

Thermoakustische Ultraschall-Leistungsmesser: Modellierung und Experiment

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Michael Frank Glinka

aus Braunschweig

eingereicht am: 4. 3. 2002

mündliche Prüfung am: 7. 6. 2002

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Bethe

Referent: Dir. & Prof. Dr. Reiner Reibold

Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Klenke

Berichte aus der Elektrotechnik

Michael Glinka

**Thermoakustische Ultraschall-Leistungsmesser:
Modellierung und Experiment**

Shaker Verlag
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Glinka, Michael:

Thermoakustische Ultraschall-Leistungsmesser: Modellierung und Experiment/
Michael Glinka.

Aachen : Shaker, 2002

(Berichte aus der Elektrotechnik)

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-0830-5

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0830-5

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Kurzfassung

Diese Arbeit führt theoretische und experimentelle Untersuchungen zur *Realisierung thermoakustischer Sensoren* durch. Nach einer Problemtransformation Thermodynamik \leftrightarrow Elektrodynamik werden in 152 Abbildungen und 14 Tabellen neue *thermodynamische Ersatzschaltbilder* aufgestellt und anhand gemessener Temperaturverläufe experimentell verifiziert.

Für die *physikalische Behandlung* der Ausgleichsvorgänge im Sensor¹ werden daher sowohl *Knotentemperaturen* als auch *Maschenwärmeströme* notwendig eingeführt, um so die experimentell beobachteten Mechanismen des Wärmetransports (Leitung; Strahlung; Konvektion) zu berücksichtigen. Die gefundenen Potentiallösungen der aufgestellten partiellen Differentialgleichungen zeigen wegen der Berücksichtigung der *realen* Randbedingungen andere Ergebnisse als die bisherigen *idealen, ausschließlich auf Wärmeleitung beruhenden* und als fehlerfrei angenommenen Modelle, die durch gewöhnliche Differentialgleichungen mit thermischen Randbedingungen beschrieben werden können.

Der experimentelle Teil der Arbeit wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im Labor *Ultraschall* durchgeführt. Nachdem alle Ersatzschaltbilder experimentell verifiziert worden waren, erfolgten auszugsweise Vorveröffentlichungen. In durchgeführten Temperaturmessungen wird anhand der Variation von Vergleichsquellen bestätigt, daß die absolute, thermoakustische Leistungsmessung mit den bisherigen Sensortopologien (Einschicht-, Zweischichtsystem) ohne die Anwendung von Hilfsenergie nicht fehlerfrei zu steigenden Empfindlichkeiten realisierbar ist.

Nachdem an diesen *idealen Wärmestrommessern* in einer Vorveröffentlichung gezeigt wurde, daß die bisherigen Modelle nicht die meßtechnische Realität widerspiegeln, modelliert die Arbeit alle bisherigen Sensortopologien hingegen als *Wärmestromteiler*. Für den Fall der *absoluten* Ultraschalleistungsmessung wird so der Zusammenhang zwischen *Sensorempfindlichkeit* und *Genauigkeit* beim *Wärmeübergang* erfaßt. Hierzu werden Bildungsgesetze (u.a. der inversen thermischen Admittanzmatrizen) gefunden und damit neue, eindeutige Potentiallösungen hergeleitet, wobei analytische Lösungen im Zeitbereich zusätzlich über die Laplace-Transformation erfolgen. So stellen die in dieser Arbeit hergeleiteten *thermodynamischen Ersatzschaltbilder* mit Einführung des Wärmestrom- und Temperaturteilers die allgemeine und universelle Theorie zur Erklärung aller Messungen dar, die anhand des Übergangs vom Dreischicht- zum Mehrschichtsystem mit Temperaturmessung über den wärmestromquellenfreien Schichten bereits vorveröffentlicht ist.

Um *beobachtete Mechanismen des Wärmetransports* in die Netzwerke (zur Erklärung aller gemessenen Temperaturverläufe als Lösung der beschreibenden Differentialgleichung) einzubetten, sind für verschiedene Anordnungen *analytische Funktionen* der eingeführten Zustandsgröße *spezifische Strahlungsleitfähigkeit* Λ_S in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ angegeben. Damit sind die Meßergebnisse der Linearitätsuntersuchungen bis hin zu Temperaturdifferenzen von einigen K linear modellierbar.

Analog zu den generierten *thermischen Systemen* wird das Auftreten von *Mehrfachreflexionen* durch die Analyse *akustischer Ersatzschaltbilder* als Lösung der Wellengleichung für *beliebige Erregungen* diskutiert. Mit der Synthese *akustischer Netzwerke* wird die Leistungsübertragung durch beliebige Schichtfolgen als *Lösung der Wellengleichung an planparallel begrenzten Schallausbreitungsmedien* experimentell verifiziert. An geeigneten Materialfolgen wird eine nahezu 100 %-ige Absorberanpassung durch den akustischen $\frac{1}{4}$ -*Transformator* behandelt.

¹ Dort entsteht als Wirkung die Temperaturantwort aufgrund der absorbierten Leistung (\equiv erregende Ursache).

Danksagung

Diese Arbeit entstand zur Zeit meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Rahmen des von dem Präsidenten der PTB, Herrn Prof. Dr. Göbel, initiierten Doktorandenprogramms vom 1.10.1996 bis 31.3.2000 im Fachbereich *Akustik* (Prof. Dr. R. Reibold), Fachlaboratorium für *Ultraschall* (Dr. B. Fay).

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing K. Bethe, den ich vor Beginn dieser Arbeit 'nur' aus zwei seiner Vorlesungen [1, 2] kannte: Sie haben die Arbeit stetig gefördert und sind immer zu motivierenden Diskussionen bereit gewesen. Ferner sind Sie stets für mich da gewesen, wenn ich Ihren Rat gebraucht habe. Ohne Ihre fachliche und menschliche Hilfestellung, die Sie mir oft geleistet haben, hätte ich die Dissertationsschrift nach der Anstellung in der Abteilung 1 der PTB Braunschweig nicht beenden können !

Für das mit hohem Arbeitsaufwand verbundene Interesse an meiner Dissertation danke ich allen Beteiligten der Promotionskommission: dem Vorsitzenden Herrn Prof. Dr. M. Schilling (*Institut für Elektrische Meßtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik*), den Referenten Herrn Prof. Dr. W. Klenke (*Institut für Thermodynamik*), Herrn Prof. Dr. R. Reibold (*PTB*) und Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Bethe (*Institut für Elektrische Meßtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik*). Ebenso danke ich für den schnellen und reibungslosen Ablauf des Promotionsverfahrens, insbesondere für die faire und sehr sorgfältige Doktorprüfung.

Herrn Prof. Dr. R. Reibold danke ich ferner für die vielen offenen Diskussionen und wertvollen Anregungen im späteren Verlauf der Arbeit, insbesondere nachdem die Betreuung durch Herrn Dr. B. Fay entfallen war.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Kind, ehemaliger Präsident der PTB ², der mir zu Beginn dieser Arbeit Herrn Dr.-Ing. Klonz vom PTB-Labor *Wechsel-Gleich-Transfer* als angenehmen und (nicht nur wegen [6–9]) sehr geschätzten Diskussionspartner vermittelte. Weiteren Dank in Richtung *alma mater* TU-Braunschweig möchte ich Herrn Dr.-Ing. Huhnke für weitere unterstützende Diskussionen aussprechen. Herrn Dr. P. Warnecke vom PTB-Labor *Gleichstromgrößen* danke ich für die Bereitstellung einer Klimakammer für erste Kalibrierungsversuche der Temperaturfühler. Leider kann ich mich hier für die Hilfe vieler nicht im einzelnen bedanken.

Stellvertretend danke ich im PTB-Labor *Ultraschall* den Herren Pätzold, Dipl.-Ing. Reimann, Dipl.-Ing. Molkenstruck, Lucki und Heine. Herrn Dr. B. Fay sei dafür gedankt, daß er mich ursprünglich zur Entwicklung eines *thermoakustischen Leistungsmessers* anstellte und sich neben seiner Laborleitertätigkeit auch Zeit für meine Ergebnisse nahm.

Auf privater Seite danke ich ganz besonders meinen Eltern, die mich nicht nur während der vergütungslosen Zeit zusätzlich unterstützt haben, sondern mir diese gesamte Ausbildung überhaupt erst ermöglicht haben und die, genau wie meine Oma, immer für mich da gewesen sind. Und last *but not least* danke ich meiner lieben Claudia für ihr Verständnis während der Durchführung dieser Arbeit, was besonders während der sehr schweren Phasen so hilfreich war.

² An dieser Stelle ein kurzer Dank an alle ehemalige PTB-Kollegen für die schöne Zeit in den Laboren *Meßwandler und Hochspannungstechnik*, *Explosionsgeschützte Maschinen* sowie davor *Zeit und Frequenz*. Stellvertretend für alle danke ich hier Herrn Dr.-Ing. K. Schon für die sehr angenehme und erfreuliche Zusammenarbeit und daß ich mit ihm parallel zu dieser Arbeit in *Montreal* [3] neben den Vorveröffentlichungen in *Zürich* [4] und *Berlin* [5] publizieren konnte.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	3
1.1 Zielstellung dieser Arbeit	5
2. Allgemeines Funktionsprinzip	7
2.1 Übertragungsfunktionen innerhalb der Meßkette	7
2.2 Thermoakustische Sensoren in der Literatur	8
3. Grundlagen „Ultraschall“	11
3.1 Übertragungsfunktion F_F der Wirkleistung im Schallfeld	11
3.1.1 Beispiele Nr. 1 bis Nr. 3 zur erweiterten Integrationsmethode	13
3.1.2 Beispiel Nr. 1: $F_F(f, \ \vec{r}_m\)$ für $a = b$	14
3.1.3 Beispiel Nr. 2: $F_F(f, \ \vec{r}_m\)$ für $b \ll a$	14
3.1.4 Beispiel Nr. 3: Axialer Schalldruckverlauf als $f(b, z)$	15
3.1.5 Weiterführende Literatur	15
3.2 Übertragungsfunktion F_W des Wandlers	16
3.2.1 Wandlerkalibrierung nach der Selbstreziprozität	16
3.2.2 Simulation des Senders im stationären Zustand bei harmonischer Erregung	19
3.2.3 Allgemeine Lösung der Wellengleichung bei komplexen Randbedingungen	21
3.3 Übertragungsfunktion F_T bei Impulsbetrieb	30
3.3.1 Thermoakustik mit simultaner Reziprozitätskalibrierung	30
3.3.2 Beispiel Nr. 4: Wirkleistungsübertragung im repetierend gepulsten Ultraschallfeld	31
4. Grundlagen „thermoakustischer Sensor“	33
4.1 Übertragungsfunktion F_S des Sensors	33
4.1.1 Die beschreibenden Differentialgleichungen	33
4.1.2 Partikulärlösung durch Integration der Poisson-DGL	35

4.1.3	Die Differentialgleichungen als elektrische Netzwerke	37
4.1.4	Partikularlösung unter variablen Randbedingungen	43
4.1.5	Partikularlösung durch Inversion der thermischen Leitwertmatrix	47
4.1.5.1	Berechnung von $T(z)$ bei festen Randbedingungen nach Abb. 4.2	47
4.1.5.2	Berechnung von $T(z = l_a)$ bei variablen Randbedingungen nach Abb. 4.7	48
4.1.5.3	Vergleich von Quellensatz- und Matrixmodell mit Integrationsmethode	49
4.1.5.4	Reduzierung des Rechenaufwandes	52
4.1.6	Stationäre Übertragungsfunktion F_S^{II} des Sensors im \mathbb{R}^2	52
4.1.7	Stationäre Übertragungsfunktion F_S^{III} des Sensors im \mathbb{R}^3	54
4.1.7.1	Berechnung der Leitwertmatrix	54
4.1.8	Vollständige Lösung im Frequenzbereich	57
4.1.9	Allgemeine Lösung im transienten Bereich	60
4.1.9.1	Vergleich <i>Wärmemaschenstromverfahren</i> nach Glg. (4.85) mit Literatur	65
4.1.10	Erregungsvektoren (lokale Wärmestromquellenverteilungen)	66
4.1.10.1	Akustisch langer Absorber	66
4.1.10.2	Akustisch kurzer Absorber	67
4.1.10.3	Allgemeine Lösung der Wellengleichung bei Beschallung beliebiger Schichtfolgen	68
4.2	Sensortopologien	72
4.2.1	Zweischichtsysteme	75
4.2.1.1	Absorption in einer Schicht	75
4.2.1.2	Absorption in beiden Schichten	80
4.2.2	Beispiele Nr. 5 bis Nr. 6	82
4.2.2.1	Beispiel Nr. 5: Sprungantwort der Schicht 2 (Absorber) ohne Schicht 1 (Front-Layer)	82
4.2.2.2	Beispiel Nr. 6: Sprungantwort des gesamten Zweischichtsystems (Two-layer sensor)	84
4.2.3	Single-layer sensor	90
4.2.4	Beispiele Nr. 7 bis Nr. 8 Einflüsse auf die Temperaturmessung	91
4.2.4.1	Beispiel Nr. 7: Eigenerwärmung durch den elektrisch zugeführten Meßstrom	91
4.2.4.2	Beispiel Nr. 8: Variation der komplexen Randbedingungen am Meßort	92

5. Meßverfahren	95
5.1 Meßeinrichtung	95
5.2 Versuchsaufbauten	96
5.3 Temperaturmessung	98
5.3.1 Kalibrierung der Temperaturfühler	98
5.4 Superpositionsprinzip	100
5.5 Linearitätsuntersuchungen	111
5.5.1 Variation der Amplitude	111
5.5.2 Variation der Frequenz	113
5.5.3 Linearitätsvergleich von Thermoakustik und Reziprozität	115
5.6 Relativer Vergleich	116
5.7 Systemgrenzen	119
5.7.1 Vergleich Impulsbetrieb mit Dauerschall	121
5.7.2 <i>Turn-down effect</i>	127
5.7.3 Thermodynamische Ausgleichsvorgänge	133
5.7.4 Stationärer Gleichgewichtszustand	134
5.7.5 Charakteristische Sendeempfindlichkeit	135
5.7.6 Modellverifizierung mittels digitaler Temperaturregelung	136
5.7.7 Variation der Absorberlänge	137
6. Ausblick	141
7. Zusammenfassung	145
Anhang	151
A. Mehrdimensionale Diskretisierung	153
A.1 Standardindizierung im \mathbb{R}^2	153
A.2 Verringerung der Bandbreite	154
A.3 Koeffizientenbildung im \mathbb{R}^3	154
B. Definition der spezifischen Strahlungsleitfähigkeit	157
B.1 Axiale Strahlung $G'_{\text{th},V} = G'_{\text{th},z}$	157

B.2 Radiale Strahlung $G'_{\text{th},V} = G'_{\text{th},r}$	158
C. <i>Temperaturausgleich durch Wärmeausbreitung</i>	159
C.1 Anpassen der Konstanten für Abb. 4.36 b), c)	159
C.2 Temperatur $T(z)$ über dem <i>Front-Layer</i> in Abb. 4.36 b), c)	160
D. <i>Realer Zweischichtsensor</i>	161
D.1 Wärmefluß im <i>realen Zweischichtsensor</i>	161
E. <i>Steigerung der Schalldurchlässigkeit</i>	163
E.1 Ideale Absorberankopplung	163
E.2 Reale Absorberankopplung	163
F. <i>Leistungsrückfluß in den Sendewandler</i>	165
G. <i>Theoretischer Hintergrund zu der beobachteten Interferenzerscheinung</i>	167
H. <i>Erstellte Programme</i>	169

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Prinzip der Schallstrahlungskraftmethode	4
2.1	Blockschaltbild der gesamten Übertragungskette	7
2.2	Akustische Leistungsmessung	8
2.3	Aufbau des aus hochreinem Kupfer realisierten Ultraschall-Leistungsmessers	8
2.4	Thermoakustisches Meßprinzip in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zu Beginn dieser Arbeit: a) Meßeinrichtung b) Einseitiger Wärmestrom aufgrund Wärmeleitung im Absorber.	9
2.5	Energiebilanz eines Rührkessels	10
3.1	Übertragung akustischer Wirkleistung von der Fläche A_0 nach A_E	11
3.2	Diskretisierung der Empfängeroberfläche A_E zur erweiterten Integration	12
3.3	Relative Druckverläufe bei den normierten (Nahfeld-) Weglängen a) $s = 0,5$ und b) $s = 1$	13
3.4	Darstellung der Übertragungsfunktion $F_F(f)$ über den Parameter $\ \vec{r}_m\ $	14
3.5	Übertragungsfunktion F_F bei radialer Verschiebung eines dünnen Sensors.	14
3.6	Druckverlauf bei axialer Verschiebung z des Sensors mit Parameter b	15
3.7	Prinzip der Wandlerkalibrierung nach der Selbstreziprozität	16
3.8	Leistungsfluß am reziproken Wandler bei Sender- und Empfängerbetrieb	17
3.9	a) <i>Schaltung zur Reziprozitätskalibrierung</i> b) benutzte Größen	18
3.10	Vereinfachtes <i>Sendermodell</i>	19
3.11	Spannung und Ströme am vereinfachten <i>Sendermodell</i> nach Betrag a) und Phase b)	19
3.12	Leistungsaufnahme und Leistungsfaktor des vereinfachten <i>Sendermodells</i>	20
3.13	Vereinfachtes Sendermodell als Wandler \underline{Y}_S an verlustloser Leitung	21
3.14	Spannungserregung des Wandlers \underline{Y}_S über verlustlose Leitung mit $l/\lambda \approx 16,5^{-1}$	22
3.15	Einschalten einer Gleichspannung: a) $u_G(t)$, $u_S(t)$, b) $u_S(t) \cdot i_{G_0}(t)$	23
3.16	Stromerregung des Wandlers \underline{Y}_S über verlustlose Leitung mit $l/\lambda \approx 16,5^{-1}$	24

3.17	Stromerregung des Wandlers \underline{Y}_S über verlustlose Leitung mit $l/\lambda \approx 16.5^{-1}$ bei Anpassung durch $R_G = Z_0$	25
3.18	a) Momentanleistung $P(t) = f(R_G)$ für $\hat{U}_G = 10$ V b) Momentanleistung $P(t) = f(R_G)$ für $\hat{U}_S = 10$ V	26
3.19	a) schwingungsfreie Spannungen und Ströme b) beim Einschalten einer Gleichspannung	27
3.20	a) $P(t)$ aus Abb. 3.19. b) Erregung der Abb. a) mit $u_G(t) = 10$ V $\sin(2\pi \cdot 7.23$ MHz $\cdot t)$	28
3.21	a) Mittelwertbildung b) Übergang <i>lange</i> \rightarrow <i>kurze</i> Leitung (Schicht 2 aus Abb. 3.13)	29
3.22	Messung repetierend (periodisch anharmonisch) angeregter Echofolgen $u_E(t)$	30
3.23	Übertragbare Wirkleistung im repetierend gepulsten Ultraschallfeld als Produkt der Übertragungsfunktionen $F_F(f) \cdot F_T(f)$	32
4.1	Der <i>thermoakustische Effekt</i> in integraler Form im \mathbb{R}^3	33
4.2	Zylindrisch verlustloser, <i>idealer Wärmestromleiter</i> (elektrische Analogie: <i>Supraleiter</i>)	36
4.3	Topologie zur Darstellung der <i>Fourier'schen Wärmeleitungs-DGL</i> im \mathbb{R}^1	38
4.4	Topologie zur Darstellung der <i>Poisson-DGL</i> im \mathbb{R}^1 mit $G'_{th,V} \equiv 0$ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	40
4.5	Topologie zur Darstellung des Wärmetransports im \mathbb{R}^3 mit $dG_{th,V} \equiv 0$ W/K	41
4.6	Darstellung des Absorbers im \mathbb{R}^1 als Netzwerk	43
4.7	\mathbb{R}^1 -Netzwerk zum Finden der Temperatur $T(z)$ bei beidseitig variablen Randbedingungen	44
4.8	Definition des Gültigkeitsbereiches: Einströmung auf einen Absorber im (ohne Hilfsenergie) <i>nicht realisierbaren Fall</i> $\{R_{S,1} \wedge R_{S,2}\} = \infty$	46
4.9	Vergleich: <i>Quellensatzmodell</i> T_1 und <i>Integrationsmethode</i> T_E	50
4.10	Differenz zwischen Kurve (T_1) und (T_E) aus Abb. 4.9	50
4.11	Relative Abweichung von $T_1(z)$ bezogen auf $T_E(z)$ aus Abb. 4.9	51
4.12	Vergleich: <i>Matrixmodell</i> T_Y und <i>Integrationsmethode</i> T_E	51
4.13	Zweidimensionale Diskretisierung der DGL	52
4.14	Zweidimensionale Entwicklung der DGL als Netzwerk	53
4.15	Entwicklung der DGL mit zu Tab. A.1 verringerter Bandbreite	54
4.16	Dreidimensionale Diskretisierung der DGL bei $z = \text{const.}$	55
4.17	Dreidimensionale Entwicklung der DGL als 1. Netzwerk bei $z = \frac{1}{2}\Delta z$	55
4.18	Dreidimensionale Entwicklung der DGL als m -tes Netzwerk bei $z = (m - \frac{1}{2})\Delta z$	56
4.19	Dreidimensionale Entwicklung der DGL als n_z -tes Netzwerk bei $z = (n_z - \frac{1}{2})\Delta z$	56

4.20	Sensor mit <i>idealen</i> Wärmekapazitäten C_{th} (Quer-Suszeptanzen) im Zeitbereich	57
4.21	<i>Heaviside</i> -Funktion $\sigma(t)$	57
4.22	\mathfrak{L} -Transformation der thermodynamischen Größen \dot{Q} und $T_{C_{\text{th}}}$	58
4.23	Absolute Bestimmung der gesamten absorbierten Leistung	60
4.24	Netzwerk ($n=1$) mit $\underline{Y}_{S,1,2} \in \mathbb{R}$ in der zeitlichen Diskretisierung bei $t = k \cdot \Delta t$ im \mathbb{R}^1	61
4.25	Netzwerk aus n -Maschen mit zwei Randbedingungen $\in \mathbb{C}$ bei $t = k \cdot \Delta t$ im \mathbb{R}^1	62
4.26	Gestelltes Potentialproblem	65
4.27	Potentiallösungen	65
4.28	Akustisch langer Absorber: $F_{S,1}^{\#}(z = l_a, f)$ mit $l_a = [0 \cdots 30]$ mm in 1 mm Schritten. Abhängig von der Leistungsdämpfung sind Bereiche dargestellt, in denen die Bedingung für den akustisch langen Absorber <i>nicht erfüllt</i> (grau), <i>teilweise erfüllt</i> (rot, grün) und <i>nahezu erfüllt</i> sind (blau).	67
4.29	Wärmestrombelag $\dot{Q}'_1(z_G)$ über dem Gesamtweg z_G bei Mehrfachreflexionen	67
4.30	Verteilung der Wärmequellen $\dot{Q}'(z)$ im Absorber bei $P_E(f = 5 \text{ MHz}) = 10 \text{ mW}$	68
4.31	Ersatzschaltbild für die <i>Beschallung zweier verlustloser Schichten</i>	69
4.32	Ersatzschaltbild <i>Leistungsübertragung bei Beschallung dreier Schichten</i>	69
4.33	Transmission $D_{1 \rightarrow 3}$ nach Abb. 4.32 und Bergmann a) akustisch lang b) akustisch kurz	70
4.34	a) $D_{1 \rightarrow 3}$ zum Vergleich mit Abb. 4.33 für $\underline{Z}_2 \in \mathbb{C}$ b) akustisches Netzwerk zur Berechnung des Transmissionsgrades $D_{1 \rightarrow 2}$	71
4.35	Universelles \mathfrak{L} -transformiertes thermodynamisches Ersatzschaltbild im $\mathbb{R}^1 \cdots \mathbb{R}^3$	73
4.36	a) Wärmestromteiler b) Realisierung eines Wärmestromteilers mit (elektrisch leitfähigem Absorber zur direkten) Umsetzung von elektrischer Vergleichsleistung \dot{Q}_{mess} (<i>Substitutions- verfahren</i>) c) Thermodynamisches Ersatzschaltbild zur Modellierung des Strömungsfeldes aus b)	73
4.37	a) <i>Idealer Zwischschichtsensor</i> b) <i>Idealer Thermokonverter</i> c) Sensortopologien	74
4.38	Universelles thermodynamisches Ersatzschaltbild angewandt auf einen nicht realisierbaren <i>idealen Zwischschichtsensor</i> im \mathbb{R}^1	75
4.39	\mathfrak{L} -transformiertes, thermodynamisches Ersatzschaltbild des <i>Ideal two-layer sensors</i> im \mathbb{R}^1	76
4.40	$T(t, z)$ am <i>akustisch langen</i> Absorberstab	83
4.41	Akustisch langes Optimum: hier mit $L_{\text{opt}} = -30 \text{ dB}$	84
4.42	Abbruch bei hinreichender Genauigkeit für $L_{\text{opt}} = -30 \text{ dB}$	85
4.43	minimale Länge $l_{a,-30\text{dB},\text{min}}(f)$ eines Plexiglasabsorbers	86
4.44	minimale Wärmekapazität $C_{\text{th},2,-30\text{dB},\text{min}}(f, b)$ eines Plexiglasabsorbers	86

4.45	maximaler Wärmeleitwert $G_{\text{th},2,-30\text{dB,max}}(f, b)$ eines Plexiglasabsorbers	87
4.46	Übertragungsverhalten eines Plexiglasabsorbers	87
4.47	Sprungantworten $T_M(t, G_{\text{th},1})$ eines <i>Ideal two-layer sensors</i> mit $L_{\text{opt}} = 30$ dB	88
4.48	Schema eines <i>Single-layer sensors</i>	90
4.49	Thermodynamisches Ersatzschaltbild des <i>Single-layer sensors</i> mit komplexen Randbedingungen und elektrischem Meßstrom \dot{Q}_{el}	91
4.50	Temperaturverlauf $T(t, z = l_a)$ bei Variation $\Re\{\underline{Z}_{S,2}\}$ für $\Im\{\underline{Z}_{S,2}\} = 0$	92
4.51	a) Gleichgewichtstemperatur $T(f, z = l_a, t \rightarrow \infty)$ und Zeitkonstante $\tau(f, z = l_a)$ bei Variation $\Re\{\underline{Z}_{S,2}\}$ für $\Im\{\underline{Z}_{S,2}\} = 0$ b) Temperaturverlauf $T(z = l_a, t)$ bei Variation $C_p(z = l_a)$	93
4.52	Gleichgewichtstemperatur $T(z, t \rightarrow \infty)$ über dem Absorber bei beidseitig geerdeten Stirnflächen a) Übergang <i>akustisch kurz</i> \mapsto <i>lang</i> $f = 1 \cdots 6$ MHz b) <i>akustisch lang</i> $f = 7 \cdots 20$ MHz	94
5.1	Prinzipskizze Meßeinrichtung (Beispiel: Temperaturmessung am Absorber)	95
5.2	Absorber an keilförmiger Vorlaufstrecke im Abstand einer Nahfeldlänge	96
5.3	Anordnung der Temperaturfühler innerhalb des Absorbers 2	96
5.4	Unterschiedliche thermische Abschirmungsstrategien a) Keil mit Kupferumhüllung im Wasserbad b) Halbzylinder mit Styroporumhüllung	97
5.5	Vorlaufstrecke als angespitzter Duralstab	97
5.6	Stahlzylinder mit Kupferhülle a) im Wasserbad b) langer Stab mit Kupferumhüllung in Luft	97
5.7	Kalibrierung der Temperaturfühler im thermischen Gleichgewicht	98
5.8	Angewandte <i>nicht-lineare Approximation</i> der Meßwerte	99
5.9	Erzielter Gleichlauf der Temperaturfühler	99
5.10	Superpositionsprinzip bei verschiedenen Erregungen $\{\dot{Q}_{\text{US}}, \dot{Q}_{\text{mess}}\}$	100
5.11	Eigenerwärmung der Temperaturfühler	101
5.12	Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Quellenverteilungen a), b)	102
5.13	Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Quellenverteilungen c), d)	103
5.14	Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Quellenverteilungen e), f)	104
5.15	Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Quellenverteilungen g), h)	105
5.16	Messung am Two-Layer-Sensor mit um den Absorber gewickelter Kupferfolie	106
5.17	Aufbau zum direkten Nachweis der Temperaturstrahlung	106
5.18	Direkter Nachweis der Temperaturstrahlung	107

5.19	Variation der Erregung: a) Sprungantworten b) Stationäre Temperaturantworten	108
5.20	Thermodynamisches Netzwerkelement <i>grauer Temperaturstrahler</i>	109
5.21	Kennlinien des Netzwerkelementes aus Abb. 5.20	110
5.22	Variation der Amplitude in Messung a) und Rechnung b)	111
5.23	Gemessene stationäre Gleichgewichtstemperaturen als Funktion der Leistung	112
5.24	Variation der Amplitude und Frequenz in Messung a) und Rechnung b)	113
5.25	Grob abgetastete Zeitverläufe bei verschiedenen Wandlern und Frequenzen	114
5.26	Vergleich von Ein- und Ausschaltvorgängen	115
5.27	Reziprozität und Thermoakustik bei Variation der Amplitude	115
5.28	Vergleich Thermoakustik und Reziprozität	116
5.29	Erregung und Antwort als Funktion der Frequenz	117
5.30	Empfindlichkeit $R_E(f)$	118
5.31	a) Meßanordnung b) Querschnitt durch den Absorberfuß bei $z = 0$	119
5.32	Sprungantwort bei Abschirmung gegen äußere Störeinflüsse	120
5.33	Impuls- und Dauerschallbetrieb am langen Stab bei verschiedenen Effektivwerten	121
5.34	Impuls- und Dauerschallbetrieb mit gleichem Effektivwert an planparalleler Platte	121
5.35	Interferenzen bei Dauerschall	122
5.36	Transmissionsgrade D_I , D_{II} und D_{III}	123
5.37	Temperaturantworten in Theorie und Experiment	124
5.38	Transmissionsgrade der Impedanzfolgen a) $Z_1 > Z_2 > Z_3$ b) $Z_3 > Z_1 > Z_2$	124
5.39	a) Leichte Fehlanpassung mit $Z_1 \approx Z_2 \neq Z_3$ b) Interferenzlos für $Z_1 \equiv Z_2 \neq Z_3$	125
5.40	Beschallung dünner Schichten mit $T_B > T_L$ am Keil	125
5.41	Temperaturdifferenzen nach Durchschallung von dünnen Schichten am Keil a) nahezu interferenzlos b) mit Interferenzen	126
5.42	a) Messung nach Rinker und Fay b) Rechnung mit <i>Wärmemaschenstromverfahren</i> nach Glg. (4.93) für $R_{S,2} \rightarrow \infty$	127
5.43	a) Frequenzen b) Temperaturen $T_{1,2}$ als Funktion der Zeit	128
5.44	a) Berechnetes und gemessenes Spektrum b) mit Tiefpaßfilterung	129
5.45	a) Vergrößerter Zoom-Bereich aus Abb. 5.44 b). b) $T_1(t) - T_2(t)$ aus Abb. 5.2 b)	130
5.46	a) $T_1(t, z = l_a) - T_2(t, z = 0)$ b) $T_1(t, z = l_a) - T_2(t, z = 1 \cdot \Delta l)$	131
5.47	a) $T_1(t, z = l_a) - T_2(t, z = 2 \cdot \Delta l)$ b) $T_1(t, z = l_a) - T_2(t, z = 3 \cdot \Delta l)$	132

5.48	Temperaturmessung a) bei $\Delta T(z = \frac{L}{2}, t)$ und unterschiedlich thermisch geerdeten Stirnflächen $A_{S,1,2}$ b) bei $\Delta T(z = l_a, t)$ und nahezu thermisch geerdeten Oberflächen $A_{M,S,1,2}$	133
5.49	Vergleich berechneter und gemessener Gleichgewichtstemperaturen $\Delta T_{GI}(f)$	134
5.50	Vergleich berechneter und gemessener Sendempfindlichkeiten über der Frequenz	135
5.51	Temperaturverläufe a) Messung b) Rechnung	136
5.52	Thermodynamisches Ersatzschaltbild zur Simulation der Potentialverläufe aus Abb. 5.51 a) 137	
5.53	Vergleich von Messung und Rechnung bei Dauerschall am Plexiglasabsorber ($b = 5$ mm) bei Variation der Absorberlänge l_a	138
5.54	Normierung der gemessenen Temperaturen aus Abb. 5.53	139
6.1	Kompensation des Fehlerwärmestroms $\dot{Q}_{S,2}$ im thermodynamischen Ersatzschaltbild	141
6.2	Grenzfall <i>Idealer Thermokonverter</i> mit identischer Wärmequellenverteilung zwischen Ultraschall- und Meßwärmestrom $\dot{Q}_{US}(\vec{r}) = \dot{Q}_{mess}(\vec{r})$	141
6.3	<i>Realer Thermokonverter</i> mit unterschiedlicher Wärmequellenverteilung zwischen Ultraschall- und Meßwärmestrom $\dot{Q}_{US}(\vec{r}_1) \neq \dot{Q}_{mess}(\vec{r}_2)$	142
6.4	<i>Thermoakustischer Sensor</i> als <i>Thermokonverter</i> mit Temperaturfühlerarray	143
6.5	Thermodynamisches Ersatzschaltbild im \mathbb{R}^2	144
B.1	Radialer Wärmestrom im Mehrschichtsystem (hier zylindrisch, später kugelig)	158
D.1	\mathcal{L} -transformiertes thermodynamisches Ersatzschaltbild des <i>realen Zweischichtensors</i>	161
E.1	Transmissionsgrade der Impedanzfolge $Z_1 > Z_2 > Z_3$	163
E.2	Transmissionsgrade der Impedanzfolge $Z_1 > Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} > Z_3$	164
F.1	Sendespannung $U_S(f)$ und Sendestrom I_S an der Referenz <i>akustisch langer Keil</i> (mit Wandler an Position 1)	165
F.2	Sendestrom I_S und Spannung U_S am <i>akustisch kurzen Keil</i> (quer durchschallt)	165
F.3	Sendestrom I_S und Spannung U_S am <i>Halbzylinder</i>	166
F.4	Sendestrom I_S und Spannung U_S am <i>Zylinder aus Dural</i>	166
F.5	Sendestrom I_S und Spannung U_S am <i>spitzen Stab aus Dural</i> mit absorbierender Schicht am spitzen Ende (Bereich I nach Abb. 5.5)	166
H.1	Ausschnitt aus der erstellten Bedienoberfläche	169
H.2	Vergleich der Dämpfung zwischen dem 1. und 2. Echo bei Einsatz verschiedener Koppelmittel (zusätzlich dargestellt sind Mittelwert und Standardabweichung jeder Versuchsreihe) 170	
H.3	Datenfußdiagramm	170

TABELLENVERZEICHNIS

0.1	Konstanten	XIII
0.2	Spezifische Materialkonstanten	XIII
0.3	Häufig verwendete Formelzeichen a)	XIII
0.4	Häufig verwendete Formelzeichen b)	XIV
0.5	Häufig benutzte mathematische Bezeichner	XV
0.6	Verwendete Abkürzungen	XV
3.1	Material- und Geometrieparameter an planparalleler Platte <i>ST37-K</i>	32
4.1	Problemtransformation: Thermodynamik \leftrightarrow Elektrodynamik	37
4.2	Materialeigenschaften Medium 1 <i>ST37-K</i> und Medium 2 <i>Plexiglas</i>	66
4.3	Eigenschaften der Anschlußdrähte	91
5.1	Variation des Erregungsvektors $\dot{Q}_{1,2}$	105
A.1	Koeffizientenbildung im \mathbb{R}^2 bei Knotenindizierung nach Abb. 4.14	153
A.2	Koeffizientenbildung im \mathbb{R}^2 bei Knotenindizierung nach Abb. 4.15	154
A.3	Koeffizientenbildung im \mathbb{R}^3 bei Knotenindizierung nach den Abb. 4.17-4.19	155