestellt.

Anhang 2 Hardwarekomponenten

Anhang 2.1 Schallpegelmessgerät

Die Messung des Schalldruckpegels erfolgt mithilfe von Präzisionsschallpegelmessern und Messmikrofon der Fa. Brüel & Kjær. Diese Messgeräte entsprechen der Spezifikation von Präzisionsschallpegelmessern und Peripherie gemäß DIN 45633 und DIN 45634. Bei dem Mikrofon handelt es sich um ein Kondensatormikrofon vom Typ 4135 (vgl. Kapitel Anhang 2.2).

Die Einstellungen und Funktionen der einzelnen Betriebsmodi des Schallpegelmessgerätes sind in der Tabelle 2-i und die zugehörigen Baugruppen in Abbildung 2-i dargestellt.

Taster	Stellung	Funktion
Hauptschalter	"Imp"	Anzeigeart "Impuls" gemäß DIN 45633 (2)
	"Hold"	Hier wird die maximale "Impuls-Anzeige" festgehalten, bis die "Meter-Reset-Taste" gelöscht wird. Die Anstiegszeit ist dieselbe wie bei "Impuls".
Filterwahlschalter	"Lin"	Hier hat das Gerät ohne Mikrofon einen linearen Frequenzgang im Bereich von 2 Hz bis 70 kHz.
Meter Reset Taste		Der Haltestromkreis, der den Zeiger in Stellung "Hold" festhält, wird durch Betätigen der "Meter Reset"-Taste entladen. Der Messwertspeicher des Schallpegelmessgerätes wurde mithilfe der Meter Reset -Taste gelöscht. Der Taster wurde nachträglich mit einem potenzialfreien Schließer parallel geschaltet, um diese Funktion automatisch mithilfe der SPS ausführen zu können
DC Output		An dieser Buchse tritt eine Gleichspannung proportional dem Zeigerausschlag auf. Der Ausgangswiderstand beträgt 25k Ω . Bei unbelastetem Ausgang entspricht eine Spannung von 1 V dem Vollausschlag des Messinstruments. Der Messwertspeicher wurde mithilfe des DC Output- Ausgangs ausgelesen. Die Umrechnung der vom PC gelesenen Integer-Werte auf den gemessenen Schalldruckpegel ergibt sich aus der Summe von Bereichsschalter-Einstellung des Pegelmessgeräts und der Übertragung gemäß Umrechnungsfunktion.

Tabelle 2-i: Einstellungen des Schallpegelmessgerätes

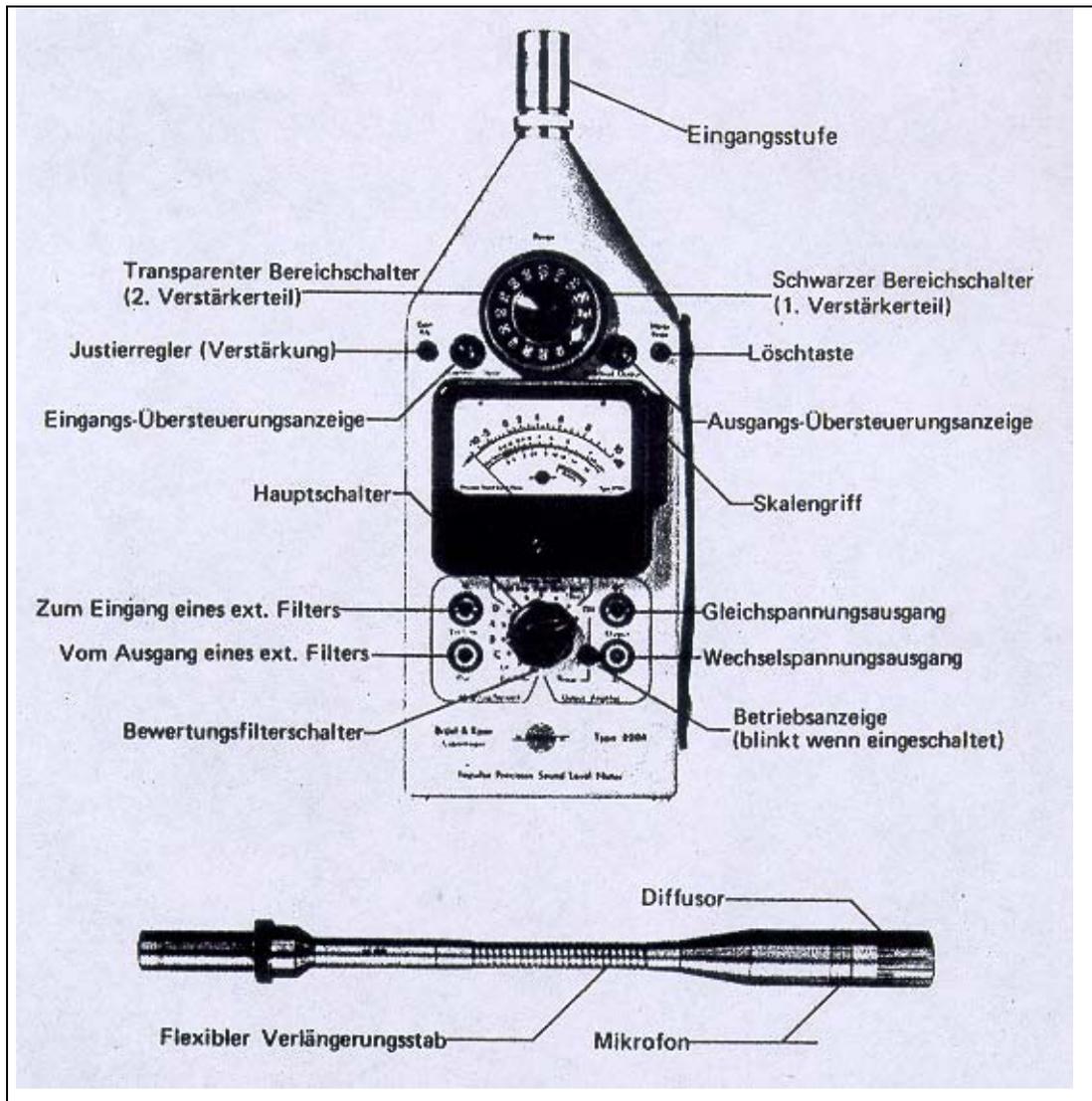


Abbildung 2-i: Baugruppen des Präzisionsschallpegelmessers

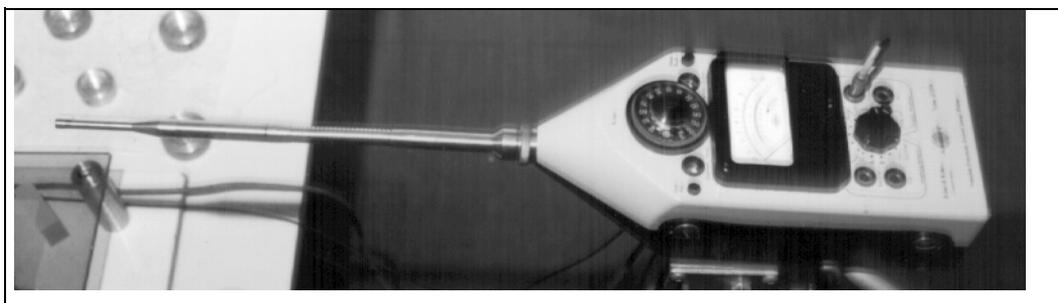


Abbildung 2-ii: Präzisionsschallpegelmessers mit Mikrofon

Anhang 2.2 Kondensatormikrofon

Das Kondensatormikrofon (vgl. Abbildung 2-iii: Kondensatormikrofon) besteht aus einer auf dem Gehäuse befestigten Nickelmembran, die in der Nähe der Gegenelektrode angeordnet ist. Hierbei handelt es sich um einen elektro-mechanischen Wandler, der nach dem dielektrischen Wandlerprinzip arbeitet. Die Luft ist in diesem Fall das Dielektrikum. Die Elektroden werden über einen hohen Vorwiderstand mithilfe der Batteriespannung auf eine Spannung von 200 Volt aufgeladen. Durch die Bewegung der Membran entsteht eine Wechselspannung, die dem Schalldruck in einem Frequenz- und Dynamikbereich proportional ist.

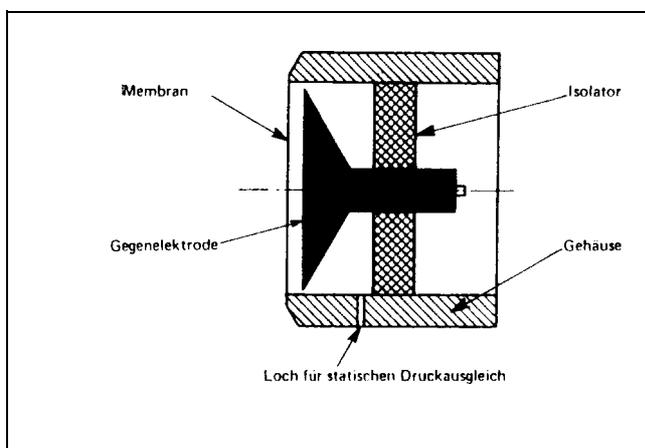


Abbildung 2-iii: Kondensatormikrofon

Anhang 2.3 SPS

Bei der verwendeten SPS vom Typ Modicon A120 der Firma AEG handelt es sich eine modular aufgebaute Steuerung in Frontschlusstechnik (Abbildung 2-iv).

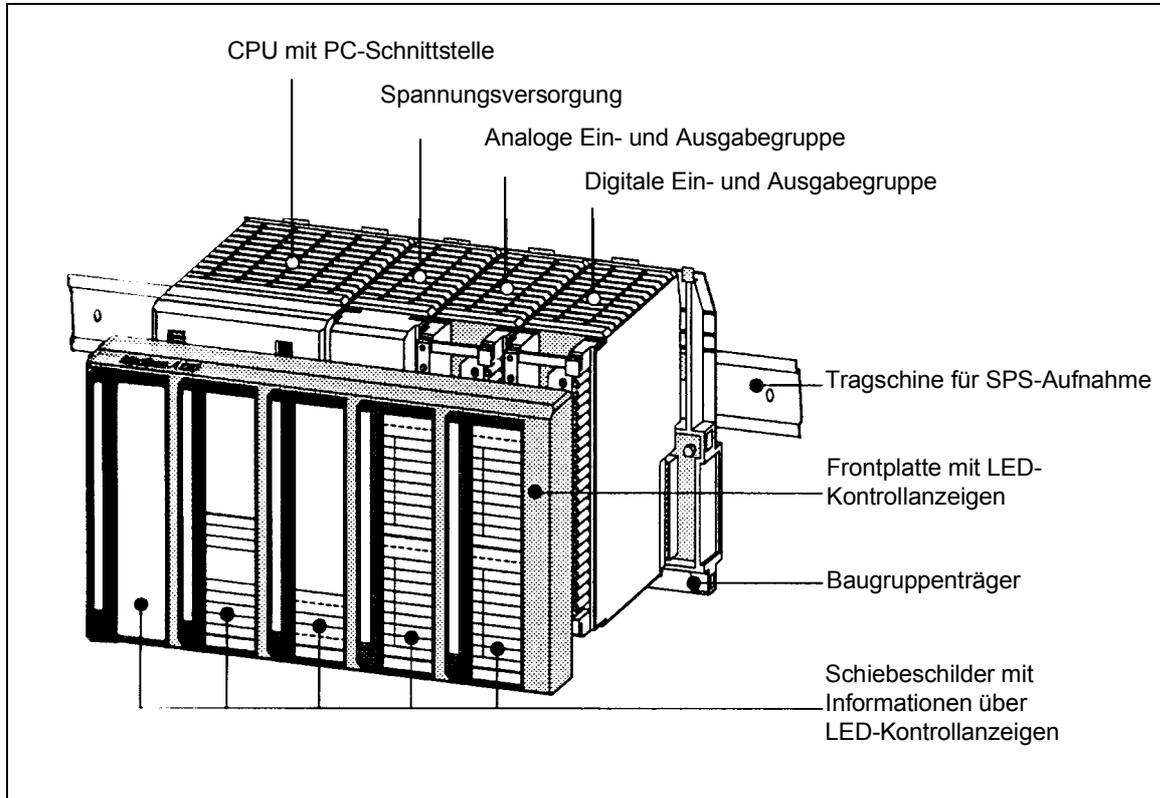


Abbildung 2-iv: Speicherprogrammierbare Steuerung

Die Übertragung der Daten auf den PC erfolgt über die PC-Schnittstelle. Während der Programmausführung können die Signalzustände mithilfe des PCs im Online-Modus kontrolliert werden.

Die Ansteuerung der Aktorik erfolgt über die digitale Ein- und Ausgabegruppe. Die Daten des Schallpegelmessers werden in die analoge Ein- und Ausgabegruppe eingelesen und anschließend auf den PC übertragen. Die LED-Kontrollanzeigen erlauben eine zusätzliche Kontrolle der ausgeführten SPS-Befehle.

Anhang 2.4 Laserinterferometrieeinrichtung

Das Grundprinzip der Laser-Doppler-Interferometrie beruht auf der Frequenzverschiebung von Licht durch den Doppler-Effekt. Mithilfe einer Messoptik wird der Laserstrahl mit der Wellenlänge „ λ_{Laser} “ auf die Oberfläche des zu prüfenden Ultraschallwandlers gerichtet. Das von der Oberfläche zurückgestreute Licht wird mit einem Photodetektor erfasst. Durch die Bewegung der US-Wandleroberfläche mit der Geschwindigkeit „ $v(t)$ “ wird das zurückgestreute Licht in seiner Frequenz um den Betrag „ $v_D(t)$ “ aufgrund des Doppler-Effektes verschoben.

$$v_D(t) = \frac{2v(t)}{\lambda_{\text{Laser}}}$$

Diese Frequenzverschiebung der rückgestreuten Lichtwelle wird durch eine optische Mischung mit dem Referenzstrahl in den Bereich der Radiowellen umgesetzt. Hierbei ist der Referenzstrahl um einen definierten Betrag frequenzverschoben. Die momentane Dopplerfrequenz „ $v_D(t)$ “ wird durch eine breitbandige Frequenzmodulation des Photodetektorsignals bestimmt und messtechnisch als elektrische Spannung für die Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt.

Das Laser-Doppler-Interferometer des Lehrstuhls für Qualitätswesen der Universität Dortmund stammt von der Fa. Polytec (Typ OFV 1100).

Die Auflösung beträgt $7\mu\text{m}/\text{sec}$ bei einer maximalen Geschwindigkeit „ v_{max} “ von $300\text{ mm}/\text{sec}$, einem Arbeitsabstand von ca. 300mm und einer maximalen Frequenz von 50kHz .

Anhang 3 Software-Dokumentation

Anhang 3.1 Listing Turbo-Pascal-Messprogramm - Ultraschall-Messplatz

```
(*****)
(* US-Mess Vers1.11, File USMESS11.PAS 22/2/95,17.15h *)
(* vgl. USMESS10.pas, jedoch erweiterte Amplitudengangbestimmung *)
(* PC-386-25- Version *)
(*****)
```

Program USMess;

```
(*****)
(* MW1-> Drehung in Uhrzeigersinn, Anzahl der Schritte= Wert-1 *)
(* MW2-> Drehung gegen den Uhrzeigersinn, " *)
(* MW3-> Referenzfahrt *)
(* MW4-> Setze Ausgang 2.1, wird von SPS nicht zurückgesetzt *)
(* MW5-> Setze Ausgang 2.2, " *)
(* MW6-> 0/1->SPS ohne/mit Aktivität bzgl.MW1,MW2 oder MW3 *)
(* MW7-> 0/1/xxx ->ohne/löschen/setze A8.2 mit Kxxx (K3280->1V) *)
(* wird von SPS nicht zurückgesetzt *)
(* MW8-> xxx ->Impuls auf A8.2 (Länge 10ms, Amplitude vgl.MW7) *)
(* wird von SPS zurückgesetzt *)
(*****)
```

uses eingabe,dos,crt,fehler,graph;

```
Const KurzTele = #$80;
      Kopf : string = #$00 + #$0C + #$00 + #$F0 +
                    #$00 + #$00 + #$01 + #$00 +
                    #$00;
      acht : String = #$80+$80+$80;
      Timer = 13; (* PC->13,PCI,VLB->50 *)
      timeout=145;
      SPSPause=200; (* PC->200,PCI,VLB->1000 *)
      bgjpfad='C:\tp\bgi'; (*PC->c:\tp\bgi, VLB->e:\tp60\bgi *)
      (* 145 definiert die Wartezeit in Sec. bei SPS-Befehl, *)
```

Type

```
Satztyp_1=RECORD {Datensatz Datei1}
      Amplitude :longint;
      Winkel :longint;
END;
Datei_1_typ = FILE OF Satztyp_1;
```

var

```
KSKopf : String[8];
```

```
    satz1,satz2,satz3:string;
    Datei_Name: string;
    Pegel: array [1..200,1..3] of longint;
    worte1,worte2,worte3:longint;
    Anzahl,i,Bereich : Byte;
    init,status : Boolean;
    Satz_1 : Satztyp_1;
    Datei_1 : Datei_1_typ; {Datei1}

PROCEDURE initcom(com,baud,bits,stoppbits:integer; parity:char);
VAR register : registers;
BEGIN
  with register do
    BEGIN
      if com = 2 then dx := 1
        else dx := 0;
      Case baud of
        110 : ax := 0;
        150 : ax := 32;
        300 : ax := 64;
        600 : ax := 96;
        1200: ax := 128;
        2400: ax := 160;
        4800: ax := 192;
        9600: ax := 224
      END;
      case parity of
        'n','N' : ;
        'o','O' : ax := ax + 8;
        'e','E' : ax := ax + 24
      END;
      case stoppbits of
        1 : ;
        2 : ax := ax + 4
      END;
      case bits of
        7 : ax := ax + 2;
        8 : ax := ax + 3
      END;
      intr($14,register);
    END;
  END;
END;
```

```
Function getZeichen:Char;
var reg: registers;
begin
  with Reg do begin
    AX := 2;
    DX := 0;
  end;
  intr($14,reg);
  if HI(reg.AX) = 0 then
    GetZeichen := char(LO(reg.AX)) else GetZeichen := #0;
  writeln(char(LO(Reg.AX)));
end;

PROCEDURE SendString(zeile:String);
VAR i : integer;
BEGIN
  for i := 1 to Length(Zeile) do
    BEGIN
      port[$03f8] := ord(zeile[i]);
      delay(Timer);
    END;
  END;

FUNCTION ReceiveString(Laenge,StartPolling : Byte) : String;
VAR Rueck,i : Word;
    zeile : String;
    ok : Boolean;
    c : byte;
BEGIN
  zeile := ""; Rueck := 255;i:= 0;
  Repeat
    i:=0;
    repeat
      if StartPolling = 1
      then Begin
        SendString(#$80);
      End;
      inc(i);
    until (Port[$03fd] and 1 = 1) or (i=30000);
    rueck := port[$03f8];
    zeile := zeile + chr(rueck);
  Until (i = 30000) or (Length(Zeile) = Laenge);
  receivestring := zeile;
END;
```

```
Procedure SicherungsByte(Var s: String); { Hängt das Sicherungsbyte an }
```

```
var S0,S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7,Pb : Byte;
```

```
    i : Integer;
```

```
begin
```

```
    PB :=0;
```

```
    S0 :=0;
```

```
    S1 :=0;
```

```
    S2 :=0;
```

```
    S3 :=0;
```

```
    S4 :=0;
```

```
    S5 :=0;
```

```
    S6 :=0;
```

```
    S7 :=0;
```

```
    for i:=1 to length(s) do begin
```

```
        if Ord(S[i]) and 1 = 1 then inc(S0);
```

```
        if Ord(S[i]) and 2 = 2 then inc(S1);
```

```
        if Ord(S[i]) and 4 = 4 then inc(S2);
```

```
        if Ord(S[i]) and 8 = 8 then inc(S3);
```

```
        if Ord(S[i]) and 16 = 16 then inc(S4);
```

```
        if Ord(S[i]) and 32 = 32 then inc(S5);
```

```
        if Ord(S[i]) and 64 = 64 then inc(S6);
```

```
        if Ord(S[i]) and 128 = 128 then inc(S7);
```

```
    end;
```

```
    if S0 MOD 2 = 0 then PB := PB or 1;
```

```
    if S1 MOD 2 = 0 then PB := PB or 2;
```

```
    if S2 MOD 2 = 0 then PB := PB or 4;
```

```
    if S3 MOD 2 = 0 then PB := PB or 8;
```

```
    if S4 MOD 2 = 0 then PB := PB or 16;
```

```
    if S5 MOD 2 = 0 then PB := PB or 32;
```

```
    if S6 MOD 2 = 0 then PB := PB or 64;
```

```
    if S7 MOD 2 = 0 then PB := PB or 128;
```

```
    S := S + Chr(PB);
```

```
end;
```

```
Procedure BlockLaenge(Var S: string);
```

```
begin
```

```
    S[3] := Char( length(S) - 4 );
```

```
end;
```

```
Function SPSSstatus: String;
```

```
Var s : String;
```

```
begin
```

```
    S := # $00 + # $0C + # $0D + # $F0 + # $00 + # $00 +  
        # $01 + # $00 + # $00 + # $05 + # $01 + # $41  
        + # $00 + # $28 + # $18 + # $00 + # $01;
```

```
    Blocklaenge(S);
```

```
    SicherungsByte(S);
```

```
    SPSSstatus := S;
```

```
end;
```

```
Function SttSPS : string;
Var s : String;
begin
  S := Kopf + #$01 + #$02 + #$00 + #$00;
  BlockLaenge(S);
  SicherungsByte(S);
  SttSPS := S;
end;

Function StpSPS : string;
Var s : String;
begin
  S := Kopf + #$01 + #$04 + #$00 + #$00;
  BlockLaenge(S);
  SicherungsByte(S);
  StpSPS := S;
end;

Procedure StartPoll;
Begin
  Repeat
    Sendstring($80);
  until ((Port[$03fd] and 1 = 1));
end;

Procedure WriteSPS( S : String;
  Var Antwort : String;
  StartPolling : Byte;
  Pause : Integer;
  Antwortlaenge : Byte);
Var i,Count : Integer;
BEGIN
  Sendstring(S);
  Delay(Pause);
  If StartPolling = 1 then Antwort := ReceiveString(Antwortlaenge,1)
  Else Antwort := ReceiveString(Antwortlaenge,0);
END;
```

```
Function SetMW(Nr,Wert : word): string; {Erzeugt String zur Ausgabe MW }
Var S : String;
begin
  S:= "";
  S:= Kopf + #$07 + #$01 + #$00 +
    #$00 + #$22 + #$01 + chr(HI(Nr)) + chr(LO(Nr)) +
    chr(HI(wert)) + chr(LO(Wert));
  BlockLaenge(s);
  SicherungsByte(S);
  SetMW := S;
end;
```

```
Function GetMW(Nr: word; Var Antwort : String): word;
var w : word;
    b : Byte;
    S,Rueck : String;
begin
  s:= Kopf + #$05 + #$01 + #$00 + #$00 +
    #$22 + #$01 + chr(HI(Nr)) + chr(LO(NR));
  Blocklaenge(S);
  Sicherungsbyte(S);
  Repeat
    w:=0;
    writeSPS(S+#$80,Antwort,0,0,7); StartPoll; WriteSPS($80,Rueck,0,0,1);
    b := pos(($05+$01+$00+$00),antwort);
    if b <> 0 then w := (ord(Antwort[b+4])shl 8)+(ord(Antwort[b+5]));
  Until b <> 0;
  GetMW := w;
end;
```

```
function SPSRun: Boolean;
var s,rueck : string;
begin
  Rueck := "";
  s := Char($41) + Char($00) + Char($01);
  StartPoll;
  WriteSPS(SPStatus+$80,Rueck,0,0,29);
  if pos(s,Rueck) = 0 then SPSRun := false else SPSRun := true;
  Rueck := "";
  WriteSPS($80,Rueck,0,0,1);
end;
```

```

Procedure StopSPS;
begin
  Startpoll;
  Sendstring(StpSPS);
  delay(1000);
end;

Procedure StartSPS;
begin
  Startpoll;
  Sendstring(SttSPS);
  delay(2000);
end;

{ADDED 15.06.1992 *****}

FUNCTION ReceiveString2 : STRING;      (* Empfängt String *)
VAR  Rueck,Help  : WORD;              (* von COM1 *)
     zeile : STRING;
     j,i : LONGINT;
     Regs : REGISTERS;
BEGIN
  Zeile := "";
  REPEAT
    Regs.Ax := 0;                      (* Rechengeschwindigkeits- *)
    Intr($1A,Regs);                    (* unabhängige Zeitkontrolle *)
    i := Regs.Dx;                      (**)
    REPEAT                              (**)
      Regs.Ax := 0;                    (**)
      Intr($1A,Regs);                 (**)
      j := Regs.Dx - i;                (**)
    UNTIL (Port[$03FD] and 1 = 1) or (j = 2);  (**)
    If j < 2
    Then BEGIN
      Rueck := Port[$03F8];
      Zeile := Zeile + Chr(Rueck);
    END;
  UNTIL (Zeile = #$80) or (j = 2);      (* j=2 --> Timeout oder Ende *)
  ReceiveString2 := Zeile;            (* des Strings *)
END;

```

```
PROCEDURE WriteSPS2( S : STRING ;      (* allgemeine Kommunikation *)
                   VAR Antwort : STRING ); (* mit der SPS      *)
VAR i : INTEGER;
    h : STRING;
BEGIN
    SendString(S);
    Delay(Timer);
    Antwort := #$80;
    i := 1;
    WHILE (Antwort = #$80) and (i < 5) Do
    BEGIN
        Antwort := ReceiveString2;
        Delay(Timer);
        SendString($80);
        Delay(Timer);
        i := i+1;
    END;
END;

PROCEDURE SchreibeMerker(Num, wort1, wort2: word);
VAR Nr,b : BYTE;
    S,Rueck : STRING;
    merker: LONGINT;
BEGIN
    merker:=wort1;
    merker:=(merker shl 16)+wort2;
    Nr:=LO(num) and 15;
    S := Kopf + #$07 + #$01 + #$00 + #$00 + #$23 + #$01 +
        chr(HI(Nr)) + chr(LO(NR)) +
        Chr(Merker shr 24) + Chr(Merker shl 8 shr 24) +
        Chr(Merker shl 16 shr 24) + Chr(Merker shl 24 shr 24);
    Blocklaenge(S);
    Sicherungsbyte(S);
    i := 1;
    REPEAT
        WriteSPS2(S,Rueck);
        b := Pos($07 + $01 + $00 + $00,Rueck);
        i := i+1;
        Delay(2*Timer);
    UNTIL (b <> 0) or (i = 6);
    IF i = 6 Then FMeldung('Timeout beim Warten auf SPS');
END;
```

```
PROCEDURE LeseMerker(Num:word; VAR wort1, wort2 : Word);
VAR b,Nr : BYTE;
    S,Rueck : STRING;
    Merker : LONGINT;
    HilfsDwort : LONGINT;
    k,i : INTEGER;
BEGIN
    Nr:=(LO(num) and 15);
    S := Kopf + #$05 + #$01 + #$00 + #$00 + #$23 + #$01 + chr(HI(Nr)) + chr(LO(NR));
    Blocklaenge(S);
    Sicherungsbyte(S);
    i := 1;
    REPEAT
        WriteSPS2(S,Rueck);
        b := pos(('$05+$01+$00+$00'),Rueck);
        If b <> 0 Then BEGIN
            Merker := 0;
            HilfsDwort := (ord(Rueck[b+4]));
            Merker := Merker+Hilfsdwort shl 24;
            HilfsDWort := (ord(Rueck[b+5]));
            Merker := Merker+Hilfsdwort shl 16;
            HilfsDWort := (ord(Rueck[b+6]));
            Merker := Merker+Hilfsdwort shl 8;
            HilfsDWort := (ord(Rueck[b+7]));
            Merker := Merker+Hilfsdwort;
        END;
        i := i+1;
        Delay(2*Timer);
    UNTIL (b <> 0) or (i = 6);
    IF i = 6 Then FMeldung('Timeout beim Warten auf SPS');
    wort1:=LO(Merker);
    wort2:=HI(Merker);
END;

PROCEDURE GetBasisMW(StatNr:WORD;VAR basis:WORD);
BEGIN
    Dec(StatNr);
    basis:=1+(4*StatNr);
END;

PROCEDURE GetStat(VAR status1,status2:word);
VAR s:String;
BEGIN
    LeseMerker(40,status1,status2);
end;
```

```

PROCEDURE SetStat(status1,status2:word);
VAR s:String;
BEGIN
  SchreibeMerker(40,status1,status2);
end;

FUNCTION BitTest(bits,x:word):BOOLEAN; {Testet, ob das x-te Bit in bits}
      {gesetzt ist}
BEGIN
  IF (x>15) THEN x:=15;
  BitTest:=(bits and (1 shl x))<>0;
END;

(*****
PROCEDURE SendxString(zeile:String); (* Überträgt String *)
VAR i : integer; (* über COM1 *)
BEGIN
  for i := 1 to Length(Zeile) do
  BEGIN
    delay(Timer);
    port[$03f8] := ord(zeile[i]); {!!!!!!!!!!!!$03f8 Datenport}
  END;
END;

FUNCTION ReceivevString : String; (* Empfängt String *)
VAR Rueck,Help : Word; (* von COM1 *)
zeile : String;
j,i : Longint;
Regs : Registers;
BEGIN
  Zeile := "";
  Repeat
  Regs.Ax := 0; (* Rechengeschwindigkeits- *)
  Intr($1A,Regs); (* unabhängige Zeitkontrolle *)
  i := Regs.Dx; (**)
  Repeat (**)
  Regs.Ax := 0; (**)
  Intr($1A,Regs); (**)
  j := Regs.Dx - i; (**)
  Until (Port[$03fd] and 1 = 1) or (j = 2); { Status $03FD }
  If j < 2
  Then Begin
    Rueck := Port[$03f8]; { $03f8}
    Zeile := Zeile + Chr(Rueck);
  End;
  Until (Zeile = #$80) or (j = 2); (* j=2 ==> Timeout oder Ende *)
  ReceivevString := Zeile; (* des Strings *)
END;

```

```

Procedure WritexSPS( S : String ;      (* allgemeine Kommunikation *)
                  VAR Antwort : String ); (* mit der SPS      *)
VAR i : Integer;
    h: String;
BEGIN
    SendxString(S);
    Delay(Timer);
    Antwort := #$80;
    i := 1;
    While (Antwort = #$80) and (i < 5) Do
    Begin
        Antwort := ReceivexString;
        Delay(Timer);
        SendxString($80);
        Delay(Timer);
        i := i+1;
    End;
END;

Function Merkerx(Nr:Byte):word;
Var i : Integer;
    auswahl : array[1..10] of string[20];

Function LeseMerker(Typ, Nr : Byte) : LongInt;
Var b : Byte;
    S,Rueck : String;
    Merker : LongInt;
    HilfsDwort : Longint;
    k,i : Integer;
Begin
    S := Kopf + #$05 + #$01 + #$00 + #$00 + Chr(Typ) + #$01 + chr(HI(Nr)) + chr(LO(NR));
    Blocklaenge(S);
    Sicherungsbyte(S);
    i := 1;
    Repeat
        WritexSPS(S,Rueck);
        b := pos((#$05+$01+$00+$00),Rueck);
        If b <> 0
        Then Case Typ Of
            $20 : Merker := (ord(Rueck[b+4]));
            $21 : Merker := (ord(Rueck[b+4]));
            $22 : Merker := (ord(Rueck[b+4]) shl 8)+(ord(Rueck[b+5]));
            $23 : Begin
                Merker := 0;
                HilfsDwort := (ord(Rueck[b+4]));
                Merker := Merker+Hilfsdwort shl 24;
                HilfsDWort := (ord(Rueck[b+5]));
                Merker := Merker+Hilfsdwort shl 16;
                HilfsDWort := (ord(Rueck[b+6]));
                Merker := Merker+Hilfsdwort shl 8;
                HilfsDWort := (ord(Rueck[b+7]));
            End;
        End;
    Until b = 0;
    Merker := Merker + HilfsDwort;
End;

```

```
        Merker := Merker+Hilfswort;
    End;
End;
i := i+1;
Delay(2*Timer);
Until (b <> 0) or (i = 6);
if i = 6 then writeln('Timeout beim Warten auf SPS');
LeseMerker := Merker;
End;

Procedure Merker_E_A( Typ,y : Byte );
Var NrS,MerkerS,eingabe : String;
(* Merker : Longint; *)
(* Nr : Byte; *)
Key : Char;
Error1,Error2,test : Integer;
Begin
    Error1 := 0;
    (* NrS:=a;
    Val(NrS,Nr,Error1);*)
    If Error1 = 0 Then
    Begin
        Merkerx := LeseMerker(Typ,Nr);
        (* writeln('koiopiop->',Merkerx);
        Str(Merker,MerkerS);
        Writeln('MW'+NrS+' -> '+MerkerS);
        Val(MerkerS,test,Error1);
        Merkerblabla:=test; *)
    End
    Else Writeln(66,3,(Length(NrS)));
End;

Begin
    Merker_E_A($22,12);
end;

Procedure ReferenzFahrt;
Begin
    worte1:=3;
    worte2:=1;
    satz1:=SetMW(worte1,worte2);
    SendString(satz1);
end;
```

Procedure Strobe;

```
Begin
  worte1:=4;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)
  delay(55000); (* Dauer Strobe *)
  worte1:=4;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Ende Strobe *)
end;
```

Procedure Start_Strich;

var

wert:word;

Begin

Repeat

writeln('1 wert ändern 2 Ende');

readln(i);

Case i Of

1 :

Begin

writeln('in Wert ändern (1 -> Ausgang löschen 3280->1V, max.16000)');

readln(wert);

if wert > 16000 then wert :=16000;

if wert>1 then

Begin

worte1:=7;satz1:=SetMW(worte1,wert);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)

End;

if wert = 1 then

Begin

worte1:=7;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);

worte1:=7;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);

End;

End;

2 : exit;

End;

Until i in [0,2];

end;

Procedure End_Strich;

Begin

worte1:=7;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)

worte1:=7;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)

end;

Procedure Impuls; (* Frequenz als worte2 definieren *)

Begin

worte1:=8;worte2:=6700;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)

end;

```

Procedure Grafik;
var
  GraphDriver : Integer;
  GraphMode   : Integer;
  ViewInfo    : ViewPortType;
  MaxX,MaxY   : Integer;
  MaxColor    : Word;
  X_Messproto : Integer;
  Color       : Word;
  K,V,H       : Integer;
  XStep,YStep : Integer;
  x1,x2,y1,y2,i: Integer;
  ViewPort    : ViewPortType;
  ErrorCode    : Word;
  MainWind    : Boolean;
  zeile,zeile1 : string;
  dat         : text;
  Zeichen     : array [1..20] of string;
  R           : array[1..100,1..2] of real;
  B           : array[1..100,1..2] of integer;
  Orig : RECORD
    x,y : WORD;
  END;
Begin
  if Datei_Name="then Datei_Name:='test';
  i:=0;
  assign(Datei_1,Datei_Name+'.abc');
  RESET(Datei_1);
  REPEAT
    i:=succ(i);
    Read(Datei_1,Satz_1);
    Pegel[i,1]:=Satz_1.Winkel;
    Pegel[i,2]:=Satz_1.Amplitude;
  UNTIL EOF (Datei_1);
  Pegel[1,3]:=i;
  CLOSE(Datei_1);
  GraphDriver:=Detect;
  InitGraph(GraphDriver,GraphMode,bgipfad);
  ErrorCode:=GraphResult;
  (*if ErrorCode=0 then
  begin
    Writeln('Grafik-Fehler: ',GraphErrorMsg(ErrorCode));
    Writeln('Compi nicht grafikfähig');
    writeln('Programmabbruch');
    Halt(1);
  end; *)
  SetBkColor(LightGray);
  SetColor(Blue);
  SetTextStyle(DefaultFont,HorizDir,1);
  MaxX := GetMaxX;
  MaxY:=GetMaxY;
  MaxX:=MaxX-50;

```

```

MaxY:=MaxY-50;
K:=Round(MaxY/60); {/60}
H:=K;
V:=K;

(* OutTextXY(Orig.x,MaxY,'Kommentar eins'); *)
MainWind := true;
SetViewPort(0,0, MaxX, MaxY-(TextHeight('M')+4), ClipOn);
Color := GetColor;
SetColor(DarkGray);
SetLineStyle(SolidLn, 0, NormWidth);
GetViewSettings(ViewPort);
with ViewPort do
  Rectangle(0+5, 0+5, x2-x1, y2-y1);
  SetColor(Color);
{-----}
  { Fenster für das Koordinatenkreuz }
  MainWind := False;
  SetViewPort(0,0, X_Messproto-2, MaxY-(TextHeight('M')+4), ClipOn);
  { KooKreuzWindow }
  X_Messproto:=MaxX-20;
  Orig.x:=Round(MaxX/2);
  Orig.y:=Round(MaxY/2);

with Orig do begin
  MoveTo(x,y);
  LineTo(X_Messproto-5,y);           { nach rechts }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(5,y);                       { nach links }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(x,5);                       { nach oben }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(x,MaxY-5);                 { nach unten }
  MoveTo(x,5);                      { Pfeil nach oben }
  LineTo(x+3,8);
  MoveTo(x,5);
  LineTo(x-3,8);
  MoveTo(X_Messproto-5,y);          { Pfeil nach rechts}
  LineTo(X_Messproto-8,y-3);
  MoveTo(X_Messproto-5,y);
  LineTo(X_Messproto-8,y+3);
  For i:= -9 to 9 Do Begin { -2 ..9}           { horiz. Einteilung }
    XStep := i*3*K;
    MoveTo(x+XStep,y-2);
    LineTo(x+XStep,y+2);
  end;
  For i:= -8 to 8 Do Begin { -8 .. 8}           { vert. Einteilung }
    YStep := i*3*K;
    MoveTo(x-2,y+YStep);
    LineTo(x+2,y+YStep);
  end;
FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO

```

```

Begin
  R[i,1] := Pegel[i,2]*COS(2*PI*Pegel[i,1]/(100*360)); {ggf.Winkel korrigieren}
  R[i,2] := Pegel[i,2]*SIN(2*PI*Pegel[i,1]/(100*360));
end;
end; {Koordinatentransformation}
FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO
  Begin
    B[i,1] := Round(Orig.x+R[i,1]/4); { ggf. Normierung anpassen }
    B[i,2] := Round(Orig.y+R[i,2]/4); {1640 -> 1V}
    (* B[i,1] := Round(Orig.x+R[i,1]*3*H*2/1000);
    B[i,2] := Round(Orig.y+R[i,2]*3*V*2/1000); *)
  end; {Normierung}
  Color := GetColor;
  SetColor(Blue);
  FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO
    Begin
      Line(B[i,1]+1,B[i,2]-1,B[i,1]-1,B[i,2]+1);
      Line(B[i,1]-1,B[i,2]-1,B[i,1]+1,B[i,2]+1);
    end;
  SetColor(Color);
  { verbindet Messpunkte }
  Color := GetColor;
  SetColor(Red);
  OutTextXY(Orig.x,MaxY,'Dateiname:'+Datei_Name+'.abc');
  For i:=1 TO Pegel[1,3]-1 DO
    Begin
      If (Not (((B[i,1] = Orig.x) And (B[i,2] = Orig.y))
        Or (B[i+1,1] = Orig.x) And (B[i+1,2] = Orig.y))) Then
        Line(B[i,1],B[i,2],B[i+1,1],B[i+1,2]);
    end;
  SetColor(Color);
  {Messkurve}
  repeat
  until KeyPressed;
  (* Readln; *)
  CloseGraph;
  clrscr;
end; {Graf}
Procedure Grafik_AMPL;
var
  GraphDriver : Integer;
  GraphMode : Integer;
  ViewInfo : ViewPortType;
  MaxX,MaxY : Integer;
  MaxColor : Word;
  X_Messproto : Integer;
  Color : Word;
  K,V,H : Integer;
  XStep,YStep : Integer;
  x1,x2,y1,y2,i: Integer;
  ViewPort : ViewPortType;
  ErrorCode : Word;

```

```

MainWind : Boolean;
zeile,zeile1 : string;
dat : text;
Zeichen : array [1..20] of string;
R : array[1..100,1..2] of real;
B : array[1..100,1..2] of integer;
Orig : RECORD
  x,y : WORD;
END;
Begin
  if Datei_Name="then Datei_Name:='test';
  i:=0;
  assign(Datei_1,Datei_Name+'.am1');
  RESET(Datei_1);
  REPEAT
    i:=succ(i);
    Read(Datei_1,Satz_1);
    Pegel[i,1]:=Satz_1.Winkel;
    Pegel[i,2]:=Satz_1.Amplitude;
  UNTIL EOF (Datei_1);
  Pegel[1,3]:=i;
  CLOSE(Datei_1);
GraphDriver:=Detect;
InitGraph(GraphDriver,GraphMode,bgipfad);
ErrorCode:=GraphResult;
(*if ErrorCode=0 then
begin
  Writeln('Grafik-Fehler: ',GraphErrorMsg(ErrorCode));
  Writeln('Compi nicht grafikfähig');
  writeln('Programmabbruch');
  Halt(1);
end; *)
SetBkColor(LightGray);
SetColor(Blue);
SetTextStyle(DefaultFont,HorizDir,1);
MaxX := GetMaxX;
MaxY:=GetMaxY;
MaxX:=MaxX-50;
MaxY:=MaxY-50;
K:=Round(MaxY/60); {/60}
H:=K;
V:=K;
MainWind := true;
SetViewPort(0,0, MaxX, MaxY-(TextHeight('M')+4), ClipOn);
Color := GetColor;
SetColor(DarkGray);
SetLineStyle(SolidLn, 0, NormWidth);
GetViewSettings(ViewPort);
with ViewPort do
  Rectangle(0+5, 0+5, x2-x1, y2-y1);
  SetColor(Color);
{-----}

```

```

    { Fenster für das Koordinatenkreuz }
MainWind := False;
SetViewPort(0,0, X_Messproto-2, MaxY-(TextHeight('M')+4), ClipOn);
{ KooKreuzWindow }
X_Messproto:=MaxX-20;
Orig.x:=Round(MaxX/8); (* MaxX/2, MaxY/2 *)
Orig.y:=Round(MaxY/1.5);
with Orig do begin
  MoveTo(x,y);
  LineTo(X_Messproto-5,y);           { nach rechts }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(5,y);                       { nach links }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(x,5);                       { nach oben }
  MoveTo(x,y);
  LineTo(x,MaxY-5);                 { nach unten }
  MoveTo(x,5);                      { Pfeil nach oben }
  LineTo(x+3,8);
  MoveTo(x,5);
  LineTo(x-3,8);
  MoveTo(X_Messproto-5,y);          { Pfeil nach rechts}
  LineTo(X_Messproto-8,y-3);
  MoveTo(X_Messproto-5,y);
  LineTo(X_Messproto-8,y+3);
  For i:= -1 to 20 Do Begin  {-2 ..9}      { horiz. Einteilung }
    XStep := i*3*K;
    MoveTo(x+XStep,y-2);
    LineTo(x+XStep,y+2);
  end;
  For i:= -10 to 1 Do Begin  {-8 .. 8}      { vert. Einteilung }
    YStep := i*3*K;
    MoveTo(x-2,y+YStep);
    LineTo(x+2,y+YStep);
  end;
  MainWind := true; (* loeschen *)
  OutTextXY(round(x+20*3*K),round(y+0.5*3*k),'100 [kHz]');
  OutTextXY(round(x+1.5*3*K),round(y+0.5*3*k),'10');
  OutTextXY(round(x+9.5*3*K),round(y+0.5*3*k),'50');
  OutTextXY(round(x+0.5*3*K),round(y-10*3*k),'Schalldruck [dB]');
FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO
  Begin
    R[i,1] := Pegel[i,1]/250; {2 Striche => 10kHz ggf. x_Achse korrigieren}
    R[i,2] := -Pegel[i,2]/1.5; {ggf. Amplitude anpassen}
  end;
end; {Koordinatentransformation}
FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO
  Begin
    B[i,1] := Round(Orig.x+R[i,1]); { ggf. Normierung anpassen }
    B[i,2] := Round(Orig.y+R[i,2]/4); {1640 -> 1V}
  end; {Normierung}
Color := GetColor;
SetColor(Blue);

```

```

FOR i:=1 TO Pegel[1,3] DO
  Begin
    Line(B[i,1]+1,B[i,2]-1,B[i,1]-1,B[i,2]+1);
    Line(B[i,1]-1,B[i,2]-1,B[i,1]+1,B[i,2]+1);
  end;
SetColor(Color);
{ verbindet Messpunkte }
Color := GetColor;
SetColor(Red);
OutTextXY(Orig.x,MaxY,'Amplitudenverlauf          Dateiname:'+Datei_Name+'.am1');
For i:=1 TO Pegel[1,3]-1 DO
  Begin
    If (Not (((B[i,1] = Orig.x) And (B[i,2] = Orig.y))
      Or (B[i+1,1] = Orig.x) And (B[i+1,2] = Orig.y))) Then
      Line(B[i,1],B[i,2],B[i+1,1],B[i+1,2]);
    end;
    SetColor(Color);
  {Messkurve}
  repeat
  until KeyPressed;
  (* Readln; *)
  CloseGraph;
  clrscr;
end; {Grafik_AMPL}
Procedure Add_Datei;
var dat :text;
    zeile: string;
    i :integer;
begin
  assign(Datei_1,Datei_Name+ '.abc');
  Rewrite(Datei_1);
  for i:=1 to Pegel[1,3] do
  begin
    Satz_1.Amplitude:=Pegel[i,2];
    Satz_1.Winkel:=Pegel[i,1];
    Write (Datei_1,Satz_1);
  end;
  Close(Datei_1);
  assign(dat,Datei_name+'.dat');
  Rewrite(dat); (* neu *)
  writeln(dat,'Winkel [1/100 °] :');
  for i:=1 to Pegel[1,3] do
  begin
    write( dat,Pegel[i,1],',');
  end;
  writeln(dat,' ');
  writeln(dat,'Pegel (Umrechnung lt. Pegelmessereinstellung [dB]) : ');
  for i:=1 to Pegel[1,3] do
  begin
    write(dat,Pegel[i,2],',');
  end;
  close(dat);

```

```
    clrscr;
end; {ADD_Datei}

Procedure Add_Datei_AMPL;
var dat :text;
    zeile: string;
    i :integer;
begin
    assign(Datei_1,Datei_Name+ '.am1');
    Rewrite(Datei_1);
    for i:=1 to Pegel[1,3] do
    begin
        Satz_1.Amplitude:=Pegel[i,2];
        Satz_1.Winkel:=Pegel[i,1];
        Write (Datei_1,Satz_1);
    end;
    Close(Datei_1);
    assign(dat,Datei_name+'.txt');
    Rewrite(dat); (* neu *)
    writeln(dat,'Frequenz [kHz] :');
    for i:=1 to Pegel[1,3] do
    begin
        write( dat,Pegel[i,1],',');
    end;
    writeln(dat,' ');
    writeln(dat,'Pegel (Umrechnung lt. Pegelmessereinstellung [dB]) : ');
    for i:=1 to Pegel[1,3] do
    begin
        write(dat,Pegel[i,2],',');
    end;
    close(dat) ;
    clrscr;
end; {ADD_Datei_AMPL}
```

```

Procedure Messung;
var
  j,k,step: integer;
  a:longint;
  Bereichstep:longint;
Begin
if Datei_Name=""then Datei_Name:='test';
Writeln('Anzahl der Schritte ?');
readln(Anzahl);
Anzahl:=Anzahl div 2;
Writeln('Winkelbereich');
readln(Bereich);
Bereichstep:=Bereich*100;
step:=(Bereichstep div 18) div Anzahl;
worte1:=1;
worte2:=(Bereichstep div 18) ;
satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);
worte3:=1;
while (worte3=1) do begin
  delay(10*spspause);
  worte3:=Merkerx(6);
end;
delay(5*spspause);
For i:= 1 to (2*Anzahl+1) do
  Begin
  worte1:=4;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)
  delay(5*spspause); (* Dauer Strobe *)
  worte1:=4;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Ende Strobe *)
  Impuls;
  delay(9*spspause); (*Zeit für B&K *)
  a:=0;
  for j:=1 to 20 do (* 10 *)
  begin
  worte3:=Merkerx(10); (*Meßwert lesen*)
  if (worte3=-32768) then worte3:=50;
  a:=a+worte3;
  (* writeln('j->',j,'worte3->',worte3); *)
  end;
  worte3:=abs(a div 20); (*div 10 *)
  Pegel[i,1]:=Bereich*100-(i-1)*step*18; (* abs *)
  Pegel[i,2]:=worte3;
  Pegel[i,3]:=2*anzahl+1;
  writeln('Winkel',Pegel[i,1]div 100 , '° ', 'Meßwert=',Pegel[i,2]);
  worte1:=2;worte2:=step+1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Schritt in UhrZeigersinn *)
  worte3:=1;
  while (worte3=1) do begin
  delay(10*spspause);
  worte3:=Merkerx(6);
  end;
  delay(10*spspause); (* Warten nach Drehen *)
  end;
writeln('fertig');

```

```

Add_datei;
end;

Procedure Messung_Halb;
var
  j,step:integer;
  a:longint;
  Bereichstep:longint;
Begin
if Datei_Name=""then Datei_Name:='test';
Writeln('Anzahl der Schritte ?');
readln(Anzahl);
Writeln('Winkelbereich');
readln(Bereich);
Bereichstep:=Bereich*100;
step:=(Bereichstep div 18) div Anzahl;
worte1:=1;
worte2:=(Bereichstep div 18) ;
satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);
worte3:=1;
while (worte3=1) do begin
  delay(10*spspause);
  worte3:=Merkerx(6);
end;
delay(5*spspause);
For i:= 1 to (Anzahl+1) do
  Begin
    worte1:=4;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)
    delay(5*spspause); (* Dauer Strobe *)
    worte1:=4;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Ende Strobe *)
    Impuls;
    delay(9*spspause);
    a:=0;
    for j:=1 to 20 do (* 10 *)
      begin
        worte3:=Merkerx(10); (*Meßwert lesen*)
        if (worte3=-32768) then worte3:=50;
        a:=a+worte3;
      end;
    worte3:=abs(a div 20); (*div 10 *)
    if(worte3=-32768) then
      begin
        for j:=1 to 30 do
          begin
            worte3:=Merkerx(10);
            if (worte3<>-32768) then
              begin
                delay(2*spspause);
                worte3:=Merkerx(10);
                j:=30
              end;
            delay(spspause);
          end;
        end;
      end;
  end;
end;

```

```

    writeln('Fehler->',j,'Merkerx->',worte3);
    if (j=30) and (worte3=-32768) then
    begin
        Impuls;
        delay(5*spspause);
        worte3:=Merkerx(10);
        if (worte3=-32768) then
        begin
            worte3:=1;
            writeln('last try Wert->',worte3);
        end;
    end;
end;
end;
Pegel[i,1]:=abs(Bereich*100-(i-1)*step*18);
Pegel[i,2]:=worte3;
Pegel[i,3]:=anzahl+1;
writeln('Winkel',Pegel[i,1] div 100,'° ','Meßwert=',Pegel[i,2]);
if i<>anzahl+1 then
begin
worte1:=2;worte2:=step+1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Schritt in UhrZeigersinn *)
worte3:=1;
while (worte3=1) do begin
    delay(10*spspause);
    worte3:=Merkerx(6);
end;
delay(10*spspause); (* Warten nach Drehen *)
end;
end;
writeln('fertig');
Add_datei;
end;
Procedure Fahren;
Begin
    Writeln('Anzahl der Schritte ?');
    readln(Anzahl);
    worte1:=2;worte2:=Anzahl+1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);
    worte3:=1;
    while (worte3=1) do
    begin
        delay(spspause);
        worte3:=Merkerx(6);
    end;
end;

Procedure Dateibestimmung;
Begin
    writeln('Geben Sie den Dateiname ein');
    readln(Datei_Name);
end;

Procedure Amplitudengang;

```

```
(* hier am Schallpegelmesser Hold-Funktion einstellen !!!! *)
var
  j,k,step: integer;
  r1,r2,r3:real;
  Start_Frequenz,Range,Frequenz_Wert:real;
  a,anz_stuetz:longint;
  Bereichstep:longint;
  wert1,Frequenz_Int:longint>(* word *)
Begin
if Datei_Name=""then Datei_Name:='test';
clrscr;
Writeln(' ***** Amplitudengang ***** ');
writeln;writeln;writeln;
Writeln ('Start-Frequenz gemäß Frequenzgenerator [kHz]');
readln(Start_Frequenz);writeln;writeln;
Writeln('Range-Einstellung gemäß Frequenzgenerator [kHz]');
readln(Range);writeln;writeln;
Writeln('Anzahl der Schritte (max. 65) ? ');
readln(anz_stuetz);
r1:=anz_stuetz;
r2:=-250;
Frequenz_Wert:=Start_Frequenz-Range;
For i:= 1 to anz_stuetz do
  Begin
    worte1:=4;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Strobe an B&K *)
    delay(5*spspause); (* Dauer Strobe *)
    worte1:=4;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* Ende Strobe *)
    r2:=(250)+r2; (* max. 16383 -> 65 Schritte *)
    Frequenz_Wert:=(Frequenz_Wert+Range);
    Frequenz_Int:=round(1000*Frequenz_Wert);
    wert1 :=round(r2); (* abs(i * (32767 div anz_stuetz)) 16000 *)
    worte1:=7;satz1:=SetMW(worte1,wert1);SendString(satz1); (* Spannung auf Frequenzgen. *)
    delay(20*spspause); (* 20* Zeit für B&K *)
    worte1:=7;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* 0V an Frequenzgen. *)
    worte1:=7;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);
    a:=0;
    for j:=1 to 20 do (* 10 *)
      begin
        worte3:=Merkerx(10); (*Meßwert lesen*)
        if (worte3=-32768) then worte3:=50;
        a:=a+worte3;
      end;
    worte3:=abs(a div 20); (*div 10 *)
    Pegel[i,1]:=Frequenz_Int; (* 16000->5V *)
    Pegel[i,2]:=worte3;
    Pegel[i,3]:=anz_stuetz;
    writeln('Frequenz',Pegel[i,1] , 'Hz', 'Meßwert=',Pegel[i,2]);
  end;
  worte1:=7;worte2:=1;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1); (* 0V an Frequenzgen. *)
  worte1:=7;worte2:=0;satz1:=SetMW(worte1,worte2);SendString(satz1);
  writeln('fertig');
Add_datei_AMPL;
```

```
end; (* Amplitudengang *)
(*****
{*****}
BEGIN
InitCom(1,9600,8,1,'o');
delay(spspause);
if (Datei_Name='') or (length(Datei_Name) > 8) then Datei_Name:='test';
Repeat
  writeln('    aktive Datei:',Datei_Name    );
  writeln('1 Referenzfahrt 2 Messung 3 Strobe 4 Start_Strich 5 End_Strich 6 Impuls ');
  writeln('7 Ende 8 Add_Datei  9 Grafik  10 Messung_Halb 11 Fahren');
  writeln('12 Dateibestimmung  13 Amplitudengang 14 Grafik-Amplitude');
  readln(i);
  Case i Of
    1 : Referenzfahrt;
    2 : Messung;
    3 : Strobe;
    4 : Start_Strich;
    5 : End_Strich;
    6 : Impuls;
    7 : exit;
    8 : Add_datei;
    9 : Grafik;
    10: Messung_Halb;
    11: Fahren;
    12: Dateibestimmung;
    13:Amplitudengang;
    14:Grafik_AMPL;
  End;
Until i in [0,15];
(* worte1:=20;
worte2:=16600;
satz1:=SetMW(worte1,worte2);
SendString(satz1);
delay(spspause);
worte3:=Merkerx(10);
writeln('i->',worte3);
readln(worte1);*)
END .
```

Anhang 3.2 Listing SPS-Messprogramm - Ultraschall-Messplatz

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0001 MW1 ->Fahren gegen Uhr

***** Main *****

*** Ultraschallmeßplatz Version 1.0, 7/1/95 Hohenburg **

*** Ansteuerung von Schrittmotor und B&K-Pegel- ***

*** Meßgerät und Frequenzgenerat. über SPS ***

*** A3.1 -> Wicklung aus (5V)

*** A3.2 -> Drehrichtung negativ (5V)

*** A3.3 -> Impuls (5V)

*** A2.1 -> Reset B&K-LP (Schließer)

*** E3.1 -> Eingang ind. Näherungsschalter (Schließer)

*** EW7.1-> Eingang Spannung von B&K-LP (max 10V,hier 1V)

***** OB1, Netz1 *****

MW1 XX Verfahren gegen Uhrzeigersinn um XX-1 Schritte

MW1 wird sofort nach SPS-Übergabe gelöscht

M1.4 gibt den Status der Routine an

M1.4 0/1 Routine nicht aktiv/aktiv

```

:U M 2.4                M 2.4
:O M 3.4                M 3.4
:SPB =LB2
:U MW 1                 MW 1
:> K 0
:= M 1.1                M 1.1
:U M 1.1                M 1.1
:FLP M 1.2              M 1.2
:= M 1.3                M 1.3
:UN M 1.3               M 1.3
:SPB =LB1
:L MW 1                 MW 1
:= ZSW 1                ZSW 1    wird benutzt in NW: 9 (O)
:L K 0
:= MW 1                 MW 1
LB1 :U SM 12             SM 12    Blinktakt 1 ( 1 HZ)
:ZV Z 1                 Z 1
:U K 1
:S Z 1                  Z 1
:L ZSW 1                 ZSW 1
:U M 1.1                M 1.1
:R Z 1                  Z 1
:= M 1.4                M 1.4    wird ben.in NW:2(I)3(I)5(I)6(I)
:U M 1.4                M 1.4
:U SM 12                 SM 12    Blinktakt 1 ( 1 HZ)
:= A 3.3                A 3.3    wird ben. in NW: 2(O)3 (O):
LB2 :NOP
.***

```

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0002 MW2 -> Verfahren in Uhr

MW2 XX -> Verfahren in Uhrzeigersinn um XX-1 Schritte

MW2 wird sofort nach Übergabe an SPS gelöscht

M2.4 gibt Status der Routine an

M2.4 0/1 Routine inaktiv/aktiv

```

:U M 1.4          M 1.4
:O M 3.4          M 3.4
:SPB =LB2
:U MW 2           MW 2
:> K 0
:= M 2.1         M 2.1
:U M 2.1         M 2.1
:FLP M 2.2       M 2.2
:= M 2.3         M 2.3
:UN M 2.3        M 2.3
:SPB =LB1
:L MW 2          MW 2
:= ZSW 2         ZSW 2    wird benutzt in NW: 9 (O)
:L K 0
:= MW 2          MW 2
LB1 :U SM 12     SM 12    Blinktakt 1 ( 1 HZ)
:ZV Z 2         Z 2
:U K 1
:S Z 2          Z 2
:L ZSW 2        ZSW 2
:U M 2.1        M 2.1
:R Z 2          Z 2
:= M 2.4        M 2.4    w. ben. in NW: 1(I)3(I)5(I)6(I)
:U M 2.4        M 2.4
:= A 3.2        A 3.2
:L K 1
:= TSW 1        TSW 1
:U M 2.4        M 2.4
:SE T 1         T 1
:DZB 10MS
:L TSW 1        TSW 1
:U M 2.1        M 2.1
:R T 1          T 1
:= M 2.5        M 2.5
:U M 2.5        M 2.5
:U SM 12       SM 12    Blinktakt 1 ( 1 HZ)
:= A 3.3        A 3.3    wird ben. in NW: 1 (O) 3 (O)
LB2 :NOP
:***

```

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0003 Referenzfahrt MW3 0/1 aus/ein

Auslösen der Referenzfahrt über MW3

Beendigung der Referenzfahrt über fallende Flanke des
induktiven Näherungsschalters (E3.1)

MW3 wird unmittelbar nach Übergabe an die SPS zurückgesetzt

Status des Verfahrens über M3.4

M3.4 0/1 -> Referenzfahrt wird ausgeführt/fertig

```

:U M 1.4                M 1.4
:O M 2.4                M 2.4
:SPB =LB3
:U MW 3                 MW 3
:> K 0
:= M 3.1                M 3.1
:U M 3.1                M 3.1
:FLP M 3.2              M 3.2
:= M 3.3                M 3.3
:UN M 3.3               M 3.3
:SPB =LB1
:L K 0
:= MW 3                 MW 3
:U K 1
:= M 3.4                M 3.4    w. ben. in NW:1(I)2(I)5(I)6(I)
LB1 :U E 3.1            E 3.1
:FLP M 3.5              M 3.5
:= M 3.6                M 3.6
:UN M 3.6               M 3.6
:SPB =LB2
:U K 0
:= M 3.4                M 3.4    wird ben.in NW:1(I)2(I)5(I)6(I)
LB2 :U M 3.4            M 3.4
:U SM 14                SM 14    Blinktakt 3 ( 5 HZ)
:= A 3.3                A 3.3    wird ben. in NW:1(O)2(O)
LB3 :NOP
.***

```

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0004 AnalogEingang EW7.1 -> MW10

Einlesen der Analog- Schnittstelle Eingang 1
EW7.1 -> MW10

hier: 1V = K1640

```

:L  EW 7.1                      EW 7.1
:=  MW 10                      1640 -> 1V      MW 10
:
:
:***

```

NETZWERK: 0005 Setzen MW4->A2.1 MW5->A2.2

Steuerung der Ausgänge 2.1 und 2.2 über MW4 und MW5
Achtung, Aktion nur möglich, wenn der Motor nicht verfährt
Die Ausgänge werden nicht zurückgesetzt

MW4 0/1 -> A2.1 0/1

MW5 0/1 -> A2.2 0/1

```

:U  M 1.4                      M 1.4
:O  M 2.4                      M 2.4
:O  M 3.4                      M 3.4
:SPB =ED1
:U  MW 4                        MW 4
:>  K 0
:=  M 1.5                      M 1.5
:U  M 1.5                      M 1.5
:=  A 2.1                      A 2.1
:U  MW 5                        MW 5
:>  K 0
:=  M 1.6                      M 1.6
:U  M 1.6                      M 1.6
:=  A 2.2                      A 2.2
:
ED1 :NOP
:***

```

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0006 Motor 0/1 -> MW6 0/1

MW6 wird gesetzt, wenn der Motor aktiv ist
vgl. Netz 1,2 und 3

```

:U M 1.4                M 1.4
:O M 2.4                M 2.4
:O M 3.4                M 3.4
:= M 6.4                M 6.4
:= MW 6                 MW 6
:
:***

```

NETZWERK: 0007 Dauerstrich an Wandlerkapsel

Steuerung über EW7

Dauerstrich an Ausgang AW8.2

K3280 -> 1V

EW7-> 0/1/xxx -> keine Aktion/AW8.2=0/AW8.2=xxx

```

:L MW 7                 3280->1V          MW 7
:= K 0
:SPB =LB1
:L MW 7                 MW 7
:= K 1
:SPB =LB2
:L MW 7                 MW 7
:> K 1
:SPB =LB3
LB2 :L K 0
    := AW 8.2           AW 8.2   wird benutzt in NW: 8 (O)
LB3 :L MW 7
    := AW 8.2           AW 8.2   wird benutzt in NW: 8 (O)
LB1 :NOP
:***

```

E:\AKF125\TEST\TEST20\OB1

AEG Modicon Dolog AKF: Programm-Protokoll

NETZWERK: 0008 MW8-> Impuls an Wandlerkapsel

MW8-> Impuls an Wandlerkapsel

Länge des Signals -> 10ms

MW8 -> 0/xxx -> keine Wirkung/Impuls von xxx Spannung

Umrechnung K3200 -> 1V

MW8 wird sofort nach Übergabe an SPS gelöscht

```

:U MW 7                                MW 7
:> K 0
:SPB =LB3
:
:U MW 8                                mw8            MW 8
:> K 0
:= M 8.1                                M 8.1
:U M 8.1                                M 8.1
:FLP M 8.2                              M 8.2
:= M 8.3                                M 8.3
:UN M 8.3                               M 8.3
:SPB =LB1
:L MW 8                                mw8            MW 8
:= MW 18                               MW 18
:L K 0
:= MW 8                                MW 8
LB1 :L K 5
:= TSW 8                                Dauer des Singals [x 10ms] TSW 8
:U M 8.3                                M 8.3
:SV T 8                                T 8
:DZB 10MS                               10ms
:L TSW 8                                TSW 8
:U M 8.10                               M 8.10
:R T 8                                T 8
:= M 8.4                                M 8.4
:U M 8.4                                M 8.4
:SPB =LB2
:L K 0
:= AW 8.2                               AW 8.2        wird benutzt in NW: 7 (O)
:SP =LB3
LB2 :L MW 18                             MW 18
:= AW 8.2                               Ausgang 8.2   AW 8.2        wird benutzt in NW: 7 (O)
LB3 :NOP
:***

```

NETZWERK: 0009 Reset der Zähler beim Starten

Reset der Zähler ZSW1 und ZSW2 beim Einschalten

```
:UN SM 2          SM 2      Einschaltmerker

:SPB =ED
:L K 0
:= ZSW 1          ZSW 1      wird benutzt in NW:1(I)1 (O)
:= ZSW 2          ZSW 2      wird benutzt in NW:2(I)2 (O)
ED :NOP
.***
```

NETZWERK: 0010

```
:BE
```

Anhang 3.3 Listing FEM-Batch-File

file: tempohne, tempmit (mit/ohne->mit/ohne Schwingungsberechnung)

```

/batch,list
/com*****
/com symmetrischer Wandler d=24mm; t=1,0mm, ohne Beschwerungsringe, *****
/com ohne Beschwerungsringsegmente *****
/com*****
/com* file: tempmit
/com Belastungsfile 1.Oberschw. f1=63970Hz
/com* Routine zur Bestimmung der Auslenkung einer *
/com* Monomorph-Scheibe *
/com* 3-dimensional *
/com* date:26/9/95,13.45h *
/com* file: temp *
/com* Mat.-file: temp.mat *
/com* hier: S-Matrix (complince- matrix = D-Matrix)
/com*****
/prep7
/title, Wandler, erzwungene Schwingung f1=14601
/nerr,1 *max.1.Fehlermeldung
et,3,5,0,1,0 *Elem.typ 3: Piezo 1->D-Matrix
et,2,5,0,1,0 *Elem.typ 2: Al 1->D-Matrix
delt=1.e-3 *Elementgroesse vorher 0.5e-3
r0=1.0e-5 *Radien vorher 1.0e-5
r1=5.e-3 *PXE-Scheibe->d=10mm r1=5.e-3 ,r1=2e-3
r2=12.e-3 *Al->d=24mm r2=12.e-3 r2=3.e-3
y0=0. *Winkel, <180° 0.0
y1=135. *vorher 1.25
y2=-135
z0=0.0e-3 *Höhe
z1=0.0e-3
z2=1.e-3 *PXE->t=1mm
z3=2.e-3 *Al->t=1mm
/com define material properties
*ulib,temp.mat
*use,PXE5anis,3 !hier: 3->mat,z-pol,3d
*use,aluminium,2
/com define geometry
local,11,1
cscir,11,0
esys,11
k,111,r0,y0,z1
k,121,r1,y0,z1
k,211,r0,y0,z2
k,221,r1,y0,z2
k,112,r0,y1,z1
k,122,r1,y1,z1
k,212,r0,y1,z2
k,222,r1,y1,z2
k,113,r0,y2,z1
k,123,r1,y2,z1
k,213,r0,y2,z2
k,223,r1,y2,z2

k,211,r0,y0,z2
k,221,r1,y0,z2
k,311,r0,y0,z3
k,321,r1,y0,z3
k,212,r0,y1,z2
k,222,r1,y1,z2
k,312,r0,y1,z3
k,322,r1,y1,z3
k,213,r0,y2,z2
k,223,r1,y2,z2
k,313,r0,y2,z3
k,323,r1,y2,z3

k,221,r1,y0,z2
k,231,r2,y0,z2
k,321,r1,y0,z3
k,331,r2,y0,z3
k,222,r1,y1,z2
k,232,r2,y1,z2
k,322,r1,y1,z3

```

```
k,332,r2,y1,z3
k,223,r1,y2,z2
k,233,r2,y2,z2
k,323,r1,y2,z3
k,333,r2,y2,z3

/com Areas definieren und mit Elementen vernetzen
esize,delt
eshape,2          *Nur Vierecke
/com Piezokeramik
type,3
mat,3
v,111,121,221,211,112,122,222,212
vmesh,1
v,111,121,221,211,113,123,223,213
vmesh,2
v,112,122,222,212,113,123,223,213
vmesh,3

type,2
mat,2
v,211,221,321,311,212,222,322,312
vmesh,4
v,211,221,321,311,213,223,323,313
vmesh,5
v,212,222,322,312,213,223,323,313
vmesh,6

v,221,231,331,321,222,232,332,322
vmesh,7
v,221,231,331,321,223,233,333,323
vmesh,8
v,222,232,332,322,223,233,333,323
vmesh,9

waves
wsort          *Sortieren
waves
/com Einspannung (mechan.)
nset,s,loc,x,r2
nset,r,loc,z,z2
d,all,uy
d,all,ux
d,all,uz
nall
nset,s,loc,x,r2
nset,r,loc,z,z3
d,all,uy
d,all,ux
d,all,uz
nall

/com nset,s,loc,y,y1
/com dsym,symm,y,1
/com nset,s,loc,y,y2
/com dsym,symm,y,1

/com Verbinden der Voltfreiheitsgrade des Piezos
nset,s,loc,z,z0,z0
cp,1,volt,all
*get,u1,nmin
nall

nset,s,loc,z,z2,z2
cp,2,volt,all
*get,u2,nmin
nall

/com Anschluss (Angaben in Gigavolt)
d,u2,volt,1e-9
d,u1,volt,0

/com /pnum,mat,1
/com /pbc,all,1
/com /pbc,u,,1
/com /pbc,volt,,1
```

```

eplo
finish
save,file,db
/com ***** ab hier Schwingungsberechnung *****
f1=14601      *79466
/com f2=205e3      *15e3 *90e3 *16e3
/com für die Berechnung einer Frequenz f2=.. auskommentieren, d.h. /com f2=..
nit=1      *nit=150
nselect,s,loc,x,r0,r0
*get,nod,z,nmin
nall
/solve
antype,harmic
hropt,full
kbc,1
hrout,off
harfreq,f1,f2
nsubst,nit
dmpmat,0.008 *0.01
solve
nselect,s,loc,x,r0
nselect,r,loc,z,z3
*get,nod,z,nmin
nselect,all
finish
/show,ver61,plt
/post26
nsol,2,nod,z,uz
/view,,,1
plvar,2
FINISH
/EXIT

```

knorz (*Modale Analyse)

```

fini
/solu
antype,modal
modopt,subsp,10,,,10,on
mxpand,10,,,yes
solve
fini
/post1
set,list

```

temp1

```

/com *****
/com          file: temp1
/com 26/6/95 geänderte,verbesserte Version zu druck1,
/com          Richtdiagramm von symmetrischen Kreistrahler
/com Druckberechnung für versch. Aufpunkte mit dem Abstand 0,2m
/com und der Winkellage relativ zur Symmetrieachse
/com 0°, d_thetap°, 2d_thetap° .... ; Druckwerte liegen auf der
/com Speicherstelle 11 (0°), 12 (0°+d_thetap), 13...
/com date: 29/9/94,10:30h Ansys5.0
/com nach Frequenzganganalyse die interessanten Frequenzen f1..
/com mit "time,f1,f1" in Post26 anwählen und "use druck1"
/com aufrufen; Richtdiagramm mit "vplot,x(1),y(1)"
/com          !!! Achtung anpassen !!!!
/com d_phiq=45*(2*Pi/360) *Aufteilung der Quellen am Kreisumfang,abhängig
/com          *von der Größe des Teilmodells !!!!!
/com d_thetap=45*(2*Pi/360) *1.      *Richtfaktor-Schrittweite
/com time,202000,202000 *Frequenz
/com *****
*abbr,mac,*use,temp1
*abbr,grdb,*vplot,x(1),y(1)
*abbr,grab,*vplot,g(1),h(1)
*abbr,ed,/sys,edit temp1
*abbr,pr,/sys,print temp1 | lpt1
/post26
time,14601,14601      *424000,424000
nall
Pi=3.14
d_phiq=10*(2*Pi/360) *22.5      *Aufteilung der Quellen am Kreisumfang
d_thetap=5*(2*Pi/360) *5.      *Richtfaktor-Schrittweite
nall

```

```

nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,y,0,0
*get,anz,node,,count
*dim,a,anz *(verschiebung)
*dim,a,anz
*dim,b,91 *(druck)
*dim,c,91
*dim,d,1
*dim,x,tabl,91
*dim,y,tabl,91
*dim,e,91
*dim,g,tabl,91
*dim,h,tabl,91
/com *dim,a,tabl,anz *(verschiebung)
/com *dim,b,tabl,50 *(druck)
/com *dim,c,tabl,50
nall
nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,y,0,0
nset,r,loc,x,r0
*get,n,nmin
*set,a(1),n
nall
counter=2
:loopx
nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,y,0,0
nset,r,loc,x,(counter-1)*delt
*get,n,nmin
*set,a(counter),n
nall
counter=counter+1
*if,counter,le,anz,:loopx
save,file,db
/post26
store,merge
numvar,50
counter=1
:loop3
nsol,counter+10,a(counter),uz *u`s werden ab Speicherstelle 11 gespei.
counter=counter+1
*if,counter,le,anz,:loop3
nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,y,y0,y0
nset,r,loc,x,r0,r0
*get,nod,nmin
nset,all
prod,2,1,,,k,,,2*Pi/330 *k=2Pi*f/c

vget,d(1),2
k_za=d(1)

thetap=0 *thetap=Richtf.-Winkel
zahl=1
:loop6
phiq=0 *phiq=El.-Winkel
imagn,9,1,,,nil *null erzeugen
:loop5
imagn,2,1,,,nil *null erzeugen
imagn,3,1,,,nil *null erzeugen
imagn,4,1,,,nil *null erzeugen
imagn,5,1,,,nil *null erzeugen
imagn,6,1,,,nil *null erzeugen
imagn,7,1,,,nil *null erzeugen
imagn,8,1,,,nil *null erzeugen
rq=r0 *rq=El.- Radius
tep=d_phiq/(2*Pi)
cfact,cos(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq)), -sin(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq))
prod,4,11
rq=r2
cfact,cos(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq)), -sin(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq))
prod,3,anz+10
add,2,4,3,,((delt/2)**2*Pi)*tep,(((anz-1)**2-(anz-1.5)**2)*delt**2*Pi)*tep
counter=2 *Int(udA) fuer inneres und ausseres Element->Speicherstelle2
:loop4
area=(((counter-0.5)**2-(counter-1.5)**2)*delt**2*Pi)*tep
rq=r0+(counter-1)*delt

```

```

cfact,,cos(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq)),sin(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq))
prod,6,counter+10
add,5,5,6,,,,,area
counter=counter+1
*if,counter,lt,anz,loop4      *Schleife ueber r=r0 bis r=r2
add,8,5,2 *Int(udA) für gesamtes r->Speicherstelle8
add,9,9,8
phiq=phiq+d_phiq      *1.25°   phiq=phiq+1.25
*if,phiq,lt,360*(2*Pi/360),loop5

PROD,8,9,1,,,,,Pi,2      * 8-> Geschw. *Fläche von phi=0°
prod,7,8,1,,,,,1/0.2,1.2 * 7-> Druck Abstand= 0.2m ,rho=1.2
abs,6,7      * 6-> /Druck/
CLOG,5,6,,,,,5e4,20      * 5-> 20log(6)
vget,b(zahl),5      *0°->zahl`11`,thetap°->zahl`12`...
/com vget,b(zahl),5
c(zahl)=thetap
vget,e(zahl),6      *0°->zahl`11`,thetap°->zahl`12`...
thetap=thetap+d_thetap      *hier d_thetap ° Schritte
zahl=zahl+1      *Druck 11->0°,12->0°+10°
*if,thetap,le,90*(2*Pi/360),loop6
count=0
:loop9
count=count+1
x(count)=abs(b(count)*cos(c(count)))
y(count)=abs(b(count)*sin(c(count)))
g(count)=abs(e(count)*cos(c(count)))
h(count)=abs(e(count)*sin(c(count)))
*if,count,le,90*(2*Pi/360)/d_thetap,loop9
/xrange,default
/yrange,default
/title, Richtcharakteristik f=14601 Hz, macro:temp1

```

```

temp2
/com *****
/com date: 26/6/95
/com      file: temp2
/com      Richtdiagramm von asymmetrischen Kreistrahlern
/com Druckberechnung für versch. Aufpunkte mit dem Abstand 0,2m
/com und der Winkellage relativ zur Symmetrieachse
/com date: 26/6/95, 9:30h Ansys5.0 (vgl.druck2)
/com *****
Pi=3.14
Frequenz=14601      *79466
d_thetap=5*(2*Pi/360)      *Richtfaktor-Schrittweite
anzp=90/d_thetap      *Berechnung Anz. Richtfaktor-Stützpunkte
*abbr,mac,*use,temp2
*abbr,grdb,*vplot,x(1),y(1)
*abbr,grab,*vplot,g(1),h(1)
*abbr,ed,/sys,edit temp2
*abbr,pr,/sys,print temp2 | lpt1
local,11,1
nall
nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,y,0,0
*get,anzx,node,,count
nall
nset,s,loc,z,z3,z3
nset,r,loc,x,r2,r2
*get,anzx,node,,count
/com anzy=8      *spaeter bei Asymmetrie auskommentieren !!!!!!!
nall
*dim,a,,anzx,anzp      *(verschiebung) *dim,a,,anzx,anzp
*dim,ai,,anzx,anzp      *(verschiebung) *dim,a,,anzx,anzp
*dim,ar,,anzx,anzp      *(verschiebung) *dim,a,,anzx,anzp
*dim,Feld,,anzx,anzp      *Flaeche um den Knoten(x,y)
*dim,udar,,anzp
*dim,udai,,anzp
*dim,udarsum,,anzp
*dim,udar_s,,anzp
*dim,udaisum,,anzp
*dim,udai_s,,anzp
*dim,druckr,,anzp
*dim,drucki,,anzp
*dim,druckabs,,anzp
*dim,drucklp,,anzp

```

```

*dim,win,,anzp
*dim,d,,2
*dim,x,tabl,anzp
*dim,y,tabl,anzp
*dim,g,tabl,anzp
*dim,h,tabl,anzp
local,11,1
cscir,11,1
couy=1
:loopy
  coux=1
  :loopx
    a(coux,couy)=node(r0+(coux-1)*delt,(couy-1)*360/anzp,z3)
    *if,coux,eq,1,then
      Feld(coux,couy)=(Pi*(delt/2)**2)/anzp
    *elseif,coux,eq,anzx
      Feld(coux,couy)=(((anzx-1)**2-(anzx-1.5)**2)*delt**2*Pi)/anzp
    *else
      Feld(coux,couy)=(((coux-0.5)**2-(coux-1.5)**2)*delt**2*Pi)/anzp
    *endif
    coux=coux+1
    *if,coux,le,anzx,:loopx
  couy=couy+1
  *if,couy,le,anzp,:loopy
save,file,db
local,11,0
/post26
country=1
:lp1
  countx=1
  :lp1
    n=a(countx,country)
    nsol,5,n,uz
    store,merge
    *get,abc1,vari,5,rtime,Frequenz
    *get,abc2,vari,5,itime,Frequenz
    ar(countx,country)=abc1
    ai(countx,country)=abc2
    countx=countx+1
    *if,countx,le,anzx,:lp1
  country=country+1
  *if,country,le,anzp,:lp1
local,11,0
numvar,50
nset,all
prod,2,1,,k,,2*Pi/330 *k=2Pi*f/c
vget,d(1),2
k_za=d(1)
vget,d(2),1
freq=d(2)
thetap=0 *thetap=Richtf.-Winkel
winkel=1
:loop6
  phiq=0 *phiq=El.-Winkel
  couy=1
  udarsum(winkel)=0
  udaisum(winkel)=0
  :loop5
    udar_s(winkel)=0
    udai_s(winkel)=0
    coux=1
    :loop4
      rq=r0+(coux-1)*delt
      abc1=cos(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq))
      abc2=-sin(k_za*rq*sin(thetap)*cos(phiq))
      /com abc1=1
      /com abc2=1
      udar(winkel)=(ar(coux,couy)*abc1-ai(coux,couy)*abc2)*Feld(coux,couy)
      udai(winkel)=(ai(coux,couy)*abc1+ar(coux,couy)*abc2)*Feld(coux,couy)
      udar_s(winkel)=udar_s(winkel)+udar(winkel)
      udai_s(winkel)=udai_s(winkel)+udai(winkel)
      coux=coux+1
      *if,coux,le,anzx,:loop4 *Schleife ueber r=r0 bis r=r2
    udarsum(winkel)=udarsum(winkel)+udar_s(winkel)
    udaisum(winkel)=udaisum(winkel)+udai_s(winkel)
  phiq=(2*Pi/anzp)*couy
  couy=couy+1

```

```
*if,phiq,lt,360*(2*Pi/360),:loop5
druckr(winkel)=udarsum(winkel)*freq*freq*Pi*2*1/0.2*1.2
drucki(winkel)=udaisum(winkel)*freq*freq*Pi*2*1/0.2*1.2
druckabs(winkel)=sqrt((druckr(winkel)**2+drucki(winkel)**2))
drucklp(winkel)=20*(log(druckabs(winkel)*5e4))/2.3026 *wegen ln->log
win(winkel)=thetap
thetap=thetap+d_thetap *hier d_thetap ° Schritte
winkel=winkel+1 *Druck 11->0°,12->0°+10°
*if,thetap,le,90*(2*Pi/360),:loop6
winkel=1
thetap=0
:loop9
x(winkel)=abs(drucklp(winkel)*cos(win(winkel)))
y(winkel)=abs(drucklp(winkel)*sin(win(winkel)))
g(winkel)=abs(druckabs(winkel)*cos(win(winkel)))
h(winkel)=abs(druckabs(winkel)*sin(win(winkel)))
thetap=thetap+d_thetap
winkel=winkel+1
*if,thetap,le,90*(2*Pi/360),:loop9
/xrange,default
/yrange,default
/title, Richtcharakteristik 14601 Hz, macro:temp2
```

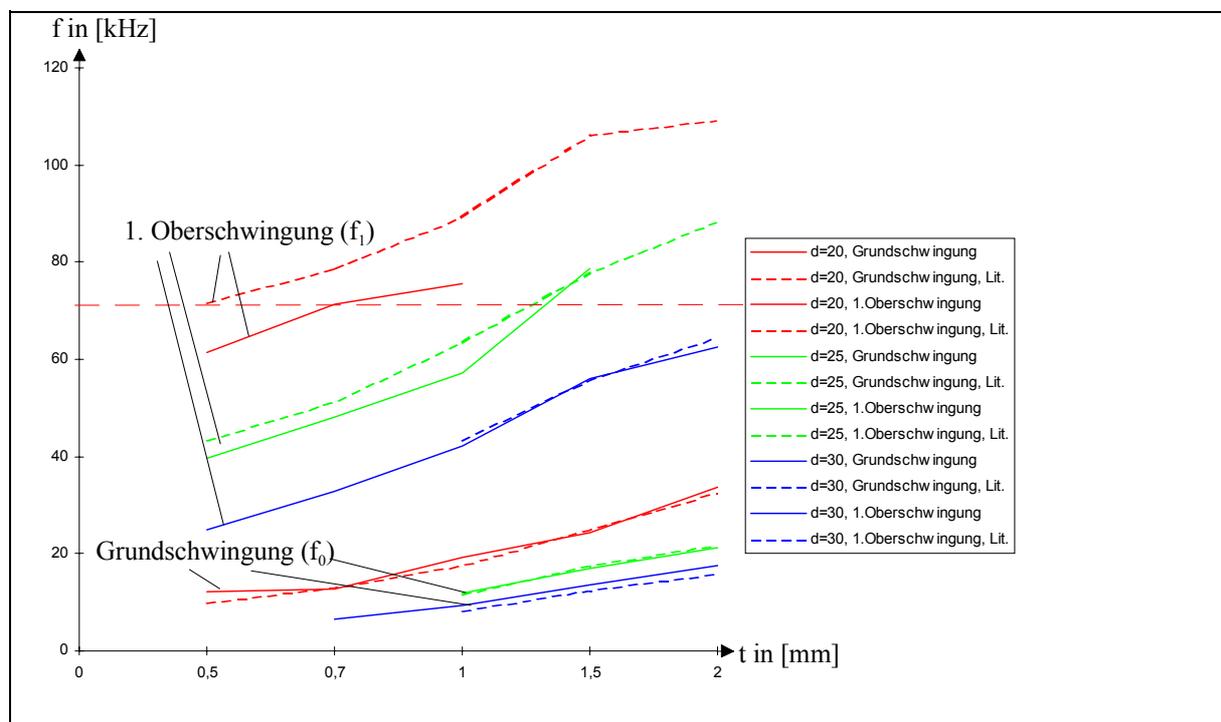
Anhang 4 Daten aus Experiment, Simulation, und Literatur

Anhang 4.1 Daten zu Kapitel 3: Experimentelle Untersuchungen

Daten zu den Abbildungen 3.6-4; 3.6-7; 3.6-8; 3.6-13; 3.6-16; 3.6-17

Abbildung 3.6-4

Vergleich der am LTDI gemessenen Resonanzfrequenzen der untersuchten US-Wandler (durchgezogene Linie) mit den Resonanzfrequenzen aus der Literatur (gestrichelte Linie)⁵:

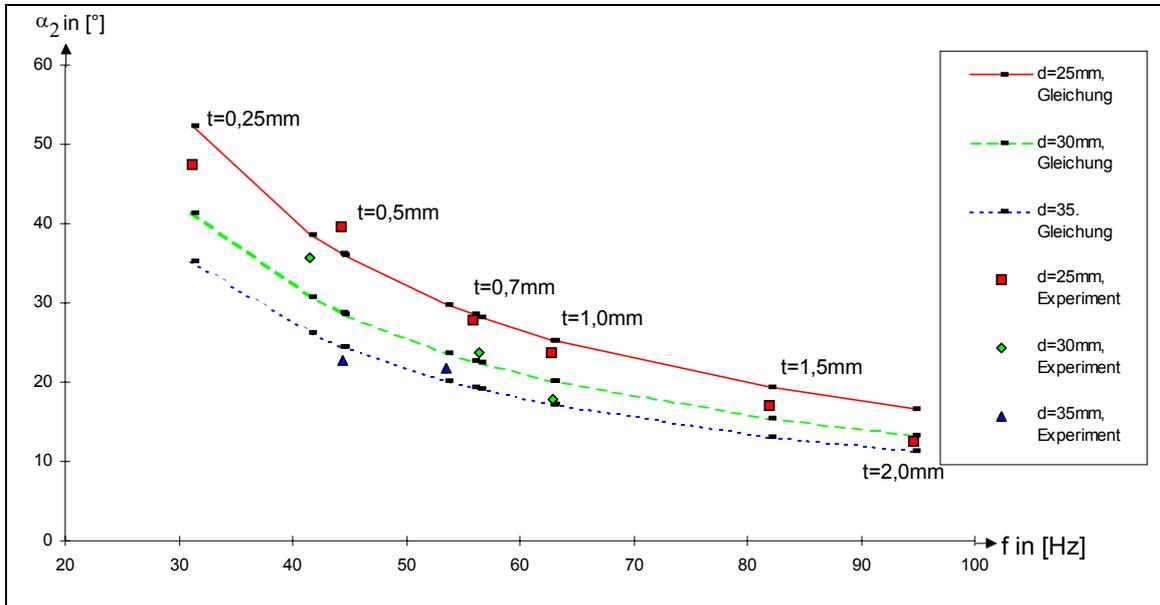


⁵ Alternativ wird die Frequenz der Grundschiwingung mit „ f_0 “ und die der 1.Oberschiwingung mit „ f_1 “ bezeichnet.

t in [mm]	d=20, Grundschiwung, Exp f in [kHz]	d=20, Grundschiwung, Lit. f in [kHz]	Abweichung in % f in [kHz]
0			Exp-Literatur
0,5	12,125	10	17,5257732
0,7	12,82333333	13	1,377696907
1	19,23428571	17,5	9,016636958
1,5	24,382	25	2,534656714
2	33,76	32,5	3,732227488
	d=25, Grundschiwung	d=25, Grundschiwung, Lit.	
0			
0,5			
0,7			
1	11,76714286	11,67	0,82554328
1,5	16,9	17,5	3,550295858
2	21,17285714	21,7	2,489710546
	d=30, Grundschiwung	d=30, Grundschiwung, Lit.	
0			
0,5			
0,7	6,368571429		
1	9,275714286	8,3	10,51902048
1,5	13,59714286	12,5	8,068922042
2	17,466	15,8	9,538532005
	d=20, 1.Oberschiwung, Exp. f in [kHz]	d=20, 1.Oberschiwung, Lit. f in [kHz]	Abweichung in % f in [kHz]
0			Exp-Literatur
0,5	61,40428571	71,7	16,76709397
0,7	71,39	78,7	10,23952935
1	75,67	89,2	17,88026959
1,5		106,25	
2		109,2	
	d=25, 1.Oberschiwung	d=25, 1.Oberschiwung, Lit.	
0			
0,5	39,72	43,33	9,088620342
0,7	48,01142857	51,33	6,912044751
1	57,3	63,33	10,52356021
1,5	78,73142857	77,9	1,056031354
2		88,33	
	d=30, 1.Oberschiwung	d=30, 1.Oberschiwung, Lit.	
0			
0,5	24,97166667		
0,7	32,89857143		
1	42,29571429	43,33	2,44536765
1,5	56,17285714	55,8	0,663767453
2	62,512	64,58	3,308164832

Abbildung 3.6-7

Öffnungswinkel α_2 als Funktion von f aus den Experimenten am LTDI für US-Wandler mit Durchmesser d von 25,30 und 35 mm und Gleichung

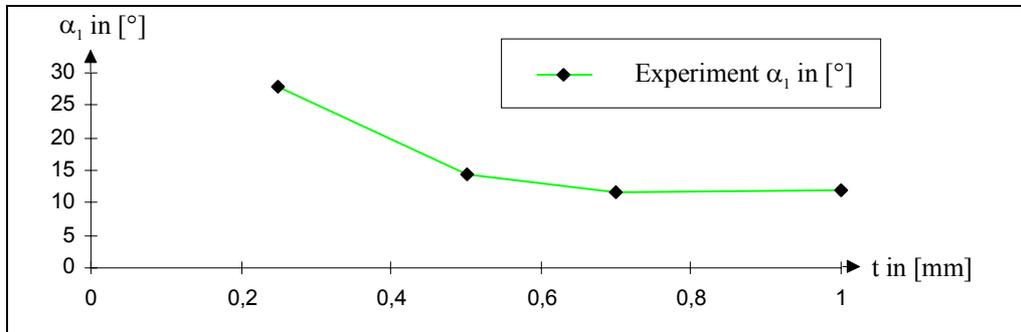


f in [kHz]	alpha2 in [°] d=24mm, Gleichung	alpha2 in [°] d=30mm, Gleichung	alpha2 in [°] d=35mm Gleichung	alpha2 in [°] d=24mm, Experiment	alpha2 in [°] d=30mm, Experiment	alpha2 in [°] d=35mm, Experiment
31,2	52,3242857	41,3093971	35,19715575	47,5		
41,56	38,6599811	30,7111595	26,23861976		35,6	
44,3	36,1830601	28,7692881	24,58950021	39,6		
44,48	36,0316053	28,6503746	24,48844764			22,76
53,56	29,7663146	23,7151781	20,28837139			21,86
55,8	28,545505	22,7501976	19,46583918	27,9		
56,45	28,2099741	22,4848061	19,23955677		23,7	
62,8	25,3074555	20,186083	17,27843203	23,8		
62,91	25,2624736	20,1504187	17,24798997		17,9	
81,9	19,339857	15,4452905	13,228142	17		
94,6	16,7234383	13,3615844	11,44588209	12,6		

f in [kHz]	d=24mm, Abweichung Exp.-Gl. in [%]	d=30mm, Abweichung Exp.-Gl. in [%]	d=35mm, Abweichung Exp.-Gl. in [%]
31,2	10,1563909		
41,56		13,7326981	
44,3	8,62863623		
44,48			7,594233939
53,56			7,189517885
55,8	2,31363792		
56,45		5,127400448	
62,8	6,33384652		
62,91		12,57217175	
81,9	13,7638646		
94,6	32,7257005		

Abbildung 3.6-8

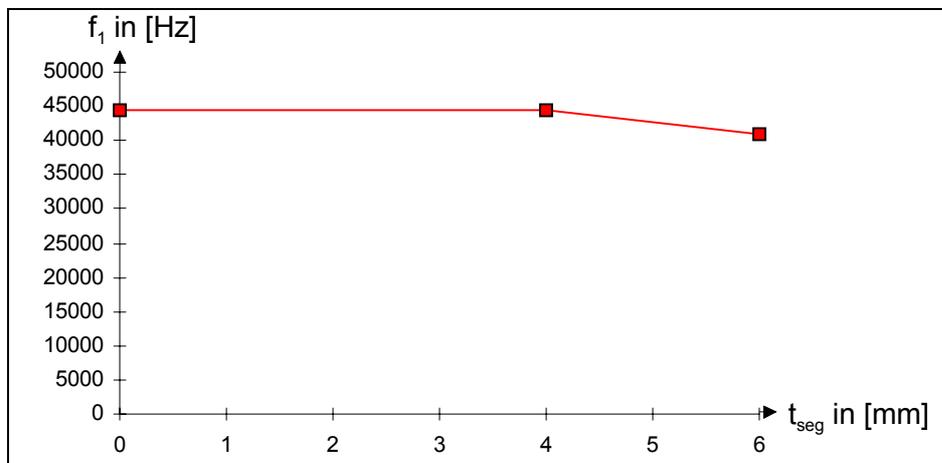
Öffnungswinkel α_1 als Funktion der Dicke t aus den Experimenten am LTDI für mehrere US-Wandler mit einem Durchmesser d von 24mm



	Durchmesser in [mm]	24	24	24	24
	Dicke in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
Experiment	alpha1; LTD I in [°]	28	14,3	11,7	11,8

Abbildung 3.6-13

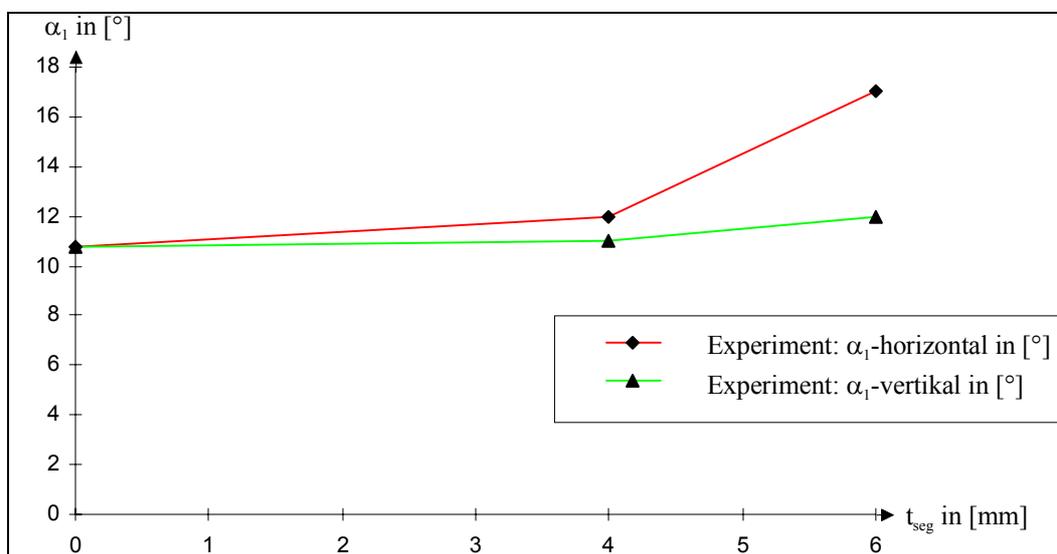
Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTDI für mehrere US-Wandler



	Durchmesser in [mm]	35	35	35
	Dicke "t" in mm	1,5	1,5	1,5
	Segmentdicke in [mm]	0	4	6
Experiment	1.Oberschw., f in [Hz]	44480	44400	41010

Abbildung 3.6-16

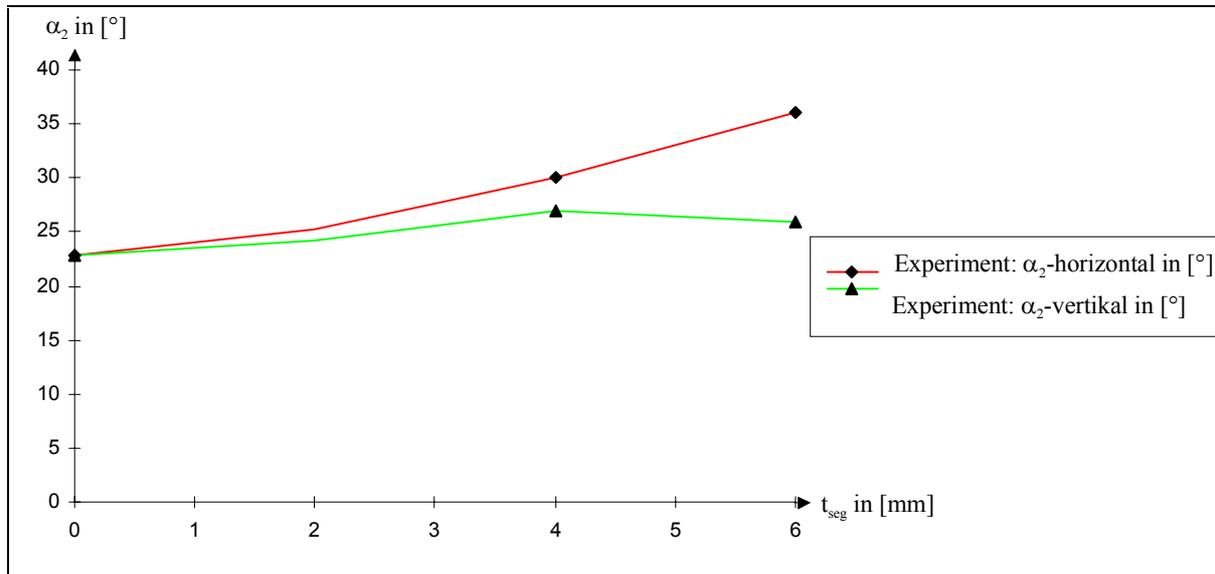
Vergleich von $\alpha_1(t_{\text{seg}})$ horizontal/vertikal als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTDI für mehrere US-Wandler



Experiment	Durchmesser in [mm]	35	35	35
	Segmentdicke in [mm]	0	4	6
alpha1				
horizontal	in [°]	10,8	12	17
vertikal	in [°]	10,8	11	12

Abbildung 3.6-17

Vergleich von $\alpha_2(t_{\text{seg}})$ horizontal/vertikal als Funktion von t_{seg} aus den Experimenten am LTDI für mehrere US-Wandler



Experiment	Segmentdicke t_{seg} in [mm]	alpha2 horizontal (exp., LTD I) in [°]	alpha2 vertikal (exp., LTD I) in [°]
	0	22,8	22,8
	2	25,2	24,2
	3	27,6	25,6
	4	30	27
	6	36	26

Anhang 4.2 Daten zu Kapitel 4: FEM-Simulationsberechnungen**Anhang 4.2.1 Anpassung der Dämpfungswerte**

Die Bestimmung der Dämpfung „ ζ “ wird durch Formel 2 erläutert⁶.

Die aus dem Experiment gewonnenen Kennwerte bilden die Datenbasis der Simulationsrechnung.

Um die Ergebnistreue des Simulationswerkzeuges „Ansys“ (Benchmark) zu überprüfen, wurden die Amplitudenspektren für die Dämpfungswerte $\zeta=0,1$, $\zeta=0,01$, $\zeta=0,008$ und $\zeta=0,001$ durchgeführt. Die anderen Material- und Modellparameter wurden konstant gehalten. Die Resultate sind in den Abbildung 4-i bis Abbildung 4-iv dargestellt: Deutlich sind die größeren Pegelwerte mit geringerer Dämpfung „ ζ “ erkennbar. Gleichzeitig resultiert aus dem 3dB-Abfall der Schalldruckpegel mit geringeren Dämpfungswerten eine geringere Frequenzbreite „ $\Delta f_{-3\text{dB}}$ “. Bei der Dämp-

⁶ vgl. S. 74

fung „ ζ “=0,1 hat die Frequenzbreite „ Δf_{-3dB} “ den hohen Wert 1,540kHz (vgl. Abbildung 4-i), bei der Dämpfung „ ζ “=0,001 beträgt die Frequenzbreite „ Δf_{-3dB} “ nur noch 15Hz (vgl. Abbildung 4-iv).

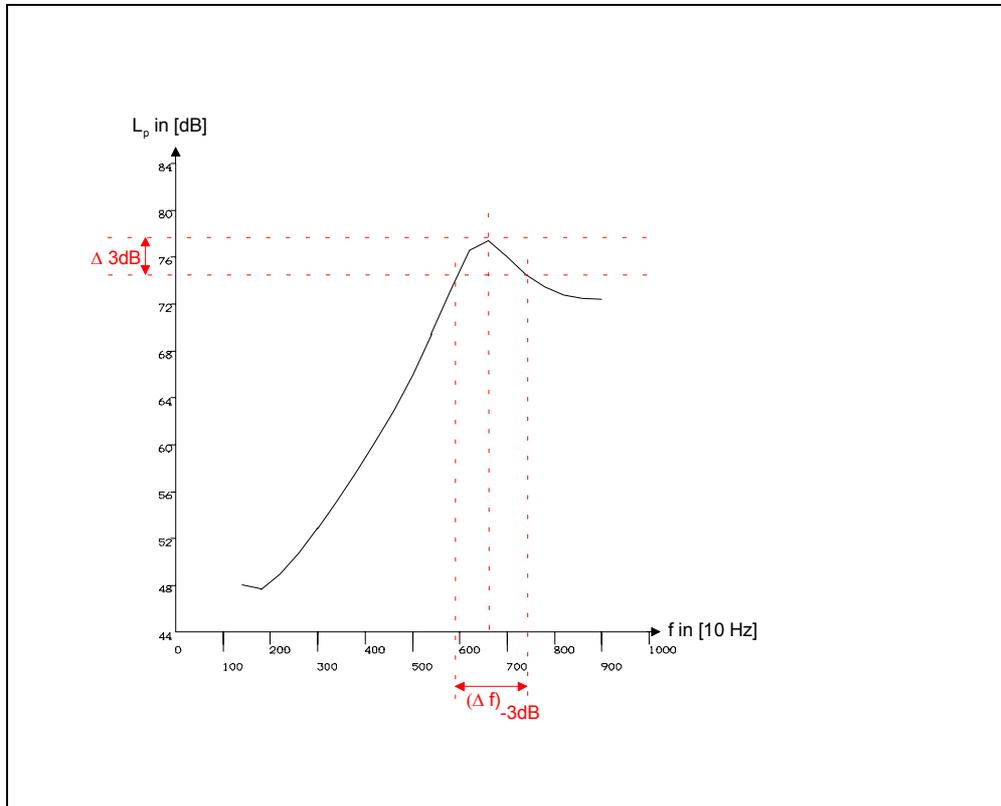


Abbildung 4-i: Amplitudenverlauf mit $\zeta=0,1$ und $\Delta f_{-3dB}=1,540\text{kHz}$

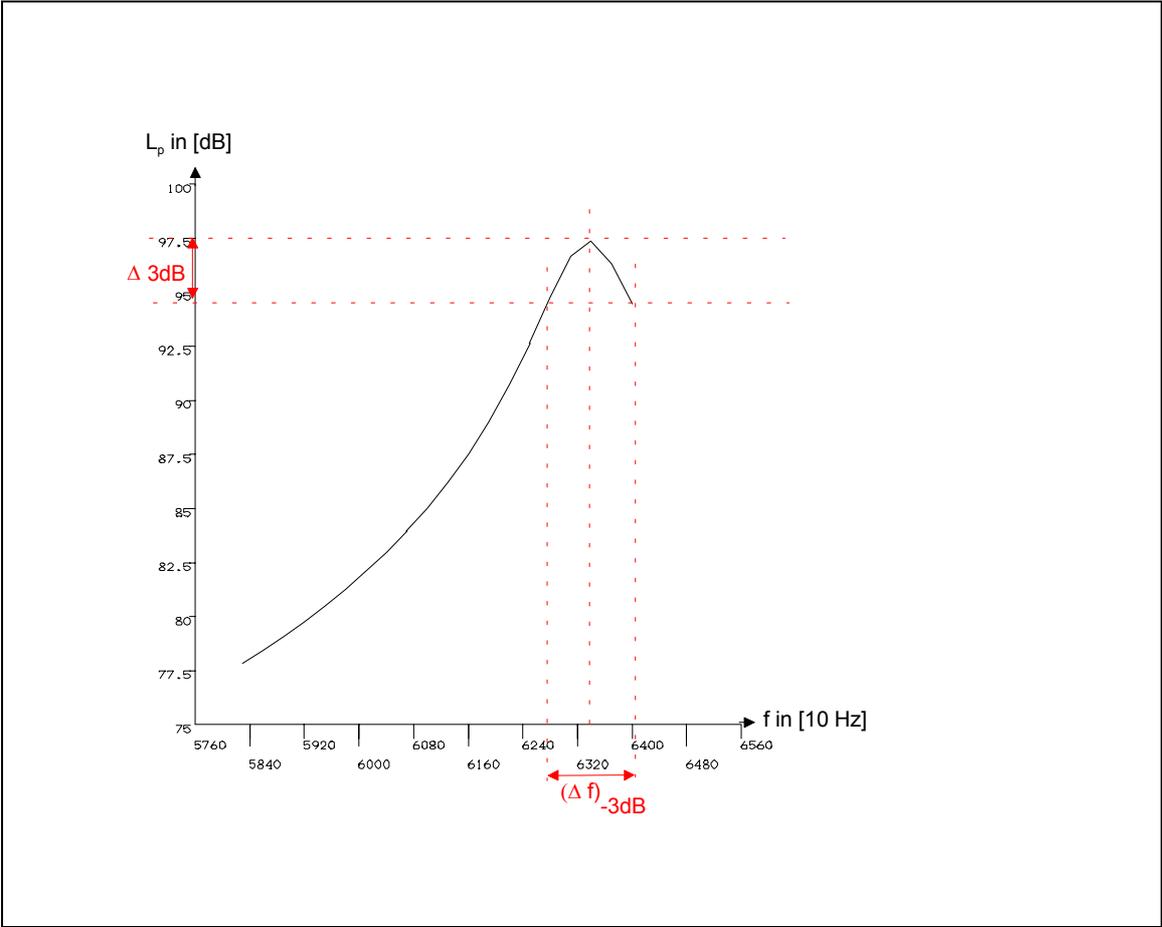


Abbildung 4-ii: Amplitudenverlauf mit $\zeta=0,01$ und $\Delta f_{-3dB}=120$ Hz

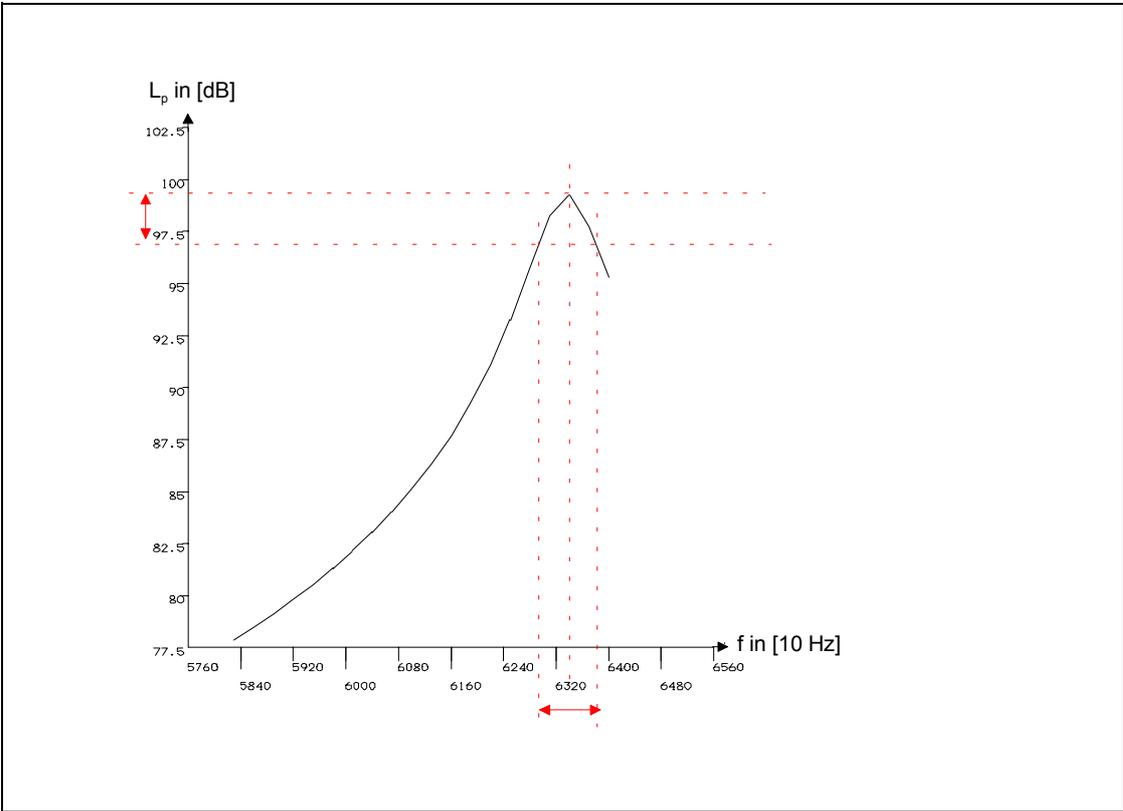
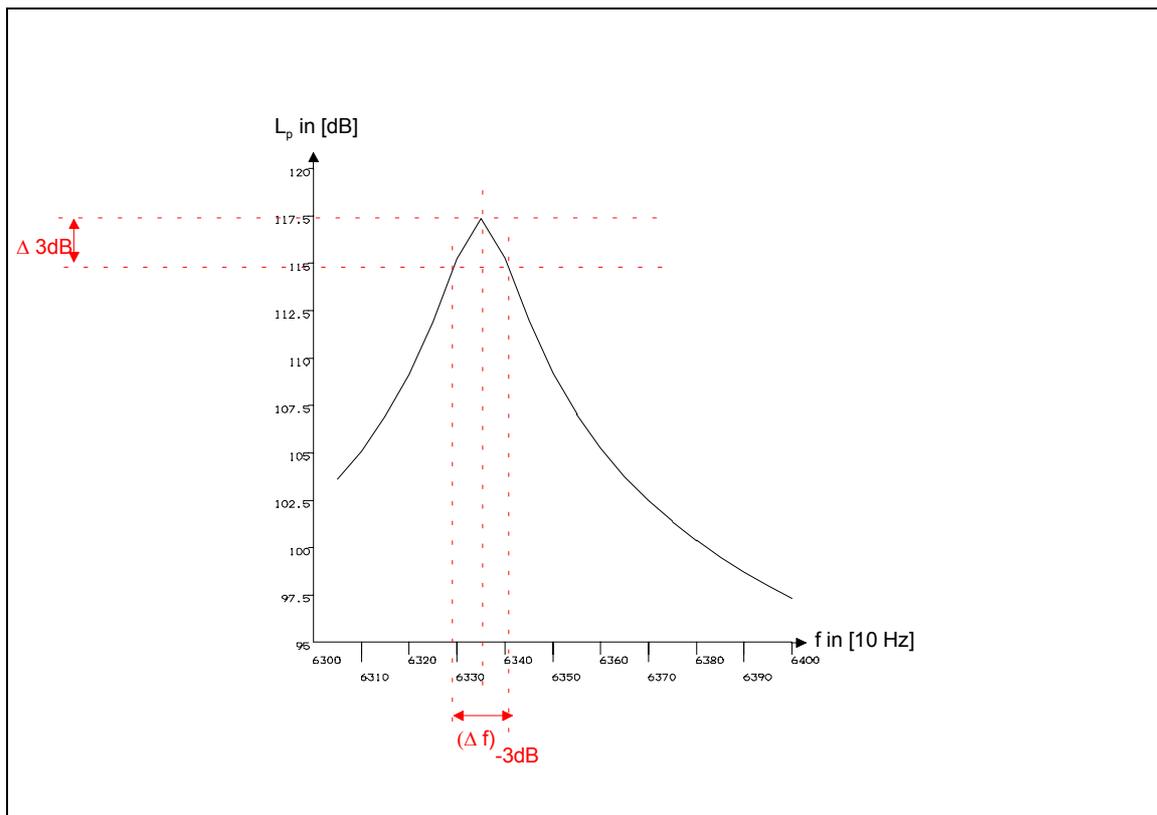


Abbildung 4-iii: Amplitudenverlauf mit $\zeta=0,008$ und $\Delta f_{-3dB}=100$ Hz

Abbildung 4-iv: Amplitudenverlauf mit $\zeta=0,001$ und $\Delta f_{-3dB}=15\text{Hz}$

Zusammenfassend sind in der Tabelle 4-i die Vorgaben und Ergebnisse der Simulationsläufe gegenübergestellt.

Vorgabe der Simulation	Ergebnis der Simulation		
	Dämpfung ζ	maximaler Pegel in [dB]	Güte Q
0,1	0,1296	77,4	4,12
0,01	0,0095	97,3593	52,83
0,008	0,0079	99,28	63,4
0,001	0,0012	117,37	422,3

Tabelle 4-i: Darstellung der Auswirkung der Variation der Dämpfung $\zeta=0,1$ bis $\zeta=0,001$ auf das Ergebnis der Simulation

Für die „ ζ “ = 0,01 und „ ζ “ = 0,008 sind die Unterschiede zwischen Vorgabewert und Ergebnis der Simulation relativ gering. In der Abbildung 4-v wird die prozentuale Abweichung der Dämpfungswerte über den Bereich zwischen „ ζ “ = 0,1 und „ ζ “ = 0,001 dargestellt. Bei einer Vorgabe von einer maximalen Abweichung von 5% liegen die Dämpfungswerte in einem Intervall zwischen „ ζ “ = 0,007 und „ ζ “ = 0,01.

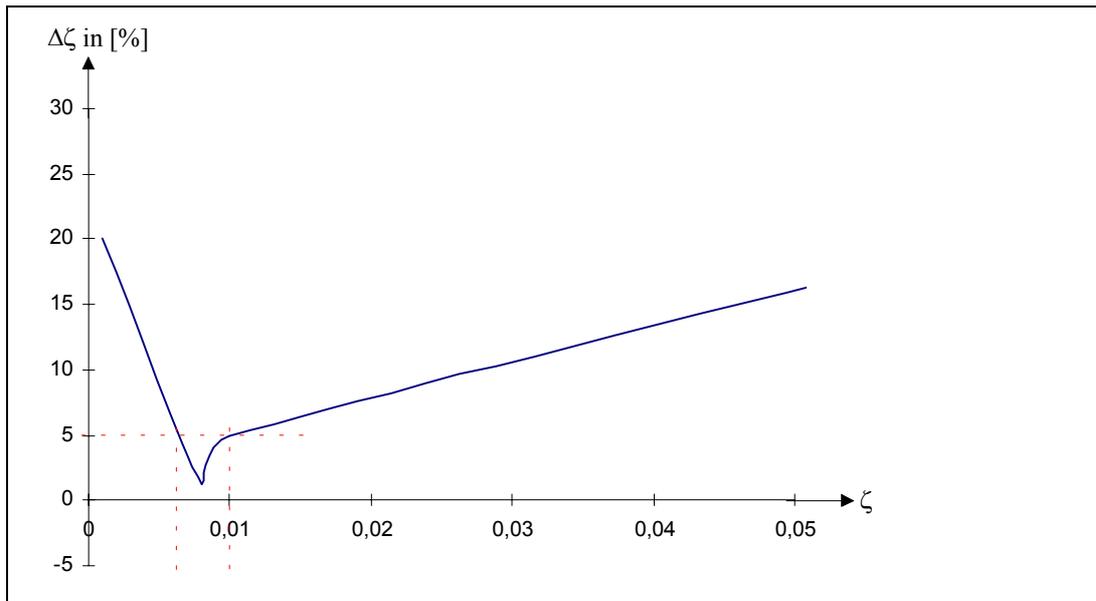


Abbildung 4-v: Darstellung der prozentualen Abweichung der Dämpfungswerte $\Delta\zeta$ zwischen Vorgabe- und Istwert der Simulation in Abhängigkeit von ζ zwischen $\zeta=0,1$ und $\zeta=0,001$

Vorgabewert	Istwert	Vorgabe	Unterschied	Vorgabe-Istwert in %
0,1	0,1296	0,1		29,6
0,01	0,0095	0,01		5
0,008	0,0079	0,008		1,25
0,001	0,0012	0,001		20

Anhang 4.2.2 Auswertung „Resonanzfrequenzen“

Die Resonanzfrequenzen von homogenen Platten lassen sich nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$f_i = C_i \frac{4t}{d^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

Um grobe Fehler bei der FEM-Simulation zu vermeiden, wurden die Ergebnisse der FEM-Simulation mit den Ergebnissen der Berechnung nach dieser Gleichung verglichen; Basis dieser Berechnung ist eine homogene Platte. Bei der FEM-Berechnung wird ein rotationssymmetrischer Schichtverbund simuliert, der aus einer piezoelektrischen und einer Aluminium-Schicht besteht. Die Geometrie- und Materialparameter sind in der Tabelle 4-ii dargestellt. Somit ist ein ähnlicher Einfluss der einzelnen Geometrie- und Materialparameter auf die Resonanzfrequenz zu erwarten wie bei der homogenen Platte.

Um die Rechenzeit zu verkürzen, wurde das FEM-Simulationsmodell als 3D-Teilmodell verwendet.

PXE-Scheibe:		Al-Schicht:		
Dicke :	1mm	Dicke:	t	1mm
Durchmesser:	10mm	Durchmesser:	d	24mm
Dichte:	$7,450 \cdot \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Dichte:	ρ	$2700 \cdot \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Tabelle 4-ii: Geometrie- und Materialdaten für die vergleichende Untersuchung eines US-Wandlers gemäß Abbildung 4-i

Beim 3D-Teilmodell handelt es sich um einen 1,5°-Auschnitt des Schwingers unter Berücksichtigung der Symmetrierandbedingungen (vgl. Abbildung 4-i).

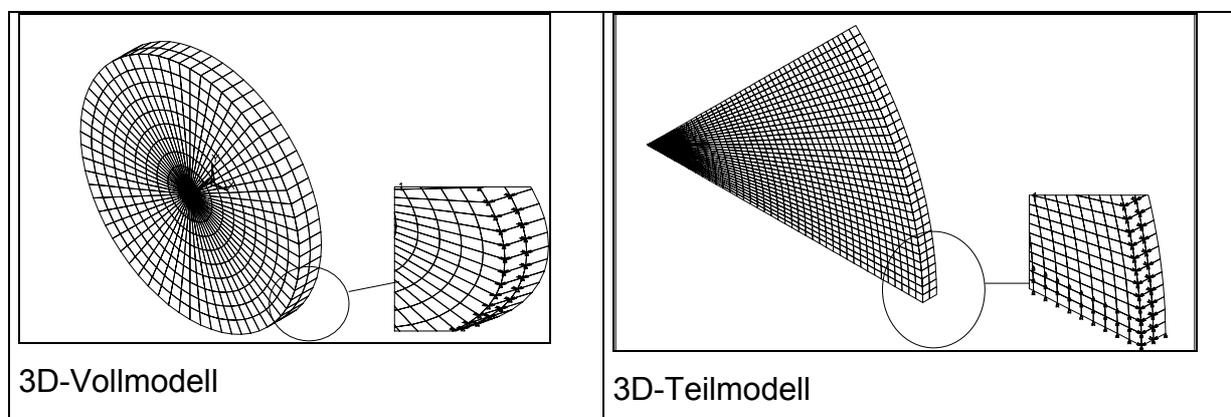


Abbildung 4-vi: Darstellung der FEM-3D-Voll- und 3D-Teilmodelle mit den entsprechenden Symmetrierandbedingungen

Bei der Vergleichsberechnung wurden jeweils die folgenden Parameter variiert: Plattendicke „t“; Plattendurchmesser „d“, E-Modul „E“, Dichte „ρ“. Nach der obigen Gleichung ergeben sich folgende Proportionalitäten⁷:

$$f_i \approx t \qquad f_i \approx \frac{1}{d^2} \qquad f_i \approx \sqrt{E} \qquad f_i \approx \sqrt{\frac{1}{\rho}}$$

Die Ergebnisse der Berechnung sind in den folgenden Abbildungen dargestellt⁸:

Variation der Plattendicke

Die Resonanzfrequenzen der Grundschiwingung der FEM-Simulationsrechnung und der Formelrechnung stimmen gut überein. Die Abweichung liegt unter 1%. Bei der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung gibt es deutlichere Abweichungen: sie ist bei einer Plattendicke „d“ von 0,6mm maximal und beträgt ca. 9,3%.

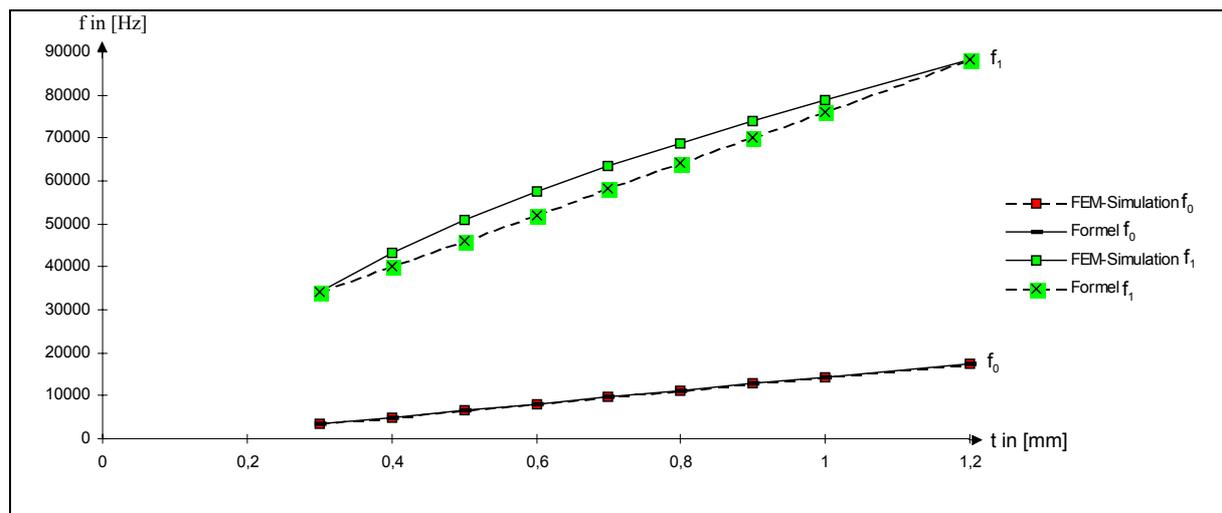


Abbildung 4-vii: Auswirkung der Variation der Plattendicke des US-Wandlers mit den sonstigen Abmessungen gemäß Tabelle 4-ii auf die Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

⁷ Der Index „i“ charakterisiert die „i“-te Resonanzfrequenz.

⁸ Die Ergebnisse der FEM-Simulation werden mit „FEM-Simulation“ gekennzeichnet; die Ergebnisse der Berechnungen nach der obigen Gleichung werden mit „Formel“ gekennzeichnet.

	FEM- Simulation Grundschw.	FEM- Simulation 1. Oberschw.	Gleichung Grundschw.	Gleichung 1. Oberschw.
t	f	f	f	f
in [mm]	in [Hz]	in [Hz]	in [Hz]	in [Hz]
0,3	3343	34058	3342	34058
0,4	4881	43095	4926,55556	40070,22222
0,5	6471	50780	6511,11111	46082,44444
0,6	8082	57423	8095,66667	52094,66667
0,7	9693	63350	9680,22222	58106,88889
0,8	11297	68795	11264,77778	64119,11111
0,9	12885	73900	12849,33333	70131,33333
1	14457	78748	14433,8889	76143,55556
1,2	17604	88168	17603	88168

	Abweichung Grundschw. FEM-Gleichung	Abweichung 1.Oberschw. FEM-Gleichung
t	in [%]	in [%]
0,3	0,029913252	0
0,4	0,933324228	7,018860141
0,5	0,619859544	9,250798652
0,6	0,169100058	9,279092582
0,7	0,131824799	8,276418486
0,8	0,285228133	6,796844086
0,9	0,276807657	5,099684258
1	0,159861044	3,307315036
1,2	0,005680527	0

Variation des Plattendurchmessers

Die Abweichung ist bei einem Plattendurchmesser „d“ von 24mm maximal und beträgt bei der Grundschwingung ca. 7,0% und bei der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung ca. 24,1%.

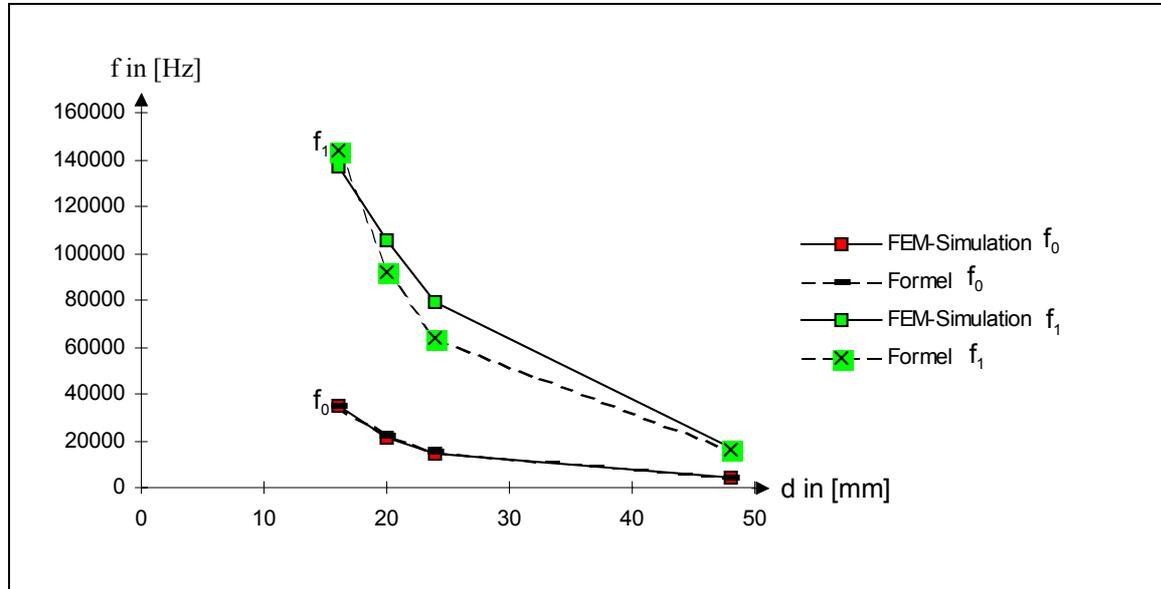


Abbildung 4-viii: Auswirkung der Variation des Plattendurchmessers des US-Wandlers mit den sonstigen Abmessungen gemäß Tabelle 4-ii auf die Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

Plattend. d in [mm]	FEM- Simulation Grundschw. f in [Hz]	Formel- Berechnung Grundschw. f in [Hz]	Grundschwung Abweichung FEM-Formel-Ber. in [%]
10	89716	89106,32	0,679566632
12	64612	61879,38889	4,229262538
16	34902	34807,15625	0,271743023
20	21217	22276,58	4,994014234
24	14457	15469,84722	7,005929461
48	3841	3867,461806	0,688930111

Plattend. d in [mm]	FEM- Simulation 1. Oberschw. f in [Hz]	Formel- Berechnung 1. Oberschw. f in [Hz]	Grundschwung Abweichung FEM-Formel-Ber. in [%]
10	301170	344074,92	14,24608029
12	218050	238940,9167	9,580791867
16	136730	134404,2656	1,700968606
20	105570	86018,73	18,51972151
24	78748	59735,22917	24,14381423
48	16796	14933,80729	11,0871202

Variation des E-Moduls

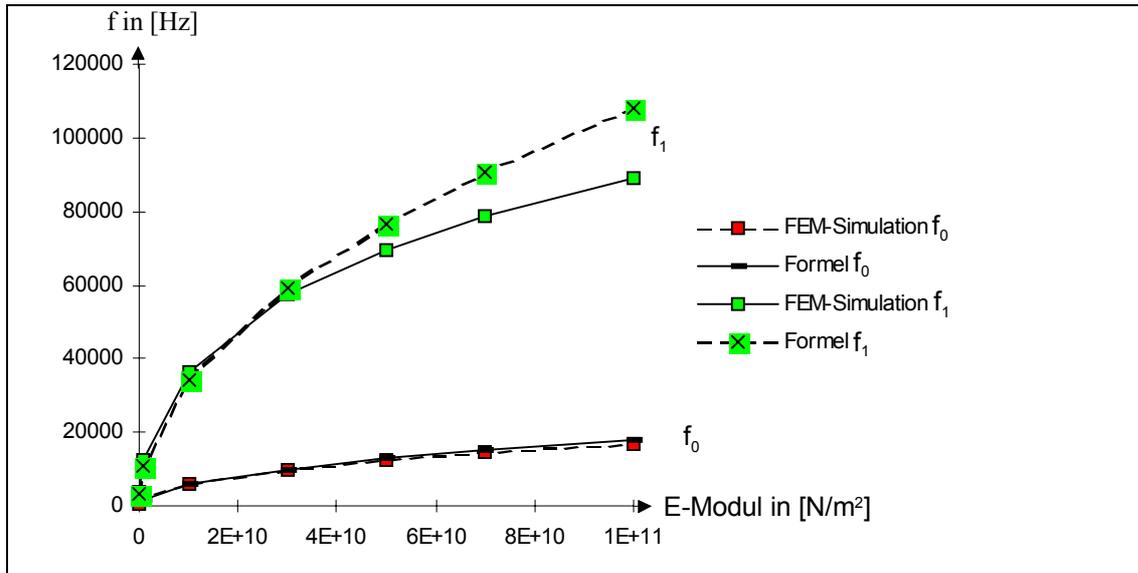


Abbildung 4-ix: Auswirkung der Variation des E-Moduls des US-Wandlers mit den sonstigen Abmessungen gemäß Tabelle 4-ii auf die Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationsymmetrischen Oberschwingung

E-Modul	FEM-Simulation Grundschw.	FEM-Simulation 1. Oberschw.	Formel-Berechnung Grundschw.
in [N/m²]	f in [Hz]	f in [Hz]	f in [Hz]
100000000	613	4022	572,43175
1000000000	1930	12497	1810,18813
1E+10	5937	36175	5724,3175
3E+10	9930	57368	9914,80875
5E+10	12487	69762	12799,9631
7E+10	14457	78748	15145,1205
1E+11	16819	89042	18101,8813

E-Modul	Grundschwungung Abweichung FEM-Formel-Ber.	Formel-Berechnung 1. Oberschw.	Grundschwungung Abweichung FEM-Formel-Ber.
in [N/m²]	in [%]	f in [Hz]	in [%]
100000000	6,617985318	3418,87765	14,99558304
1000000000	6,207868653	10811,44042	13,48771373
1E+10	3,582322722	34188,7765	5,490597097
3E+10	0,152983397	59216,69795	3,222524659
5E+10	2,506311002	76448,42832	9,584628195
7E+10	4,759774023	90455,00025	14,86640962
1E+11	7,627572091	108114,4042	21,41955948

Die größten Abweichungen ergeben sich bei einem E-Modul von $1 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ und betragen für die Grundschwingung bzw. 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung ca. 7,6% bzw. 21,4%.

Variation der Dichte

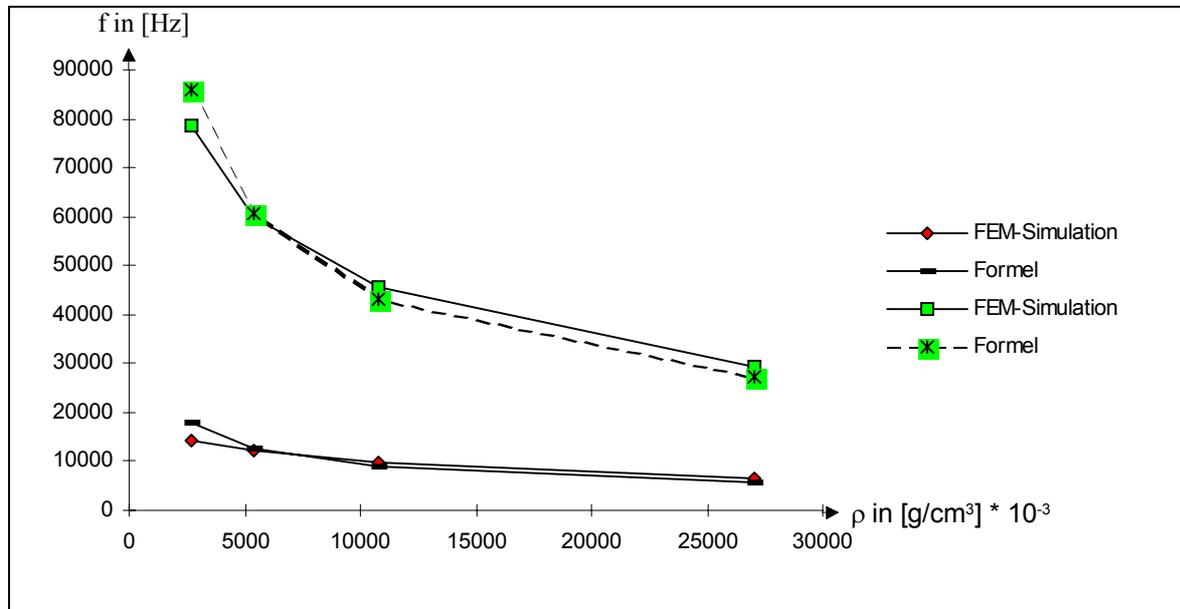


Abbildung 4-x: Auswirkung der Variation der Dichte ρ des US-Wandlers mit den sonstigen Abmessungen gemäß Tabelle 4-ii auf die Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung

Dichte	FEM-Simulation Grundschw.	Formel- Berechnung Grundschw.	Grundschiwingung Abweichung FEM-Formel-Ber.
in [kg/m ³]	f in [Hz]	f in [Hz]	in [%]
2700	14457	17743,0611	22,72989635
5400	12168	12546,2388	3,108471676
10800	9662	8871,53056	8,181219648
27000	6650	5610,84858	15,62633716

Dichte	FEM-Simulation 1. Oberschw.	Formel- Berechnung 1. Oberschw.	1.Oberschiwingung Abweichung FEM-Formel-Ber.
in [kg/m ³]	f in [Hz]	f in [Hz]	in [%]
2700	78748	85949,60534	9,145127923
5400	59797	60775,54877	1,636451283
10800	45550	42974,80267	5,65356165
27000	29457	27179,65169	7,731093847

Bei der geringsten Dichte von $2,700\text{g/mm}^3$ beträgt die größte Abweichung für die Grundschiwingung bzw. 1. rotationssymmetrischen Oberschiwingung ca. 22,8% bzw. 9,1%.

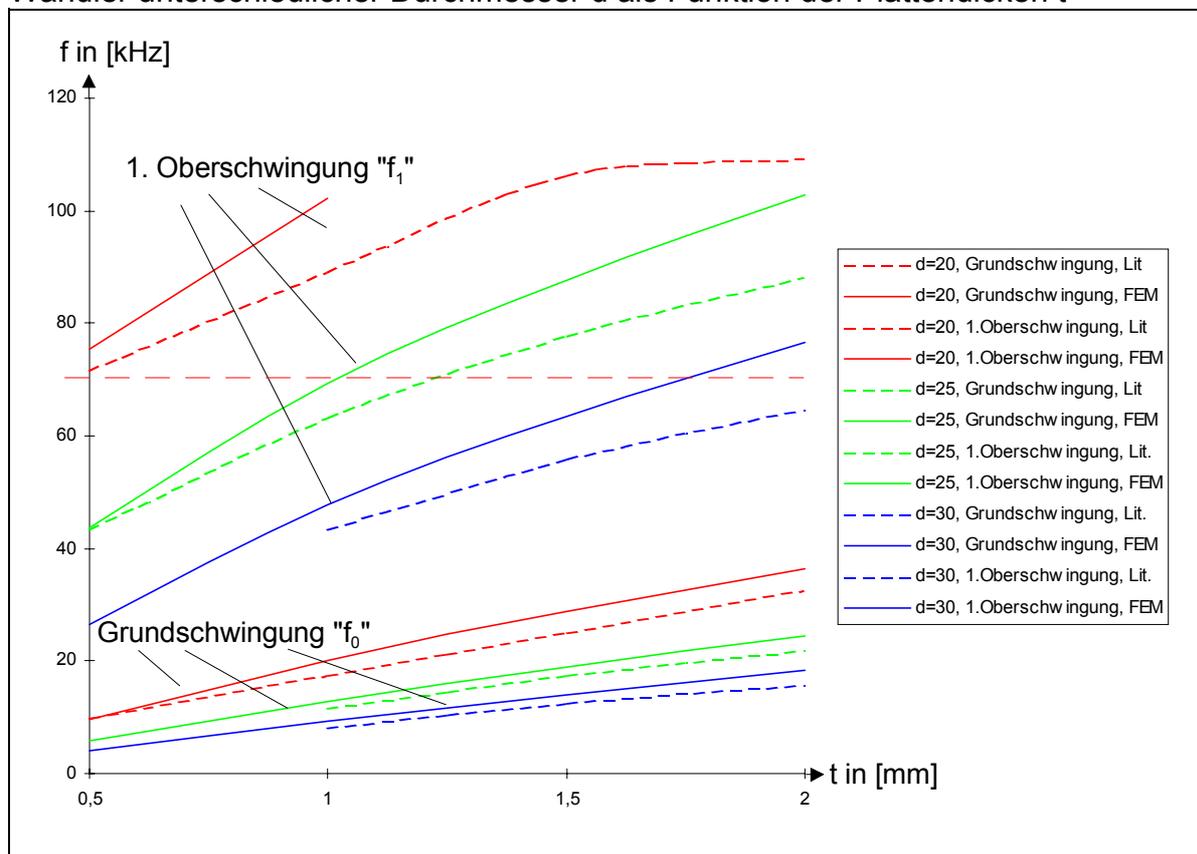
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Funktionsverläufe der berechneten Resonanzfrequenzen in qualitativer Hinsicht gute Übereinstimmungen liefern. Die Messwertunterschiede sind jedoch für die einzelnen Parameter nicht zu vernachlässigen. Dies war zu erwarten, weil die Modelle der Berechnung nach Gleichung bzw. nach FEM unterschiedlich sind:

Das Modell nach Gleichung berücksichtigt eine homogene Platte aus Aluminium ohne piezoelektrischer Schicht. Das FEM-Modell ist ein 3D-Teilmodell, das aus einem Schichtverbund aus Aluminium und Piezokeramik besteht.

Daten zu den Abbildung 4.3-3; 4-3-4; 4-3-15 bis 4-3-18; 4-3-25; 4-3-26; 4-3-33; 4-3-34

Abbildung 4.3-3

Vergleich der berechneten Resonanzfrequenzen der FEM-Simulation (durchgezogene Linie) mit den experimentell bestimmten Resonanzfrequenzen aus der Literatur (gestrichelte Linie) für symmetrische US-Wandler unterschiedlicher Durchmesser d als Funktion der Plattendicken t

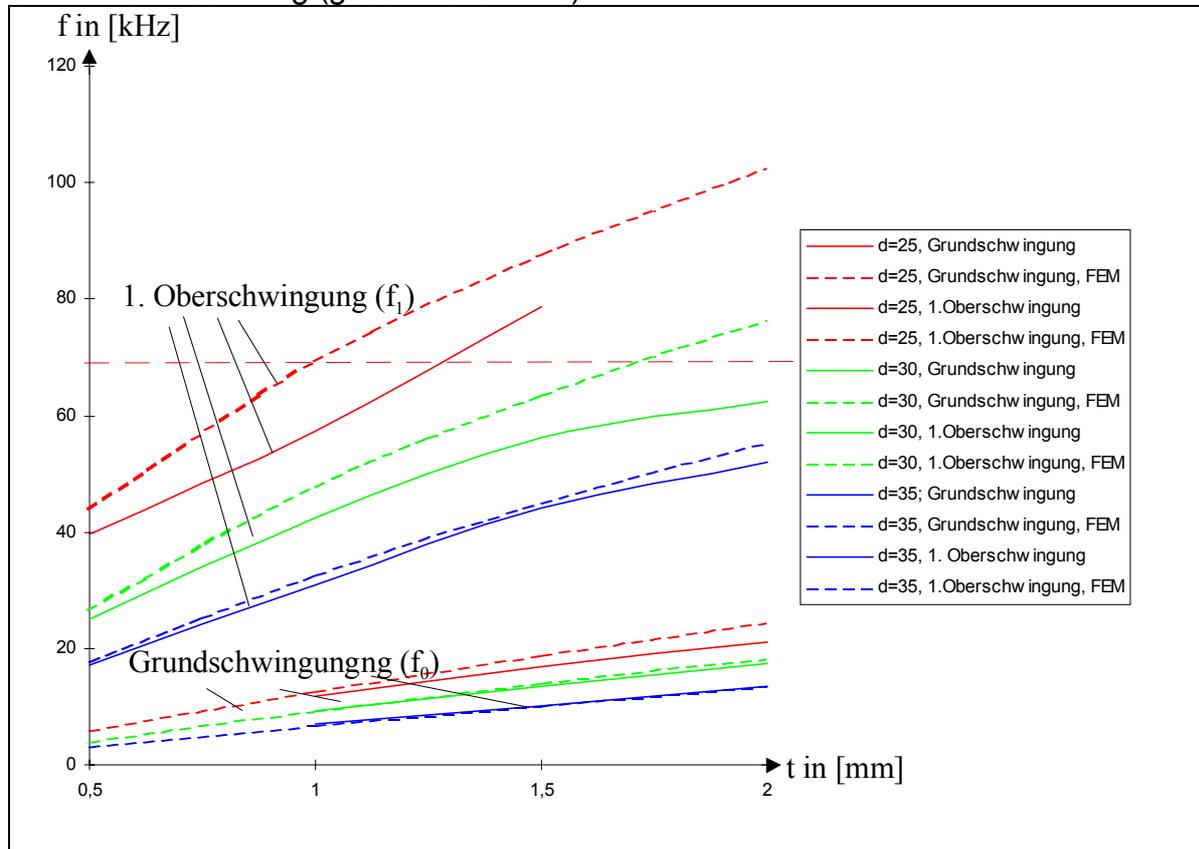


	d=20, Grundschw. , Lit.	d=20, Grundschw. , FEM	Abweichung FEM-Lit
t in [mm]	f in [kHz]	f in [kHz]	in [%]
0			
0,5		10	9,714
0,7		13	13,8528
1		17,5	20,061
1,5		25	28,825
2		32,5	36,475
	d=25, Grundschw. , Lit.	d=25, Grundschw. , FEM	Abweichung FEM-Lit in [%]
0			
0,5			5,849
0,7			8,5894
1	11,67	12,7	8,11023622
1,5	17,5	18,9	7,407407407
2	21,7	24,5	11,42857143
	d=30, Grundschw. , Lit.	d=30, Grundschw. , FEM	Abweichung FEM-Lit in [%]
0			
0,5			4
0,7			
1	8,3	9,2	9,782608696
1,5	12,5	14	10,71428571
2	15,8	18,4	14,13043478

t in [mm]	d=20, 1.Oberschw. Lit.	d=20, 1.Oberschw., FEM	Abweichung FEM-Lit in [%]
	f in [kHz]	f in [kHz]	in [%]
0			
0,5	71,7	75,496	5,028080958
0,7	78,7	86,2456	8,748968063
1	89,2	102,37	12,8650972
1,5	106,25		
2	109,2		
	d=25, 1.Oberschw., Lit.	d=25, 1.Oberschw., , FEM	Abweichung FEM-Lit in [%]
0			
0,5	43,33	43,8	1,073059361
0,7	51,33	54	4,944444444
1	63,33	69,3	8,614718615
1,5	77,9	87,8	11,27562642
2	88,33	102,7	
	d=30, 1.Oberschw. Lit.	d=30, 1.Oberschw., FEM	Abweichung FEM-Lit in [%]
0			
0,5		26,6	
0,7		35,08	
1	43,33	47,8	9,351464435
1,5	55,8	63,4	11,9873817
2	64,58	76,5	15,58169935

Abbildung 4.3-4

Vergleich der am LTDI gemessenen Resonanzfrequenzen der untersuchten US-Wandler (durchgezogene Linie) mit den Resonanzfrequenzen der FEM-Simulationsrechnung (gestrichelte Linie)

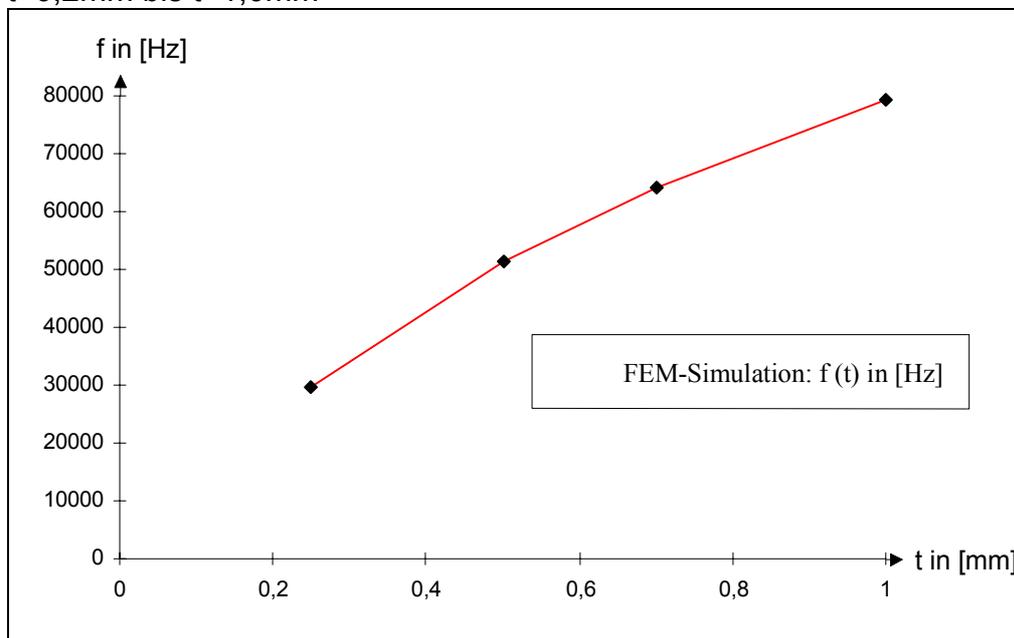


t in [mm]	d=25, Grundschiwingung; Exp.	d=25, Grundschiwingung, FEM	Abweichung in % Exp.-FEM. f in [kHz]
	f in [kHz]	f in [kHz]	
0			
0,5		5,849	
1	11,76714286	12,7	7,92764356
1,5	16,9	18,9	11,83431953
2	21,17285714	24,5	15,71418933
d=30, Grundschiwingung			
0			
0,5		4	
1	9,275714286	9,2	0,816263669
1,5	13,59714286	14	2,962807312
2	17,466	18,4	5,347532349
d=35; Grundschiwingung			
0			
0,5		3	
1	7,128333333	6,7	6,008884732
1,5	10,24428571	10,2	0,432296751
2	13,452	13,4	0,386559619

t in [mm]	d=25, 1.Oberschwingung; Exp.	d=25, 1.Oberschwingung, FEM	Abweichung in % Exp.-FEM. f in [kHz]
	f in [kHz]	f in [kHz]	
0			
0,5	39,72	43,8	10,27190332
1	57,3	69,3	20,94240838
1,5	78,73142857	87,8	11,51836261
2		102,7	
	d=30, 1.Oberschwingung	d=30, 1.Oberschwingung, FEM	
0			
0,5	24,97166667	26,6	6,520723487
1	42,29571429	47,8	13,0138143
1,5	56,17285714	63,4	12,86589863
2	62,512	76,5	22,37650371
	d=35, 1. Oberschwingung	d=35, 1.Oberschwingung, FEM	
0			
0,5	17,15142857	17,8	3,781442612
1	30,86833333	32,6	5,60984828
1,5	44,17142857	44,9	1,649417853
2	51,994	55,5	6,743085741

Abbildung 4.3-15

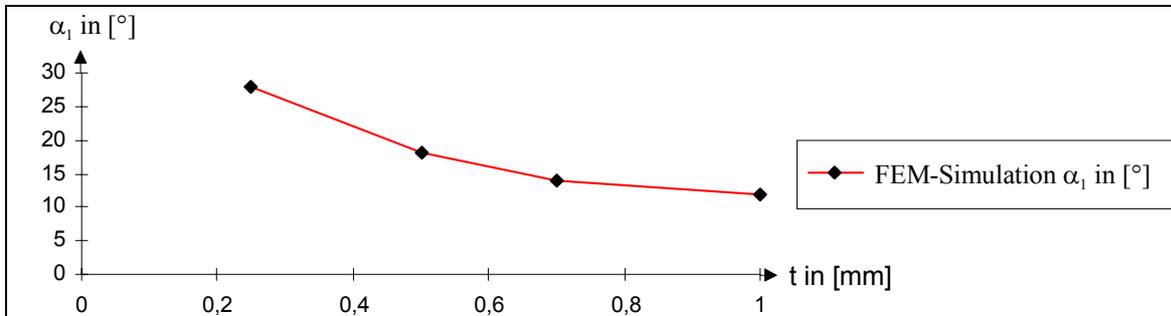
Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler mit einem Durchmesser d=24mm als Funktion verschiedener Plattendicken t=0,2mm bis t=1,0mm



Durchmesser in [mm]	24	24	24	24
Dicke in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
FEM-Simulation Frequenz in [Hz]	29495	51329	63969	79466

Abbildung 4.3-16

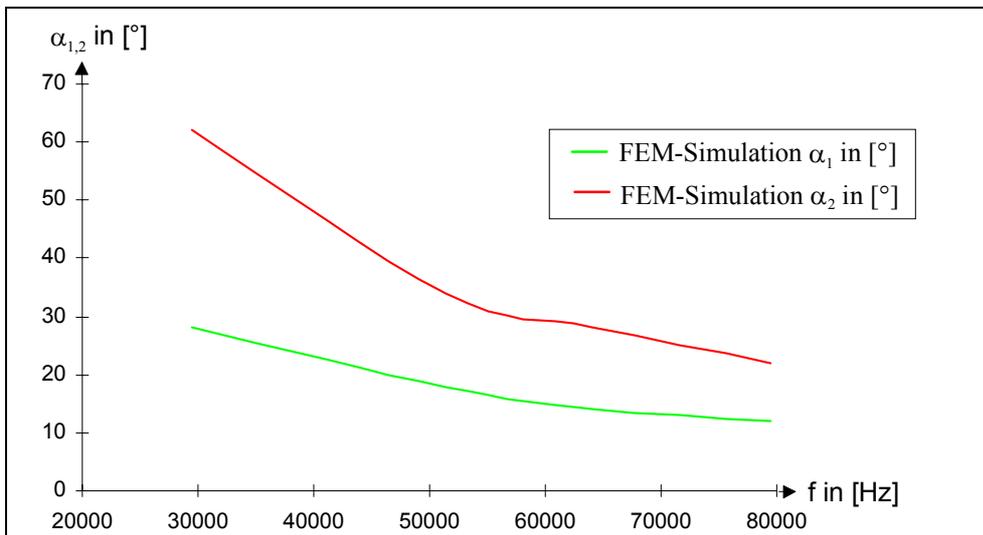
Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler mit einem Durchmesser „d“=24mm als Funktion verschiedener Plattendicken t=0,2mm bis t=1,0mm



Durchmesser in [mm]	24	24	24	24
Dicke in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
alpha1 in [°]	28	18	14	12
FEM-Simulation Frequenz in [Hz]	29495	51329	63969	79466

Abbildung 4.3-17

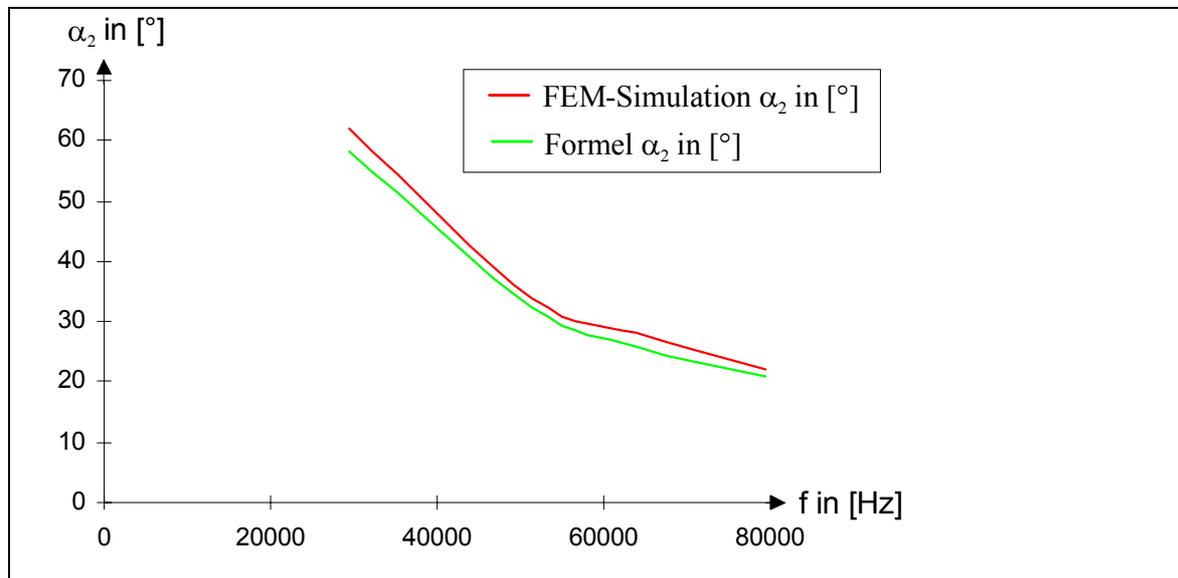
Öffnungswinkel α_1 und α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für versch. US-Wandler mit einem Durchmesser d=24mm und verschiedenen Plattendicken t als Funktion der Resonanzfrequenzen f_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung



Durchmesser in [mm]	24	24	24	24
Dicke in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
Frequenz in [Hz]	29495	51329	63969	79466
alpha1 in [°]	28	18	14	12
FEM-Simulation alpha2 in [°]	62	34	28	22

Abbildung 4.3-18

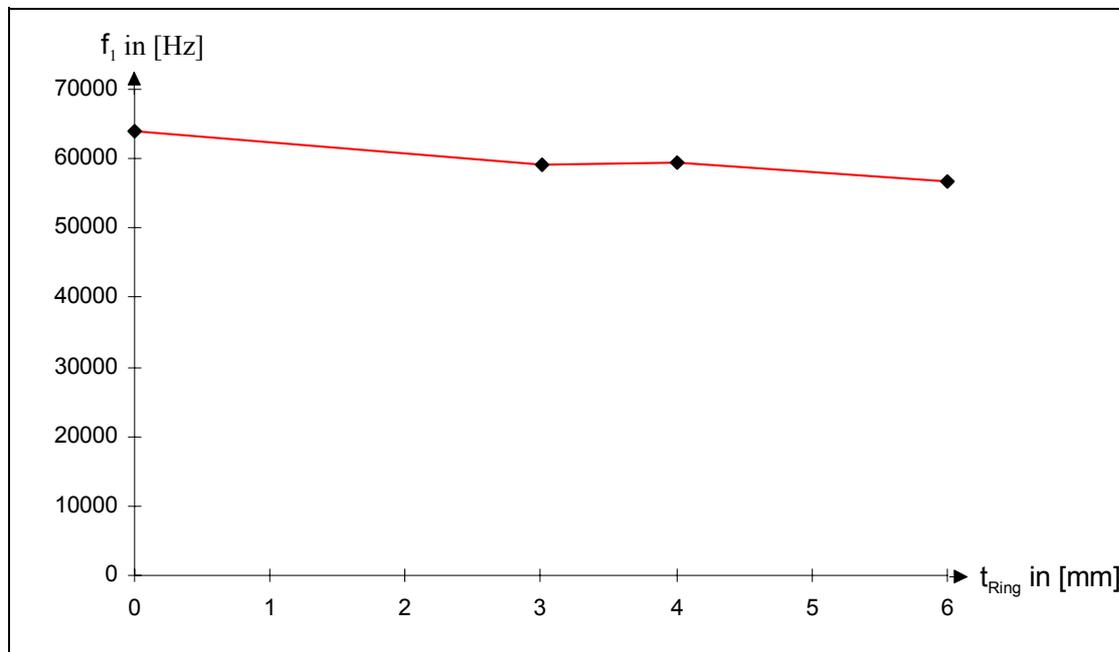
Vergleich von α_2 aus FEM-Simulation und Formel gemäß Gleichung für versch. US-Wandler mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ und verschiedener Plattendicken t als Funktion der Resonanzfrequenzen f_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung



Durchmesser in [mm]	24	24	24	24
Dicke in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
Frequenz in [Hz]	29495	51329	63969	79466
FEM; alpha2 in [°]	62	34	28	22
Gleichung; alpha2 in [°]	58,18	32,45	25,91	20,79
Abweichung FEM-Gleichung in (%)	6,16126078	4,56861771	7,46728566	5,4852731

Abbildung 4.3-25

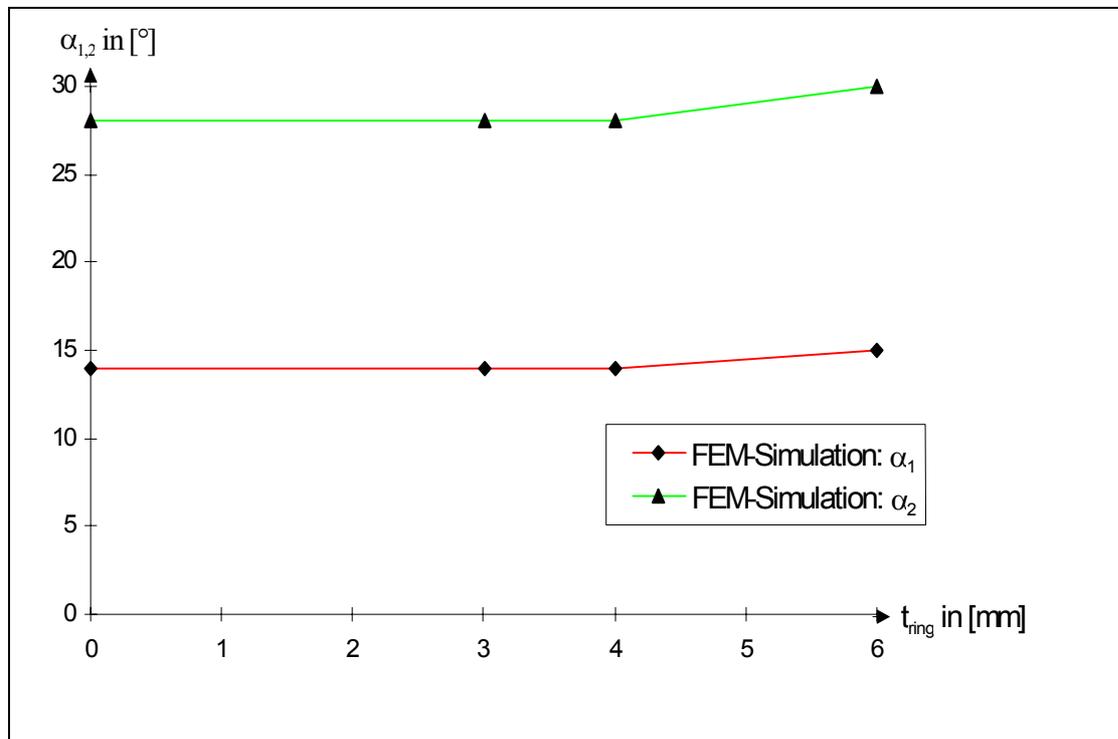
Resonanzfrequenzen der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler als Funktion der Dicke der Beschwerungsringe von $t_{\text{ring}}=0,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$



Durchmesser=24mm,t=0,7mm				
Ringdicke in [mm]	0	3	4	6
1.Oberschw.				
Frequenz, f in [Hz]	63969	59263	59551	56801
Unterschied				
Ringdicke =0 zu Ringdicke =6mm				11,2054276

Abbildung 4.3-26

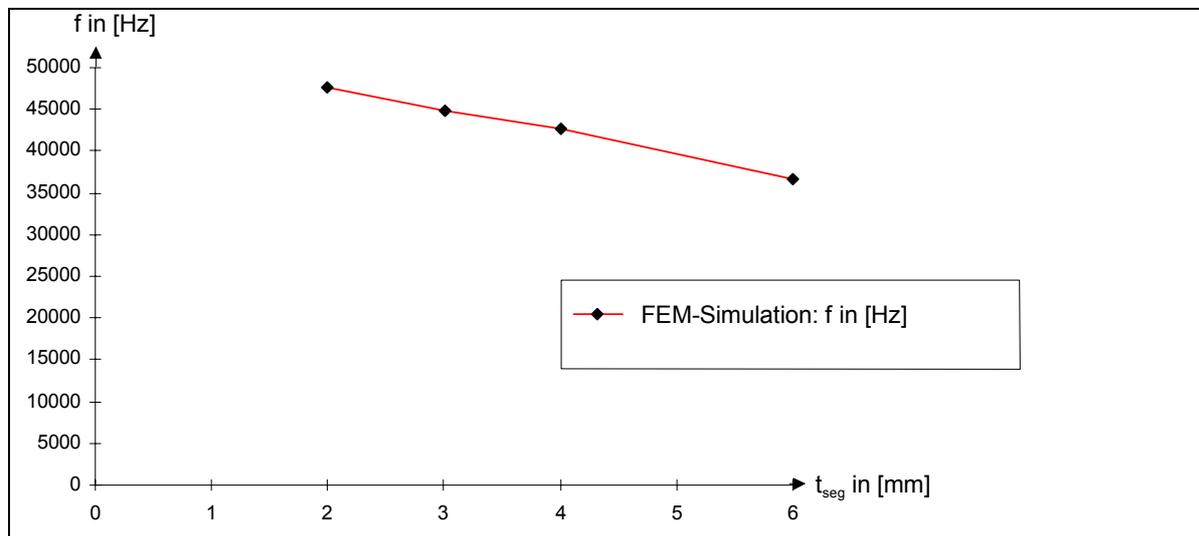
Öffnungswinkel α_1 und α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler als Funktion der Dicke der Beschwerungsringe von $t_{\text{ring}}=0,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$



		Durchmesser=24mm,t=0,7mm			
		Ringdicke in [mm]			
FEM_Simulation		0	3	4	6
	alpha1 in [°]	14	14	14	15
	alpha2 in [°]	28	28	28	30

Abbildung 4.3-33

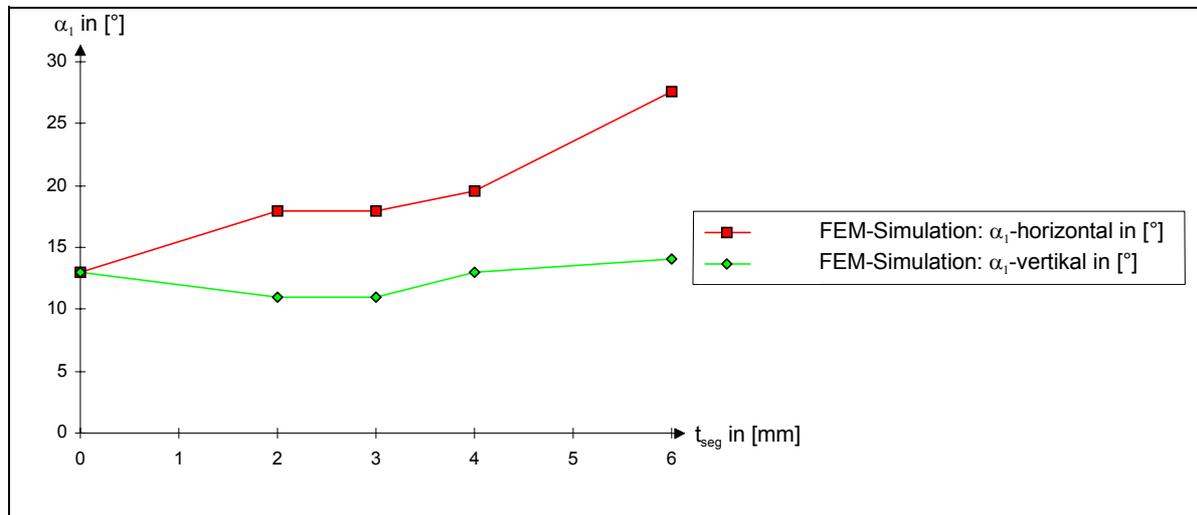
Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung verschiedener US-Wandler mit einem US-Wandlerdurchmesser $d=35\text{mm}$ mit einer Dicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Dicke der Beschwerungsringsegmente von $t_{\text{seg}}=2,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$



Durchmesser in [mm]	35	35	35	35	35	
Segmentdicke in [mm]	0	2	3	4	6	
1. Oberschwingung						
FEM_Simulation	Frequenz, f in [Hz]	51172	47679	44903	42596	36611

Abbildung 4.3-34

Öffnungswinkel α_1 horizontal/vertikal der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung aus FEM-Simulation für verschiedene US-Wandler mit einem Wandlerdurchmesser $d=35\text{mm}$ mit einer Dicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Dicke der Beschwerungsringsegmenten von $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; $2,0\text{mm}$; $3,0\text{mm}$; $4,0\text{mm}$ und $6,0\text{mm}$



Durchmesser in [mm]	35	35	35	35	35
Segmentdicke in [mm]	0	2	3	4	6
alpha1/horizontal in [°]	13	18	18	19,6	27,6
FEM_Simulation alpha1/vertikal in [°]	13	11	11	13	14

Anhang 4.2.3 Auswertung „Güte- und Dämpfungswerte“

Zielsetzung der vorliegenden experimentellen Bestimmung von Güte „Q“ und Dämpfung „ ξ “ ist es, die für die FEM-Simulationsrechnung benötigten Kennwerte zu bestimmen. In der Literatur sind diese Kennwerte für die verwendeten US-Wandlerarten nicht verfügbar.

Für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung werden diese Werte mithilfe der Halbwertsbreite „ $\Delta(f_1)_{-3\text{dB}}$ “ gemäß der Gleichungen 1 sowie 2 bestimmt.

$$Q = \frac{f_1}{\Delta(f_1)_{-3\text{dB}}} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{1 - \frac{1}{4Q}}{-1 + 2Q} \quad (2)$$

In der folgenden Abbildung ist das Spektrogramm eines US-Wandlers mit einem Durchmesser „d“ von 35mm und einer Plattendicke „t“ von 1,5mm dargestellt.

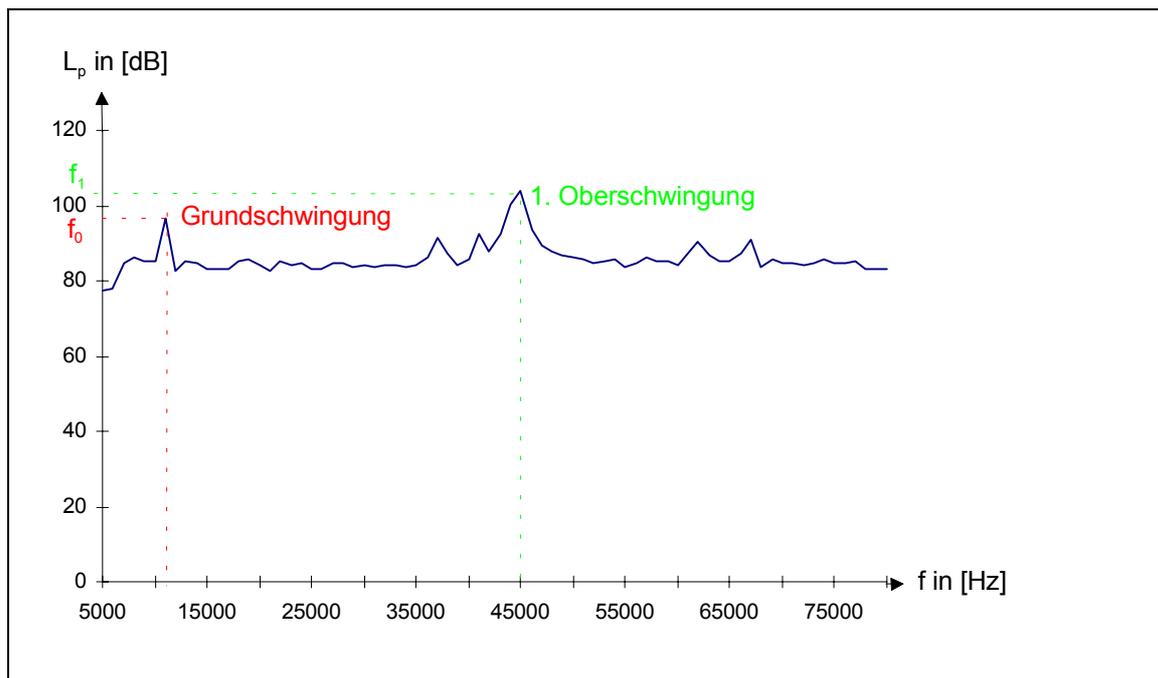


Abbildung 4-xi: Spektrogramm eines US-Wandlers (d=35mm, t=1,5mm)

Die Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung „f₁“ liegt bei 44,480kHz und die Frequenzen bei denen der Schalldruckpegel um 3dB abfällt, liegen bei 44,380kHz, bzw. 44,530kHz. Damit ergeben sich für den Güte- und die Dämpfungswert folgende Ergebnisse:

$$Q = \frac{f_1}{\Delta(f_1)_{-3\text{dB}}} = \frac{44480\text{Hz}}{44580\text{Hz} - 44380\text{Hz}} = 222,4 \quad \zeta = \frac{1 - \frac{1}{4Q}}{-1 + 2Q} = \frac{1 - \frac{1}{4 \cdot 222,4}}{-1 + 2 \cdot 222,4} = 0,00225$$

In der Abbildung 4-xii sind exemplarisch die Kurvenverläufe der „Q“- und „ζ“-Werte für US-Wandler mit konstantem Durchmesser „d“=24mm und veränderter Plattendicke „t“ zwischen 0,25mm und 2,0mm dargestellt. Deutlich ist das inverse Verhalten der Kennwerte „Güte“ und „Dämpfung“ erkennbar.

Mithilfe dieser experimentell gewonnenen Kennwerte wird die Datenbasis der FEM-Simulationsrechnung ergänzt.

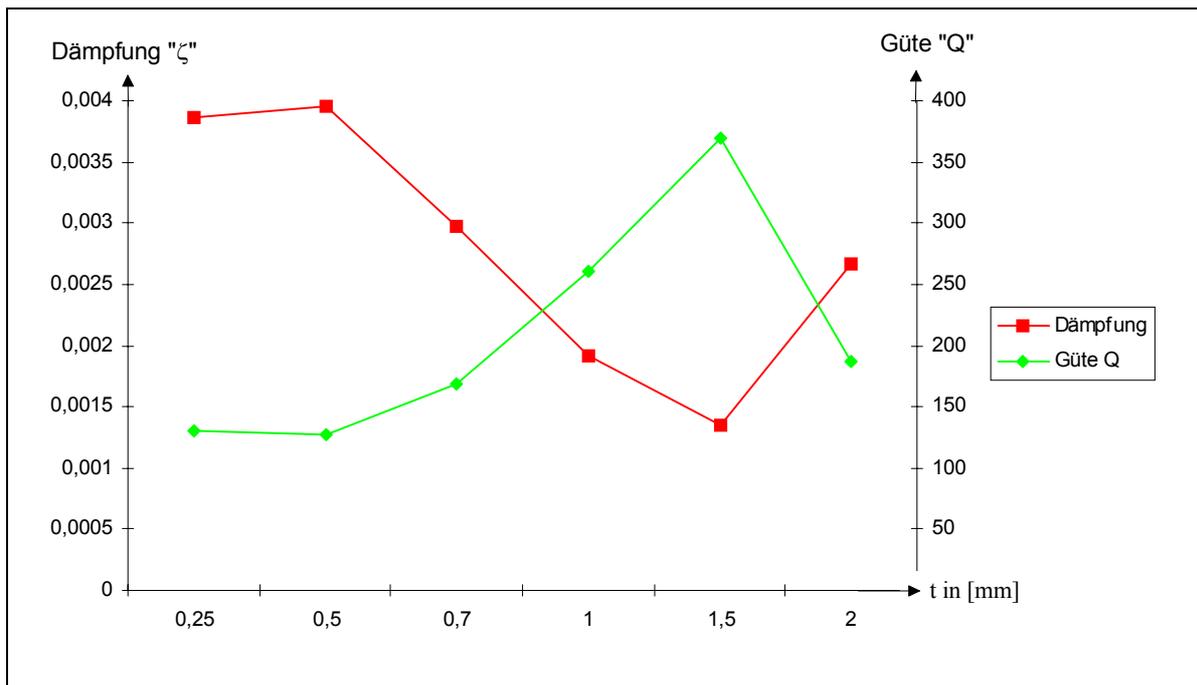


Abbildung 4-xii: Dämpfungs- und Güte-Werte für die 1. rotationssymmetrische Oberschwingung von US-Wandlern mit dem gleichen Durchmesser $d=24\text{mm}$ und unterschiedlichen Dicken $t=0,25\text{mm}$ bis $2,0\text{mm}$

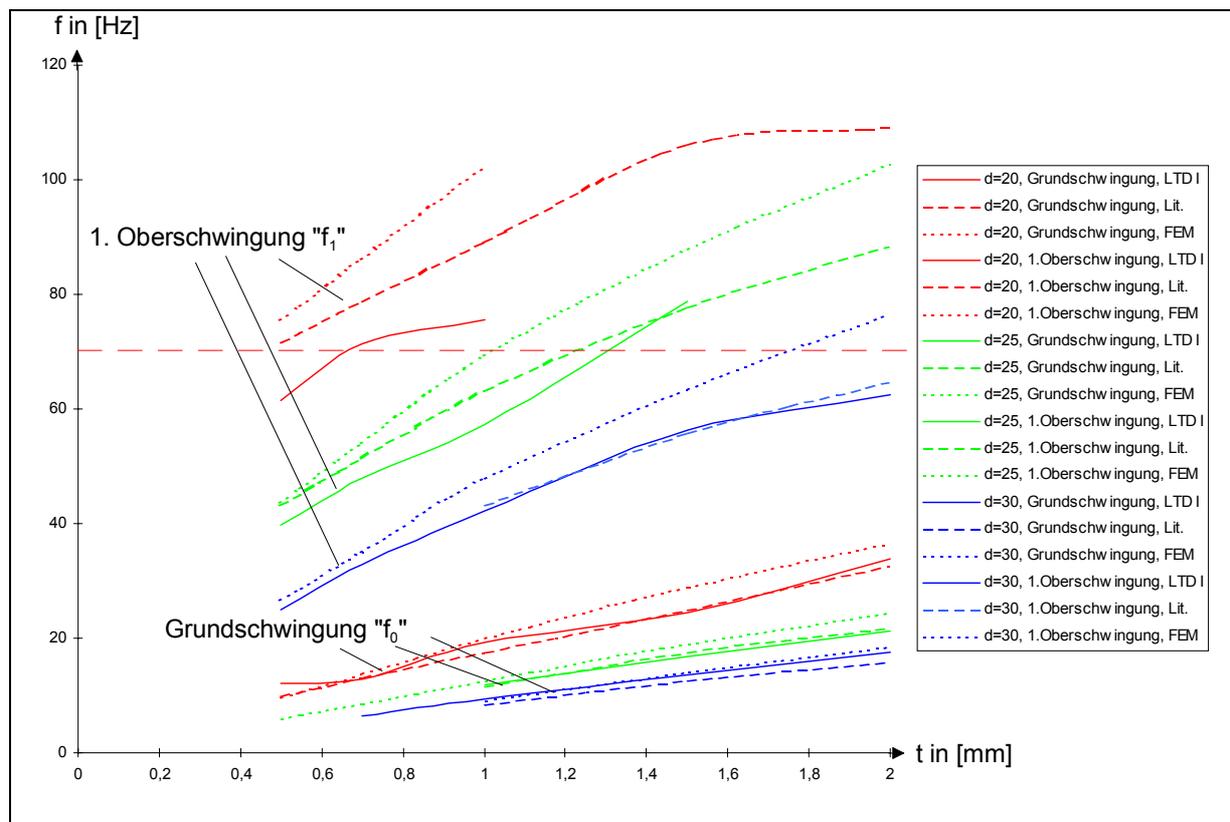
t in [mm]	Dämpfung	Güte Q
0,25	0,00386	129,79
0,5	0,00396	126,51
0,7	0,00297	168,79
1	0,00192	261,08
1,5	0,00135	369,23
2	0,00267	187,57

Anhang 4.3 Daten zu Kapitel 5: Ergebnis-Vergleich

Daten zu den Abbildung 5.1-1; 5.1.2; 5.2.3 bis 5.2.6

Abbildung 5.1-1

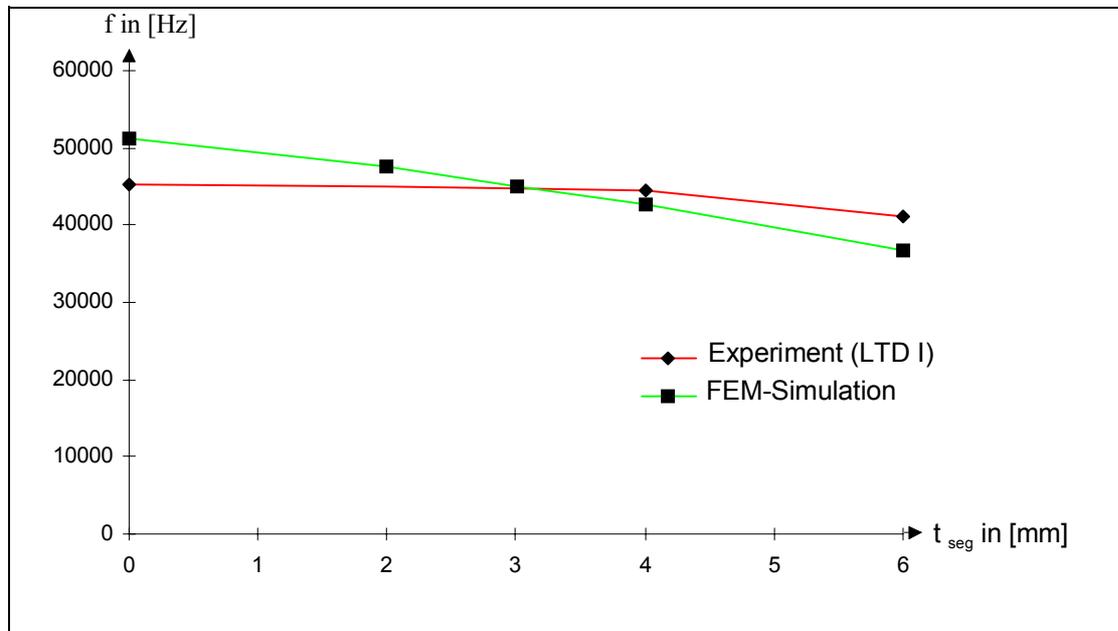
Vergleich der am LTDI gemessenen Resonanzfrequenzen der Grund- und 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Resonanzfrequenzen aus der Literatur und FEM-Simulationsrechnung als Funktion der Plattendicke



t in [mm]	d=20, Grundschw. LTD I f in [kHz]	d=20, Grundschw. , Lit. f in [kHz]	d=20, Grundschw. , FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung LTD I-Lit. in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5	12,125		10	2,944204241	17,5257732	19,88453608
0,7	12,82333333		13	6,156156156	1,377696907	8,028073824
1	19,23428571		17,5	12,76606351	9,016636958	4,298128342
1,5	24,382		25	13,26973114	2,534656714	18,22245919
2	33,76		32,5	10,89787526	3,732227488	8,042061611
t in [mm]	d=25, Grundschw. LTD I f in [kHz]	d=25, Grundschw. , Lit. f in [kHz]	d=25, Grundschw. , FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung LTD I-Lit. in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5			5,849			
0,7			8,5894			
1	11,76714286		11,67	8,11023622	0,82554328	7,92764356
1,5	16,9		17,5	7,407407407	3,550295858	11,83431953
2	21,17285714		21,7	11,42857143	2,489710546	15,71418933
t in [mm]	d=30, Grundschw. LTD I f in [kHz]	d=30, Grundschw. , Lit. f in [kHz]	d=30, Grundschw. , FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung LTD I-Lit. in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5			4			
0,7	6,368571429					
1	9,275714286		8,3	9,782608696	10,51902048	0,816263669
1,5	13,59714286		12,5	10,71428571	8,068922042	2,962807312
2	17,466		15,8	14,13043478	9,538532005	5,347532349
t in [mm]	d=20, 1.Oberschw. , LTD I f in [kHz]	d=20, 1.Obers. Lit. f in [kHz]	d=20, 1.Oberschw., FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung Lit-LTD I in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5	61,40428571		71,7	5,028080958	16,76709397	22,94907289
0,7	71,39		86,2456	8,748968063	10,23952935	20,8090769
1	75,67		102,37	12,8650972	17,88026959	35,28478922
1,5			106,25			
2			109,2			
t in [mm]	d=25, 1.Oberschw. , LTD I f in [kHz]	d=25, 1.Oberschw., Lit. f in [kHz]	d=25, 1.Oberschw., FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung Lit-LTD I in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5	39,72		43,8	1,073059361	9,088620342	10,27190332
0,7	48,01142857		54	4,944444444	6,912044751	12,47322066
1	57,3		69,3	8,614718615	10,52356021	20,94240838
1,5	78,73142857		87,8	11,27562642	1,056031354	11,51836261
2			102,7			
t in [mm]	d=30, 1.Oberschw. , LTD I f in [kHz]	d=30, 1.Oberschw., Lit. f in [kHz]	d=30, 1.Oberschw., FEM f in [kHz]	Abweichung FEM-Lit in [%]	Abweichung Lit-LTD I in [%]	Abweichung LTD I-FEM in [%]
0						
0,5	24,97166667		26,6			
0,7	32,89857143		35,08			
1	42,29571429		47,8	9,351464435	2,44536765	13,0138143
1,5	56,17285714		63,4	11,9873817	0,663767453	12,86589863
2	62,512		76,5	15,58169935	3,308164832	22,37650371

Abbildung 5.1-2:

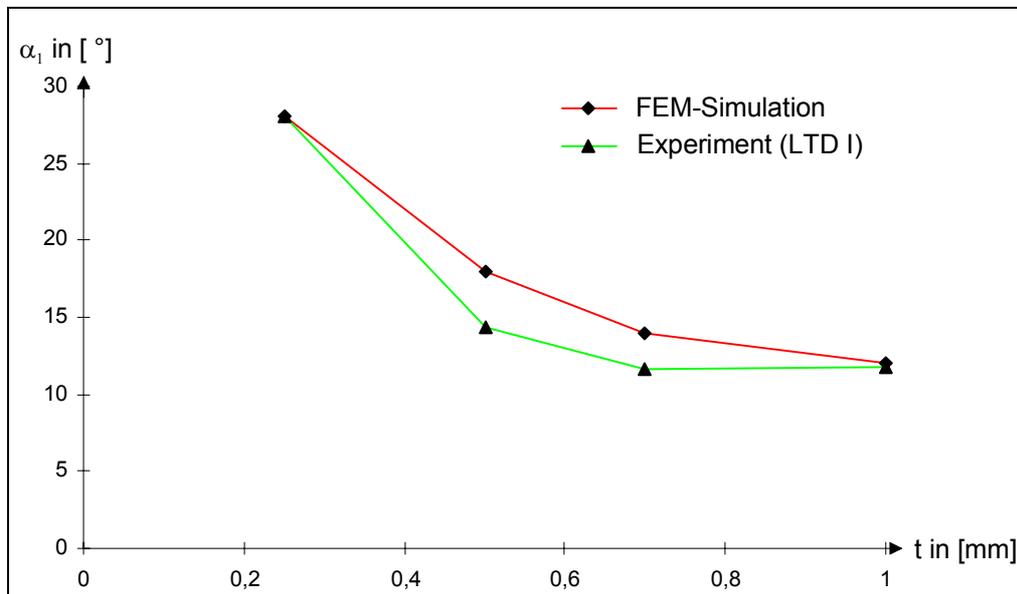
Vergleich der am LTD I gemessenen Resonanzfrequenz der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung für US-Wandler mit $d=35\text{mm}$, $t=1,5\text{mm}$ und den Ergebnissen der FEM-Simulationsrechnung als Funktion der Beschwerungsringsegmentdicken t_{seg}



Durchmesser	in [mm]	35	35	35	35	35
Segmentdicke	in [mm]	0	2	3	4	6
Experiment	1.Oberschw.in [Hz]	45150	44900	44650	44400	41010
FEM-Simulation	1.Oberschw.in [Hz]	51172	47679	44903	42596	36611
Abweichung						
Exp.-FEM in [%]		13,338	6,189	0,567	4,0631	10,727

Abbildung 5.2-3

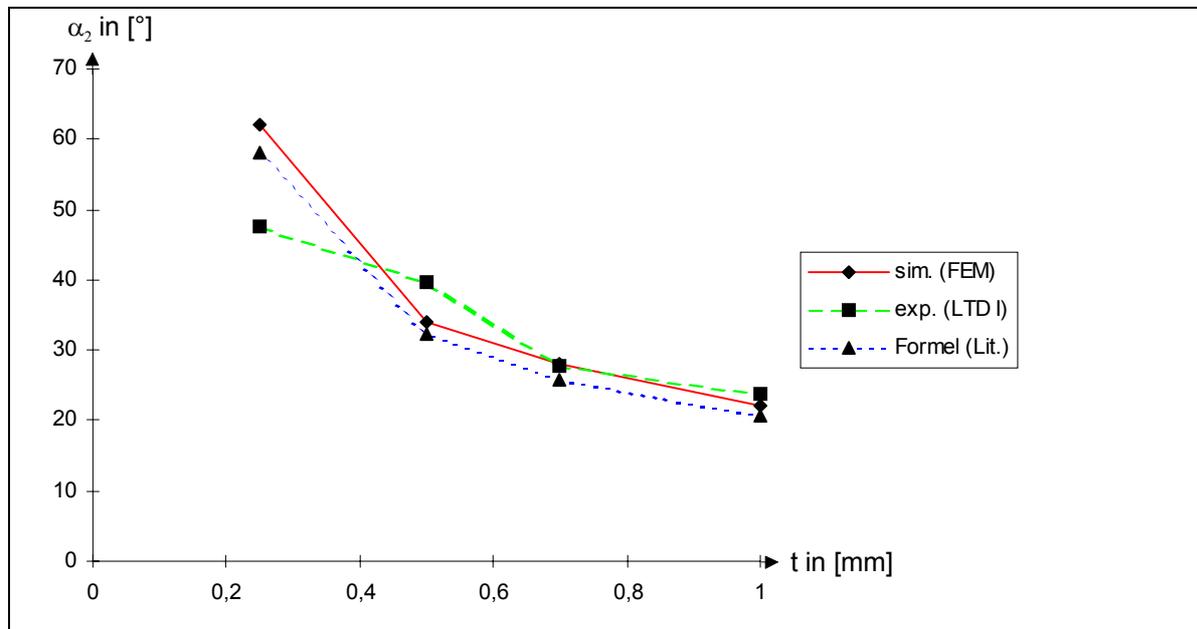
Vergleich der am LTD I gemessenen Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=24\text{mm}$ als Funktion der Plattendicken $t=0,25\text{mm}$; $0,5\text{mm}$; $0,7\text{mm}$ und $1,0\text{mm}$



		Vgl. FEM_Simulationen- Experiment			
Durchmesser	in [mm]	24	24	24	24
Dicke	in [mm]	0,25	0,5	0,7	1
FEM-Simulation	alpha1 (FEM)	28	18	14	12
Experiment	alpha1 (LTD I)	28	14,3	11,7	11,8
Abweichung					
Exp.-FEM	in [%]	0	25,874	19,6581	1,6949

Abbildung 5.2-4

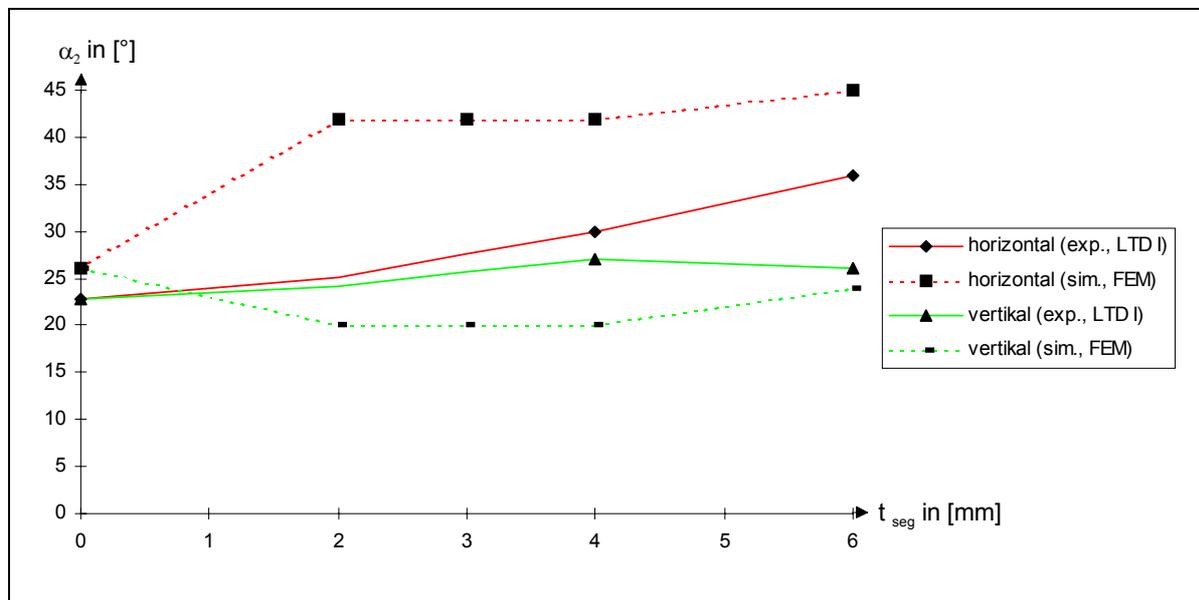
Vergleich der am LTD I gemessenen Öffnungswinkel α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation und Berechnung gemäß Gleichung (Gl. 3.6-5) für US-Wandler mit dem Durchmesser $d=24\text{mm}$ als Funktion der Dicke der Al-Schicht $t=0,25\text{mm}$; $0,5\text{mm}$; $0,7\text{mm}$ und $1,0\text{mm}$



Vgl. FEM_Simulationen- Experiment- Formel (alpha2)					
Durchmesser	24	24	24	24	
Dicke	0,25	0,5	0,7	1	
FEM-Simulation(alpha2) in [°]	sim. (FEM)	62	34	28	22
Experiment(alpha2) in [°]	exp. (LTD I)	47,5	39,6	27,9	23,8
Formel(alpha2) in [°]	Formel (Lit.)	58,18	32,44	25,9	20,7
Abweichung in [%]					
Simulation-Formel		6,16129032	4,58823529	7,5	5,90909091
Simulation-Experiment		23,3870968	16,4705882	0,35714286	8,18181818
Experiment-Formel		22,4842105	18,0808081	7,16845878	13,0252101

Abbildung 5.2-5

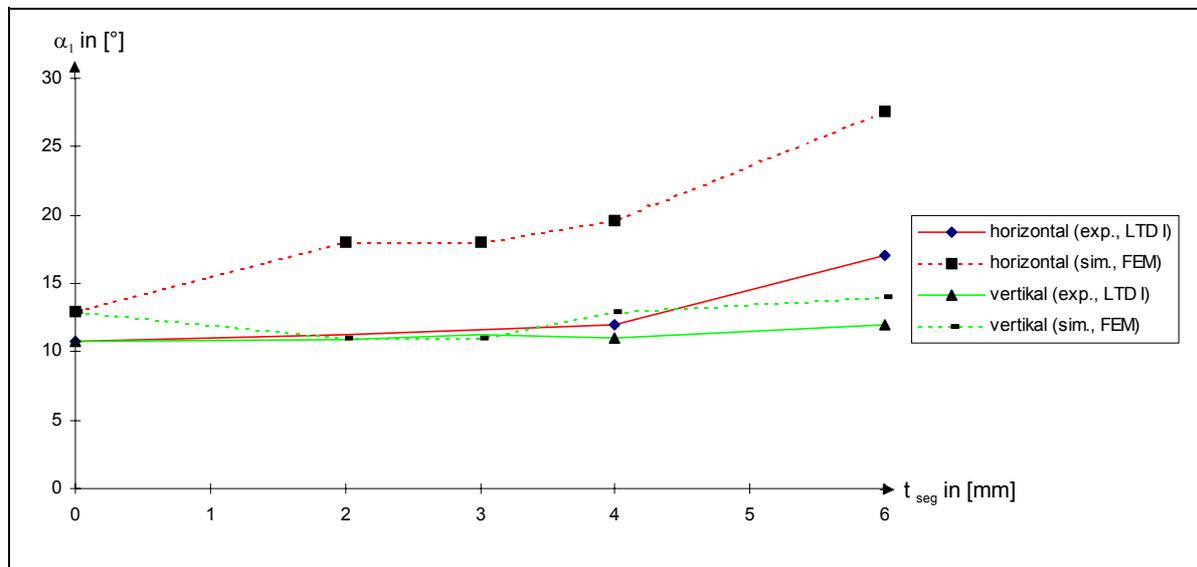
Vergleich der am LTD I gemessenen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel α_2 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwingung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=35\text{mm}$, Plattendicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Ringsegmentdicken $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; $2,0\text{mm}$; 3mm ; 4mm und 6mm



tseg in [mm]	alpha2 in [°]		alpha2 in [°]	
	horizontal (exp., LTD I)	horizontal (sim., FEM)	vertikal (exp., LTD I)	vertikal (sim., FEM)
0	22,8	26	22,8	26
2	25,2	42	24,2	20
3	27,6	42	25,6	20
4	30	42	27	20
6	36	45	26	24
Abw exp (LTDI)-Simulation(FEM) in [%] für tseg in [mm]				
6	25		7,692307692	
4	40		25,92592593	
0	14,03508772		14,03508772	

Abbildung 5.2-6

Vergleich der am LTD I gemessenen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel α_1 der 1. rotationssymmetrischen Oberschwungung mit den Ergebnissen der FEM-Simulation für US-Wandler mit einem Durchmesser $d=35\text{mm}$, Plattendicke $t=1,5\text{mm}$ als Funktion der Ringsegmentdicken $t_{\text{seg}}=0,0\text{mm}$; $2,0\text{mm}$; 3mm ; 4mm und 6mm



t_{seg} in [mm]	alpha1 in [°] horizontal (exp., LTD I)	alpha1 in [°] horizontal (sim., FEM)	alpha1 in [°] vertikal (exp., LTD I)	alpha1 in [°] vertikal (sim., FEM)
0	10,8	13	10,8	13
2	11,2	18	10,86666667	11
3	11,6	18	11,24444444	11
4	12	19,6	11	13
6	17	27,6	12	14
Abw Experiment-Simulation				
6 (%)	62,35294118		16,66666667	
4 (%)	63,33333333		18,18181818	
0 (%)	20,37037037		20,37037037	