

Ableitung von Raumtemperaturverteilungen aus Schallreflexionsmessungen

Masterarbeit



Technische Universität Berlin
Fakultät I - Geisteswissenschaften
Institut für Sprache und Kommunikation
Fachgebiet Audiokommunikation

vorgelegt von: Marcus Bleisteiner, B.Eng., cand. M.Sc.



Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl (TU Berlin)

Betreuer: Dr. Armin Raabe (Universität Leipzig)

© 2014

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den

MARCUS BLEISTEINER

Danksagung

Ich möchte mich zuerst bei Herrn Dr. Armin Raabe und Frau Dr. Manuela Barth vom Leipziger Institut für Meteorologie für die große Unterstützung und fachliche Expertise bedanken.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Stefan Weinzierl für die Ermöglichung dieser Masterarbeit.

Desweiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Holstein als Ansprechpartner und der Firma Sonotec GmbH für den Zugang zu der Räumlichkeit.

Ich bin allen meinen Freundinnen und Freunden überaus dankbar, dass sie so wundervoll sind, insbesondere Josi und Jörg.

Der größte Dank gilt schließlich meiner Familie und vor allem meinen Eltern, die mich schon mein ganzes Leben lang unterstützen und fördern.

Zusammenfassung

Aus akustischen Laufzeitmessungen auf einer Vielzahl von bekannten Schallstrecken können mit tomografischen Verfahren Raumtemperaturverteilungen abgeleitet werden. In der vorliegenden Masterarbeit wird eine experimentelle Messmethode beschrieben, die mit lediglich einem spezifischen Lautsprecher und einem Mikrofon eine akustische Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Temperaturverteilungen in Innenräumen ermöglicht. Hierfür werden Schallstrecken und dazugehörige Schalllaufzeiten genutzt, die sich durch Reflexionen an Raumbegrenzungsflächen ergeben. Die Theorie der geometrischen Raumakustik wird verwendet, um die Schallstrecken zu modellieren. Da in einer Raumimpulsantwort die Laufzeiten sämtlicher Reflexionen im Raum enthalten sind, können daraus die gesuchten Ankunftszeiten ermittelt werden. Die Variabilität der raumklimatologischen Größen Temperatur und Strömung erzeugt zeitliche Varianzen des Ausbreitungsmediums, die durch eine Veränderung der Raumimpulsantwort abgebildet werden. Eine Beispielmessung zeigt, dass mit der vorgestellten Methode Temperaturänderungen, räumlich aufgelöst, unter der Abwesenheit von Raumluftströmungen, untersucht werden können.

Abstract

By applying propagation time measurements on a multitude of known sound paths tomographic methods can be used to estimate room temperature distributions. In this thesis an experimental method of measurement is being presented which enables a spatially differentiated acquisition of the temporal temperature development in interior rooms, using only one specific speaker and one microphone. Therefore sound paths and the associated sound propagation times which emerge due to reflections from the bounding surfaces of a room are being used. The theory of geometric room acoustics is applied to compute the sound paths. Since the propagation times of all possible reflections are included in one room impulse response the latter can be used to get the wanted sound arrival times. The variability of the room climate elements temperature and air flow creates temporal variances of the propagation medium, which are being displayed through changes in the room impulse response. An exemplary metering shows that the method presented is capable of analyzing temperature changes in a spatially differentiated manner in the absence of indoor airflow.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Schallausbreitung in Gasen	3
2.1 Thermodynamik	3
2.2 Schallfeld	4
2.3 Schallabstrahlung und Dämpfung	6
2.4 Schallgeschwindigkeit	8
2.4.1 Temperaturabhängigkeit	8
2.4.2 Feuchteabhängigkeit	8
2.4.3 Strömungsabhängigkeit	9
2.5 Reflexion und Absorption an Raumbegrenzungsflächen	11
3 Grundlagen zur Messmethode	13
3.1 Fouriertransformation	13
3.2 Übertragungssystem, Impulsantwort und Übertragungsfunktion . . .	14
3.3 Korrelationsmesstechnik	14
3.4 Maximalfolgen	15
3.5 Zeitvarianzen	17
3.5.1 Inter- und intraperiodische Effekte	17
3.5.2 Time-Stretching-Modell	17
3.6 Reflexionserkennung durch statistische Signalaufbereitung	19
3.6.1 Peak Picking	19
3.6.2 Kurtosis-Analyse	19
3.7 Spiegelschallquellenverfahren	21
3.8 Akustische Laufzeittomografie	23
4 Messtechnik	26
4.1 Schallquelle	26
4.1.1 Anforderungen und Bauweise	26
4.1.2 Der Lautsprecher	28
4.1.3 Akustische Eigenschaften	29
4.2 DAQ- und sonstige Hardware	32
4.3 Theoretische Messgenauigkeit	33
4.4 Software	34
4.5 Messkette	35
5 Experimentelle Messmethode	37
5.1 Anforderungen	37

5.2	Umsetzung und Implementierung	37
5.2.1	Konventionen	38
5.2.2	Programmablauf	39
5.2.3	Signalerzeugung, -ausgabe und -aufnahme	41
5.2.4	Nullphasiges Hochpassfilter	41
5.2.5	Korrelation mit Referenzsignal	42
5.2.6	SNR	43
5.2.7	Spiegelschallquellenmodell	43
5.2.8	Bestimmung absoluter Laufzeiten	45
5.2.9	Reflexionserkennung, Peak Picking und Laufzeitermittlung	46
5.2.10	Absolute und relative, akustisch virtuelle Temperatur	47
5.2.11	Laufzeitkorrektur	48
5.2.12	Tomografie	49
5.2.13	Timing	50
6	Messverfahren	51
6.1	Vorbereitung	51
6.2	Ausführung	52
6.3	Nachbereitung	53
7	Beispielmessung	55
7.1	Versuchsumgebung und Aufbau	55
7.2	Ablauf	59
7.3	Ergebnisse und Diskussion	59
7.3.1	Referenz-Temperaturmessung	60
7.3.2	Temperaturverläufe	60
7.3.3	Temperaturverteilungen	63
7.3.4	Einfluss der Konvektionsströmung	64
8	Fazit	67
8.1	Zusammenfassung	67
8.2	Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	71
A	Anhang	i
A.1	Matlab-Code	i
A.1.1	DAQrun.m	i
A.1.2	hpZeroPhase.m	viii
A.1.3	imageModel.m	ix
A.1.4	kurtosis.m	xii
A.1.5	runningTimePlot.m	xiii
A.1.6	interactivePlot.m	xiv
A.1.7	cellSoundRays.m	xv
A.2	DAQinit.m: Parameter der Beispielmessung	xxi
A.3	Datenblätter	xxiii
A.4	Vom Autor verwendete Software	xxix
A.5	Inhalt Datenträger	xxx

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

AKF	Autokorrelationsfunktion
DUT	Device Under Test
IIR	Infinite Impulse Response
IR	Impulse Response
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
LIM	Leipziger Institut für Meteorologie
LS	Lautsprecher
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MLS	Maximum Length Sequence
MS	Mean Square
PHAT	Phase Transform
RIR	Room Impulse Response
SEO	Schallentstehungsort
SIRT	Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
SNR	Signal to Noise Ratio
SSQ	Spiegelschallquelle
TSP	Thiele/Small-Parameter
XOR	Exklusiv-Oder

Symbolverzeichnis

α	Dämpfungsfaktor
α_K	Wärmeübergangskoeffizient
β	Verlustgrad
c_0	Schallgeschwindigkeit für $p_W = 0$ und $\vartheta = 0$ [m/s]
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/kg K]
c_V	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [J/kg K]
Δt_f	Fensterlänge für das Peak-Picking [Samples]
Δt_g	Länge des Kurtosis-Reflektogramms [Samples]
$\Delta \tau_i$	Laufzeitkorrektur durch Referenzmessung [s]
$\Delta \tau_i^{meas}$	Zeit zwischen dem Direktschall und einer Reflexion erster Ordnung [s]
ϵ	Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit
h_{50}	erste 50 ms einer Impulsantwort nach dem Direktschallpeak
ϑ	Umgebungstemperatur [°C]
ϑ_{av}	akustisch virtuelle Umgebungstemperatur [K]
I	Anzahl der Schallstrecken aus Spiegelschallquellenmodell
J	Anzahl der Tomografie-Zellen
k	Kurtosis-Reflektogramm
κ	spezifisches Wärmeverhältnis
κ_{tr}	spezifisches Wärmeverhältnis trockener Luft [1.4]
κ_W	spezifisches Wärmeverhältnis von Wasserdampf
L_i	Länge einer Schallstrecke innerhalb einer Tomografie-Zelle [m]
L_j	Länge aller Schallstrecken innerhalb einer Tomografie-Zelle [m]
L_W	Leistungspegel einer ebenen fortschreitenden Welle [dB]
\underline{L}	Matrix zur Generierung der Temperaturverteilung
l_{dir}	Strecke zwischen Sender und Empfänger [m]
l_i	Länge einer modellierten Schallstrecke [m]
l_{ij}	Schallstreckenabschnitt innerhalb einer Tomografie-Zelle [m]
l_k	kurzes Kurtosis-Analysefenster [Samples]
μ	Mittelwert
M	Ordnung des Spiegelschallquellenmodells
m	Schalldämpfungskonstante
m_k	langes Kurtosis-Analysefenster [Samples]
N	Ordnung der MLS
ξ	Auslenkung [m]
p_W	Partialdruck von Wasserdampf [Pa]
q	spezifische Feuchte
R	allgemeine Gaskonstante [8.314 J/mol K]

R_{tr}	spezifische Gaskonstante trockener Luft [287.058 J/kg K]
r	komplexer Reflexionsfaktor
SNR_{50}	von h_{50} abhängiges SNR [dB]
s_j	Langsamkeit [s/m]
σ	Standardabweichung
T	Lufttemperatur [K]
T_{av}	akustisch virtuelle Temperatur [K]
τ_{dir}	Laufzeit des Direktschalls [s]
τ_i^{calc}	Laufzeit aus der Vorwärtsmodellierung [s]
τ_i^{meas}	gemessene Schalllaufzeit auf der Schallstrecke l_i [s]
τ_i^{mod}	modellierte Schalllaufzeit auf der Schallstrecke l_i [s]
τ_{ij}^{meas}	gemessene Schalllaufzeit auf dem Schallstreckenabschnitt l_{ij} [s]
$\Phi_{xx}(\tau)$	Autokorrelationsfunktion
$\Phi_{xy}(\tau)$	Kreuzkorrelationsfunktion
v_0	Geschwindigkeit des Ausbreitungsmediums [m/s]
v_{eff}	effektive Schallausbreitungsgeschwindigkeit [m/s]
v_{ray}	Strahlgeschwindigkeit [m/s]
w	Gewichtungsfaktor für die Abhängigkeit von s_j von den Nachbarzellen
Z_0	Schallkennimpedanz [N s/m ³]
z	Wandimpedanz [N s/m ³]

Abbildungsverzeichnis

2.1	Konzept des Schallstrahls, dessen Verlauf durch die Strömungsgeschwindigkeit v_0 beeinflusst wird. Der Punkt $x_p(t)$ bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v_{eff} = v_0 + cn$.	11
3.1	Darstellung einer MLS vom Grad 4 im (a) Zeitbereich, (b) Frequenzbereich und die (c) AKF der MLS	16
3.2	Spiegelschallquellenmodell mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung	22
4.1	Tropfenförmiger Messlautsprecher	28
4.2	Amplitudenfrequenzgang bei den Winkeln 0° (blau), 45° (rot), 90° (magenta) und 180° (braun)	30
4.3	Abstrahlverhalten in der Isobarendarstellung	31
4.4	Gruppenlaufzeit	31
4.5	Sprungantwort	32
4.6	Theoretische Temperaturaufösung	34
4.7	Schematische Darstellung der Messkette	36
5.1	Nummerierung der Raumbegrenzungsflächen	38
5.2	Nummerierung der Tomografie-Voxels	39
5.3	sequentieller Programmablauf	40
5.4	Wirkung des linearen Filters im Frequenzbereich	42
5.5	Dreitafelprojektion eines SSQ-Modells mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung	44
5.6	Dreidimensionale Darstellung eines SSQ-Modells mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung	45
5.7	Korrelationsergebnis mir schematischer Darstellung der Bestimmung absoluter Laufzeiten	46
5.8	Auswirkung der Kurtosis-Methode auf ein Reflektogramm	47
7.1	Foto der Messumgebung mit Messaufbau	56
7.2	Messaufbau der Beispielmessung mit den Positionen des Senders, des Empfängers, der Temperatursensoren und der Wärmequelle	57
7.3	Schallstreckenverteilung bei der Beispielmessung	58
7.4	Kurtosis-Reflektogramm mit modellierten Laufzeiten und deren Zuordnung zu Schallstrecken	58
7.5	Temperaturverlauf der sieben konventionellen Temperatursensoren	60
7.6	gemittelte absolute Temperaturen	61
7.7	Vergleich der gemittelten Temperaturänderungsverläufe	62
7.8	Vergleich von Temperaturänderungsverläufen an verschiedenen Stellen im Raum (vgl. Abb 5.2 und Abb. 7.2)	63
7.9	relative Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeiten	64
7.10	Raumlufstromungen bei Beheizung mit Raumheizkörpern	65

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der Zeitvarianzen in akustischen Übertragungssystemen .	17
4.1	Einige Herstellerangaben zum Lautsprecher-Treiber Visaton FRS 5 XTS	29
4.2	Einige Herstellerangaben zum Mikrofon AVM MI-17	33
4.3	Einige Herstellerangaben zum Leistungsverstärker Kemo M032S . .	33
5.1	Synchronität von Ausgangs- und Eingangskanal der DT 8947-1-1- Messkarte	45
6.1	Parameterbeschreibung in <code>DAQinit.m</code>	52
6.2	Auswertungen während des Messvorgangs	54
7.1	Zeitlicher Ablauf der Beispielmessung	59

1 Einleitung

Die Raumtemperatur wird meist durch die Anwendung von In-Situ-Verfahren an bestimmten Stellen gemessen. Dies verlangt das Einbringen eines Sensors und somit die Beeinflussung der Messumgebung an der Stelle der Datenerhebung. Außerdem kann nur über einen lokal begrenzten Bereich eine Aussage zur Temperatur gemacht werden [Foke 06, S. 209 ff.]. Für die Ermittlung von Temperaturverteilungen müssten demnach mehrere einzelne herkömmliche Sensoren im Raum verteilt werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit, ein Untersuchungsgebiet von außen mit Schallenergie zu sondieren. Dabei macht man sich die Modulation eines akustischen Signals durch den Zustand des Ausbreitungsmediums zu nutze, der einen Einfluss auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit hat. Bei Luft als Medium sind neben den skalaren Größen Temperatur und Luftfeuchtigkeit, vor allem die vektorielle Strömungen für zeitliche Varianzen verantwortlich, die im wesentlichen die Modulationen charakterisieren [Bohn 88][Pier 89, S. 371 ff.].

Eine Methode die dieses Prinzip als Grundlage hat, ermittelt die Schalllaufzeit auf einer bekannten Strecke, um die temperaturabhängige Schallausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen, welche die mittlere Temperatur entlang dieser Strecke repräsentiert. Für mikrometeorologische Messungen gibt es mit dem Ultraschallanemometer und -thermometer ein Standardgerät, das dieses Prinzip auf Strecken von wenigen Dezimetern nutzt [Kaim 63][Copp 83]. Die Kombination mehrerer Schallstrecken mit einer Länge von wenigen, bis zu mehreren hundert Metern, die jeweils von einem Lautsprecher und einem Mikrofon gebildet werden und in einer Ebene oder im Raum gleichmäßig verteilt sind, bilden den Aufbau für eine zwei-, bzw. dreidimensionale akustische Laufzeittomografie [Osta 09]. Aufgrund der großen Distanzen arbeiten solche Systeme meist im Hörschallbereich. Tomografische Rekonstruktionstechniken erlauben Rückschlüsse auf die Verteilung der Temperatur und der Strömungen im Untersuchungsgebiet, das von den Schallstrecken abgedeckt wird [Hols 04][Bart 11]. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methode, mit der ebenfalls dreidimensionale Raumtemperaturverteilungen aus akustischen Messungen abgeleitet werden. Statt mehrere Schallsender und -empfänger, die ein Untersuchungsgebiet einschließen, wird lediglich ein Lautsprecher und ein Mikrofon darin platziert. Durch mehrfache Wandreflexionen ergibt sich, basierend auf der Theorie der geometrischen Raumakustik, eine Vielzahl von Schallstrecken [Alle 79]. Diese werden auf der Grundlage der gegebenen Raumgeometrie und der Position von Sender und Empfänger modelliert und die dazugehörigen Schalllaufzeiten messtechnisch ermittelt. Die Überlagerung des Direktschalls mit allen Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen ergibt die Raumimpulsantwort, weshalb sich Nichtlinearitäten durch Temperaturgradienten im Ausbreitungsmedium in einer zeitlichen Variabilität der Raumimpulsantwort äußern [Vorl 97][Sven 99]. Daher geht die Methode mit der Detektion von Reflexionen in der Raumantwort und der Bestimmung ihrer Laufzeiten, sowie einer jeweiligen Zuordnung zu einer modellierten Schallstrecke einher.

Ziel der Abschlussarbeit ist es, eine experimentelle Messmethode für Raumtemperaturverteilungen nach dem oben genannten Prinzip zu entwickeln. Im Vergleich zu bisherigen Ansätzen beschränkt sich die Hardware auf ein Minimum von einem

Schallsender und einem -empfänger. Dadurch kann das System, in Verbindung mit der Messsoftware, schnell in einem Raum integriert werden, oder als mobiles Messsystem betrieben werden. Da das Spektrum des Messsignals im Hörschallbereich liegt und eine potentielle Belästigung darstellen kann, bietet sich beispielsweise der Einsatz als dauerhafte, räumlich auflösende Temperaturüberwachung von technischen Betriebsräumen an, oder kann der Einmessung klimatisierter Räume dienen. Eine derartige akustische Messmethode reagiert bei einer hohen Messfrequenz sehr schnell auf plötzliche Temperaturänderungen (beispielsweise bei einem technischen Defekt), da im Vergleich zu konventionellen Messmethoden keine Sensorträgheit zu verzeichnen ist [Foke 06, S. 203].

Der praktische Teil dieser Arbeit wurde am Leipziger Institut für Meteorologie (LIM) in Zusammenarbeit mit der AG Akustik und Fernerkundung¹ durchgeführt. Dort wurden Systeme zur Ermittlung der Temperatur- und Strömungsverteilung mithilfe der akustischen Laufzeittomografie entwickelt. Dafür werden multiple Schallstrecken aus jeweils einem Schallsender und einem -empfänger genutzt. Die Verfahren werden zur Untersuchung der atmosphärischen Grenzschicht verwendet [Arno 00][Ziem 00], sowie, im kleineren Maßstab, zur räumlichen Erfassung der Temperatur und der Strömung [Bart 09][Bart 11].

In Kapitel 2 der Ausarbeitung werden relevante Grundlagen der Schallausbreitung in Luft, sowie der Raumakustik aufgeführt, wobei der Schallgeschwindigkeit als Messgröße besondere Relevanz zugesprochen wird. Speziellere Grundlagen für die Messmethode werden im darauf folgenden Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 sind die Anforderungen an einen verwendbaren Messlautsprecher, sowie der Bau eines Lautsprechers beschrieben. Außerdem werden die messtechnische Validierung, sowie weitere Hardwarekomponenten der Messkette präsentiert. In den darauffolgenden Kapiteln 5 und 6 werden die experimentelle Messmethode, deren Softwareimplementierung und die praktische Ausführung einer Messung beschrieben. In Kapitel 7 ist eine Beispielmessung in einer Sporthalle dokumentiert, anhand derer die Ergebnisse diskutiert werden. Schließlich wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und weiterführende Ideen zum Ausbau und zur Verbesserung des Verfahrens werden aufgeführt.

¹LIM - Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

2 Schallausbreitung in Gasen

Ursächlich für die Entstehung von Schall sind immer mechanische Schwingungen oder Vibrationen einer in ihren Ausmaßen beschränkten Masse, die als Schallquelle definiert ist. Durch die Bewegung erfolgt eine periodische Verdichtung und Verdünnung des umgebenden Mediums. Diese zunächst lokale Störung des Gleichgewichtszustands entfernt sich aufgrund von Wechselwirkungen im Medium mit einer bestimmten Geschwindigkeit von der Schallquelle und wird als Schallwelle bezeichnet. Sie erfährt dabei eine von den Eigenschaften und vom Zustand des Ausbreitungsmediums abhängige Modulation bestimmter physikalischer Größen [Kutt 07, S. 2 ff.]. In diesem Kapitel wird die mathematische Beschreibung der Schallausbreitung in Gasen, sowie die Berechnung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit hergeleitet. Die in der atmosphärischen Luft gegebenen Beeinflussungen auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit werden nachfolgend betrachtet. Weitere theoretische Grundlagen der Akustik, die relevant für die vorliegende Arbeit sind, werden ebenfalls hier aufgeführt. Die folgenden Abschnitte 2.1 und 2.2 sind [Möse 12, S. 20 ff.] entnommen und zusammenfassend ausgeführt.

2.1 Thermodynamik

Grundlegend für die Beschreibung der Schallausbreitung ist die Thermodynamik in Gasen und die damit beschriebenen physikalischen Größen. Sie lassen sich in der Boyle-Mariotte-Gleichung zusammenfassen:

$$p_G = \frac{R}{M_{Mol}} \rho_G T_G \quad (2.1)$$

Dabei ist p_G der Druck in einem Gasvolumen, R die allgemeine Gaskonstante, ρ_G die Dichte des Gases, T_G seine Temperatur und M_{Mol} die molare Masse des betreffenden Stoffes.

Da die Verdichtungsvorgänge bei der Schallausbreitung im atmosphärischen Gasgemisch sehr rasch von statten gehen, gibt es trotz kurzzeitiger Druckänderungen keine Wärmeleitung in Schallfeldern und somit ist sie adiabatisch. Dies bedeutet, dass die Summe aus einem isobaren und einen isochoren Teilschritt Null sein muss und es keine Netto-Wärmeenergieaufnahme gibt. Aus dem Ansatz

$$dE_p = -dE_\rho \quad (2.2)$$

lässt sich eine Zustandsgleichung berechnen, die thermodynamische Vorgänge, ohne dem Austausch von Wärme, beschreibt. Für solche adiabatische Prozesse gilt:

$$\frac{p_G}{p_0} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_0} \right)^\kappa \quad (2.3)$$

p_0 und ρ_0 sind statische Größen des Ausbreitungsmediums und κ ist mit $\kappa = c_p/c_v$ gegeben, wobei c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck und c_v die spezifische

Wärme bei konstantem Volumen ist. Für die zweiatomigen Gase der Atmosphäre gilt $\kappa = 1,4$.

Die akustischen Größen p (Schalldruck), ρ_S (Schalldichte) und T_S (Schalltemperatur) sind den Ruhegrößen des Schallfeldes p_0 , ρ_0 und T_0 überlagert und ihre Summen bilden eine jeweilige Gesamtgröße p_G , ρ_G und T_G . In Gl. 2.1 eingesetzt und durch die Vernachlässigung des quadratisch kleinen Produkts aus Schalldichte und Schalltemperatur ρT ergibt sich

$$p = \frac{R}{M_{Mol}}(\rho_0 T_S + T_0 \rho_S) \quad (2.4)$$

für die Schallfeldgrößen, bzw.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho_S}{\rho_0} + \frac{T_S}{T_0} \quad (2.5)$$

wenn durch den Ruhedruck $p_0 = R\rho_0 T_0 / M_{Mol}$ geteilt wird.

Die Schallfeldgrößen p_G , ρ_G und T_G können weiterhin in Gl. 2.3 eingesetzt werden. Um die auf akustische Zwecke zugeschnittene adiabatische Zustandsgleichung

$$\frac{p}{p_0} = \kappa \frac{\rho_S}{\rho_0} \quad (2.6)$$

zu erhalten, wird die Potenzreihen-Entwicklung nach dem linearen Glied abgebrochen ($f(x) = (1+x)^\kappa$ um $x=0$ besteht in $f(x) = 1 + \kappa x$).

Da Schallfelder meist durch die Angabe von Druckverteilungen beschrieben werden, wird die Schalldichte durch den Schalldruck ausgedrückt. Hierfür wird Gl. 2.6 nach der Dichte aufgelöst und es ergibt sich

$$\rho_S = \frac{p}{c^2}. \quad (2.7)$$

Hier wurde die Konstante c als

$$c^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \quad (2.8)$$

eingeführt. Bei c handelt es sich um die Schallausbreitungsgeschwindigkeit, wobei sich nach dem Einsetzen der Boyle-Mariotte-Gleichung 2.1 in Gl. 2.8 die Schallausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\kappa \frac{R}{M_{Mol}} T_0} \quad (2.9)$$

ergibt. Es ist festzuhalten, dass sie ausschließlich vom Medium und der absoluten Temperatur abhängig ist.

2.2 Schallfeld

In diesem Abschnitt soll der einfachste, theoretische Fall eines Schallfeldes betrachtet werden, nämlich eine eindimensionale, ebene Schallwelle, welche keinerlei Beeinflussung, wie beispielsweise eine entfernungsabhängige Abschwächung oder Reflexionen erfährt. Auf den in natura dreidimensionalen Fall kann daraus geschlossen werden. Ein Modell für den Wellentransport stellt der sog. Kettenleiter dar, das eine eindi-

mensionale Luftsäule in viele kleine Elemente teilt, denen gedanklich abwechselnd Masse- und Federeigenschaften zugeordnet werden. Nach der Anregung eines Elements erfolgt eine mit einer bestimmten Geschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit c) fortschreitende Störung des Ruhezustandes der nachfolgenden Elemente. Die einzelnen Elemente bewegen sich dabei mit einer eigenen Geschwindigkeit (Schallschnelle v).

Wird nun ein Luftelement, z.B. durch einen Lautsprecher (LS) angeregt, wird dieses elastisch deformiert. Für infinitesimal kleine Gaselemente gilt die sog. Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\rho_S}{\rho_0} = -\frac{\partial \xi(x)}{\partial(x)}, \quad (2.10)$$

welche besagt, dass sich die Schalldichte unmittelbar aus der Ortsableitung der Teilchenauslenkung ergibt, bzw. die relative Schalldichte gleich der negativen Dehnung ist.

Die Volumenelemente werden durch die auf sie wirkenden Federkräfte zu beschleunigten Bewegungen veranlasst. Dabei gibt das Newtonsche Trägheitsgesetz Aufschluss über die Beschleunigung $\partial^2 \xi / \partial t^2$ der in einem Element enthaltenen Masse, indem die Kräftedifferenz an beiden Seiten betrachtet wird und das Segment geschrumpft ($\Delta x \rightarrow 0$) wird. Daraus ergibt sich das Trägheitsgesetz der Akustik

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.11)$$

Die Gl. 2.10 beschreibt einerseits die Verdichtung eines Kontinuums aufgrund von ortsabhängiger Auslenkung und Gl. 2.11 beschreibt andererseits, wie Auslenkung aufgrund von Verdichtung zustande kommt. Alle Schallereignisse im eindimensionalen Fall können durch sie wiedergegeben werden. Nun können die beiden Gleichungen zusammengefasst werden, indem Gl. 2.10 zweifach nach der Zeit und Gl. 2.11 nach dem Ort abgeleitet wird und anschließend ineinander eingesetzt werden. Schließlich wird noch die Schalldichte durch den Schalldruck wie in Gl. 2.7 ersetzt und es ergibt sich die Wellengleichung der Akustik:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Dieser Gleichung müssen alle Schallereignisse genügen.

Eine allgemeine Lösung der Wellengleichung im eindimensionalen Fall ist

$$p(x, t) = f\left(t \pm \frac{x}{c}\right), \quad (2.13)$$

wobei die Funktion $f(t)$ eine Signalform repräsentiert und von der Schallquelle bestimmt wird. Bei der Konstanten c handelt es sich um die Ausbreitungsgeschwindigkeit (sh. auch Abschnitt 2.1), deren physikalische Bedeutung sich aus der Vorstellung ergibt, dass sich ein Funktionswert f , der zur Zeit t an der Stelle x anliegt, während der Zeit Δt um Δx verschiebt:

$$f(x, t) = f(x + \Delta x, t + \Delta t) \quad (2.14)$$

Wenn $(t - x/c)$ in beiden Fällen gleich ist, folgt

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = c \quad (2.15)$$

und daraus wird erkenntlich, dass die Schallausbreitungsgeschwindigkeit völlig unabhängig von der Signalgestalt ist.

Schallereignisse werden oft als cosinusförmige (harmonische) Zeitverläufe dargestellt und genügen im Falle einer in x-Richtung fortschreitenden Welle

$$p(x, t) = p_0 \cos(\omega t - kx) = p_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.16)$$

als Lösung für die Wellengleichung. Wobei

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.17)$$

die Wellenzahl und

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T_t}, \quad (2.18)$$

die Kreisfrequenz darstellt. λ ist die örtliche Periodenlänge (Wellenlänge) und T_t die Periodendauer. Mit Gl. 2.12 und Gl. 2.18 errechnet sich die Wellenlänge zu

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.19)$$

Bildet man den Quotienten aus dem Schalldruck p und der Schallschnelle v , oder das Produkt aus der Dichte des Ausbreitungsmediums ρ und der Schallgeschwindigkeit c , erhält man die Schallkennimpedanz oder auch den Wellenwiderstand des Mediums

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \rho c, \quad (2.20)$$

die die Abhängigkeit der Schallausbreitung vom Ausbreitungsmedium beinhaltet.

2.3 Schallabstrahlung und Dämpfung

Für die vorliegende Arbeit macht es Sinn, für die Schallabstrahlung von einer ungerichteten, breitbandigen Punktquelle auszugehen, da die Ausmaße des verwendeten LS bis in höhere Frequenzen klein gegenüber den wiedergegebenen Wellenlängen sind. Darüber hinaus wurde der verwendete LS so konstruiert, dass die Schallabstrahlung möglichst omnidirektional stattfindet (sh. Abschnitt 4.1).

Schallquellen werden in erster Linie durch ihre abgestrahlte Leistung charakterisiert. Für die Schallleistung gilt allgemein [Wein 08, S. 26 ff.]:

$$P = \int I dS \quad (2.21)$$

I ist dabei die Intensität, die mit $I = pv$ definiert ist und S ist die Fläche, durch die die von einer Schallquelle abgegebene Leistung hindurchtritt. Bei einer ungerichteten

Abstrahlung ist diese Fläche $S = 4\pi r^2$ kugelförmig, jedoch nähert sich die Kugelwelle im Fernfeld immer mehr einer ebenen Welle an. Die Leistung der Schallquelle im Fernfeld ist demnach

$$P = \frac{1}{\rho c} p_{eff}^2 S. \quad (2.22)$$

p_{eff} ist der Schalldruck-Effektivwert im Abstand r . Somit verringert sich der Schalldruck umgekehrt proportional zum Abstand. Dividiert man 2.22 noch durch die Bezugsleistung $P_0 = (p_0^2/\rho c) \cdot 1 \text{ m}^2$ und verwendet den dekadischen Logarithmus, erhält man ein Pegelgesetz für Kugelwellen [Möse 12, S. 76]:

$$L_p = L_W - 20 \log \frac{r}{\text{m}} - 11 \text{ dB} \quad (2.23)$$

L_p ist der Schalldruckpegel im Abstand r und L_W der Leistungspegel einer Ebene fortschreitenden Welle mit

$$L_W = 10 \log \frac{\bar{P}}{P_0}. \quad (2.24)$$

Nach 2.23 verringert sich der Pegel um 6 dB bei einer Verdoppelung der Entfernung. Diese Tatsache wird als geometrische Dämpfung bezeichnet, da sie lediglich von räumlichen Variablen abhängig ist und von einem verlustfreien Medium ausgegangen wird.

Zusätzlich kann noch die Berechnung des Schalldruckpegels L_p aus der Feldgröße Schalldruck p mit

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (2.25)$$

und $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ erwähnt werden. Wohingegen Leistungsgrößen wie die Schallleistung P durch

$$L_p = 10 \log \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad (2.26)$$

und $P_0 = 10 \times 10^{-12} \text{ W}$ ermittelt werden können.

Neben der geometrischen Dämpfung gibt es Abschwächungen des Schalldruckpegels in der atmosphärischen Luft, die auf Wechselwirkungen mit dem Ausbreitungsmedium zurückzuführen sind. Der Energieverlust geht dabei, trotz der in der Theorie angenommenen adiabatischen Schallausbreitung, immer mit einer (geringfügigen) Erwärmung des Ausbreitungsmediums einher. Für die Betrachtung des Schalldrucks harmonischer Zeitverläufe wird die Dämpfungskonstante m eingeführt und Gl. 2.16 wird folgendermaßen ergänzt [Kutt 07, S. 55 ff.]:

$$p(x, t) = p_0 e^{-mx/2} e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.27)$$

Verschiedene physikalische Vorgänge tragen zu der Dimensionierung von m bei: Die sog. klassische Dämpfung, die durch zwei Absorptionsmechanismen beschrieben ist, spielt dabei eine Rolle. Zum einen sind Zustandsänderungen in der Realität nur begrenzt adiabatisch und es existiert ein geringer Wärmeaustausch zwischen benachbarten Volumen-Elementen. Zum anderen unterliegt ein Gaselement in longitudinalen Schallwellen einer bestimmten Art der Verformung. Aufgrund der Viskosität des Mediums und dem Auftreten von Scherströmungen kommt es zu Reibungsverlusten. Die sog. molekulare Dämpfung, die mehratomige Moleküle betrifft, lässt sich auf die

sog. thermische Relaxation zurückführen. Sie kann man als eine Art interne, frequenzabhängige Wärmeleitung beschreiben, die zu Energieverlusten bei der Schallausbreitung führt. Zusätzlich wird die Relaxation bei höheren Frequenzen von einer „Versteifung“ des gasförmigen Ausbreitungsmediums begleitet, die zu einer geringen Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit führt. Diese Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit heißt Dispersion.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang der Effekt des in der Luft gelösten Wassers, das die Zusammensetzung des Ausbreitungsmediums ändert und so für eine von der Luftfeuchtigkeit abhängige Dämpfung verantwortlich ist.

2.4 Schallgeschwindigkeit

In den nächsten Abschnitten werden Einflüsse der Atmosphäre auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit aufgeführt, die künftig kürzer Schallgeschwindigkeit genannt wird. Dabei soll sich auf die wesentlichen Einflussfaktoren Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit beschränkt werden.

2.4.1 Temperaturabhängigkeit

Bei einem Schallfeld, dem als Ausbreitungsmedium trockene Luft zugrunde liegt, berechnet sich die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Lufttemperatur aus Gl. 2.9. Die molare Masse M_{Mol} berechnet sich volumenanteilig aus den molaren Einzelmassen der in der Standardatmosphäre vorkommenden Gase. Die stoffliche Zusammensetzung der Atmosphäre ist unter fast allen Umständen derart gleichbleibend, dass sie als konstant angenommen werden kann [Bart 09, S. 10]. Selbst die häufig vorkommende Schwankung des CO_2 -Gehalts als Ursache für Konzentrationsänderung verursacht unter normalen Bedingungen eine Schwankung um lediglich 0.05 m/s [Knes 61, S. 192 ff.], zit. n. [Seli 05, S. 9]. Setzt man noch $T_0 = 273.15$ K (0°C) in Gl. 2.9 ein, so erhält man für die Schallgeschwindigkeit $c = 331.3$ m/s. Um die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur zu bestimmen, wird Gl. 2.9 nach dT_0 differenziert. Dadurch ergibt sich eine indirekte Proportionalität zu $\sqrt{T_0}$. Bei einer Temperatur von $T_0 = 273.15$ K beträgt der Geschwindigkeitsgradient zirka 0.6 m/s/K. Durch die Approximation

$$c = 331,3 + 0,6\vartheta \quad (2.28)$$

lässt sich die Schallgeschwindigkeit bei einer Temperatur nahe 0°C in guter Näherung ermitteln. Die Variable ϑ ist die Umgebungstemperatur in $^\circ\text{C}$.

2.4.2 Feuchteabhängigkeit

Die Annahme aus Abschnitt 2.4.1 von völlig trockener Luft ist nicht realistisch und deshalb soll der Einfluss der Luftfeuchtigkeit im Folgendem beschrieben werden. Der in der Atmosphäre vorhandene Wasserdampf ist ursächlich für eine abweichende Zusammensetzung des Gasgemischs im Vergleich zur trockenen Luft mit konstanter

Gaszusammensetzung. Der Effekt von Luftfeuchtigkeit wird theoretisch in [Harr 71] mit

$$c = c_0 \sqrt{\left(1 + \frac{\vartheta}{273}\right) \left[1 - \frac{p_W}{p_0} \left(\frac{\kappa_W}{\kappa_{tr}} - \frac{M_W}{M_L}\right)\right]} \quad (2.29)$$

angegeben. p_W ist dabei der Partialdruck von Wasserdampf und c_0 ist die Schallgeschwindigkeit für $p_W = 0$ und $\vartheta = 0^\circ\text{C}$. κ_W und κ_{tr} sind die Verhältnisse der spezifischen Wärmen von Wasserdampf und trockener Luft, sowie M_W und M_L ihre molekulare Massen.

Die Schallgeschwindigkeit kann aber auch als Funktion der spezifischen Feuchte q und der Temperatur T geschrieben werden:

$$c = \sqrt{(1 + 0,51q)\kappa_{tr}R_{tr}T} \quad (2.30)$$

R_{tr} ist dabei die spezifische Gaskonstante von trockener Luft.

Im Zusammenhang mit akustischen Laufzeitmessungen zur Ermittlung von Temperaturen, macht es weiterhin Sinn, die *akustisch virtuelle Temperatur*, in Anlehnung an die virtuelle Temperatur, zu nennen [Zmar 02, S. 74 f.]. Sie gibt an, welche Temperatur trockene Luft bei gleichem Druck hätte und ist mit

$$T_{av} = (1 + 0,51q)T \quad (2.31)$$

definiert. Für die Schallgeschwindigkeit ergibt sich demnach

$$c = \sqrt{\kappa_{tr}R_{tr}T_{av}}. \quad (2.32)$$

Die Abweichung der akustisch virtuellen Temperatur zur realen Lufttemperatur ist linear abhängig vom Feuchtegehalt der Luft. Wasserdampf führt anteilig zu einer höheren Schallgeschwindigkeit in feuchter Luft und somit zu einer (virtuellen) Erhöhung der Temperatur im Vergleich zu trockener Luft gleicher Temperatur. Somit bleibt festzuhalten, dass für Temperaturen, die mit einer akustischen Messmethode ermittelt wurden, eine Korrektur mit Gl. 2.31 vorgenommen werden muss, falls die reale Temperatur von Interesse ist. Die Abweichung beträgt bei einer Lufttemperatur von 20°C maximal 2.02 K, nämlich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % ($q \approx 14.473 \text{ g/kg}$).

Abschließend sollte noch erwähnt werden, dass der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Schallgeschwindigkeit deutlich geringer ist, als der Einfluss der Temperatur [Harr 71]. Gerade wenn Geschwindigkeitsgradienten in einem begrenzten Luftvolumen von Bedeutung sein sollen, spielt die Feuchte eine geringe Rolle, da ihre Variabilität darin gering ist [Bart 09, S. 14].

2.4.3 Strömungsabhängigkeit

Die bisherige Voraussetzung, dass sich das Medium in einem beruhigten Zustand befindet, soll in diesem Abschnitt nicht gelten und entspricht auch niemals der Realität. Im Gegenteil ist die Schallausbreitung selbst in Räumen stets von Strömungen beeinflusst und aus diesem Grund wird sie hier auch behandelt. Nichtsdestotrotz wird der Strömungseinfluss im praktischen Teil dieser Arbeit vernachlässigt und es

wird von einem beruhigten Medium ausgegangen. Eine Ausnahme sind thermische Strömungen bzw. Konvektionsströmungen, die zwangsläufig bei der partielle Beeinflussung der Raumtemperatur durch Wärmequellen entstehen.

Um die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Strömungen innerhalb des Ausbreitungsmediums zu beschreiben, kann man sich der Theorie der geometrischen Akustik bzw. Strahlenakustik bedienen. Jedes Schallereignis erzeugt eine Wellenfront, die durch Bewegungen des Ausbreitungsmediums, wie sie beispielsweise durch Wind und thermische Strömungen erzeugt werden, beeinflusst wird. Eine einfache Feststellung ist, dass die Schallgeschwindigkeit höher ist, wenn die Richtung der Schallausbreitung der Windrichtung entspricht und umgekehrt niedriger ist, wenn sie dem Wind entgegen gerichtet ist.

Bewegt sich das Ausbreitungsmedium mit der Geschwindigkeit v_0 und die Schallgeschwindigkeit beträgt cn , so ergibt sich eine effektive Schallgeschwindigkeit $v_{eff} = v_0 + cn$ aus der Sicht des bewegten Mediums. n ist dabei der Normalenvektor zur Wellenfront. Betrachtet man das System von einem festen Standpunkt aus, ist die Ausbreitungsrichtung nicht zwangsläufig gleich n . Aus diesem Grund schreibt man folgendes [Pier 89, S. 372]:

$$\frac{dx_p}{dt} = v(x_p, t) + n(x_p, t)c(x_p, t) = v_{ray} \quad (2.33)$$

Dies ist die Strahlgeschwindigkeit v_{ray} eines Punktes x_p auf der Wellenfront, wobei ein Ausgangszeitpunkt $t = \tau(x)$ festgelegt worden ist. Die Strecke die $x_p(t)$ während einer bestimmten Zeit t zurück legt, ist der *Schallstrahl* bzw. die *Schallstrecke* und die Funktion $x_p(t)$ ist der *Strahlengang*. In Abb. 2.1 ist dieser Zusammenhang illustriert. Dass der Strömungseinfluss in dieser Arbeit unberücksichtigt bleibt, hat zur Folge, dass Schallstrahlen bzw. Schallstrecken stets als gerade angenommen werden.

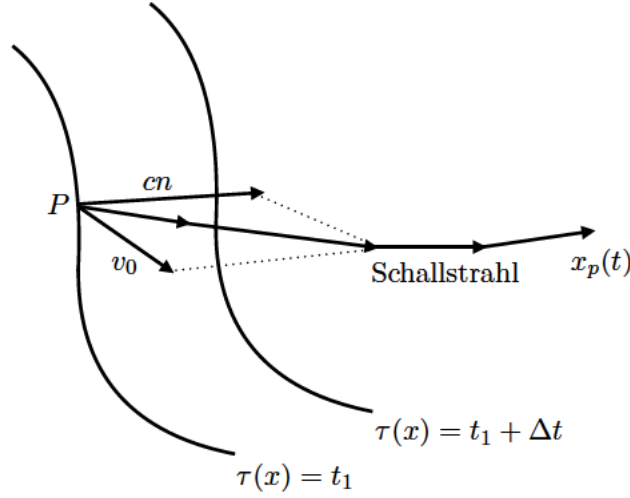


Abbildung 2.1: Konzept des Schallstrahls, dessen Verlauf durch die Strömungsgeschwindigkeit v_0 beeinflusst wird. Der Punkt $x_p(t)$ bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v_{eff} = v_0 + cn$.

2.5 Reflexion und Absorption an Raumbegrenzungsflächen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde immer von einer ungehinderten Schallausbreitung ausgegangen. Diese geometrische Unbegrenztheit wird in der Folge räumlich durch Begrenzungsflächen eingeschränkt. Trifft eine ebene Schallwelle auf eine Wand, so wird sie auf eine sehr gut vorhersagbare Art und Weise in den Raum zurückgeworfen. Voraussetzung für die nachfolgende Beschreibung solcher Reflexionen ist, dass die Wellenlängen des auftreffenden Schallsignals klein gegenüber den Ausmaßen der Reflexionsfläche sind. Die Tatsache, dass im Falle einer Reflexion, Einfallswinkel θ und Ausfallwinkel θ gleich groß sind, ist von elementarer Bedeutung für die vorliegende Arbeit. Gemeint sind Winkel die an der Normalen der Reflexionsfläche anliegen.

Das Schallfeld vor einem Reflektor lässt sich im Allgemeinen als Summe der auftreffenden und reflektierten Welle beschreiben [Möse 12, S. 219 ff.]. Als allgemeiner Fall wird der schräge Schalleinfall behandelt:

$$p = p_0 e^{jky \sin \theta} (e^{-jkx \cos \theta} + r e^{jkx \cos \theta}) \quad (2.34)$$

r ist der komplexe Reflexionsfaktor, der die Dämpfung der reflektierten Schallwelle bestimmt:

$$r = \frac{\frac{z}{\rho c} \cos \theta - 1}{\frac{z}{\rho c} \cos \theta + 1} \quad (2.35)$$

Dabei ist $z = p(0)/v(0)$ die Wandimpedanz, die das Verhältnis von Druck und Schallschnelle an der Wandoberfläche $x = 0$ darstellt. Sie wird vom Aufbau des Reflektors und der Beschaffenheit seiner Oberfläche bestimmt.

Die Absorption kann unmittelbar aus dem Reflexionsfaktor errechnet werden und wird mit dem Verlustgrad

$$\beta = 1 - |r|^2 \tag{2.36}$$

angegeben.

3 Grundlagen zur Messmethode

Die im Zuge dieser Abschlussarbeit entwickelte experimentelle Methode zur Messung der Raumtemperaturverteilung (sh. Kap. 5 ff.) basiert auf der im Folgenden vorgestellten Ermittlung von Laufzeiten akustischer Signale auf Schallstrecken, die an Raumbegrenzungsflächen reflektiert wurden. Zunächst werden kurz system- und signaltheoretische Grundlagen erläutert, woraufhin im Allgemeinen die Korrelationsmesstechnik und im Speziellen die Maximalfolgenmesstechnik vorgestellt wird. In diesem Kapitel werden außerdem spezifische Grundlagen für die Messmethode aufgeführt. Dafür werden Auswirkungen von Zeitvarianzen, welche Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit haben, betrachtet. Die relevanten Zeitvarianzen, die die Messgröße darstellen, werden durch ein Modell beschrieben, um eine theoretische Begründung für die zeitliche Betrachtung der Raumantwort, wie sie in dieser Arbeit vollzogen wird, zu liefern. Außerdem werden mit einer statistischen Analyse von Korrelationssignalen und dem Spiegelschallquellenverfahren Voraussetzungen für die Laufzeitbestimmung von Wandreflexionen beschrieben. Schließlich wird in die akustische Laufzeitotomographie zur Rekonstruktion von Temperaturfeldern eingeführt.

3.1 Fouriertransformation

Beinahe jede Art von akustischen Signalen kann durch überlagerte sinusförmige Schwingungen mit der Frequenz ω dargestellt werden. Dabei wird ein Zeitsignal $x(t)$ durch die Fouriertransformation nach [Wein 08, S. 6 ff.]

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

auf das zugehörige Spektrum $X(\omega)$ abgebildet. Um umgekehrt aus der spektralen Darstellung den zeitlichen Verlauf einer physikalischen Größe zu erhalten, kann aus den gewichteten Exponentialanteilen das Zeitsignal durch die inverse Fouriertransformation errechnet werden:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

Im zeitdiskreten Fall lauten die Gleichungen

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\Omega n} \quad (3.3)$$

und

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega)e^{j\Omega n} d\Omega. \quad (3.4)$$

$x(n)$ sind Werte einer zeitlichen Folge, zu welcher die spektrale Darstellung $X(\Omega)$ gehört.

3.2 Übertragungssystem, Impulsantwort und Übertragungsfunktion

Ein Raum ist ein akustisches Übertragungssystem, das ein Schallereignis, abhängig von den Parametern des Raumes, verändert. Aus dem Eingangssignal $x(t)$ folgt das Ausgangssignal $y(t)$:

$$y(t) = L\{x(t)\} \quad (3.5)$$

Dabei wird das Schallsignal hauptsächlich verzögert, seine Amplitude verringert sich und Reflexionen mit unterschiedlicher Laufzeit und Intensität werden dem Signal hinzugefügt. Im Allgemeinen wird in der praktischen Akustik das Übertragungssystem Raum als linear und zeitinvariant behandelt [Wein 08, Kap. 1.2.4]. Dass aber gerade Raumtemperaturänderungen zu Zeitvarianzen führen, zeigt u.a. [Kaji 99] und wird näher in Abschnitt 3.5 betrachtet. Während diese Tatsache bei raumakustischen Messungen zu ungewollten Fehlern führt, wird sie bei der in Kap. 5 ff. vorgestellten Methode genutzt, um die Raumtemperaturverteilung zu ermitteln.

Um die Eigenschaften eines akustischen Übertragungssystems zu erhalten, wird das System mit einem infinitesimal kurzem Impuls $\delta(t)$ angeregt. Die Antwort des Systems ist die Impulse Response (IR)

$$h(t) = L\{\delta(t)\}, \quad (3.6)$$

die das System vollständig beschreibt. Wird die IR nun mittels Faltung auf ein akustisches Signal $x(t)$ angewandt, so werden die Übertragungseigenschaften des Systems im Ausgangssignal enthalten sein:

$$y(t) = L\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (3.7)$$

Im Frequenzbereich ist die Faltung eine einfache Multiplikation der Spektren und Gl. 3.7 wird zu

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega). \quad (3.8)$$

$H(\omega)$ ist dabei die Übertragungsfunktion, also die Fourier-Transformierte F der IR:

$$H(\omega) = F\{h(t)\} \quad (3.9)$$

Die zeitliche und die spektrale Darstellung enthalten die identische und vollständige Information über ein Übertragungssystem.

3.3 Korrelationsmesstechnik

Um die Laufzeiten in einem System oder dessen gesamte Übertragungseigenschaften, wie beispielsweise die Room Impulse Response (RIR) zu ermitteln, ist es möglich

das System mit einem einzelnen Impuls $x(t) = \delta(t)$ anzuregen und somit direkt die System-IR am Empfänger zu erhalten [Vorl 94]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t')\delta(t - t')dt' \approx h(t) \quad (3.10)$$

Bei der Korrelationsmesstechnik wird dagegen ein zeitlich gedehntes Anregungssignal $x(t)$ verwendet, um ebenfalls die IR des Systems zu erhalten. Für das Faltungsintegral der Korrelationsmesstechnik schreibt man

$$\Phi_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t')\Phi_{xx}(\tau - t')dt' \approx h(\tau). \quad (3.11)$$

$\Phi_{xx}(\tau)$ ist die Autokorrelationsfunktion (AKF) des Anregungssignals und $\Phi_{xy}(\tau)$ ist die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) des Empfangssignals. Die Korrelationsmesstechnik hat den Vorteil, dass nicht das Anregungssignal selbst einem idealen Impuls möglichst nahe kommen muss, sondern seine AKF. In der Folge kann das Übertragungssystem mit deutlich mehr Energie angeregt werden und die Aussteuerung des Messsystems muss nicht kompromissbehaftet ausgeführt werden. Es wird ein deutlich höheres Signal to Noise Ratio (SNR) als bei der impulshaften Anregung erreicht.

3.4 Maximalfolgen

Mögliche Korrelationssignale die für die Messtechnik aus Abschnitt 3.3 verwendet werden können und auch als Messsignal für die Messung der Raumtemperaturverteilung in Kap. 5 ff. verwendet werden, sind sog. Maximalfolgen oder Maximum Length Sequence (MLS). MLS sind konstruierte binäre Pseudozufallsfolgen, die durch eine ganzzahlig-positive Ordnung N charakterisiert werden. Sie können nur die Werte 0 und 1 annehmen und haben eine Länge von $2^N - 1$ Samples. Zu Messzwecken wird der Wertebereich allerdings auf -1 und 1 skaliert. Die Konstruktion basiert meist auf einem rückgekoppelten binären Schieberegister der Länge N . Die mathematischen und zahlentheoretischen Grundlagen, sowie die praktische Erzeugung wird in [Luke 92, Kap. 3] beschrieben. In Abb. 3.1 ist exemplarisch der Zeitverlauf, das weiße Frequenzspektrum und die AKF einer MLS vom Grad 4 zu sehen.

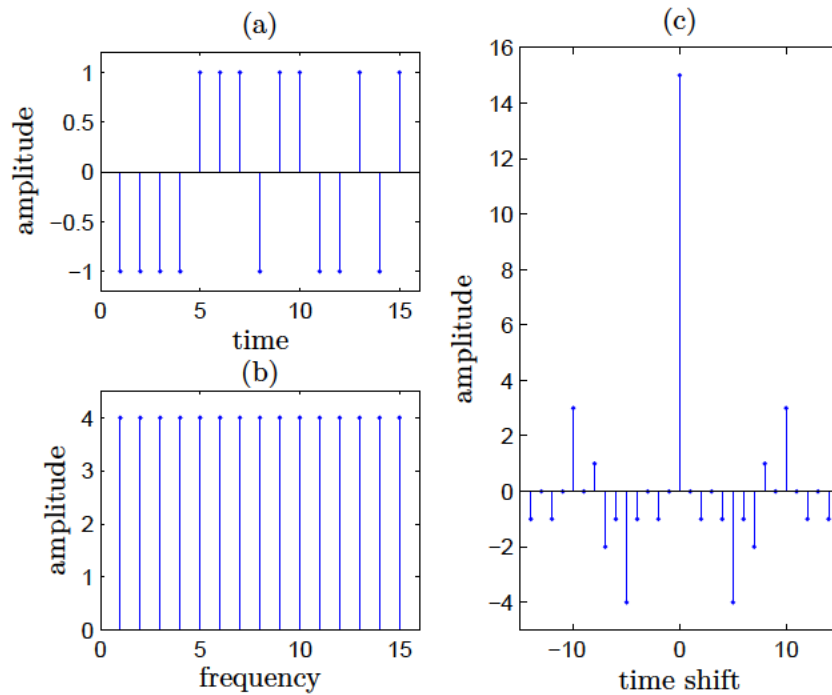


Abbildung 3.1: Darstellung einer MLS vom Grad 4 im (a) Zeitbereich, (b) Frequenzbereich und die (c) AKF der MLS

Neben der AKF, die bei einer höheren Ordnung N einem idealen Impuls sehr nahe kommt und der Möglichkeit, dass die Verwendung des Messsignals bei einem ungünstigen Störsignalpegel dennoch verwertbare Messergebnisse liefern kann, hat das MLS-Signal weitere nennenswerte Eigenschaften [Dunn 93]. Sein Crest-Faktor ist theoretisch, aufgrund seiner Signaleigenschaften, minimal klein. In der Praxis führt jedoch ein schneller Wechsel von maximalen Auslenkungszuständen zu erheblichen Verzerrungen und Übersteuerungen durch die Nichtlinearitäten der Messkette (u.a. Impulsverhalten des Lautsprechers). Für die akustische Laufzeitmessung auf multiplen Schallstrecken im Untersuchungsgebiet kann es relevant sein, dass mehrere MLS simultan ausgesendet und empfangen werden. Dabei findet man keine relevante gegenseitige Beeinflussung in den einzelnen Korrelaten [Seli 05]. Weiterhin sind Messsysteme, die auf eine MLS als Anregungssignal basieren empfindlicher gegenüber Zeitvarianzen, im Vergleich zur heute in der raumakustischen Messtechnik üblichen Gleitsinusanregung. Diese Aussage kann in mehreren Arbeiten, wie in [Vorl 95], [Sven 99] und [Kob 96], gefunden werden und hat schließlich dazu geführt, der MLS-Technik in dieser Arbeit den Vorzug zu geben. In Abschnitt 3.5 werden mögliche Zeitvarianzen in akustischen Systemen behandelt.

3.5 Zeitvarianzen

In diesem Abschnitt soll der theoretische Einfluss von Zeitvarianzen bei Messungen mittels der Maximalfolgen-Messtechnik nach [Vorl 97] und [Sven 99] betrachtet werden, insofern sie für die vorliegende Arbeit relevant sind.

3.5.1 Inter- und intraperiodische Effekte

Zeitvarianzen werden grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt. Zum einen erzeugen sie intraperiodische Effekte, die eine Messung während der Dauer einer einzelnen MLS-Periode beeinflussen und durch Delay-Modulation der IR modelliert werden können. Zum anderen werden interperiodische Zeitvarianzen beschrieben, die nicht-lineare Veränderungen des Systems abdecken, welche im Verhältnis zur Anregungsdauer eines Systems langsam erfolgen. Sie können durch (partiell) Time-Stretching der IR modelliert werden. Die Tab. 3.1 zeigt mögliche Zeitvarianzen bei akustischen Messungen mittels MLS und wie sie kategorisiert werden.

Ursache für zeitliche Varianz	Kategorie
Temperaturänderungen	interperiodisch
Wind, Strömungen und Turbulenzen	intraperiodisch / interperiodisch
Bewegte Objekte oder Personen	intraperiodisch
Erwärmung der Messhardware	interperiodisch
Clock-Jitter	intraperiodisch
Schalldruckpegeländerungen	intraperiodisch / interperiodisch
Sampling-Frequency-Drift	interperiodisch

Tabelle 3.1: Übersicht der Zeitvarianzen in akustischen Übertragungssystemen [Sven 99]

Alle in Tab 3.1 beschriebenen Effekte bedeuten eine Abweichung von der Annahme, dass ein akustisches System linear und zeitinvariant ist. Da sich Temperaturänderungen in der Regel langsam vollziehen, wird im Folgendem ausschließlich auf interperiodische Zeitvarianzen eingegangen.

3.5.2 Time-Stretching-Modell

Zunächst sei gesagt, dass das Time-Stretching einer IR äquivalent zu einer Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist und somit in erster Näherung auch gleichbedeutend mit einer Änderung der Temperatur (sh. Abschnitt 2.4).

Betrachtet werden nun zwei IR: $h_1(t)$ und $h_2(t)$, welche aus zwei Messungen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten, mittels MLS-Technik erzeugt wurden. Es wird vorausgesetzt, dass sie frei von jeglichem Störsignal sind, sodass die Differenz

$$\Delta h(t) = h_2(t) - h_1(t) \quad (3.12)$$

ausschließlich die Zeitvarianzen zum Ausdruck bringt. Die Beziehung zwischen zwei IR, die einem Time-Stretching ausgesetzt waren ist $h_2(t) = h_1(t[1 + \epsilon])$, mit der relativen Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit $\epsilon = \Delta c/c$. Aus Gl. 3.12 folgt für die Differenz zwischen beiden IR

$$\Delta h(t) = h_1(t[1 + \epsilon]) - h_1(t). \quad (3.13)$$

Zunächst geht man von einem vereinfachten Fall aus, wie es beispielsweise die Freifeld-IR eines LS ist. Sie besteht lediglich aus der einfachen IR des LS zu einem bestimmten Zeitpunkt t_1 . Dies ist in erster Näherung die Verzögerung $h_{delay}(t)$ der Systemantwort h_{DUT} durch die Laufzeit zwischen LS und Mikrofon:

$$h_1(t) = h_{DUT}(t) * h_{delay}(t) = h_{DUT}(t) * \delta(t - t_1) \quad (3.14)$$

Aus Gl. 3.13 ergibt sich dadurch

$$\Delta h(t) = h_{DUT}(t[1 + \epsilon]) * \delta(t[1 + \epsilon] - t_1) - h_{DUT}(t) * \delta(t - t_1). \quad (3.15)$$

In akustischen Systemen kann davon ausgegangen werden, dass der Time-Stretching-Effekt auf $h_{DUT}(t)$ deutlich kleiner ist, als auf $h_{delay}(t)$, da sich $h_{DUT}(t)$ über einen wesentlich kürzeren Zeitraum erstreckt. Durch diese Annahme folgt aus Gl. 3.15

$$\begin{aligned} \Delta h(t) &\approx h_{DUT}(t) * \{\delta(t[1 + \epsilon] - t_1) - \delta(t - t_1)\} \\ &= h_{DUT}(t) * \left\{ \delta\left(t - \frac{t_1}{1 - \epsilon}\right) - \delta(t - t_1) \right\}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Daraus geht hervor, dass der Haupteffekt von Time-Stretching eine zeitliche Verschiebung der IR um den Betrag $1/(1 + \epsilon)$ darstellt. Außerdem sieht man, dass sich die Abweichung $\Delta h(t)$ im zeitlichen Bereich der eigentlichen IR befindet. Für kleine Werte von ϵ ist in [Sven 99] eine Approximation für Gl. 3.16 im Frequenzbereich zu finden:

$$\begin{aligned} \Delta H(\omega) &= H_{DUT}(\omega)(e^{-j\omega t_1/(1+\epsilon)} - e^{-j\omega t_1}) \\ &\approx H_{DUT}(\omega)H_{delay}(\omega) \left[j\omega t_1 \epsilon - \frac{1}{2}(\omega t_1 \epsilon)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Interpretiert man Gl. 3.17, so sollte zunächst gesagt werden, dass $H_{delay}(\omega)$ Allpassverhalten hat. Die Differenz der Übertragungsfunktionen $\Delta H(\omega)$ hat aber grundsätzlich die spektrale Form der Übertragungsfunktion $H_{DUT}(\omega)$, und besitzt zusätzlich einen Anstieg von 6 dB pro Oktave. Die Amplitude dieses Terms ist dabei proportional zur Verzögerungszeit t_1 und zur relativen Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit ϵ . Für Frequenzen höher als $\omega = 2/t_1\epsilon$ ist der Übertragungsfunktion ein Anstieg von 12 dB pro Oktave zu entnehmen.

Die oben beschriebene Differenz-IR und die Interpretation im Zeit- und Frequenzbereich gilt ausschließlich für den theoretischen Fall einer IR, frei von weiteren Nichtlinearität, Varianzen und Störsignalen. Eine reale RIR besteht dagegen aus einer Überlagerung des Direktschalls mit einer großen Anzahl von Reflexionen zu verschiedenen Zeiten, mit verschiedenen Amplituden. Jede Reflexion verursacht eine Änderung der Übertragungsfunktion nach Gl. 3.17 zu den Zeiten t_1 , die den Verzö-

gerungen der Reflexionen entsprechen. Die Summe dieser einzelnen Übertragungsfunktionen bildet die totale Abweichung der Übertragungsfunktion und beinhaltet sämtliche Interferenz-Effekte.

Die große Anzahl von Reflexionen im Diffusfeld eines Raumes führt vielmehr zur Addition von Energien, statt zur Addition von Amplituden. Die totale Abweichung einer Raumübertragungsfunktion kann als energiebasierte Summation aller Abweichungen zu den Zeiten t_1 der einzelnen Reflexionen betrachtet werden, die durch Zeitvarianzen verursacht werden.

3.6 Reflexionserkennung durch statistische Signalaufbereitung

Die Qualität der Analyse des Korrelationssignal bestimmt, ob eine Reflexion bzw. ihre Laufzeit detektiert werden kann. Es wird eine Methode vorgestellt, die auf einem rudimentären Ansatz, in Verbindung mit einer statistischen Signalaufbereitung basiert.

3.6.1 Peak Picking

In einem Korrelationssignal bzw. in einer RIR, die beispielsweise aus einer Messung mit der Korrelationsmesstechnik (sh Abschnitt 3.3) hervorgeht, werden die Laufzeiten von Reflexionen als lokale Maxima oder Minima abgebildet. Eine naheliegende Methode, diese Laufzeiten τ_i zu bestimmen, ist die Analyse dieser Extremwerte in einem Kurzzeitfenster, was sich folgendermaßen ausdrücken lässt und im Allgemeinen als Peak Picking bezeichnet wird [Terv 11, S. 70]:

$$\tau_i = t_{Start} + \operatorname{argmax}\{h(t)\} \quad (3.18)$$

t liegt dabei in einem Bereich $t_{Start} < t < t_{End}$ der vom Startpunkt und vom Endpunkt des Zeitfensters begrenzt wird. Neben dem Peak Picking existieren weitere Methoden der Laufzeitbestimmung. In [Terv 11, S. 98 ff.] wurden mehrere Algorithmen in einer Monte-Carlo-Simulation, in Abhängigkeit des SNR einer simulierten RIR, miteinander verglichen. Das Peak Picking zeigte dabei eine gute Erkennungsleistung, auch im Bezug auf rechenintensivere Methoden. Die Fehlerrate war dabei durchweg geringer als bei der ebenfalls gängigen Phase Transform (PHAT)-Methode und ab einem $SNR > 20\text{dB}$ war sie auch geringer, als bei der Maximum Likelihood Estimation (MLE)-Methode.

3.6.2 Kurtosis-Analyse

Um das Peak Picking für diese Arbeit performanter zu machen, wurde eine statistische Methode nach [Ushe 10] implementiert, um Reflexionen als solche im Korrelationssignal besser detektieren zu können. Darin wird eine Statistik zweiter Ordnung einer RIR verwendet, anstatt lediglich eine Analyse des energiebasierten Signals durchzuführen. Bei Reflexionen, die in einem Punkt eintreffen, kann der Schalldruck

als stochastische Funktion mit einer Normalverteilung und einem Mittelwert von Null modelliert werden. Der Grad der Normalverteilung eines Ausschnitts einer RIR kann somit zur Laufzeitbestimmung genutzt werden. Je höher dieser Grad ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei dem betreffenden Abschnitt um eine Reflexion handelt.

Ein Maß für den Grad der Normalverteilung ist die Kurtosis (dt.: Wölbung). Die Kurtosis kann man auch als Maß für den Grad der „Spitzigkeit“ (Ausprägung des Peaks) einer Verteilung sehen, was genauer als Bi-Modalität zu bezeichnen ist. Die Kurtosis k für einen Datenvektor x ist definiert als das Verhältnis des vierten Zentralmoments zu seiner Standardabweichung zur vierten Potenz:

$$k = \frac{E\{x - \mu\}^4}{\sigma^4} \quad (3.19)$$

Dabei ist E der statistische Erwartungsoperator, μ der Mittelwert von x und σ die Standardabweichung von x . Für eine praktische Implementierung wird ein Kurzzeitfenster $x = [x_{n-m/2}, x_{n-m/2+1}, \dots, x_{n+m/2-1}]$ definiert. Eine gleitende Kurtosis-Analyse ergibt sich dann zu

$$k_n = \frac{(x_n - \mu_n)^4}{\sigma_n^4}, \quad (3.20)$$

mit μ_n und σ_n als Mittelwert und Standardabweichung des Vektors x_n mit der Länge m .

Gl. 3.20 kann nun auf eine RIR angewandt werden, wodurch eine Art *RIR-Kurtosis* berechnet wird, die den Grad der „Spitzigkeit“, statt den Schalldruckpegel über die Zeit darstellt. Dabei geht die Amplitude der Kurtosis nicht zwangsläufig mit der Ausprägung der Reflexion in der RIR einher. In [Ushe 10] wird der Begriff *Kurtosis-Reflektogramm* erwähnt, welcher im Zusammenhang mit dieser Arbeit terminologisch als zutreffend erscheint.

Die zeitliche Auflösung eines Kurtosis-Reflektogramms ist von der Fenstergröße m und der Überlappung aufeinanderfolgender Fenster abhängig. Wenn das Analysefenster kürzer, als die Zeit zwischen zwei Reflexionen ist, ist der lokale Mittelwert μ zu gering, um eine korrekte Differenz zwischen einem Sample x und μ zu erhalten, sodass eine zu geringe Kurtosis resultiert. Andererseits würde ein zu großes Fenster das Kurtosis-Reflektogramm verschmieren und eine bi-modale Verteilung von zwei Peaks würde ebenfalls zu einer verringerten Kurtosis führen. Aufgrund dieser möglichen Fehlerquellen wurde eine modifizierte Kurtosis-Berechnung nach [Ushe 10] verwendet, in der ein einzelner Wert x durch eine erste Kurtosis-Analyse eines sehr kurzen lokalen Fensters ersetzt wird. Mithilfe eines zweiten, längeren Fensters, werden Mittelwerte und Standardabweichungen über einen größeren Zeitraum berechnet. Zusammengefasst in einer Gleichung folgt:

$$k_{n,l,m} = \frac{(\mu_{n,l_k} - \mu_{n,m_k})^4}{\sigma_{n,m_k}^4} \quad (3.21)$$

l_k und m_k sind die Fensterlängen, die beide das Sample n des Datenvektor x als Zentrum haben, wobei $m_k > l_k$ gilt. Weiterhin sind μ_{n,l_k} und μ_{n,m_k} die Mittelwerte dieser Fenster und σ_{n,m_k} ist die Standardabweichung des Fensters mit der Länge m_k . Bei den Fensterlängen, für die Messungen im Zuge dieser Arbeit, wurde sich an einer

empirischen Untersuchung orientiert, die ebenfalls in der oben referenzierten Arbeit durchgeführt wurde.

3.7 Spiegelschallquellenverfahren

Grundlegend für die experimentelle Methode in Kap. 5 ff. ist eine mathematische Modellierung der theoretischen Schallstrecken nach den Grundsätzen der geometrischen Raumakustik. In [Alle 79] wurde erstmals ein Spiegelschallquellenverfahren (SSQ-Verfahren) zur Modellierung von RIR beschrieben. Neben weiteren Verfahren, wie Ray-Tracing-Methoden und dem direkten Lösen der Wellengleichung (sh. Abschnitt 2.2), ist das SSQ-Verfahren eine Standardmethode der akustischen Raumsimulation.

Das SSQ-Modell erzeugt die Schallstrecken direkt zwischen Sender und Empfänger, unter der Berücksichtigung von Reflexionen. Die Ordnung M gibt dabei an, wie oft ein Schallstrahl an einer Raumbegrenzungsfläche reflektiert wird. Mit niedrigen Ordnungen berechnet man erste Reflexionen, die diskret in der IR eines Raumes als Peaks auszumachen sind. Sie repräsentieren die theoretischen Schalllaufzeiten im linearen und zeitinvarianten System.

Im Folgenden wurde auf die Darstellung in [Dokm 13] zurückgegriffen, um ein SSQ-Modell zu veranschaulichen. Darin wird von einer IR mit der Form

$$h_m(t) = \sum_i \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (3.22)$$

ausgegangen, wobei sich Sender und Empfänger an einer festen Position im Raum befinden. In diesem theoretischen Fall handelt es sich um eine Impulsfolge, in der auf den Direktschall ein Impuls für jede Reflexion folgt. α_i ist für die Verringerung der Amplitude von $\delta(t)$ verantwortlich, deren Hauptursachen in Kap. 2 beschrieben werden.

In einem SSQ-Modell wird ein Schallstrahl nach dem geometrischen Reflexionsgesetz (sh. auch Abschnitt 2.5) von der Wand reflektiert. Diese Reflexion kann mittels einer virtuellen Schallquelle, der SSQ \tilde{S}_i , simuliert werden. Für diesen Zweck wird die originale Schallquelle S an der Raumbegrenzungsfläche gespiegelt, welche für die Reflexion verantwortlich ist. Nun nimmt man an, dass es sich bei \tilde{S}_i , neben S um eine zusätzliche Schallquelle handelt. An beiden Quellen liegt das identische Signal an, jedoch ist das von \tilde{S}_i für eine einfache Raumsimulation entsprechend der größeren Distanz zum Empfänger verzögert und um den Grad der Wandabsorption in seiner Energie verringert. Mehrfachspiegelungen von \tilde{S}_i an den Verlängerungen der Raumbegrenzungsflächen führen zu SSQ höherer Ordnung. Die modellierte RIR ist die Summe aus dem Direktschall und dem Schall, der von den SSQ emittiert wird, vorausgesetzt es erfolgte eine Impulsanregung.

Eine SSQ erster Ordnung errechnet sich mit

$$\tilde{S}_i = S + 2\langle P_i - S, n_i \rangle n_i. \quad (3.23)$$

Dabei ist n_i der Normalenvektor der i -ten Raumbegrenzungsfläche und P_i ein beliebiger Punkt, der auf dieser Fläche liegt. Die Laufzeit der Reflexion an der i -ten Wand ist

$$\tau_i = \frac{\|\tilde{S}_i - R\|}{c}. \quad (3.24)$$

R markiert die Position des Empfängers und c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Eine SSQ einer höheren Ordnung M kann immer im Bezug auf eine SSQ mit der Ordnung $M = M - 1$ erzeugt werden. Eine SSQ zweiter Ordnung ist somit

$$\tilde{S}_{ij} = \tilde{S}_i + 2\langle P_j - \tilde{S}_i, n_j \rangle n_j, \quad (3.25)$$

wobei n_j der Normalenvektor einer weiteren Raumbegrenzungsfläche ist. Zudem gilt die Abstandsbeziehung

$$\|S - \tilde{S}_{ij}\| = \|\tilde{S}_i - \tilde{S}_j\|. \quad (3.26)$$

Die Gesamte Konstruktion der SSQ kann sehr gut grafisch dargestellt und nachvollzogen werden (sh Abb. 3.2). Als Notation für weitere Ausführungen sollen mit dem SSQ-Modell berechnete Laufzeiten, unabhängig von der Ordnung, τ_i^{mod} und Schallstrecken l_i bezeichnet werden.

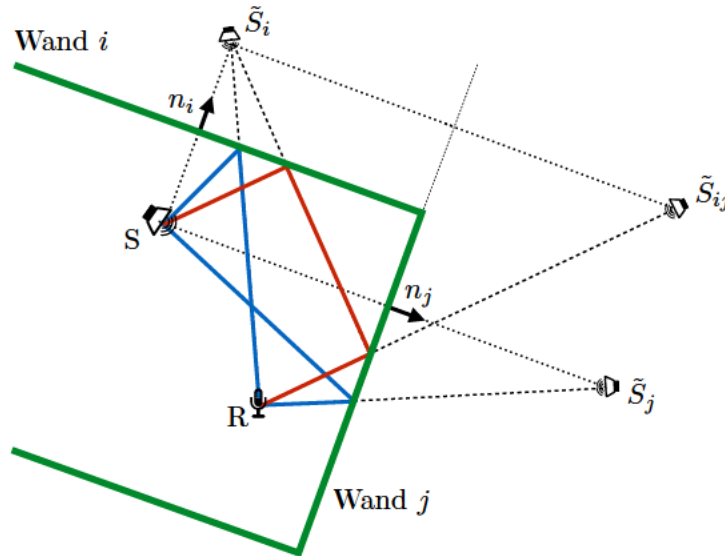


Abbildung 3.2: Spiegelschallquellenmodell mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung

3.8 Akustische Laufzeittomografie

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur tomografischen Rekonstruktion von Temperaturverteilungen innerhalb eines Volumens vorgestellt, der akustische Laufzeitmessungen auf bekannten Schallstrecken zugrunde liegen. Die Schallstrecken sollten dabei möglichst gleichmäßig in der Messumgebung verteilt sein. Die Methode wird in [Bart 11] beschrieben.

Die gemessene, temperaturabhängige Laufzeit entlang einer Schallstrecke l_i innerhalb eines begrenzten Raumes ist

$$\tau_i^{meas} = \int_{Ray} \frac{\partial l_i}{c(r)}. \quad (3.27)$$

Dabei ist ∂l_i ein Streckenelement der i -ten Schallstrecke und $c(r)$ die ortsabhängige Schallgeschwindigkeit. r beschreibt mit $r = xe_x + ye_y + ze_z$ den Ortsvektor.

Durch einen Algorithmus, der in der Lage ist, die Schallgeschwindigkeiten $c(r)$, die aus den individuellen Laufzeiten τ_i^{meas} hervorgehen, räumlich aufzulösen, kann ein Tomogramm der Raumtemperatur erstellt werden. Dies geschieht durch Inversion der Gl. 3.27. In der Quelle, die diesem Abschnitt zugrunde liegt, wird eine experimentelle, algebraische Methode zur tomografischen Rekonstruktion von aerodynamischen Messungen verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit theoretisch nicht betrachtet werden soll. Eine algebraische Methode verlangt, dass die Messumgebung durch die Aufteilung in Gitterzellen diskretisiert wird. Eine Zelle wird im Verlauf der Arbeit auch als *Voxel* bezeichnet werden, also eine quaderförmige Zelle, welche einen Quader regelmäßig zerteilt. Es wird angenommen, dass die Messgröße innerhalb einer Zelle konstant ist. Durch Mittlung wird ein Temperaturwert pro Zelle resultieren.

Mit der inversen Schallgeschwindigkeit $s_j = 1/c_j$, die eine Größe für die *Langsamkeit* darstellt, ergibt sich durch Diskretisierung von Gl. 3.27.

$$\tau_{ij}^{meas} = \sum_{j=1}^J l_{ij} s_j. \quad (3.28)$$

τ_{ij}^{meas} gilt für die j -te Zelle und l_{ij} , dem Teil der Schallstrecke l_i , welcher in dieser Zelle verläuft. Mit J ist die Anzahl der Gitterzellen notiert.

In [Bart 11] wird die Abfolge der Berechnung der Schallgeschwindigkeitsverteilung, innerhalb einer vorgegebenen Zellenaufteilung, mit einer algebraischen Methode folgendermaßen angegeben:

1. Bestimmung einer Startverteilung der Werte für die Langsamkeit (beispielsweise eine homogene Verteilung).
2. Berechnung von Laufzeitwerten auf bekannten Schallstrecken entsprechend der vorbestimmten Langsamkeits-Verteilung (Vorwärtsmodellierung).
3. Bestimmung von Abweichungen der Laufzeit aus der Vorwärtsmodellierung von gemessenen Werten, sowie Berechnung von Korrekturwerten für die Langsamkeit der Gitterzellen.

4. Neuberechnung der Langsamkeits-Verteilung entsprechend der Korrekturwerte.
5. Schritt 2-4 werden solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses kann die Anzahl der Iterationen, oder eine vordefinierte Abweichung zwischen modellierten und gemessenen Werten sein.
6. Der iterative Prozess endet mit der Verteilung der Langsamkeit, bzw. der Schallgeschwindigkeit als Ergebnis.

Mit der Gl. 2.32 kann nach diesem Vorgang die Verteilung der akustisch virtuellen Temperatur berechnet werden.

Für die Berechnungen in Schritt 3 wird ein Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT)-Algorithmus eingesetzt. Der tomografische Rekonstruktionsprozess mittels SIRT verlangt keine weiteren Informationen, wie die, die in diesem Abschnitt bereits genannt wurden. Während des iterativen Prozesses, der zur Lösung der Gl. 3.28 durchlaufen wird, ist der SIRT-Algorithmus für die Korrektur der Langsamkeit Δs_j der j -ten Zelle verantwortlich:

$$\Delta s_j = \frac{1}{L_j} \sum_{i=1}^I \left(l_{ij} \frac{\tau_i^{meas} - \tau_i^{calc}}{L_i} \right) \quad (3.29)$$

Die Summe $L_i = \sum_{j=1}^J l_{ij}$ ist dabei die Länge der i -ten Schallstrecke und die Summe $L_j = \sum_{i=1}^I l_{ij}$ beschreibt die Länge aller Schallstrecken innerhalb der j -ten Gitterzelle. J ist in diesem Zusammenhang die Anzahl der Zellen und I ist die Anzahl der Schallstrecken. Weiterhin ist τ_i^{meas} die gemessene Laufzeit auf der Schallstrecke l_i und $\tau_i^{calc} = \sum_{j=1}^J l_{ij} s_j$ ist die Laufzeit aus der aktuellen Vorwärtsmodellierung der Langsamkeits-Verteilung für l_i . Aus der Gl. 3.29 geht hervor dass die Korrekturen der Langsamkeiten von den Laufzeitdifferenzen auf allen Schallstrecken abhängig sind.

Mit Gl. 3.29 wird im oben beschriebenen iterativen Prozess aus der vorhergehenden Verteilung der Langsamkeiten s_j^t eine neue Langsamkeits-Verteilung

$$s_j^{t+1} = s_j^t + \Delta s_j^t \quad (3.30)$$

erstellt.

Aufgrund der Annahme, dass die Verteilung der Langsamkeit in der Messumgebung stetig ist, besteht eine gegenseitige Abhängigkeit benachbarter Gitterzellen. Nach jedem iterativen Zyklus wird eine Mittelung zwischen einer Zelle und ihren Nachbarzellen durchgeführt, um dieser Abhängigkeit Rechnung zu tragen. Der Grad der Abhängigkeit durch die Langsamkeiten in den Nachbarzellen kann mittels eines Gewichtungsfaktors w kontrolliert werden. Die gemittelte Langsamkeit wird mit der Anzahl n der benachbarten Zellen (maximal 26 für ein dreidimensionales Gitter) durch

$$\bar{s}_j = \frac{s_j + w \sum_{k=1}^n s_{j,o}}{1 + nw} \quad (3.31)$$

ermittelt, wobei für o gilt: $o = 1, \dots, 26$. In der referenzierten Arbeit wird ein Wert von $w = 0,01$ empfohlen. Dieser Wert wurde auf Basis von Simulationen ermittelt, die mit rekonstruierten Zellwerten verglichen wurden. Beim angegebenen Wert waren die

Differenzen zwischen den simulierten Werten und den iterativ bestimmten Werten am geringsten.

4 Messtechnik

In diesem Kapitel wird der Messaufbau mit allen Komponenten beschrieben, so wie er im Zuge der Abschlussarbeit entstanden ist. Hierfür wurde ein spezieller Mess-LS gebaut, dessen Eigenschaften hier festgehalten werden sollen. Andere relevante Daten der Messkette werden ebenso genannt, sowie ein beispielhafter Aufbau gezeigt und auf die verwendete Software eingegangen. Die zusammengestellte Anordnung sollte in erster Linie dem Prototyping dienen, da in Zukunft eine hardwarenähere Implementierung vorgesehen ist, die lediglich die Auswertung auf Softwareebene vorsieht.

4.1 Schallquelle

Eine genaue Analyse von Korrelaten, bzw. RIR zur Laufzeitermittlung aus reflektiertem Schall, setzt bestimmte Eigenschaften an die Schallquelle voraus (sh. Abschnitt 4.1.1). Andere übliche Anforderungen an einen LS, wie ein möglichst linearer Frequenzgang, spielen hingegen eine sekundäre Rolle. Die erwünschten Eigenschaften ließen sich zufriedenstellend durch die Gestaltung der Gehäuseform, dem Volumen und insgesamt kleinen Ausmaßen des LS in geschlossener Bauform erreichen. Dass die Anforderungen weitestgehend erfüllt wurden, zeigen die Messergebnisse in Abschnitt 4.1.3.

4.1.1 Anforderungen und Bauweise

Die ideale Schallquelle für den angedachten Einsatzzweck wäre eine Monopol-Punktquelle. Solch ein LS ist aus vielerlei physikalischen Gründen nicht als realer Schallemitter umzusetzen [Masi 11]. Stattdessen wurde versucht, einen LS zu bauen, der die folgenden Forderungen zufriedenstellend einhalten kann. Es erfolgt zudem zu jedem Punkt eine Begründung hinsichtlich der Anwendung und der Art der Realisierung.

Breitbandiger Übertragungsbereich

Bei der Korrelationsmesstechnik (sh. Abschnitt 3.3) ist die Übertragungsbandbreite die ausschlaggebende Größe für die maximale Höhe eines Korrelationsmaximums. Außerdem bestimmt sie, wie scharf ein Peak abgebildet werden kann [Dunn 93]. Für die MLS-Technik bedeutet dies, dass das weiße Betragsspektrum möglichst erhalten bleiben sollte, um impulsähnliche Maxima im Korrelat zu erzielen. Die Wahl des Treibers im verwendeten Gehäuse soll dafür sorgen, dass die obere und untere Grenzfrequenz weit auseinander liegen. Hierfür ist ein kleiner Breitband-LS mit niedriger Resonanzfrequenz geeignet.

Omnidirektionales Abstrahlverhalten

Das Abstrahlverhalten ist im hohen Grade abhängig von der Frequenz. Dennoch

sollte der LS für einen großen Frequenzbereich eine annähernd ungerichtete Abstrahlung zulassen, was nur bei tiefen Frequenzen uneingeschränkt gewährleistet werden kann. Da aber der Arbeitsbereich der Konstruktion erst bei zirka 200 Hz beginnt und weit darüber hinaus geht, wurde versucht, durch die Wahl des Treibers und der Gehäuseform zumindest für den mittleren Frequenzbereich eine omnidirektionale Abstrahlung zu erreichen. Eine theoretische Betrachtung des Abstrahlverhaltens kreisrunder Kolbenmembrane im Fernfeld, mit Durchmessern von 3/4-Zoll bis 12-Zoll, wurde in [Schu 11, S. 49 ff.] durchgeführt. Daraus geht hervor, dass je kleiner die Membran ist, desto weniger gerichtet ist ihre Schallabstrahlung. Das Gehäuse hat eine Tropfenform und besitzt eine Schallwand mit geringen Ausmaßen, sodass auch bei mittleren Wellenlängen eine Beugung um das Gehäuse ermöglicht und eine Reflexion an der Schallwand verhindert wird. Ein wenig bündelnder Treiber bietet die Voraussetzung für eine Abstrahlung in alle Richtungen.

Definiertes akustisches Zentrum

Um den LS in der Messumgebung positionieren zu können, sodass genaue Laufzeiten für Messstrecken abgeleitet werden können, ist es vorteilhaft, den Ort zu kennen, an dem der Schall im bzw. am LS entsteht. Sind die Abmessungen des Treibers gering, beschränkt sich auch der Bereich der möglichen Schallentstehung. Dennoch ist es wahrscheinlich, dass Fluktuationen des akustischen Zentrums, ein unbestimmtes Fehlerpotential für spätere Messungen haben. Das akustische Zentrum wandert nämlich frequenzabhängig, axial zum Treiber, was zu frequenzabhängigen Laufzeiten und breiten Korrelations-Peaks führt [Hofe 08].

Die in der raumakustischen Messtechnik meist eingesetzten Dodekaeder-LS, mit denen versucht wird, sich einem Kugelstrahler nullter Ordnung mit mehreren Einzel-LS anzunähern, ist für die in Kap. 5 ff. vorgestellte Messmethode nicht geeignet. Die räumlich getrennten Treiber würden durch ihre unterschiedlichen Laufzeiten jeweils eine eigene, zeitlich verschobene IR erzeugen. Dadurch würde das Ergebnis der Korrelation stark „verschmiert“ werden und eine Zuordnung von Reflexionen zu Schalllaufwegen erheblich erschwert.

Konstante Gruppenlaufzeit

Im Arbeitsbereich des LS sollte die frequenzabhängige Verzögerung möglichst konstant sein, um eine zeitgleiche Raumanregung für das komplette Wiedergabespektrum zu gewährleisten. Die Hochpasscharakteristik eines Breitband-LS sorgt zwar für einen Anstieg der Gruppenlaufzeit zu tiefen Frequenzen hin [Wein 08, S. 434], da der in seinen Ausmaßen beschränkte LS aber oberhalb des Bereiches großer Gruppenlaufzeiten eingesetzt wird, sind kaum Einschränkungen für die vorgesehene Verwendung zu erwarten.

Vorteilhaftes Zeitverhalten

Durch den Einsatzzweck als Mess-LS in Verbindung mit der MLS-Technik, wird der Schallquelle ein Signal zugeführt, dass prinzipiell ausschließlich aus Impulsen bzw. Spannungssprüngen besteht. Dieses sollte soweit wie möglich linear abgebildet werden können. In erster Linie wird dies von der Massenträgheit der Membran verhindert, wonach eine kleine, leichte Membran vorteilhaft sein sollte. Weiterhin sollte sich die geschlossene Bauart und ein kleines Gehäusevolumen vorteilhaft auf das Zeitverhalten auswirken [Star 99, Kap. 4.1].

Ausreichend hohe Wirkleistung

Trotz der Vorteile der Korrelation-Messtechnik (sh. Abschnitt 3.3), ist es unerlässlich, dass der LS genügend hohe Schalldruckpegel verzerrungsarm erzeugen kann. Durch die Laufzeitmessung auf Schalllaufwegen mit Reflexionen höherer Ordnung, müssen bei größeren Räumen große Distanzen überbrückt werden. Dies gilt vor allem in Räumen mit stark absorbierenden Wänden. Auch wenn die vorher gemachten Aussagen eher für einen sehr kleinen Treiber sprechen, braucht dieser dennoch eine gewisse Größe, um eine akzeptable Wirkleistung im relevanten Frequenzbereich zu erzielen [Schu 11, S. 59].

4.1.2 Der Lautsprecher

Betrachtet man alle erwünschten Anforderungen an die Schallquelle, müssen bei jedem Aspekt Kompromisse eingegangen werden. Schließlich wurde der 2-Zoll-Breitbandtreiber FRS 5 XTS von Visaton² (Datenblatt sh. Anhang A.3) aufgrund seiner Spezifikationen und seiner Verfügbarkeit gewählt und in ein geeignetes, geschlossenes Versuchsgehäuse eingesetzt. Das bedämpfte Gehäuse wurde mechanisch bearbeitet, sodass annähernd eine Tropfenform resultierte. Als Orientierung für die Gehäuseform diente [Masi 11], wo die Entwicklung und der Bau eines LS mit dieser Form und ähnlichen Anforderungen ausgeführt wurden. Abb. 4.1 zeigt den LS, wobei man erkennen kann, dass die Schallwand einen geringen Durchmesser hat, um das angestrebte Abstrahlverhalten anzunähern. Da das Gehäusevolumen $V \approx 0.25 \text{ L}$ durch den Hohlkörper aus Hartholz vorgegeben war, ergibt sich mit den ausschlaggebenden Thiele/Small-Parameter (TSP) des Treibers (sh. Tab. 4.1) rechnerisch eine Resonanzfrequenz von $f_0 = 263.29 \text{ Hz}$ und eine untere Grenzfrequenz von $f_3 = 209.93 \text{ Hz}$ bei einer Güte von $Q_{tc} = 0.97$ und einem unbedämpften Gehäuse. Die Berechnung wurde mit einem Online-Tool durchgeführt [Jobs 12]. Über die Art der Ausführung wurde Rücksprache mit einem semi-kommerziellen LS-Entwickler gehalten [Heiß 14]. Die Angaben des Treiberherstellers zum Schallentstehungsort (SEO) mit 12 mm hinter der Schallwand ergänzt die Daten, um den LS im Raum einzumessen.

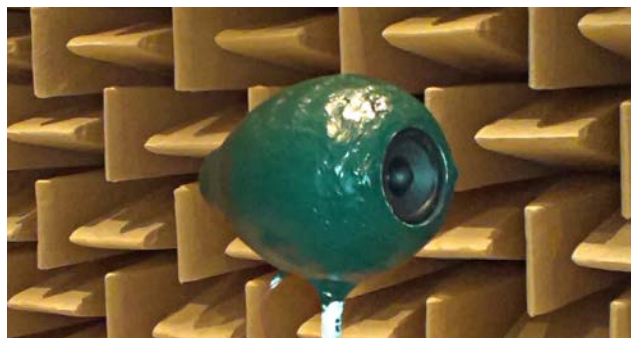


Abbildung 4.1: Tropfenförmiger Messlautsprecher

²VISATON GmbH, Ohligser Straße 29-31, D-42781 Haan, Tel.: 02129/552-0, Fax 02129/552-10, E-Mail: visaton@visaton.com

Parameter	Einheit	Herstellerangabe
Nennbelastbarkeit	W	5
Musikbelastbarkeit	W	8
Nennimpedanz Z	Ω	8
Übertragungsbereich	Hz	120-20000
Mittlerer Kennschalldruck	dB (1 W/m)	86
Abstrahlwinkel (-6 dB)	-	$180^\circ/4000$ Hz
Resonanzfrequenz f_s	Hz	190
Gleichstromwiderstand R_{dc}	Ω	7,7
Mechanische Güte Q_{ms}	-	3,49
Elektrische Güte Q_{es}	-	0,88
Gesamtgüte Q_{ts}	-	0,7
Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen V_{as}	L	0,23
Antriebsfaktor B_{xl}	Tm	2,67

Tabelle 4.1: Einige Herstellerangaben zum Lautsprecher-Treiber Visaton FRS 5 XTS

4.1.3 Akustische Eigenschaften

Alle Messungen am LS für diesen Abschnitt wurden im Reflexionsarmen Raum der TU-Berlin durchgeführt. Es wurde das Messsystem Monkey Forest der Four Audio GmbH & Co. KG³ in Verbindung mit dem Robo3-Frontend verwendet. Als Anregungssignal für die Vermessung des LS, diente ein logarithmischer Sweep der Ordnung 16. Weiterhin wurde das Messmikrofon Behringer⁴ ECM8000 verwendet. Die Nichtlinearitäten der Messkette wurden kompensiert. Bei allen Messungen wurden die Kriterien für das Fernfeld eingehalten [Wein 08, S. 35 ff.]. Eine zusätzlich Nahfeldmessung war aufgrund der hohen unteren Grenzfrequenz des LS nicht notwendig. Zur Messung unter Winkeln wurde der ferngesteuerte, elektrische Drehteller ET-2/ST-2 der Firma Outline⁵ verwendet.

Die Abb. 4.2 zeigt den mit 1/6 Oktave geglätteten Amplitudenfrequenzgang der Abstrahlrichtungen 0° , 45° , 90° und 180° . Es ist ein für geschlossene Gehäuse typischer Anstieg der Hochpassfilterflanke von 12 dB pro Oktave zu erkennen. Außerdem ist frontal auf Achse ein Anstieg hin zu hohen Frequenzen ab zirka 1.5 kHz um etwa 10 dB zu sehen, was in erster Linie mit dem zu erwartenden Baffle Step erklärt werden kann. Unter großen Winkeln fällt dieser Anstieg weg. In dem Bereich zwischen 250 Hz und 4.5 kHz darf ein, den Anforderungen entsprechendes, annähernd ungerichtetes Abstrahlverhalten erwartet werden.

³Four Audio GmbH & Co. KG, Bergdriesch 24-26, 52062 Aachen, Deutschland, email: info@four-audio.com

⁴Behringer Spezielle Studiotechnik GmbH, Hanns-Martin-Schleyer-Straße 36-38, 47877 Willich, 02154 92060

⁵Outline s.n.c. di Noselli G. & C., V. Leonardo da Vinci, 56, 25020 Flero (bs), Italy, Web Site: <http://www.outline.it>, E-Mail: outline@outline.it

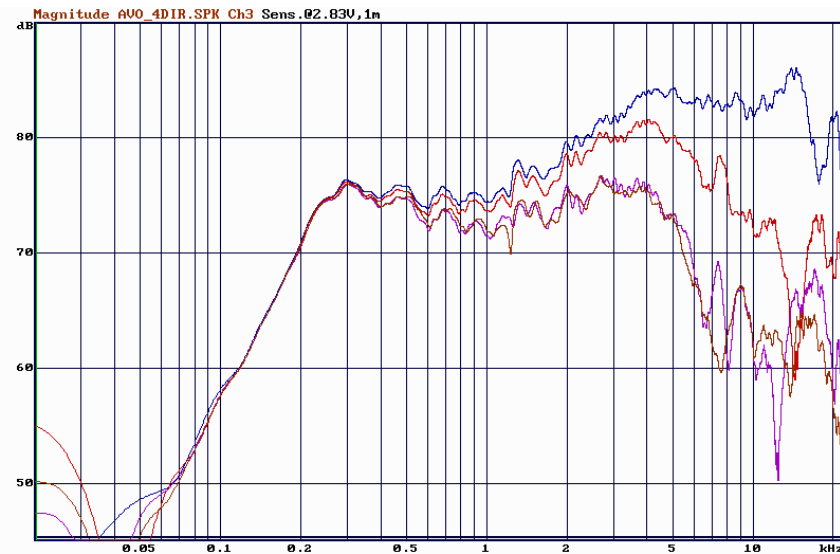


Abbildung 4.2: Amplitudenfrequenzgang bei den Winkeln 0° (blau), 45° (rot), 90° (magenta) und 180° (braun)

Das komplette Abstrahlverhalten lässt sich übersichtlich mit der 360° -Isobarendarstellung in Abb. 4.3 veranschaulichen. Hierfür wurden in 5° -Schritten die LS-Übertragungsfunktionen mit Monkey Forest, wie oben, in der Äquatorebene gemessen. Die Tatsache, dass der LS rotationssymmetrisch zur Treiberachse ist, verlangt Messungen nur in dieser Ebene. Zur Darstellung wurde das Programm ARTA in der Version 1.7.1 von ARTALABS⁶ verwendet und die Frequenzgänge mit 1/6 Oktave geglättet. Im Bereich zwischen 200 Hz und 4 kHz zeichnet sich eine sehr flächige Darstellung der Pegelminderungen um etwa -12 dB (gelb) ab. Wenn man bedenkt, dass die höheren Frequenzen in der Hauptabstrahlrichtungen um etwa den gleichen Betrag überhöht sind und die Linearität eine sekundäre Rolle spielt, kann von einer zufriedenstellenden, ungerichteten Abstrahlung bei diesen Frequenzen gesprochen werden.

Für das experimentelle Messsystem das im Zuge dieser Arbeit entstanden ist, ist es nötig, dass der LS in alle Raumrichtungen Schall mit einem ausreichenden Pegel, breitbandig, emittieren kann. Dadurch ist es möglich, den von den Raumbegrenzungsflächen reflektierten Schall, unabhängig von der Hauptabstrahlrichtung des LS zu empfangen und auszuwerten. Die Abb. 4.3 veranschaulicht diese Eigenschaft und bestätigt den Nutzen der speziellen Bauweise. Wichtig ist dabei, dass die Schallquelle dennoch annähernd die Eigenschaften einer Punktquelle besitzt, was durch den einzelnen, kleinformatischen Treiber realisiert wurde.

⁶ARTALABS, J. Rodina 4., 21215 Kastel Luksic, Croatia, e-mail: info@artalabs.hr

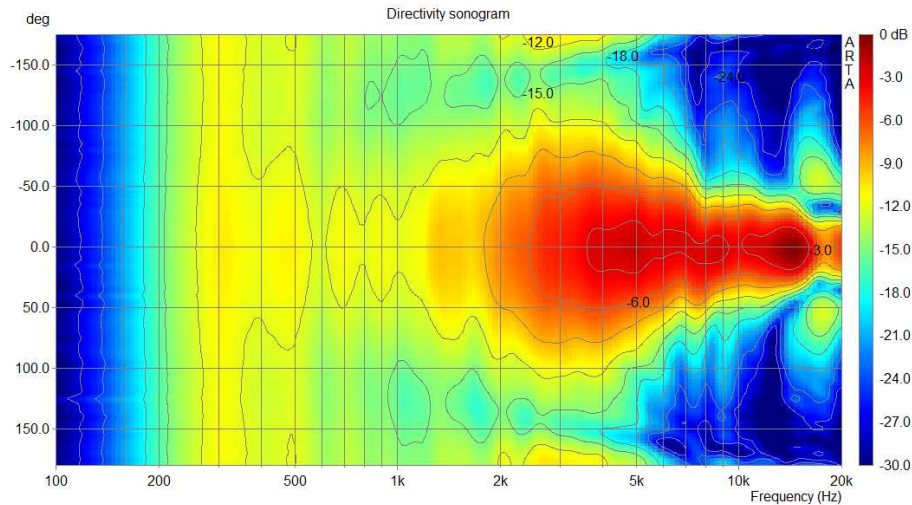


Abbildung 4.3: Abstrahlverhalten in der Isobarendarstellung

Zunächst kann das frequenzabhängige Zeitverhalten anhand der Gruppenlaufzeit in Abb. 4.4 beurteilt werden. Hier wurde wiederum mit 1/6 Oktave geglättet. Ab zirka 400 Hz gibt es, bis auf eine geringe Welligkeit, kaum noch nennenswerte Verzögerungen.

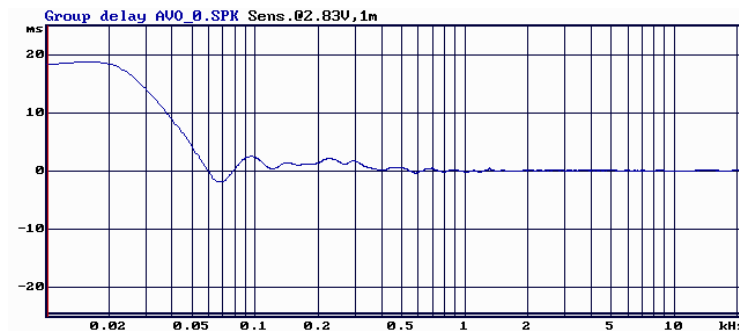


Abbildung 4.4: Gruppenlaufzeit

Die Sprungantwort in Abb. 4.5, die eine reine Zeitbetrachtung darstellt, ist typisch für einen Breitband-LS und bescheinigt ein wünschenswertes Zeitverhalten, da Ein- und Ausschwingvorgänge recht schnell vonstatten gehen. Die unendlich steilen Flanken des MLS-Signals werden somit nicht durch eine ausgeprägte Trägheit des LS über die Maßen geglättet, womit eine verlässliche Korrelationanalyse ermöglicht werden sollte. Selbst wenn Gruppenlaufzeit und Sprungantwort unter Winkeln betrachtet werden, bleibt ihre Grundform weitestgehend erhalten.

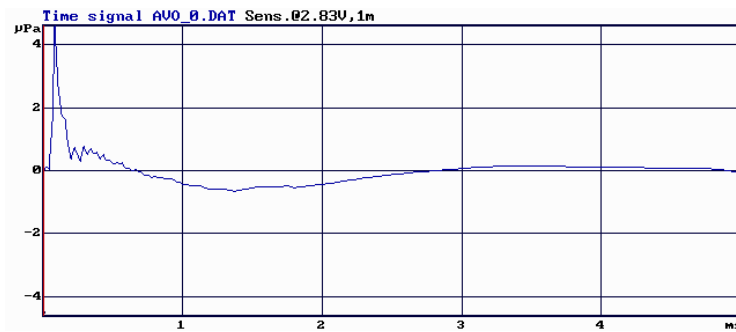


Abbildung 4.5: Sprungantwort

4.2 DAQ- und sonstige Hardware

Das nachfolgend aufgeführte Messequipment gehört zur Ausstattung des LIM und hat sich als geeignet für das Prototyping und in manchen Aspekten als sehr performant für die vorgesehenen Messaufgaben erwiesen.

DAQ-Messkarte

Die Data Translation⁷ DT 9847-1-1 ist ein 1-Kanal Dynamic Signal Analyzer zur Schall und Schwingungsanalyse mit einem Ausgang- und einem Eingangskanal (24 Bit) [DT98 13]. In der Messkarte ist ein Eingangsverstärker, sowie eine 18 V-Sensorspeisung integriert. Hervorzuheben ist die hohe Digitalisierungsrate von 216 kHz, die eine gute Auflösung des Korrelationssignals zufolge hat. Dieses wird so abgebildet, dass keine nachträgliche Signalrekonstruktion, wie durch die Verwendung der Samplingreihe [Hoff 98, S. 31 ff.], aufgrund einer mangelnden Genauigkeit bei der Diskretisierung, verwendet wird. Zudem besitzt die DT 9847-1-1 ein Anti-Aliasing-Filter im Eingangskanal, das sich automatisch an die vorgegebene Digitalisierungsrate anpasst. Außerdem ist der Ausgangskanal mit einem zweipoligen Butterworth-Tiefpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 100 kHz ausgestattet.

Mikrofon

Für den Messaufbau wurde stets ein 1/4-Zoll-Elektret-Kondensatormikrofon des Typs AVM⁸ MI-17 verwendet (Datenblatt sh. Anhang A.3). Es handelt sich dabei um ein industrielles Messmikrofon, das als Druckempfänger ausgelegt ist und somit im relevanten Frequenzbereich lediglich eine geringe Richtwirkung aufweist [Bore 99, S. 11]. Das Mikrofon besitzt nämlich eine Freifeldentzerrung, weshalb bei seitlichem Schalleinfall zu höheren Frequenzen hin ein leichter Pegelabfall im Wiedergabebereich des LS (sh. Abschnitt 4.1.3) erwartet werden kann [Bore 99, S. 24 f.]. Weitere Mikrofoneigenschaften können der Tab. 4.2 entnommen werden.

⁷Data Translation GmbH, Im Weilerlen 10, 74321 Bietigheim-Bissingen, Deutschland

⁸AVM Mess- und Prüfgeräte für Akustik und Vibration, Forststr. 32, 64572 Büttelborn - Germany,
E Mail: bertram.schapal.avm@t-online.de

Parameter	Einheit	Herstellerangabe
Übertragungsbereich	Hz	30 – 4000 (± 0.5 dB), 4000 – 20000 (± 1.5 dB)
Übertragungsfaktor	mV/A	$50 \pm 5\%$
Eigenrauschen (lin: 20 Hz – 20 kHz)	dB	30
Grenzschalldruckpegel	dB	130
Konstantstrom-Versorgung	mA	2 – 8
Quellwiderstand	Ω	50

Tabelle 4.2: Einige Herstellerangaben zum Mikrofon AVM MI-17

Leistungsverstärker

Das Kemo M032S⁹ (Datenblatt sh. Anhang A.3) ist ein einkanaliges Verstärkermodule, das durch seine geringen Ausmaße und einem niedrigen Energiebedarf, aufgrund seiner 6 – 16 V Betriebsspannung, eine gute Voraussetzung für einen kompakten und mobilen Messaufbau schafft. Dennoch ist die Verstärkerleistung ausreichend, um den Mess-LS zu betreiben. Auch die Herstellerangaben zum Verstärker sind in einer Tabelle (Tab. 4.3) aufgeführt.

Parameter	Einheit	Herstellerangabe
Betriebsspannung	V (DC)	6 – 16
Stromaufnahme	mA	max. 800
Eingangsempfindlichkeit	mV	< 80
Lautsprecheranschluss	Ω	4 – 16
Musikleistung	W	max. 12 bei 16 V (DC) an 4 Ω Lautsprecher
Übertragungsbereich	Hz	ca. 40 – 20000

Tabelle 4.3: Einige Herstellerangaben zum Leistungsverstärker Kemo M032S

Computer

Für alle Implementierungsschritte, numerischen Berechnungen und Messaufgaben wurde ein Lenovo¹⁰ Thinkpad T400, mit einem Intel Core 2 Duo @2,53MHz Prozessor und 4 GB RAM verwendet. Der Rechner wurde mit einer Windows 7 @64bit Installation betrieben.

4.3 Theoretische Messgenauigkeit

Aufgrund der Diskretisierung durch die Messhardware ergeben sich Unsicherheiten, die sich theoretisch berechnen lassen. Die Messgenauigkeit für Laufzeiten und daraus resultierende Größen werden maßgeblich von der Digitalisierungsrate bestimmt.

⁹Kemo Electronic GmbH, Klaus Kernchen, Mato Vukovic, Leher Landstr. 20, 27607 Langen, Germany, <http://www.kemo-electronic.de>, email: info@kemo-electronic.de

¹⁰Lenovo (Deutschland) GmbH, Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart, Deutschland

Der Zeitschritt $\Delta t = 1/216\,000\text{ s}$ ermöglicht für eine Schallgeschwindigkeit von $c = 343.421\text{ m/s}$ ($\varphi = 20\text{ °C}$) eine theoretische Längenauflösung von $\Delta l = 1.588\text{ mm}$. Die akustische Temperaturmessung basiert mindestens auf zwei Messgrößen und damit ist eine Bestimmung nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nötig, um die theoretische Temperaturlösung angeben zu können. Dieses lautet allgemein [Mesc 02, S. 6]:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (4.1)$$

Für den Fall der akustischen Laufzeitmessung auf einer Schallstrecke angepasst, folgt aus Gl. 4.1 für die Temperaturlösung:

$$\Delta T_{av} = 2T_{av} \frac{\Delta l}{l} \quad (4.2)$$

ΔT_{av} wurde in Abb. 4.6 über l aufgetragen, wobei zur Berechnung ebenfalls eine Raumtemperatur von $\varphi = 20\text{ °C}$ angenommen wurde. Zusätzlich muss die Annahme gemacht werden, dass l bei allen Temperaturen konstant ist.

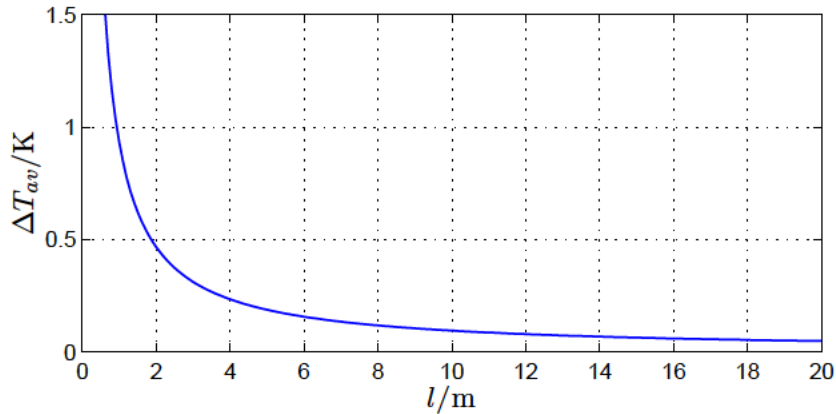


Abbildung 4.6: Theoretische Temperaturlösung

Bei einer Messstrecke von $l_i = 10\text{ m}$, was in mittelgroßen Räumen eine realistische Größenordnung ist, zumal wenn Reflexionen mit einbezogen werden, errechnet sich ein theoretischer Wert von $\Delta T_{av} \approx 0.09\text{ K}$. Bei einer Messstrecke von $l_i = 1\text{ m}$ würde man folglich mit einer Auflösung von $\Delta T_{av} \approx 0.9\text{ K}$ messen können.

4.4 Software

Obwohl am LIM Hardwarelösungen und Softwareroutinen zur akustischen Laufzeitmessung bereits existierten, wurde eine davon unabhängige Implementierung auf Softwarebasis umgesetzt. Dabei wurde auf folgende Werkzeuge zurückgegriffen.

Matlab®

Als Entwicklungswerkzeug wurde Mathworks Matlab®¹¹ in der Version 2013a @32bit verwendet. Zudem werden alle Berechnungen, Signalverarbeitungsschritte, die Ablaufsteuerung, sowie die Visualisierung von Ergebnissen einer Messung durch Matlab® realisiert. Das Hauptprogramm wurde durch Toolboxes erweitert, welche am LIM zur Verfügung standen. Aufgrund der Inkompatibilität der Data Acquisition Toolbox (sh. unten) mit der 64-bit-Version von Matlab®, musste mit der 32-bit-Version gearbeitet werden. Allerdings macht dies die Implementierung zu älteren Systemen kompatibel.

Data Acquisition Toolbox

Diese Matlab®-Erweiterung soll hier gesondert erwähnt werden, da sie in Verbindung mit der Messkarte (sh. Abschnitt 4.2) eine gute Grundlage für ein Matlab®-basiertes Messsystem darstellt [Math 14]. Hardwareparameter der Messkarte können unmittelbar im Matlab®-Code (M-Files) festgelegt werden. Die Toolbox sorgt bei den Messaufgaben in Kap. 5 ff. für die Konfiguration der Messkarte, die Kontrolle von Ausgangs- und Eingangsdaten und das Triggern. Dabei werden Eigenschaftswerte ausgetauscht, hauptsächlich in Form von Hardwareparametern. Daten, die über die Messkarte wiedergegeben und aufgezeichnet werden, werden transferiert und Events werden übertragen, wozu beispielsweise Trigger-Befehle gehören. Der Informationsfluss ist in Abb. 4.7 visualisiert. Eine nützliche Eigenschaft der Toolbox ist das direkte Schreiben von Daten auf die Festplatte, sodass der begrenzte Arbeitsspeicher des Computers irrelevant ist.

4.5 Messkette

In der Abb. 4.7 ist die schematische Darstellung der Messkette zu sehen. Typischerweise befinden sich lediglich der LS und das Mikrofon in der Messumgebung, sodass die Messung von außen gesteuert und überwacht werden kann, ohne ungewollte Zeitvarianzen zu erzeugen, die durch die Anwesenheit einer Person zwangsläufig entstehen würden (sh. Abschnitt 3.5).

¹¹The MathWorks GmbH, Adalperostraße 45, 85737 Ismaning, GERMANY, URL: <http://www.mathworks.de/products/matlab/>

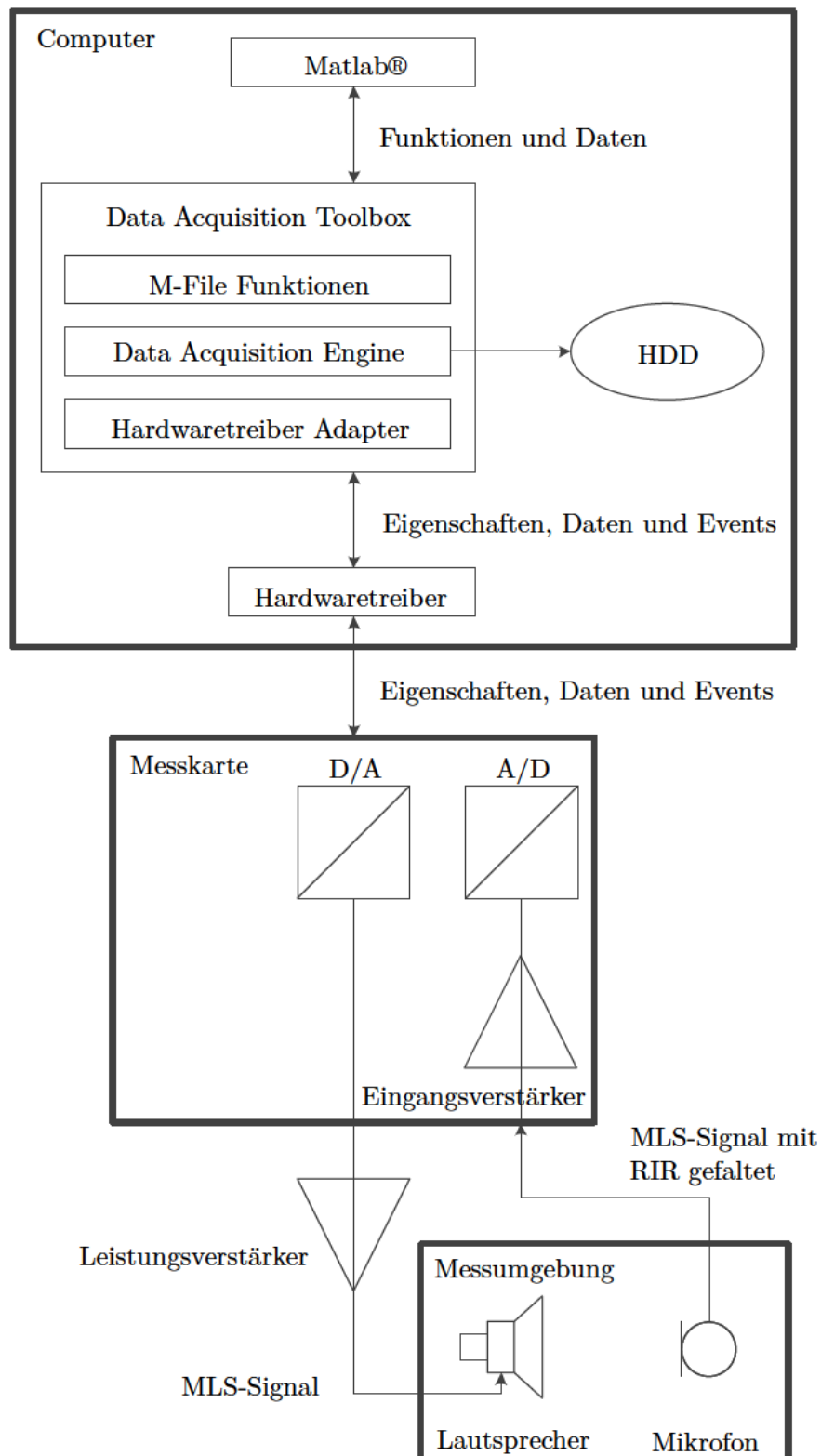


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Messkette

5 Experimentelle Messmethode

Aufbauend auf die Theorie und die Messausstattung, die in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführt sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine experimentelle Messmethode entwickelt, um Raumtemperaturverteilungen bestimmen zu können. In diesem Kapitel werden die Anforderungen an das Messverfahren definiert und relevante Schritte für die methodische Umsetzung aufgeführt. Der komplette Messvorgang läuft in Matlab® ab, weshalb in jedem Abschnitt auch auf die Implementierung in dieser Entwicklungsumgebung eingegangen wird.

5.1 Anforderungen

Mithilfe einer akustischen Messmethode soll es möglich sein, die Raumtemperaturentwicklung bzw. die Raumtemperatur, in Form einer relativen bzw. absoluten Messung, räumlich aufgelöst, zu ermitteln. Dies soll über einen beliebig langen Zeitraum machbar sein, um eine dauerhafte, stationäre Raumüberwachung realisieren zu können. Für viele reale Messaufgaben genügt die relative Erhebung der Temperaturverteilung, also die Feststellung örtlicher Änderungen über die Zeit. Darüber hinaus verhindern, im Fall der eingesetzten Messkarte, zeitliche Nichtlinearitäten (sh. Abschnitt 5.2.8) und daraus resultierende Laufzeitfehler eine direkte, absolute Messung. Trotzdem soll versucht werden, eine absolute Temperaturmessung zu ermöglichen.

Das Messsystem soll ohne größeren Aufwand in einen Raum integrierbar sein. Hierfür soll lediglich ein LS und ein Mikrofon in die Messumgebung eingebracht werden müssen. Die Computerschnittstelle in Form eines AD-/DA-Wandlers muss daher lediglich einkanalig am Ausgang und am Eingang ausgelegt sein. Es sollen auch unter der Beeinträchtigung von hohen Störpegeln Messungen möglich sein. Die Temperaturauflösung sollte im Bereich des Auflösungsvermögens gängiger Messgeräte liegen, wobei prinzipbedingt die akustisch virtuelle Temperatur gemessen wird (sh. Abschnitt 2.4.2). Ein gängiges, kommerzielles akustisches Messgerät für mikrometeorologische Messungen löst mit zirka 0.01 K auf [Copp 83], was der Größenordnung in Abschnitt 4.3 entspricht. Weiterhin sollte die Messfrequenz im Bereich weniger Sekunden liegen, da eine potentielle Erweiterung der Messaufgaben in der Erfassung von Strömungen und Turbulenzen gesehen wird. Meteorologische Standarddaten werden mit einer Frequenz von 1 Hz abgetastet [Foke 06, S. 189].

5.2 Umsetzung und Implementierung

Die Messmethode basiert auf der Ermittlung von Schallgeschwindigkeiten auf bekannten Schallstrecken, unter der Berücksichtigung von Reflexionen an Raumbegrenzungsflächen. Daraus abgeleiteten Temperaturen werden mithilfe eines tomografischen Verfahrens räumlich aufgelöst. Das Messverfahren wurde für ein „Proof of Concept“ aufgebaut und ist daher ausschließlich für annähernd quaderförmige

Räume ohne jegliche Schallreflexionsflächen innerhalb der Messumgebung ausgelegt. Dies ist mit der einfachen Implementierung der Raumsimulation mittels dem Spiegelschallquelle (SSQ)-Verfahren (sh. Abschnitt 5.2.7) zu begründen.

In den folgenden Abschnitten werden relevante Algorithmen aufgeführt, die zur Umsetzung des Verfahrens beitragen. Außerdem wird beschrieben, welche Aufgabe sie bei der Messmethode erfüllen. Wobei zunächst noch nötige Konventionen definiert werden und ein Überblick über den gesamten Programmablauf gegeben wird.

Hinweis: Alle Matlab®-Skripte, die nicht explizit referenziert sind, befinden sich auf einem Datenträger, welcher der Arbeit beigelegt ist.

5.2.1 Konventionen

Jedem Raum wird ein Koordinatensystem zugewiesen, dessen Ursprung in einer unteren Raumecke liegt. Schallsender und Empfänger werden ebenfalls in diesem Koordinatensystem platziert.

Raumbegrenzungsflächen

Zur Berechnung der Schallwege in einem Raum, ist es unerlässlich die Wände eindeutig zu benennen. Hierfür werden sie, beginnend im Ursprung, im mathematisch positiven Sinn, von 1 bis 4 nummeriert. Die Decke erhält die Nummer 5 und der Boden die Nummer 6 (sh. Abb. 5.1).

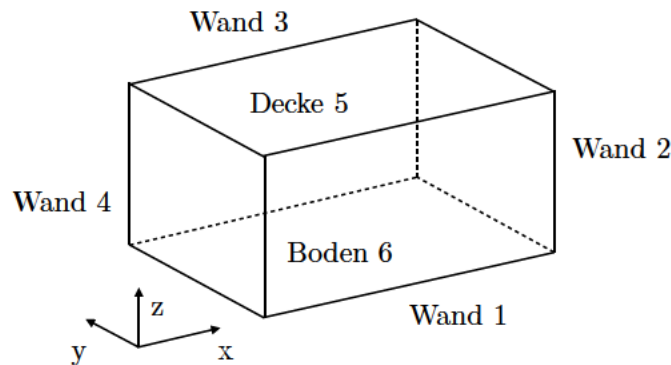


Abbildung 5.1: Nummerierung der Raumbegrenzungsflächen

Tomografie

Auch für die Berechnung der räumlichen Temperaturtomografie und ihrer Darstellung muss eine Nummerierung der Teilvolumen (Voxel) festgelegt werden. Sie erfolgt ebenenweise von unter nach oben. Für eine Tomografie im Quaderraum der Ordnung 3 ist die Nummerierung in Abb. 5.2 zu sehen. Alle Messungen für diese Arbeit wurden mit dieser Ordnung durchgeführt.

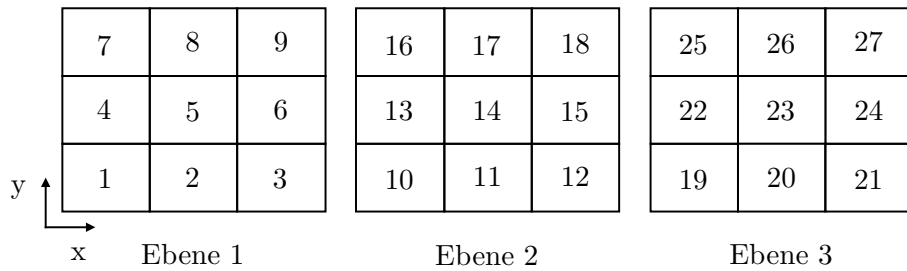


Abbildung 5.2: Nummerierung der Tomografie-Voxels

5.2.2 Programmablauf

Zusammenfassend für die experimentelle Messmethode und deren Implementierung wird mit Abb. 5.3 der Programmablauf dargestellt, in dem alle Skripte und Funktionen des Algorithmus aufgeführt werden, die nicht Matlab®-intern sind. Mit dem Ausführen des Hauptprogramms `DAQrun.m` (sh. Anhang A.1.1) wird eine Messung gestartet. Es kann in zwei Teile gegliedert werden, wobei der initiale Programmteil nur einmal zu Beginn einer Messung durchlaufen wird und der zweite Teil für jede einzelne Messung in einer Schleife ausgeführt wird.

Initialer Programmteil	DAQrun.m	
	- laden von Messparametern	
	DAQinit.m	Initiale Nutzerdateneingabe
	- Bestimmung initialer Größen	
	- Erstellung des Spiegelschallquellenmodells	
	imageModel.m	Berechnung von theoretischen Laufzeiten und Schallstrecken
		plane_line_intersect.m Schnittpunktberechnung einer Ebene mit einer Gerade
	- Raumaufteilung für Tomographie	
	cellSoundRays.m	Berechnung von Schallstreckenlängen für einzelne Voxels
		plane_line_intersect.m
	- Kontrolle der Schallstreckenlängen	
	- Messsignalerzeugung	
	mls.m	Erzeugung einer Maximalfolge
	- Laden des MLS-Referenzsignals	
	- Initialisierung der Messhardware und Variablen	
	- Laden der Daten aus der initialen Referenzmessung	
	- Ausschluss fehlerhafter Reflexionen	
Wiederholte Messroutine	- Start: Timing	
	- Triggern der Messung und Daten einlesen	
	- Speichern der aufgenommenen Rohdaten	
	- Neuinitialisierung der Messhardware	
	- Bandbegrenzung des Eingangssignals	
	hpZeroPhase.m	nullphasiges Hochpassfilter
	- Korrelation des Eingangssignals mit dem MLS-Referenzsignal	
	- Beschneidung des Korrelationsergebnisses (absolute Laufzeit, Analysefenster)	
	- Schätzung des SNR	
	- Statistische Signalaufbereitung	
	kurtosis.m	Berechnung des Kurtosis-Reflektogramms
	- Fenstergebundenes Peak Picking	
	- Berechnung der mittleren akustisch virtuellen Temperatur der Schallstrecken	
	- Berechnung der aktuellen Schallgeschwindigkeit	
	- Berechnung der Temperaturverteilung	
	SirtAtom.m	Tomographiealgorithmus
		TomoAverage.m Mittelung von Zellwerten
		TomoVectorShift.m
	- Neuberechnung des Spiegelschallquellenmodells	
	imageModel.m	plane_line_intersect.m
	- Grafische Darstellungen während der Messung	
	runnungTimePlot.m	Plot des Kurtosis-Reflektogramms
	interactivePlot.m	Interaktive Laufzeitanpassung
	imageModel.m	Visualisierung des Spiegelschallquellenmodells (plotFlag = 1)
	plotTemp3D	Visualisierung der Raumtemperaturverteilung
		tomo2.m Color Map

Abbildung 5.3: sequentieller Programmablauf

5.2.3 Signalerzeugung, -ausgabe und -aufnahme

Bei dem Messsignal handelt es sich um eine MLS der Ordnung N , deren Eigenschaften bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben wurden. Beim initialen Start einer Messung wird eine MLS mit der Funktion `mls.m` erzeugt. Für die Implementierung wurde der Algorithmus von [Brow 02] verwendet. Darin wird ein binäres, rückgekoppeltes Schieberegister genutzt. An jeder Stelle des Registers kann eine 0 oder eine 1 anliegen. Die Eingangswerte werden durch Abgriffe (taps) einer Exklusiv-Oder (XOR)-Schaltung erzeugt. Um eine für jede Messung reproduzierbare Folge zu erhalten, liegt zu Beginn der Berechnung an jeder Stelle eine 1 an. Eine Folge mit den Eigenschaften einer MLS entsteht nur, wenn die XOR-Verknüpfung bei der Rückkopplung bestimmte Abgriffe zulässt. Diese werden mithilfe von irreduziblen Polynomen und der Mathematik der Galois-Felder bestimmt [Luke 92, Kap. 3]. Jedoch erzeugt nicht jedes irreduzible Polynom eine MLS, sondern nur ein Teil von ihnen, die sog. primitiven Polynome. Diese können nicht direkt berechnet werden, sondern müssen durch ein Suchverfahren bestimmt werden. Aus diesem Grund sind Koeffizienten der primitiven Polynome für die Ordnungen $N = 2, 3, \dots, 32$ vorgegeben.

Die Messumgebung wird bei jeder Einzelmessung mit dem oben beschriebenen MLS-Signal angeregt. Dabei wird das Signal ausgegeben und zeitgleich das Eingangssignal aufgezeichnet, wobei die Aufzeichnungsdauer die Zeit bis zum Eintreffen des Direktschalls, sowie die Nachhallzeit berücksichtigt und dementsprechend beaufschlagt wird. Bei raumakustischen Messungen werden MLS-Signale mit einer Länge verwendet, die in etwa der Nachhallzeit des Raumes entspricht [Möse 10, S. 568]. Bei den Messungen für diese Arbeit wurden deshalb Ordnungen von $N = 15$ bis $N = 18$ verwendet, was einer Anregungsdauer von zirka 0.15 s bzw. 1.21 s, bei einer Digitalisierungsrate von 216 kHz am Ausgang, entspricht.

5.2.4 Nullphasiges Hochpassfilter

Nachdem das mit der Raumantwort gefaltete Messsignal digitalisiert wurde, wird es einer Hochpass-Filterung unterzogen. Damit werden tieffrequente Signalanteile entfernt, um ein besseres Korrelationsergebnis zu erhalten und um das SNR zu erhöhen. Die Grenzfrequenz des Filters ist unterhalb des Arbeitsbereiches des LS, wodurch die komplette Bandbreite des LS zu Messzwecken genutzt werden kann.

Das verwendete Filter ist linearphasig, was bedeutet, dass der Betragsfrequenzgang, ohne Beeinflussung der Phase manipuliert werden kann. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, da Phasenverschiebungen nichtlinearer Filter dem Einfluss von Zeitvarianzen entsprechen würden und es somit zu Verfälschungen der Messergebnisse kommen würde [Kob 96]. In [Lind 06, S. 124 ff.] wird bewiesen, dass mittels Kaskadierung kausaler Infinite Impulse Response (IIR)-Filter, nullphasige Filter implementiert werden können. In der Signal Processing Toolbox von Matlab® ist die Funktion `filtfilt` enthalten, in der dieser Algorithmus umgesetzt wurde. Neben dieser Funktion wird in `hpZeroPhase.m` (sh. Anhang A.1.2) das Digital Filter Design-Werkzeug `fdesign.highpass` mit der Ordnung 18 und einer Cut-Off-Frequenz von 150 Hz für den 3 dB-Punkt unterhalb des Durchlassbereiches verwendet. Als Second Order Section-Filter wird ein Butterworth-Filter genutzt.

Die Frequenzanteile einer Aufnahme des Messsignals der Ordnung 18 im Reflexionsarmen Raum mit der Messtechnik aus Kap. 4 sind in Abb 5.4 zu sehen, bevor und nachdem die Aufnahme gefiltert wurde. Der Betragsfrequenzgang wurde jeweils mit 1/6 Oktave geglättet. Da eine MLS ein weißes Spektrum aufweist, entspricht der Verlauf in etwa dem Frequenzgang des Mess-LS (vgl. Abb 4.2).

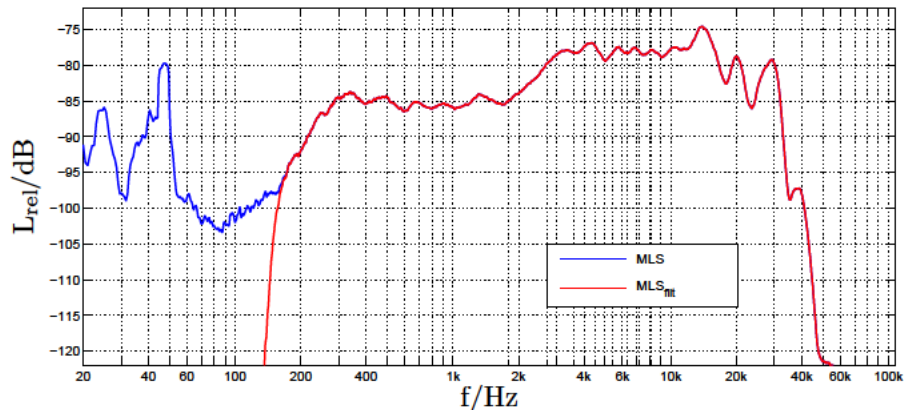


Abbildung 5.4: Wirkung des linearen Filters im Frequenzbereich

5.2.5 Korrelation mit Referenzsignal

Das aufgezeichnete und gefilterte Signal (sh. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4), das einer Faltung des vom LS ausgegebenen Signals, mit der IR des Raumes, entspricht, wird entsprechend Abschnitt 3.3 mit einem Referenzsignal korreliert. Dafür wird die Matlab®-interne Funktion `xcorr` im Hauptprogramm `DAQrun.m` verwendet. Ein Ausschnitt eines solchen Korrelats ist in Abb. 5.7 zu sehen. Bei den genutzten Längen der MLS-Anregung ist, trotz niedrigem Signalpegel und der Präsenz von breitbandigen Störgeräuschen, ein zufriedenstellendes Korrelationsergebnis zu erwarten, das zur Reflexionsdetektion verwendet werden kann [Kob 96].

Statt mit der numerisch generierten MLS-Folge, wird mit einer Aufnahme dieser Folge korreliert. Diese muss die gleiche Ordnung haben und unter Freifeldbedingungen entstanden sein. Damit werden Nichtlinearitäten des Messsystems berücksichtigt [Terv 11, S. 71]. Die Konsequenz ist, dass sowohl das wiedergegebene Messsignal, als auch das Referenzsignal die Übertragungseigenschaften der Messkette beinhalten und das SNR (sh. Abschnitt 5.2.6) der KKF wird verbessert. Hierfür wurden mit der Messtechnik aus Kap. 4 Aufnahmen des MLS-Signals unterschiedlicher Ordnung im reflexionsarmen Raum der TU-Berlin gemacht. Das Signal wurde anschließend mit dem Filter aus 5.2.4 gefiltert. Da sich die IR eines LS mit der Abstrahlrichtung ändert [Terv 11, S. 72], wurden zudem Aufnahmen verschiedener Ordnung in 30°-Schritten gemacht.

5.2.6 SNR

Bei jeder Einzelmessung wird das Signalrauschverhältnis des Korrelationsergebnisses geschätzt. Das SNR ist ein Qualitätskriterium für eine Messung und daraus ableitbare Reflexionen und ist für zeitlich konstante Signale als das Verhältnis der Nutzsignalleistung zur Rauschleistung definiert. Dadurch, dass aber das untersuchte Signal nicht konstant ist, sondern exponentiell abklingt, müssen Beobachtungszeiträume definiert werden. In Anlehnung an [Lind 06, S. 130 ff.], wo die SNR-Bewertung von RIR behandelt wird, wurde folgende Abschätzung in `DAQrun.m` implementiert:

$$SNR_{50} = 10 \log \left(\frac{MS(h_{50}(n)) - MS(m(n))}{MS(m(n))} \right) \quad (5.1)$$

$MS(h_{50}(n))$ ist die Schallenergie der ersten 50 ms im Korrelationsergebnis, die nach dem Peak für den Direktschall folgen und das Nutzsignal darstellen. Diese Länge wurde gewählt, da innerhalb dieser Zeit, selbst in größeren Räumen eine Vielzahl von Reflexionen erster und zweiter Ordnung bereits am Empfangsort eingetroffen sind. $MS(m(n))$ ist die Energie des Grundrauschens. Dafür wird ein Bereich vor dem Direktschallpeak aus der initialen Grundlaufzeit verwendet und dessen Energie geschätzt („estimate from initial gap“).

Das SNR ist im Fall dieser Messmethode abhängig von der Ordnung der MLS, der Auspegelung des Messsystems, den Eigenschaften der Übertragungskette und von Hintergrund-, und Störgeräuschen in der Messumgebung, sowie der Ausrichtung des LS zum Mikrofon. Als unteren Grenzwert für das SNR_{50} könnte man 20 dB angeben, da diese Schwelle in [Ushe 10] für eine geringe Fehlerrate bei der Laufzeitbestimmung durch Peak Picking genannt wird. Dieser Wert wurde bei allen Messungen, die für diese Arbeit gemacht wurden erreicht.

5.2.7 Spiegelschallquellenmodell

Ein SSQ-Modell wurde nach Abschnitt 3.7 implementiert. Zusammenfassend dargestellt, berechnet der Algorithmus in `imageModel.m` (sh. Anhang A.1.3), unter der Angabe der Raumgeometrie und der Position von Sender und Empfänger, die theoretischen Schalllaufwege l_i , und die daraus resultierenden Laufzeiten τ_i^{mod} von Schallreflexionen. Da ein modellierter Schallstrahl, im Vergleich zu anderen akustischen Raumsimulationsmethoden, exakt der Messstrecke für die Laufzeit entspricht, wurde das SSQ-Modell adaptiert. Für die vorliegende Arbeit wurde lediglich ein Modell der Ordnung 2 benötigt, um eine ausreichende Anzahl von Messstrecken für eine experimentelle Umsetzung zu erhalten, was zu einem geringen Implementierungsaufwand und einer geringen Rechenzeit führt, sowie zu einer deutlichen Abbildung einzelner Reflexionen im Reflektogramm.

Im Gegensatz zu Abschnitt 3.7 sind für diese Arbeit lediglich die Schalllaufzeiten τ_i^{mod} von Interesse, weshalb eine Modellierung von α durch Dämpfungs- und Absorptionsvorgänge nicht nötig ist. Zusätzlich zu den SSQ werden aber die Punkte der geometrischen Reflexion an den Raumbegrenzungsflächen berechnet. Diese werden für die Darstellung der Schallstrahlen und somit für eine Einschätzung der räumlichen Schallstrahlverteilung benötigt. Die Plot-Routine für die Visualisierung ist

ebenfalls in `imageModel.m` integriert. Vor allem aber sind sie die Grundlage für die Implementierung der Temperaturtomografie in Abschnitt 5.2.12. Die Schnittpunkte der Schallstrecken mit den Raumbegrenzungsflächen wurden mit der Funktion `plane_line_intersect.m` berechnet [Khal 14]. In Abb. 5.5 ist ein SSQ-Modell mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung eines Raumes mit den exemplarischen Maßen $x = 7\text{ m}$, $y = 5\text{ m}$ und $z = 3\text{ m}$ als Dreitafelprojektion visualisiert. Der LS befindet sich an der Position $S(1, 1, 1)$ und das Mikrofon an der Position $R(5, 4, 2)$. Da in den frontalen Ansichten die Reflexionen erster Ordnung immer von Reflexionen zweiter Ordnung verdeckt werden, ist in Abb. 5.6 eine dreidimensionale Ansicht des selben Modells zu sehen.

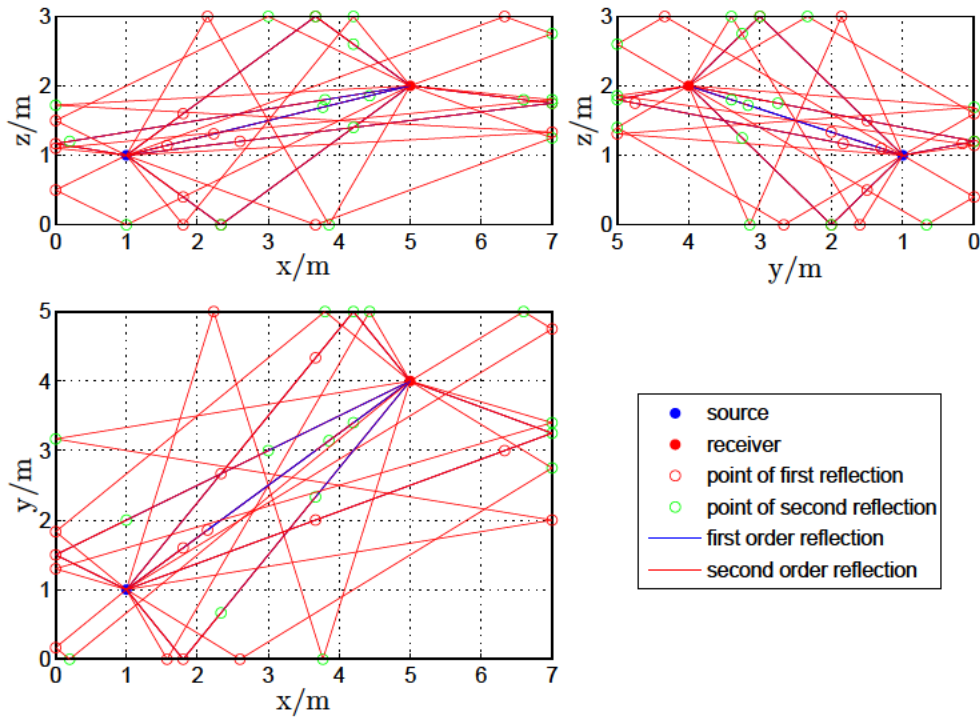


Abbildung 5.5: Dreitafelprojektion eines SSQ-Modells mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung

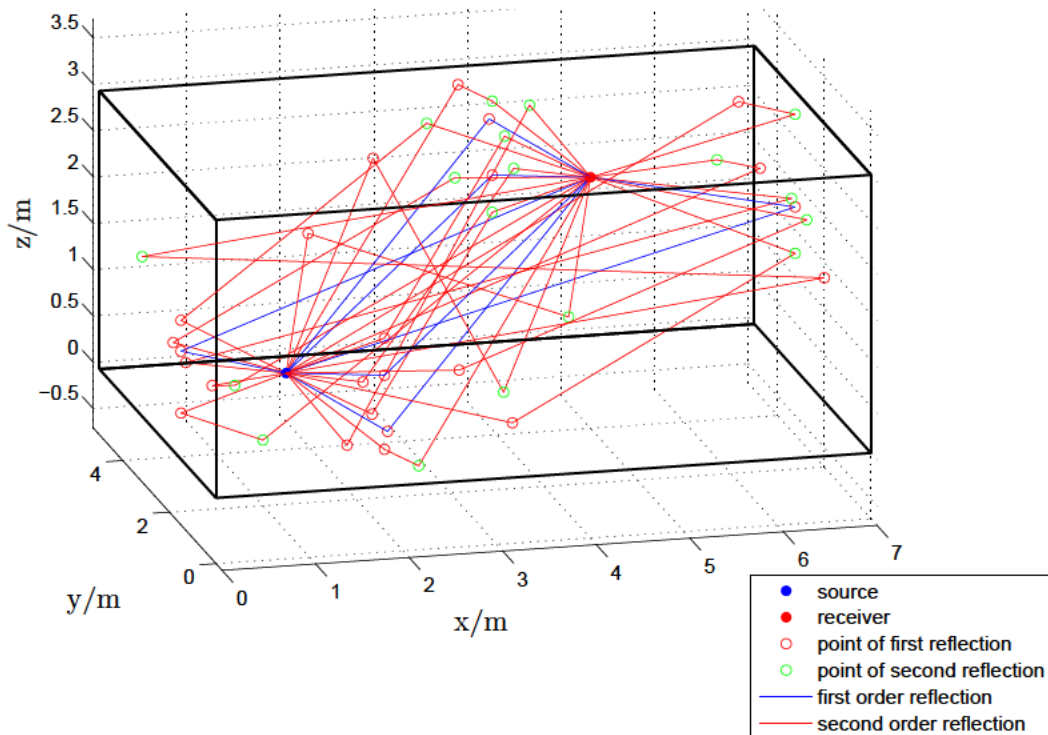


Abbildung 5.6: Dreidimensionale Darstellung eines SSQ-Modells mit Reflexionen erster und zweiter Ordnung

5.2.8 Bestimmung absoluter Laufzeiten

Zunächst sei festzuhalten, dass es mit der Messkarte (sh. Abschnitt 4.2) über Trigger-Befehle zur Hardwarekontrolle per Software nicht möglich ist, den Eingangskanal und Ausgangskanal zeitsynchron zu steuern. Wie auch bei konventionellen Audio-Interfaces, besteht, trotz zeitgleichem Trigger-Befehl, ein Versatz von einigen Samples, deren Anzahl auf unvorhersehbare Weise schwankt. Die Schwankungen wurden mittels eines Loopbacks des Ausgangs und Eingangs an der DT 9847-1-1 bestätigt. Die Signalaufnahme und die Wiedergabe eines Impulses (Sample ungleich Null) wurden zeitgleich getriggert. Die Tabelle 5.1 gibt für acht Wiederholungen die Stelle an, an welcher sich der Impuls in der Aufnahme befindet. Der Samplewert ist bei jedem Durchgang verschieden.

Durchgang	1	2	3	4	5	6	7	8
Samplewert	8557	6028	6034	6058	6108	8005	5852	8123

Tabelle 5.1: Synchronität von Ausgangs- und Eingangskanal der DT 8947-1-1-Messkarte

Aus diesem Grund ist eine absolute Messung von Laufzeiten mit nicht spezialisierter Hardware unmöglich. Absolute Laufzeiten werden stattdessen indirekt berechnet. Hierfür wird in `DAQrun.m` im Korrelationsergebnis aus Abschnitt 5.2.5 nach der Stelle des absoluten Maximums gesucht, denn dieses entspricht im Normalfall dem des Direktschalls. Ausgehend von diesem Referenzzeitpunkt kann nun ein Reflektogramm mit den absoluten Laufzeiten bestimmt werden. Hierfür wird die theoretische Laufzeit des Direktschalls $\tau_{dir} = l_{dir}/c$ dem Korrelationsergebnis links des Maximums vorangestellt, wobei l_{dir} der Abstand zwischen Sender und Empfänger ist. Anschließend wird das Korrelat zu einem Analysefenster mit initial definierter Gesamtlänge Δt_g (Länge des Kurtosis-Reflektogramms) verkürzt. Schematisch ist diese Vorgehensweise an dem Ausschnitt eines Korrelationsergebnisses einer Messung in Abb. 5.7 zu sehen. Darin sind der Peak für den Direktschall, die Laufzeit τ_{dir} und das Fenster der Länge Δt_g skizziert.

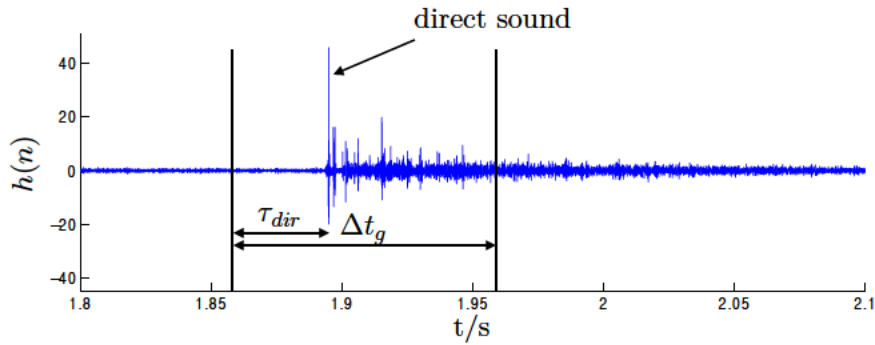


Abbildung 5.7: Korrelationsergebnis mit schematischer Darstellung der Bestimmung absoluter Laufzeiten

5.2.9 Reflexionserkennung, Peak Picking und Laufzeitermittlung

Aus der RIR in Abschnitt 5.2.8 wird das Kurtosis-Reflektogramm in `kurtosis.m` (sh. Anhang A.1.4) nach Abschnitt 3.6.2 berechnet, um signalanalytisch Reflexionen herauszuarbeiten. Daraufhin werden die theoretischen Schalllaufzeiten τ_i^{mod} , die in Abschnitt 5.2.7 ermittelt wurden, auf das Kurtosis-Reflektogramm $k(t)$ angewendet, um Fenster variabler Länge Δt_f bei den erwarteten Reflexionen zu setzen. Die Fenster sind um die theoretischen Laufzeiten zentriert. Innerhalb dieser Fenster wird die Laufzeit des absoluten Maximums bestimmt und zur Laufzeit des Fensterbeginns addiert, wodurch letztendlich die gesuchte Laufzeit τ_i^{meas} für eine modellierte Strecke ermittelt wird. Dieser Vorgang ist im Hauptprogramm `DAQrun.m` implementiert und lässt sich mathematisch folgendermaßen beschreiben:

$$\tau_i^{meas} = \tau_i^{mod} - \frac{\Delta t_f}{2} + \operatorname{argmax}\{k(n)\} \quad (5.2)$$

Dabei liegt t im Bereich $t_{Start} < t < t_{End}$ und das Fenster hat die Länge $\Delta t_f = t_{End} - t_{Start}$. Zusätzlich wurde eine dynamische, temperaturabhängige Nachverfolgung jeder einzelnen Reflexion implementiert, da der Reflexionspeak ansonsten, bei einer größeren zeitlichen Varianz des Reflektogramms, aufgrund der Auflösung des Messsystems, nicht mehr vom Fenster erfasst werden würde (sh. Abschnitt 4.3). In Abb. 5.8 ist ein Reflektogramm eines realen Raumes zu sehen, bevor und nachdem es einer Kurtosis-Analyse unterzogen wurde. Die Laufzeiten von Reflexionen erster und zweiter Ordnung wurden für diesen Raum mit der SSQ-Methode aus Abschnitt 5.2.7 numerisch bestimmt. Die Fensterlängen der Kurtosis-Analyse betrugen $l_k = 16$ und $m_k = 400$.

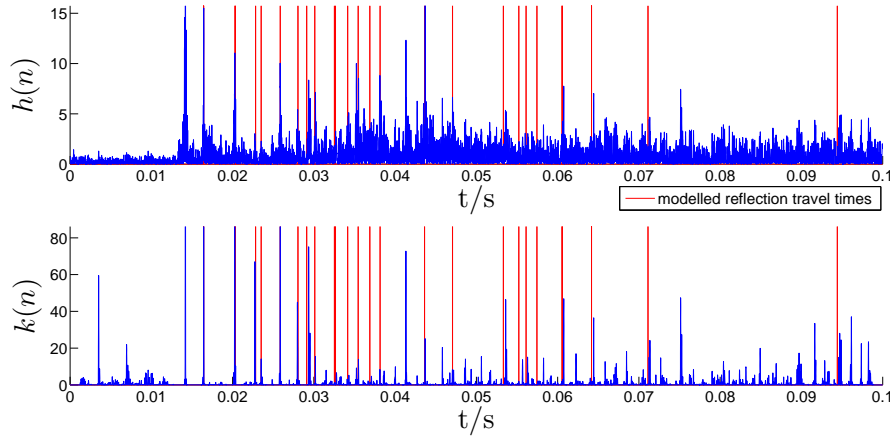


Abbildung 5.8: Auswirkung der Kurtosis-Methode auf ein Reflektogramm

5.2.10 Absolute und relative, akustisch virtuelle Temperatur

Aus den Laufzeiten τ_i^{meas} für Reflexionen erster und zweiter Ordnung, die dem Kurtosis-Reflektogramm entnommen wurden (sh. Abschnitt 5.2.9), wird in diesem Schritt die mittlere akustisch virtuelle Temperatur auf den dazugehörigen modellierten Schallstrecken l_i bestimmt. Über die Schallgeschwindigkeit $c = \frac{l_i}{\tau_i^{meas}}$ lässt sich diese wie folgt ermitteln (sh. Gl. 2.32):

$$\vartheta_{av} = T_{av} - 273,15 = \frac{c^2}{\kappa_{tr} R_{tr}} - 273,15 \quad (5.3)$$

$\kappa_{tr} = 1,4$ ist das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten und $R_{tr} = 287,058 \text{ J/kgK}$ die spezifische Gaskonstante trockener Luft. ϑ_{av} wird auf zwei unterschiedliche Arten bestimmt, die nachfolgend erklärt werden. Beide Methoden werden bei einer Messung berücksichtigt und sind in `DAQrun.m` zu finden. Zusätzlich zu der akustisch virtuellen Temperatur der einzelnen Schallstrecken wird ein Mittelwert über alle Schallstrecken errechnet, der ein guter Repräsentant für die Raumtemperatur ist.

Relative Temperaturmessung

Eine relative Messung bedeutet, dass während der gesamten Messdauer lediglich die Abweichung zu einer initialen Raumtemperaturangabe gemessen wird. Hierfür wird ein initiales SSQ-Modell verwendet, das mit dieser Temperatur berechnet wird. Der Vorgang erfordert die genaue Kenntnis der Raumtemperatur zu Beginn der Messung, falls die absolute Temperatur von Interesse ist.

Absolute Temperaturmessung

Ein Ansatz absolute Temperaturen zu messen, wurde alternativ implementiert. Hierbei ist eine initiale Angabe der Raumtemperatur mit einer Abweichung von wenigen Kelvin zulässig. Bei der Angabe von ϑ zum Start einer Messung waren Abweichungen im Bereich von $\pm 3^\circ\text{C}$ stets unproblematisch. Die Umsetzung erfolgte auf Grundlage der Theorie des Time-Stretchings (sh. Abschnit 3.5.2) durch eine Bestimmung der aktuellen Schallgeschwindigkeit bei jeder Einzelmessung. Hierfür wird die Laufzeit des Direktschalls proportional zu der mittleren Laufzeitänderung der sechs Reflexionen erster Ordnung in Bezug auf den Direktschallpeak berechnet. Solange sich der Peak für eine Reflexion erster Ordnung innerhalb des Fensters der Δt_f aus 5.2.9 liegt, kann eine erfolgreiche Anpassung an die tatsächliche virtuell akustische Temperatur stattfinden. Der Ansatz

$$\frac{l_{dir}}{\tau_{dir,new}} = \frac{l_i}{\tau_{dir,new} + \Delta\tau_i^{meas}}, \quad (5.4)$$

ergibt aufgelöst

$$\tau_{dir,new} = \frac{\Delta\tau_i^{meas}}{\frac{l_i}{l_{dir}} - 1}, \quad (5.5)$$

die neue Laufzeit $\tau_{dir,new}$ des Direktschalls für eine Reflexionen erster Ordnung. Dabei werden ausschließlich Größen verwendet, die unabhängig von τ_{dir} sind und somit unabhängig von einer initialen Raumtemperaturangabe. $\Delta\tau_i^{meas}$ ist die Zeit, die zwischen dem Direktschall und einer Reflexion erster Ordnung vergeht. Proportional dazu ist die Direktschalllaufzeit und damit die aktuelle Schallgeschwindigkeit $c_{new} = l_{dir}/\tau_{dir,new}$, mit der ein angepasstes SSQ-Modell berechnet wird. l_i ist die zu τ_i^{mod} gehörige Strecke und l_{dir} der Abstand vom LS zum Mikrofon.

5.2.11 Laufzeitkorrektur

Aufgrund von geometrischen Unsicherheiten, sowohl bei den Abmessungen des quaderförmigen Raumes, als auch bei der Positionierung der Schallquelle und des Mikrofons, stimmen die theoretischen Laufzeiten selten exakt mit tatsächlichen Reflexionen überein. Daher wird vor jedem Messstart eine initiale Referenzmessung `DAQrun_captureRef.m` durchgeführt, die die Laufzeiten des SSQ-Modells an die tatsächlich gemessenen Laufzeiten anpasst. Die Implementierung ist, bis auf die folgenden aufgeführten Modifikationen, identisch mit `DAQrun`.

Automatische Laufzeitkorrektur

Bei der automatischen Korrektur werden die Abweichungen $\Delta\tau_i = \tau_i^{meas} - \tau_i^{mod}$, die bei der Referenzmessung ermittelt werden, beim Messdurchlauf berücksichtigt,

indem sie von der Laufzeit $\tau_{i,new}^{meas} = \tau_i^{meas} - \Delta\tau_i$ subtrahiert werden. Dadurch entsprechen die gemessenen Laufzeiten initial den numerisch Berechneten aus dem SSQ-Modell.

Manuelle Laufzeitkorrektur

Die oben beschriebenen geometrischen Ungenauigkeiten verursachen gelegentlich fehlerhafte Laufzeiten im Kurtosis-Reflektogramm, die über den Bereich des Zeitfensters Δt_f hinaus gehen. Aufgrund dessen wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Fenster interaktiv bei der Referenzmessung zu verschieben. Dadurch wird eine zeit-spielige Nachjustierung der Aufstellung des Messsystems vermieden und eventuelle Abweichungen von der perfekten Quadergeometrie der Messumgebung können ausgeglichen werden. Dafür wird laufend das aktuelle Kurtosis-Reflektogramm und die Laufzeiten aus dem SSQ-Modell geplottet. Per Mausklick auf die Markierung für die Laufzeit einer errechneten Reflexion kann das Fenster durch einen erneuten Klick verschoben werden. Ermöglicht wird dies von den Funktionen `runningTimePlot.m` (sh. Anhang A.1.5) und `interactivePlot.m` (sh. Anhang A.1.6). Die neue Position wird durch Anpassung der Laufzeiten $\tau_{i,new}^{meas} = \tau_i^{meas} + \Delta\tau_i$ im SSQ-Modell berücksichtigt.

5.2.12 Tomografie

Mit dem iterativen, algebraischen Tomografie-Algorithmus aus Abschnitt 3.8 wird in diesem Teil der Implementierung aus den Laufzeiten τ_i^{meas} , auf den Schallstrecken l_i (sh. Abschnitt 5.2.9), die Raumtemperaturverteilung ermittelt. Hierfür ist die Matlab®-Funktion `SirtATOM.m` verantwortlich, deren Urheberschaft bei der Autorin von [Bart 09] und [Bart 11] liegt. Ebenfalls von dieser Autorin sind die dazugehörigen Funktionen `TomoAverage.m` und `TomoVektorShift.m` übernommen worden, welche von `SirtATOM.m` aufgerufen werden, sowie zwei Funktionen zur Darstellung von Raumtemperaturverteilungen mit `plotTemp3D.m` und `tomo2.m`.

Neben den gemessenen Laufzeiten, einem Abbruchkriterium für die Iteration, einer Anfangsverteilung von Langsamkeiten, der Voxelanzahl in jeder Dimension (entspricht der Ordnung D , sh. unten) und der Gewichtung für die Mittelung benachbarter Zellen, werden die Längen L_i und die Längen L_j für jede Zelle vom Tomografie-Algorithmus verlangt. Diese Forderung wird durch die Berechnung einer Matrix der Form

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1J} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2J} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{I1} & l_{I2} & \dots & l_{IJ} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

erfüllt, mit den Schallstreckenabschnitten l_{ij} für jedes Voxel als ihre Elemente.

Die Umsetzung dieser geometrischen Berechnungen geschieht mit der Funktion `cellSoundRays.m` (sh. Anhang A.1.7). Darin wird zunächst die Messumgebung in $D \times D \times D$ gleichgroße Voxels geteilt, deren Seitenverhältnisse denen der Messumgebung entsprechen. Dabei ist D die Ordnung der Raumaufteilung, welche grundsätzlich beliebig wählbar ist. Dennoch wurde für Messungen ausschließlich $D = 3$ verwendet, da einerseits bei einer kleineren Ordnung von beispielsweise $D = 2$ eine räumliche Darstellung mit lediglich 8 Voxels resultieren würde und andererseits für

den Tomografie-Algorithmus die Forderung $J \geq I$ besteht, also eine höhere oder gleichgroße Zahl von Schallstrecken, wie die der Voxels.

Weiterhin wird für jede Schallstrecke l_i , erster und zweiter Ordnung mithilfe von logischen Operatoren geprüft, ob sie zwei, oder aufgrund von Wandreflexionen, mehrere Schnittpunkte mit den Begrenzungsflächen der j -ten Gitterzelle besitzt. Ist dies der Fall, werden die Abstände zweier Schnittpunkte entlang l_i zu l_{ij} addiert.

Ob die Schallstreckenabschnitte korrekt berechnet wurden, wird im Hauptprogramm `DAQrun.m` überprüft. Die Summe der Zeilen von \underline{L} , also $l_{i1} + l_{i2} + \dots + l_{iJ}$, muss nämlich der Länge von l_i entsprechen.

5.2.13 Timing

Die Zeitdauer einer Messung wird beim derzeitigen Stand des Programms durch eine initiale Angabe der Messdurchläufe und einem Messintervall bestimmt. Dabei muss das Messintervall länger als die Verarbeitungszeit der wiederholten Messroutine sein. Bei langen Messungen besteht die Möglichkeit, die anfallenden Daten, während einer Messung, direkt auf die Festplatte zu speichern, um ein Volllaufen des Arbeitsspeichers zu verhindern.

Die Zeitsteuerung wurde mit den Matlab®-Befehlen *tíc* und *tóc* gelöst. Diese Befehle stehen am Beginn und am Ende der wiederholten Messroutine, um die Verarbeitungszeit festzuhalten. Im Anschluss pausiert die Schleifenausführung für die Dauer der Differenz von Verarbeitungszeit zu Messintervalldauer, bevor eine neue Teilmessung beginnt. Dieser Vorgang wurde empirisch beobachtet und es wurde festgestellt, dass selbst nach vielen Stunden Messdauer und mehreren tausend Einzelmessungen, der Vorgang auf die Sekunde genau beendet wird. Dies bedeutet, dass das vorgegebene Messintervall durch diese Form der Zeitsteuerung auch über einen langen Zeitraum konstant ist.

6 Messverfahren

In diesem Kapitel wird das praktische Vorgehen bei einer Messung der Raumtemperaturverteilung mit der Methode, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, geschildert. Die Gesamte Messung wurde in Matlab® realisiert, weshalb die Durchführung mit dem Aufruf von insgesamt drei Matlab®-Funktionen (`imageModelPlot.m`, eine Erweiterung von `imageModel.m`, `DAQrun_captureRef.m` und `DAQrun.m`) und dem Editieren eines Skriptes (`DAQinit.m`, vgl. Anhang A.2), das initiale Parameter enthält, einhergeht.

6.1 Vorbereitung

Vermessung des Raumes

Wie weiter oben bereits begründet, kann zum derzeitigen Entwicklungsstand des Messsystems ausschließlich in quaderförmigen, leeren Räumen die Temperaturverteilung ermittelt werden. Hierfür müssen die Raummaße x, y und z möglichst exakt bestimmt werden und gegebenenfalls ein Mittelwert aus mehreren einzelnen Entfernungsmessungen gebildet werden.

Positionsbestimmung von Sender und Empfänger

Die Maße des Raumes können verwendet werden, um eine geeignete Position von Sender und Empfänger zu bestimmen. Hierfür kann der Aufruf der Funktion `imageModelPlot.m` behilflich sein, in welche die Raummaße und die Position von Sender S und Empfänger R eingetragen werden. Sie visualisiert sowohl die Schallstrahlenverteilung im Raum (ähnlich Abb. 5.6), als auch ein Reflektogramm, in dem zusätzlich die theoretischen Laufzeiten τ_i^{mod} , wie auch deren Zuordnung zu den Raumbegrenzungsflächen (ähnlich Abb. 7.4) dargestellt sind. Folgende Kriterien sollten für die Positionierung des Messsystems gelten:

1. Möglichst gleichmäßige Verteilung der Schallstrecken in der Messumgebung, um jeden Raumbereich erfassen zu können.
2. Möglichst gleichmäßige Verteilung der Reflexionen erster und zweiter Ordnung im Reflektogramm, um eine Überlappung der Fenster Δt_f für das Peak-Picking zu vermeiden.

Das Messsystem kann aber auch ohne numerische Hilfe, beliebig im Raum positioniert werden, wodurch der Aufruf von `imageModelPlot.m` entfällt. Jedoch muss mit einer ungenügenden Abdeckung des Raumes mit Schallstrahlen gerechnet werden und eine singuläre Repräsentation ihrer Laufzeiten im Reflektogramm kann nicht erwartet werden.

Aufbau

Die Messtechnik wird innerhalb und außerhalb der Messumgebung aufgebaut. Der Aufbau entspricht der Messkette in Abb. 4.7 mit einer definierten bzw. willkürlichen Positionierung von Sender und Empfänger (sh. oben).

6.2 Ausführung

Initialisierung

Der Messalgorithmus muss durch das Editieren des Skriptes `DAQinit.m` den äußeren Bedingungen zu Beginn der Messung angepasst werden. In Tabelle 6.1 werden alle Parameter des Skriptes aufgeführt. Variablen, die in der Arbeit bereits verwendet wurden, sind in der Beschreibung angegeben.

Variable	Einheit	Beschreibung
room	m	Maße der Messumgebung (Syntax: [x y z])
s	m	Position S des Senders (Syntax: [x y z])
r	m	Position R des Empfängers (Syntax: [x y z])
refDist	m	Abstand l_{dir} zwischen Sender und Empfänger
initialTemp	°C	aktuelle Raumtemperatur ϑ
exOrder	-	Ordnung N der MLS
lengthIn	s	Dauer der Signalaufnahme
amplification	-	Anpassung des Ausgangspegels (Faktor zwischen 0 und 1)
measNr	-	Anzahl der Einzelmessungen (Messdurchläufe)
measInterval	s	Zeitabstand zwischen den Einzelmessungen (Messintervall)
corrLength	s	Länge Δt_g des (Kurtosis-)Reflektogramms
windowLength	Samples	Fensterlänge Δt_f für das Peak Picking
cellOrder	-	Ordnung D für die Raumaufteilung in Voxels
excludeRay	-	Von der Tomografie ausgenommene Schallstrahlen (Syntax: Vektor mit der Schallstrahlnummer aus dem SSQ-Modell, beginnend mit der Höchsten)
kurtosisWindowLengthL	Samples	kurzes Kurtosis-Analyse-Fenster der Länge l_k
kurtosisWindowLengthM	Samples	langes Kurtosis-Analyse-Fenster der Länge m_k
WeightDirect	-	Gewichtungsfaktor w für direkt angrenzende Voxels bei der tomografischen Rekonstruktion
WeightDiagonal	-	Gewichtungsfaktor w für diagonal angrenzende Voxels bei der tomografischen Rekonstruktion
fs	Hz	Sampling-Frequenz, sowohl am Ausgang, als auch am Eingang der Messkarte

Tabelle 6.1: Paramaterbeschreibung in `DAQinit.m`

Ausschluss von Schallstrecken

Nicht an anderer Stelle in dieser Arbeit ist die Möglichkeit des Ausschlusses einzelner Schallstrecken l_i erwähnt. Wird in der Variable *excludeRay* eine Schallstrecke eingetragen, so wird diese nicht bei der tomografischen Rekonstruktion berücksichtigt. Dies sollte unter Anderem in Anspruch genommen werden, falls eine Reflexion nicht eindeutig im Reflektogramm abgebildet wird, oder Reflexionen darin zu dicht beieinander liegen.

Referenzmessung

Durch das Ausführen der Funktion `DAQrun_captureRef.m` wird eine Referenzmessung angestoßen, die wie in Abschnitt 5.2.11 beschrieben, Abweichungen der Laufzeiten von der Modellrechnung bestimmt. Während die Referenzmessung läuft, kann eine manuelle Korrektur mithilfe der Interaktivität des Reflektogramm-Plots vorgenommen werden (sh. ebenfalls Abschnitt 5.2.11). Die Referenzmessung wird in ihrer Dauer durch eine initial festgelegte Anzahl von Einzelmessungen begrenzt, oder wird nach einer beliebigen Zeit mit dem Tastaturbefehl *strg+c* abgebrochen.

Messung

Mit dem Ausführen von `DAQrun.m` wird die eigentliche Messung gestartet, welche, abhängig von den Parametern *measNr* und *measInterval* in `DAQinit.m` nach einer bestimmten Zeit beendet wird. Während der Messung wird die akustisch virtuelle Raumtemperaturverteilung nach der absoluten oder relativen Methode (sh. Abschnitt 5.2.10) laufend grafisch ausgegeben.

6.3 Nachbereitung

Eine Messung erzeugt einen Ordner, in dem die rohen Messdaten als extra Datei für jede Einzelmessung abgelegt werden. Dies erlaubt die komplette Rekonstruktion einer Messung mit veränderten Parametern, was vor allem bezüglich des Prototypings, bzw. der Parametereinstellung für eine Messumgebung, von Vorteil ist. Darüber hinaus werden beim derzeitigen Implementierungsstand, während des Messvorgangs, verschiedene Ausgabewerte bei jeder Einzelmessung berechnet, die als jeweilige Zeitreihe nach der Messung zur Verfügung stehen. Die Tabelle 6.2 gibt einen Überblick, unter welchen Variablen-Namen die jeweiligen Werte im Matlab®-Workspace abgespeichert werden.

Variable	Einheit	Beschreibung
SNR	dB	Schätzung des Signalrauschverhältnisses
kurtosisTemperature	°C	absolute mittlere ak. virt. Temperatur auf den Schallstrecken
kurtosisTemperatureRel	°C	relative mittlere ak. virt. Temperatur auf den Schallstrecken
kurtosisTemperatureMean	°C	absolute mittlere ak. virt. Temperatur über Schallstrecken gemittelt
kurtosisTemperatureMeanRel	°C	relative mittlere ak. virt. Temperatur über Schallstrecken gemittelt
tomoTemperature	°C	absolute tomografische ak. virtuelle Temperatur der Voxels
tomoTemperatureRel	°C	relative tomografische ak. virtuelle Temperatur der Voxels
tomoTemperatureMean	°C	absolute tomografische ak. virtuelle Temperatur über Voxels gemittelt
tomoTemperatureMeanRel	°C	relative tomografische ak. virtuelle Temperatur über Voxels gemittelt

Tabelle 6.2: Auswertungen während des Messvorgangs

7 Beispielmessung

Dieses Kapitel ist die Dokumentation einer Versuchsmessung der Raumtemperaturverteilung mit der experimentellen Methode, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Dabei wurden die theoretischen Überlegungen aus den vorherigen Kapiteln, sowie deren Implementierung angewandt. Die Messgröße wurde durch den regionalen Betrieb von elektrischen Heizgeräten beeinflusst, wodurch das Raumklima manipuliert wurde und innerhalb des Raumes Temperaturgradienten und Konvektionsströme und somit zeitliche Varianzen des Ausbreitungsmediums entstanden. Die Messergebnisse werden in diesem Kapitel zur Verifizierung mit Daten konventioneller Temperatursensoren verglichen, die im Raum verteilt positioniert waren.

7.1 Versuchsumgebung und Aufbau

Die Versuchsmessung fand in einer ehemaligen Sporthalle der Firma Sonotec¹² am 17.07.2014 in Halle (Saale) statt. Ein Foto eines Ausschnitts der Halle und des Messaufbaus ist in Abb. 7.1 zu sehen.

Sporthalle

Die Halle hat in erster Näherung, bis auf bauliche Ungenauigkeiten, die Form eines Quaders. Durch eine Mittelung von zehn Abstandsmessungen wurde das Maß für jede Raumdimension bestimmt und es resultierte $x = 14.09$ m, $y = 9.51$ m und $z = 4.51$ m. Alle Abstandsmessungen, die eine Distanz von 2 m überschritten, wurden mit dem optischen Entfernungsmesser Leica¹³ Disto Basic durchgeführt.

Relevant für die Qualität des Reflektogramms sind unter anderem die Reflexionseigenschaften der Raumbegrenzungsflächen (sh. Abschnitt 2.5). Dabei sind große Reflexionsfaktoren bei den Wänden (verputztes Mauerwerk) und dem Boden (Holzparkett) zu erwarten. Lediglich die Decke aus einem unbekannten Fasermaterial dürfte eine bedingt schallharte Raumbegrenzungsfläche darstellen, wobei es sich aber nicht um eine Akustikdecke handelt.

¹²SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Nauendorfer Straße 2, 06112 Halle (Saale), Dtl.

¹³Leica Geosystems AG, Heinrich-Wild-Strasse, 9435 Heerbrugg, Switzerland



Abbildung 7.1: Foto der Messumgebung mit Messaufbau

Positionierung und Einstellungen

Es wurde die Messtechnik aus Kap. 4 verwendet. In der Halle wurden Sender und Empfänger nach einer numerisch gestützten Positionsbestimmung (sh. Abschnitt 6.1) an den Stellen $S(3.1, 1.8, 2.4)$ und $R(6.1, 5.5, 0.9)$ platziert, was auch Abb. 7.2 zu entnehmen ist. Die schwarzen Kreuze deuten die Aufteilung des Raumes in die Zellen für die tomografische Rekonstruktion an.

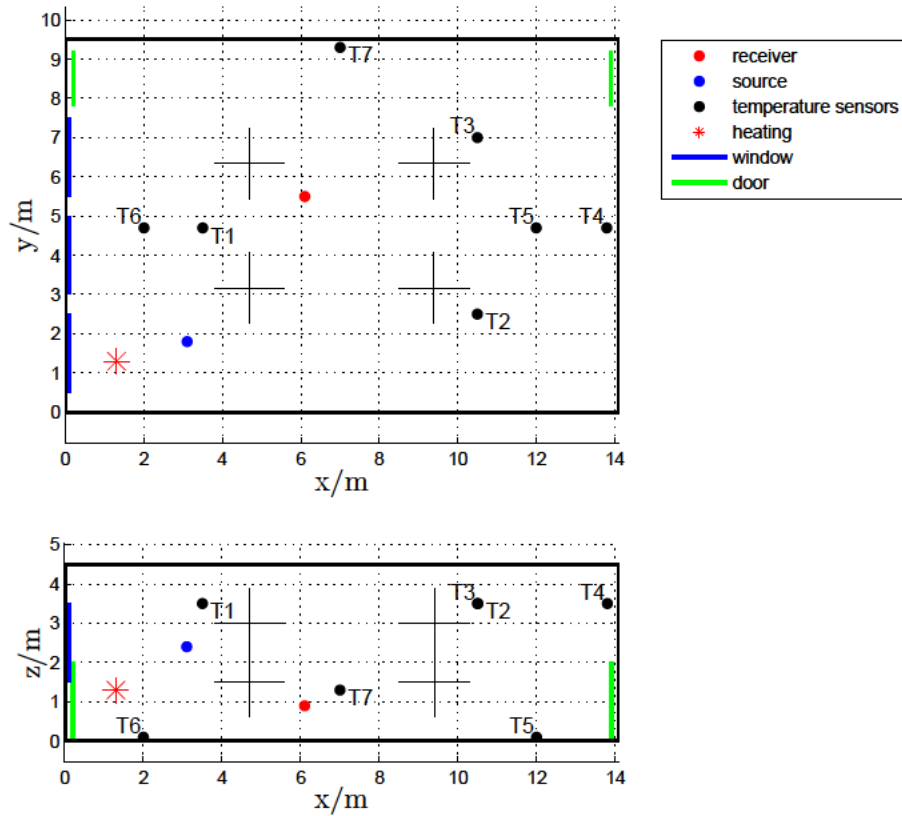


Abbildung 7.2: Messaufbau der Beispielmessung mit den Positionen des Senders, des Empfängers, der Temperatursensoren und der Wärmequelle

Mit der Positionierung des Messsystems ergeben sich die Schallstrecken in Abb. 7.3, sowie, durch die Parameter in der Initialisierungs-Datei `DAQinit.m` im Anhang A.2, das dazugehörige Kurtosis-Reflektogramm in Abb. 7.4. Die vertikal dargestellten Zahlen oberhalb der errechneten Schalllaufzeiten (rote Linien) zeigen die Nummer der Schallstrecke bei der Modellierung und geben die Raumbegrenzungsflächen an, die bei der jeweiligen Reflexion beteiligt sind. Beispielsweise bedeutet die Zahlenkombination 17, 4 und 6, dass an dieser Stelle im Reflektogramm die Laufzeit erwartet wird, welche der Schallstrecke 17 zugeordnet wurde. Dabei wurde das Signal an der Wand 4 und dem Boden 6 reflektiert.

Für eine Großzahl der Reflexionen liegt der zugehörige Peak im Reflektogramm recht nahe bei den modellierten Schalllaufzeiten, sodass sie sich innerhalb des Fensters Δt_f befinden. Somit kann durch die automatische Laufzeitkorrektur das Fenster um die tatsächliche Reflexion zentriert werden (sh. Abschnitt 5.2.11). Bei größeren Abweichungen, bzw. einem schlecht ausgeprägtem Peak, wurde die entsprechende Schallstrecke entweder ausgeschlossen, oder die Laufzeit manuell korrigiert.

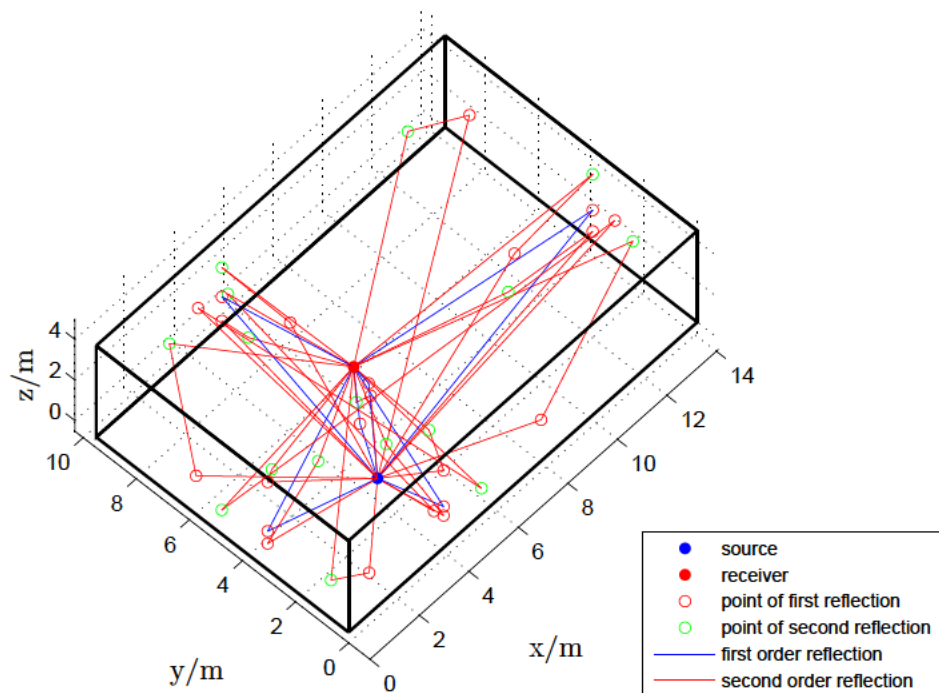


Abbildung 7.3: Schallstreckenverteilung bei der Beispielmessung

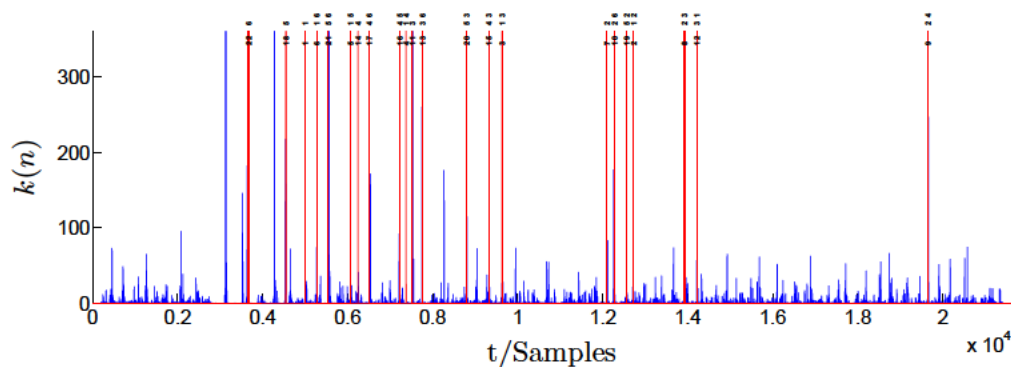


Abbildung 7.4: Kurtosis-Reflektogramm mit modellierten Laufzeiten und deren Zuordnung zu Schallstrecken

Referenz-Temperatursensoren

An sieben Stellen im Raum wurden die konventionellen testostor 171-3 Feuchte-/Temperaturlogger des Herstellers Testo¹⁴ platziert (Datenblatt sh. Anhang A.3). Die Sensoren sind von T1 bis T7 durchnummeriert und die Positionen sind ebenfalls Abb. 7.2 zu entnehmen. Die Geräte liefern verlässliche raumklimatologische Daten

¹⁴Testo AG, Testo-Straße 1, 79853 Lenzkirch, Deutschland

als Zeitreihen mit denen die Ergebnisse der akustischen Methode dieser Arbeit im Abschnitt 7.3 verglichen werden.

Beeinflussung der Messgröße

Die Raumluft innerhalb der Messumgebung wurde an einer regional begrenzten Stelle am Boden durch elektrische Heizgeräte (Elektro-Radiatoren und elektrische Herdplatten) erwärmt. Der Defekt eines Gerätes führte dazu, dass für Heizperioden maximal 8.5 kW an Heizleistung zur Verfügung standen. Zusätzlich ist zu beachten, dass alle verwendeten Heizgeräte durch ein Thermostat geregelt sind und nicht dauerhaft in Betrieb waren.

Äußere Bedingungen

Am Tag der Messung herrschte sommerliches und sonniges Wetter mit einer Tageshöchsttemperatur von $\vartheta = 29^\circ\text{C}$ für die Region Leipzig/Halle.

7.2 Ablauf

Das Messverfahren wurde bereits in Kap. 6 vorgestellt, wobei der zeitliche Ablauf in der Tab. 7.1 dokumentiert ist. Der Raum wurde zwei Stunden lang von den oben genannten Wärmequellen aufgeheizt, wonach eine einstündige Abkühlung folgte. Beide Vorgänge fielen aufgrund der äußeren Bedingungen moderat aus. Zum Ein- und Ausschalten der Wärmequellen musste die Halle betreten werden. Ansonsten blieben die Türen und Fenster stets geschlossen, um Strömungseinflüsse gering zu halten.

Uhrzeit	Vorgang
12:15	Messstart Einschalten der Wärmequelle
14:15	Ausschalten der Wärmequelle
15:15	Messstop

Tabelle 7.1: Zeitlicher Ablauf der Beispielmessung

7.3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse in verschiedenen Formen präsentiert und diskutiert. Dadurch soll gezeigt werden, dass die Anforderungen an die experimentelle Messmethode prinzipiell erfüllt werden, wenngleich Verbesserungen (sh. Abschnitt 8.2) angedacht sind, die zum Zeitpunkt der Beispielmessung nicht Teil des Systems waren.

Bei den Messungen wurde ein durchschnittlicher SNR von 38.2 dB erreicht. Lediglich bei zwei Einzelmessungen wich er mit 30.6 dB und 27.1 dB deutlich vom Mittelwert ab, und war damit stets über dem geforderten Minimum von 20 dB.

7.3.1 Referenz-Temperaturmessung

Die Abb. 7.5 zeigt die Temperaturverläufe, die von den konventionellen Temperatursensoren im Messzeitraum aufgezeichnet wurden. Sie stellen im Rahmen der Messgenauigkeit und der Kalibrierung der Geräte den tatsächlichen Verlauf der Lufttemperatur an den Stellen dar, an dem die Fühler positioniert waren.

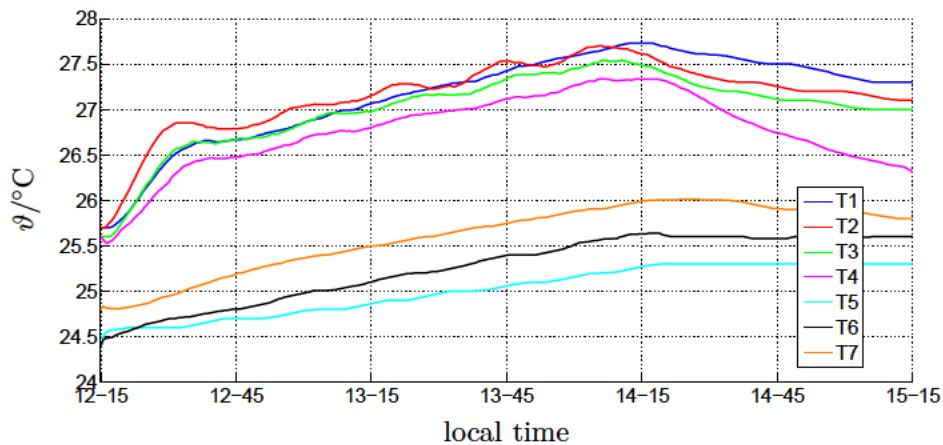


Abbildung 7.5: Temperaturverlauf der sieben konventionellen Temperatursensoren

Deutlich ist bereits zu Beginn des Messzeitraumes eine vertikale Temperaturschichtung zu erkennen, also eine Abweichung von zirka 1 K der Lufttemperatur am Boden, im Vergleich zur Temperatur in Deckennähe. Die experimentelle Methode dieser Arbeit ist ohne einer initialen Angabe dieser raumhöhenabhängigen Temperaturunterschiede nicht in der Lage diese Schichtung wiederzugeben, da zu Beginn von einer homogenen Temperaturverteilung ausgegangen wird. Deshalb werden folgend ausschließlich Temperaturen relativ zu der Raumtemperatur bei Beginn der Messung und unabhängig ihres absoluten Wertes dargestellt.

Die leicht wellige Struktur aller Temperaturänderungsverläufe kann mit den Heizperioden der Wärmequellen begründet werden. Auch das Temperaturmaximum vor dem Ende der Heizperiode dürfte damit zusammenhängen.

7.3.2 Temperaturverläufe

Bei den folgenden Ergebnissen wurde keine Anpassung des SSQ-Modells, wie es bei der absoluten Temperaturmessung in Abschnitt 5.2.10 beschrieben wird, durchgeführt. Mit der relativen Messmethode, die im gleichen Abschnitt beschrieben wird, werden nämlich im Allgemeinen homogenere Temperaturverläufe erreicht. Außerdem spielt die absolute Temperatur, relativ zu einer Ausgangstemperatur, für die durchgeführten Vergleiche, keine Rolle. Dennoch soll der Vollständigkeit halber zunächst ein Ergebnis der absoluten Messmethode in Abb. 7.6 gezeigt werden. Es handelt sich um den Mittelwert aller Voxels im Vergleich mit dem Mittelwert der Referenztemperaturmessung. Es erfolgte eine Umrechnung der akustisch virtuellen Temperatur

unter der Berücksichtigung einer relativen Luftfeuchtigkeit von zirka 60 %, die in der Halle festgestellt wurde. Bei mehreren Messungen hat sich gezeigt, dass eine Ermittlung des Temperaturbetrags nach Gl. 5.5 prinzipiell möglich ist, jedoch verursacht die Anpassung, in Verbindung mit anderen Unsicherheiten, erhebliche, unrealistische Schwankungen im Zeitverlauf. Der Sprung zu Beginn der Messung resultiert aus der Abweichung der ermittelten Temperatur zum initial angegebenen Wert. Die Messung der Absoluttemperatur ist im hohen Maße von der geometrischen Exaktheit des Messaufbaus abhängig (sh. Abschnitt. 4.3).

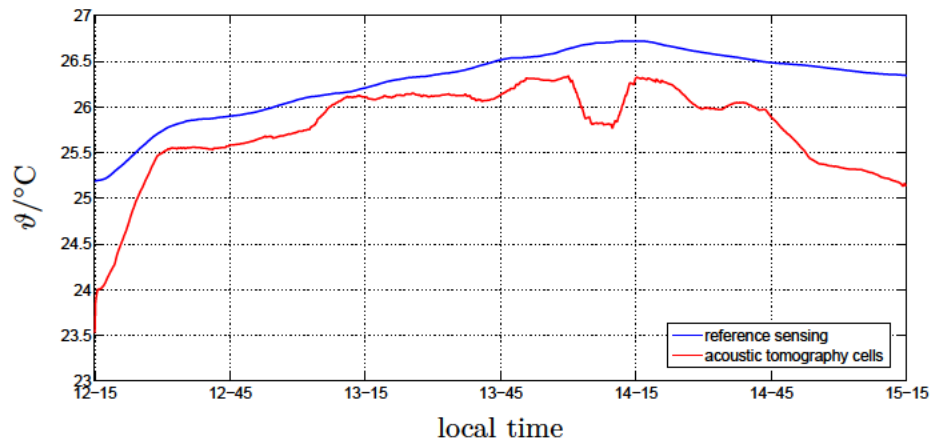


Abbildung 7.6: gemittelte absolute Temperaturen

Gemittelter Temperaturänderungsverlauf

In Abb. 7.7 ist ein Vergleich der gemittelten Temperaturänderungen zu sehen. Die systembedingte Trägheit der konventionellen Hardware ist deutlich auszumachen. Invarianzen des Raumes durch eine Temperaturänderung werden beim akustischen System unmittelbar und mit voller Ausprägung erfasst, wohingegen bei den testostor-Sensoren Zeitverzögerungen aufgrund von Wärmeübergängen vorherrschen [Peif 94, S. 148 f.].

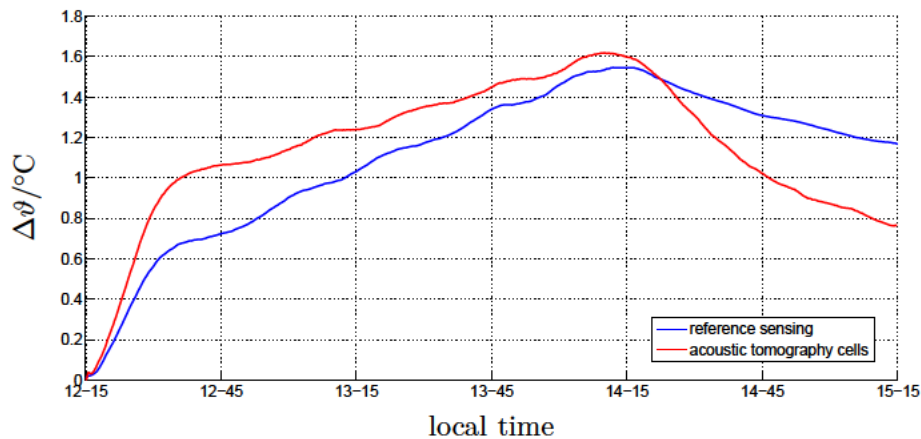


Abbildung 7.7: Vergleich der gemittelten Temperaturänderungsverläufe

Lokale Temperaturänderungsverläufe

Die Betrachtung spezifischer Raumbereiche wird in Abb. 7.8 folgen. Es werden die von den einzelnen konventionellen Messgeräten aufgezeichnete Temperaturänderungsverläufe mit den Verläufen der akustischen Messung verglichen. Die testostor-Sensoren befanden sich in den jeweiligen Tomografie-Zellen, um eine örtliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Neben den Fehlern bei der experimentellen akustischen Messmethode, die zu Abweichungen der verglichenen Temperaturänderungsverläufe führen können, spielt die Position der Referenzsensoren eine entscheidende Rolle. Es darf davon ausgegangen werden, dass es eine Beeinflussung der Sensoren T4 bis T7 (sh. Abb. 7.8 d) bis g)) durch eine sehr nahe Positionierung an Raumbegrenzungsflächen mit Untertemperatur gegeben hat. Insbesondere ist dieser Effekt bei T5 und T6 (sh. Abb. 7.8 e) und f)) zu sehen, die unmittelbar am kälteren Boden positioniert waren. Außerdem spielt eine von der Lufttemperatur abweichende Temperatur der Raumbegrenzungsflächen eine weitere Rolle, denn Wärmeübergänge werden in den gemittelten Werten eines Voxels stärker berücksichtigt, als bei der punktuellen Erhebung der Referenzsensoren. Dadurch können höhere Maximaltemperaturen bei den konventionellen Temperatursensoren erklärt werden.

Es ist zudem nicht auszuschließen, dass in den Zellen selbst die Temperatur ungleichmäßig verteilt ist. Dabei darf vor allem von einer vertikalen Schichtung ausgegangen werden.

Insgesamt sollte die größte Unsicherheit aber bei der unvermeidlichen Konvektionströmung liegen, die durch räumliche Temperaturdifferenzen verursacht wird. Darauf wird im Abschnitt 7.3.4 noch genauer eingegangen.

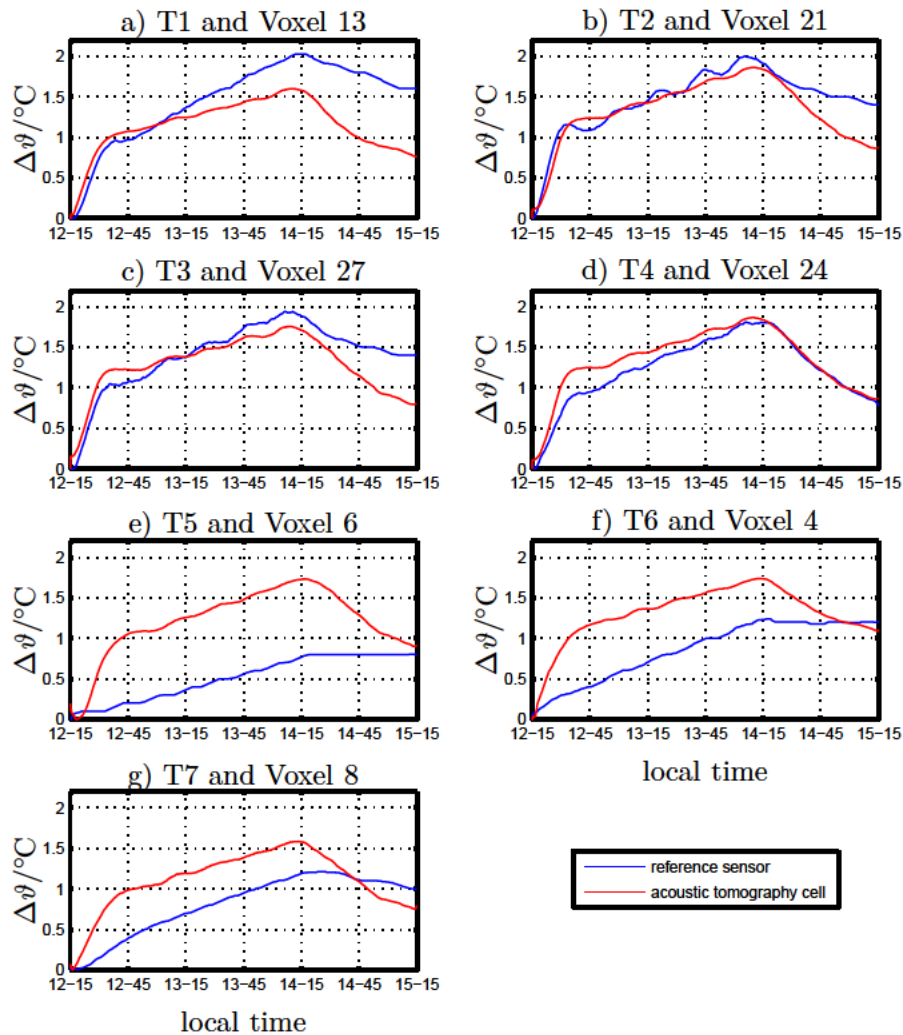


Abbildung 7.8: Vergleich von Temperaturänderungsverläufen an verschiedenen Stellen im Raum (vgl. Abb 5.2 und Abb. 7.2)

7.3.3 Temperaturverteilungen

Beobachtet man die zeitliche Entwicklung der Änderung der Temperaturverteilung in der Halle, so kann sie grob in vier Phasen eingeteilt werden, die in Abb. 7.9 zu sehen sind.

1. Homogene Temperaturverteilung (abgesehen der nicht dargestellten vertikalen Schichtung in Räumen), ohne Strömung zu Beginn der Messung:
Erwartungsgemäß zeigt sich, aufgrund der initialen Referenzmessung, die im

Abschnitt 5.2.11 erläutert wird, in jedem Raumbereich annähernd eine identische Temperatur.

2. lokale Erwärmung im Bereich der Wärmequellen; keine ausgeprägte Konvektionsströmung:

Eine lokale Temperaturänderung ist zu diesem Zeitpunkt gut zu erkennen. Die wärmere Luft befindet sich aufgrund ihrer geringeren Dichte oberhalb der Wärmequellen.

3. Fortführung der Raumerwärmung bei ausgeprägte Umwälzströmung:
Durch die nun schon länger andauernde Heizphase hat sich ein Strömungsfeld gebildet, dass die Temperaturerfassung stört. Auf dieses Problem wird in Abschnitt 7.3.4 näher eingegangen.

4. Erwärmter Raum ohne Strömungsphänomene:
Nachdem die Wärmequellen keine Lufttemperaturdifferenzen mehr verursachen, stellt sich wieder eine homogene Verteilung bei einer höheren Temperatur ein.

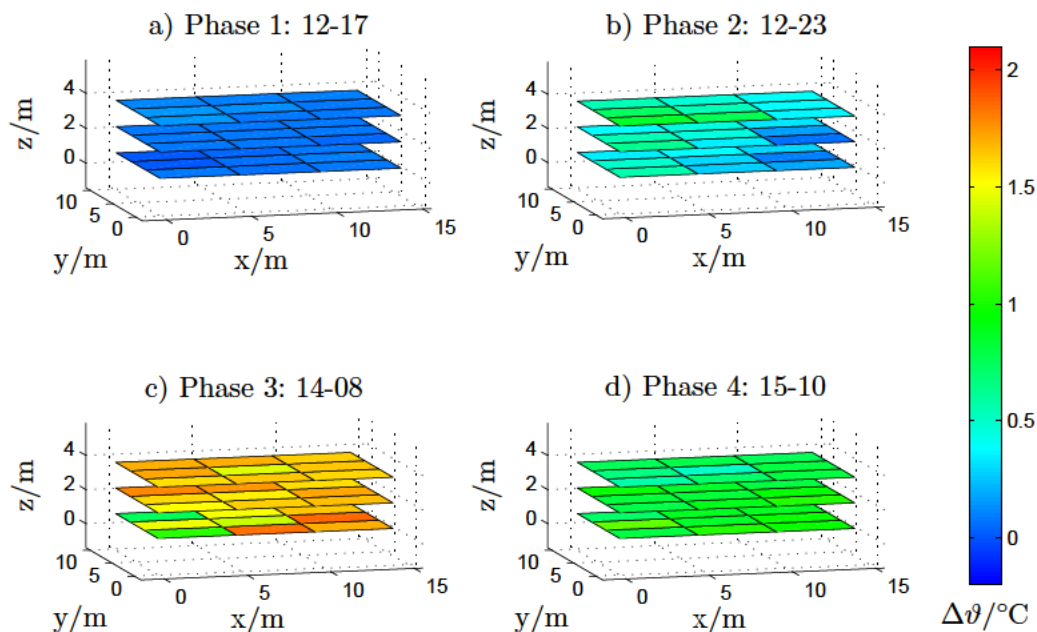


Abbildung 7.9: relative Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeiten

7.3.4 Einfluss der Konvektionsströmung

Durch die Deutung der Messergebnisse, konnten Konvektionsströmungen der Wärmequellen als Hauptursache für eine fehlerhafte Ermittlung der Temperaturverteilung

lung während der regionalen Beheizung des Untersuchungsgebietes ausgemacht werden.

Die Voraussetzung, die im theoretischen Teil dieser Arbeit genannt wurde, dass Luftströmungen nicht berücksichtigt werden (sh. Abschnitt 2.4.3), hat sich für praktische Messungen als unrealistisch herausgestellt. Sobald in einem Raum größere Temperaturunterschiede vorkommen (durch lokales Heizen), bildet sich eine Umwälzströmung aus [Riet 04, S. 90 ff.], deren Einfluss auf akustische Messungen zur Temperaturerfassung nicht vernachlässigt werden kann. Die Wärmeströmung dürfte sich in der Halle nach dem Prinzip in Abb. 7.10 ausgebildet haben.

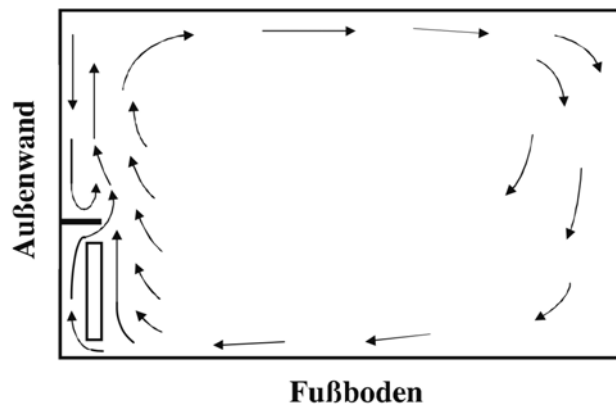


Abbildung 7.10: Raumluftrömungen bei Beheizung mit Raumheizkörpern [Riet 04, S. 92]

Es kann davon ausgegangen werden, dass die ausgeprägten, lokalen Temperaturdifferenzen in Abb. 7.9 c) größtenteils durch die Strömung im Raum verursacht wurden. Wird nämlich im Raum nicht geheizt, wird eine realistische, homogenere Temperaturverteilung dargestellt. Die Umwälzströmung verursacht einen Fehler, dessen Größe von der Strömungsgeschwindigkeit, ihrer Orientierung, sowie der Schallausbreitungsrichtung bzw. der Orientierung der Schallstrecken abhängig ist. Die Schallausbreitung erfolgt entlang der modellierten Schallstrecken in alle Raumrichtungen, wobei ein Richtungswechsel bei jeder Reflexion stattfindet.

In diesem Abschnitt soll nun noch die Größe des Fehlers durch die Umwälzströmung abgeschätzt werden. Bei der Wärmeströmung, die durch einen Heizkörper verursacht wird, handelt es sich um natürliche Konvektion, deren Wärmeabführvermögen bzw. Wärmeübergangskoeffizient α_K nach [Zirn 06, S. 75] mit

$$\alpha_K = 12 * \sqrt{v_0} + 2 \quad (7.1)$$

angenähert werden kann. Nun wird als Wärmequelle ein Heizkörper mit einer Höhe von 0.6 m, einer Länge von 1.4 m und einer Übertemperatur von 20 K angenommen. Für einen solchen Wärmetauscher wurde in [Heri 12, S. 918] ein Wärmeübergangskoeffizient zu $\alpha_K = 4.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ errechnet. Setzt man diesen Wert in Gl. 7.1 ein, folgt für die Strömungsgeschwindigkeit, aufgrund von Konvektion $v_0 = 0.27 \text{ m/s}$. Bei einer Raumtemperatur von $\vartheta_{av} \approx 20^\circ \text{C}$ würde dieser Strömungseinfluss auf die

mittlerer Temperatur entlang einer Schallstrecke, nach Gl. 2.28 eine Abweichung von $\Delta\vartheta_{av} \approx 0.45 \text{ K}$ zur tatsächlichen Raumtemperatur verursachen. Das ist auch in etwa die Größenordnung der Abweichungen relativer Temperaturen zwischen benachbarter Raumteilmengen in Abb. 7.9 c).

8 Fazit

Bisherige Ansätze für eine akustische Erfassung von Raumtemperaturverteilungen wurden mit einer Vielzahl von Sender/Empfänger-Paaren realisiert, die um ein Untersuchungsgebiet verteilt, Messstrecken zur Schalllaufzeiterfassung bilden. Mithilfe eines tomografischen Verfahrens konnten mit diesen Informationen Temperaturverteilungen wiedergegeben werden. Ausgehend von der Idee, die LS, welche das Untersuchungsgebiet umgeben, durch virtuelle Schallquellen zu ersetzen, wurde in dieser Arbeit eine experimentelle, akustische Messmethode entwickelt, Raumtemperaturverteilung zu analysieren. Unter der Einbeziehung von Schallreflexionen geschieht dies mit lediglich einem LS und einem Mikrofon. Sämtliche Vorteile der akustischen Ermittlung von raumklimatologischen Größen bleiben dabei erhalten.

8.1 Zusammenfassung

Unter Kenntnis der Raumgeometrie und der Position von Sender und Empfänger, werden Schallstrecken, sowie die dazugehörigen theoretischen Schalllaufzeiten bestimmt. Dies geschieht auf Grundlage der geometrischen Raumakustik und einem SSQ-Modell für quaderförmige Räume zweiter Ordnung. Dabei ist es nicht unerheblich, welche Positionen gewählt werden, denn sie bestimmen die Verteilung von Schallstrecken im Raum, sowie die zeitlichen Abstände der Ankunftszeiten. Mittels der gemessenen Schalllaufzeiten auf den modellierten Schallstrecken, kann die mittlere Schallgeschwindigkeit, die proportional zur mittleren Temperatur auf der Strecke ist, bestimmt werden.

Diese Laufzeiten werden auch in Form von Peaks im Bereich der frühen Reflexionen in der IR des betreffenden Raumes repräsentiert. Die RIR wird bei jeder Einzelmessung mittels der Korrelationsmesstechnik und einer MLS als Anregungssignal ermittelt. Die Raumantwort wird statistisch aufbereitet, um Reflexionen hervorzuheben, indem die charakteristische Signalform von zurückgeworfenen Impulsen ausgenutzt wird, wodurch ein sog. Kurtosis-Reflektogramm entsteht. Unter der Kenntnis der theoretischen Schalllaufzeiten, wird das Reflektogramm analysiert, indem in den Bereichen der erwarteten Reflexionen nach einem lokalen Maximum gesucht wird. Nicht immer kann eine numerisch bestimmte Schalllaufzeit einem Peak in der IR zugeordnet werden, zumal geometrische Ungenauigkeiten in realen Umgebungen unvermeidbar sind und Mehrfachreflexionen zu einer geringen Ausprägung der Peaks im Kurtosis-Reflektogramm führen. In solchen Fällen wird entweder eine manuelle Korrektur des SSQ-Modells, mittels interaktiver Eingabe per Computermaus vorgenommen, oder die betreffende Schallstrecke wird gänzlich von der Berechnung der Raumtemperaturverteilung ausgeschlossen.

Für die örtliche Differenzierung der Temperatur auf Grundlage der modellierten Schallstrecken und der gemessenen Laufzeiten, sorgt eine experimentelle, algebraische, tomografische Rekonstruktion. Nach einer Diskretisierung des Raumes in Teilvolumen und Schallstreckenabschnitte, werden, mithilfe eines SIRT-Algorithmus, die Temperaturen in den Teilvolumen ermittelt.

Es hat sich gezeigt, dass ein Raum mit einem spezialisierten, tropfenförmigen LS, in einem Frequenzbereich von zirka 200 Hz bis 4 kHz, annähernd richtungsunabhängig und mit einem ausreichend hohen Pegel, sondiert werden kann. Hierfür wurde ein kompakter LS mit einem einzelnen 2-Zoll-Treiber gebaut und evaluiert, obgleich theoretisch eine maximal breitbandige Monopol-Punktquelle für die vorgestellte Messmethode ideal wäre. Mehrere Treiber, die in alle Raumrichtungen abstrahlen, würden bei zeitgleicher Signalabgabe, aufgrund ihrer örtlich getrennten SEO, das Korrelationsergebnis verschmieren.

Bei einer Beispielmessung mit dem experimentellen Messsystem in einer kleinen, quaderförmigen Sporthalle, wurde gezeigt, dass die theoretischen Schalllaufzeiten meist gut mit den Peaks im Kurtosis-Reflektogramm übereinstimmen. Die Verbindung zwischen dem Modell und der Realität ist, aufgrund einer automatischen Laufzeitanpassung durch eine Referenzmessung, hinreichend gegeben. Die Messgröße wurde während der Messdauer von drei Stunden mit mehreren elektrischen Heizgeräten an einer Stelle beeinflusst. Bei der Auswertung wurden Temperaturänderungsverläufe, relativ zum Messbeginn, mit den Daten konventioneller Sensoren verglichen. In allen Raumbereichen haben die Kurven vergleichbare Tendenzen, auch wenn die Temperaturänderungsverläufe betragsmäßig in einigen Fällen stark voneinander abweichen. Doch dies kann zum Teil mit der mangelnden Vergleichbarkeit aufgrund der verschiedenen Messprinzipien, aber vor allem durch die jeweilige Positionierung der herkömmlichen Sensoren im Raum, erklärt werden. Zudem stellt die akustische Methode immer örtlich gemittelte Werte dar, wohingegen die Thermometer an einem Punkt messen. Der Ansatz, durch Laufzeitbeziehungen im Reflektogramm auf absolute Temperaturen zu schließen, hatte einen unstetigen Temperaturverlauf zur Folge, obgleich die Anpassung an einen realistischeren Temperaturwert, im Vergleich zur initialen Angabe, funktioniert hat.

Schließlich wurden Verteilungen der relativen Temperaturen zu unterschiedlichen Zeitpunkten visualisiert. Dabei kann zunächst die Position der Wärmequellen, aufgrund von lokalen Temperaturdifferenzen, gut erkannt werden. Doch es musste im weiteren Verlauf der Messung festgestellt werden, dass die Annahme, die im theoretischen Teil dieser Arbeit gemacht wurde, nämlich dass Strömungseinflüsse unberücksichtigt bleiben sollen, nicht realistisch ist, sobald in einem Raum größere Temperaturunterschiede vorkommen. Neben Temperaturänderungen, führen vor allem Fluktuationen der Raumluftströmung, die im Falle der Beispielmessung auf Wärme konvektion zurückzuführen ist, zu zeitlichen Varianzen des Ausbreitungsmediums. Diese Nichtlinearitäten haben Fehldarstellungen der Temperaturverteilung zur Folge. Sowohl Temperaturänderungen, als auch Strömungsfluktuationen im Raum sind gleichbedeutend mit einem partiellen oder totalen Time-Stretching der RIR, welche der experimentellen Messmethode zugrunde liegt.

8.2 Ausblick

Bei der Auseinandersetzung mit dem Thema der Arbeit und bei ihrer Umsetzung, sind vielfältige Möglichkeiten aufgetaucht, wie die vorgestellte experimentelle Messmethode sinnvoll ausgebaut und verbessert werden kann. Diese umfassen sowohl Software-Implementierungen, als auch Veränderungen bei der Hardware und des

Aufbaus und könnten bei einer Weiterentwicklung verwirklicht werden. Einige Ansätze sind nachfolgend aufgeführt:

Berücksichtigung von Strömungseinflüssen

Selbst in geschlossenen Räumen führen konvektive Strömungen zu einer vektoriellen Beeinflussung der Schallgeschwindigkeit (sh. Abschnitt 7.3.4), weshalb diese bei einer Temperaturmessung zu Fehlern führen. Darüber hinaus ist die Strömung selbst eine Größe, die bei raumklimatologischen Erhebungen von großem Interesse ist. Der Strömungseinfluss kann für Temperaturmessungen herausgerechnet werden [Bart 11]. Mit dem Aufbau der Messmethode dieser Arbeit, der nur aus einem Sender und einem Empfänger besteht, wird der Forderung nach reziproken Schallstrecken zur Berücksichtigung der Strömung nicht nachgekommen. Ein Ansatz wäre, Strömungseinflüsse als systematische Fehler zu betrachten [Vech 13].

Komplexeres Raummodell

Die Beschränkung auf einen quaderförmigen Raum durch die rudimentäre Implementierung des SSQ-Modells stellt eine erhebliche Einschränkung für Messungen in realen Umgebungen dar. Daher wäre eine praxisnahe Umsetzung der Berechnung von Schallstrecken und Laufzeiten mithilfe eines Raumsimulationsprogramms eine denkbare Lösung.

Numerische Bestimmung der Position von Sender und Empfänger

Die geforderte gleichmäßige Verteilung der Schallstrecken im Raum und der Reflexionen im Reflektogramm könnte numerisch bestimmt werden. Dies würde zu einer optimierten Position von Sender und Empfänger im Raum führen.

Einbeziehung von Reflexionen höherer Ordnung

Reflexionen höherer Ordnung werden zum Teil früher vom Empfänger erfasst und sind energiereicher, als Reflexionen erster und zweiter Ordnung. Deshalb wäre eine Betrachtung höherer Reflexionen erstrebenswert, um Schallstrecken nach der Qualität der zugehörigen Reflexionen auszuwählen. Außerdem könnte man eine verbesserte Abdeckung des Raumes mit Schallstrecken realisieren.

Erhöhung der Anzahl von Sender oder Empfänger

Zum einen würden zusätzliche Sender und Empfänger die Anzahl der zur Verfügung stehenden Schallstrecken signifikant erhöhen. Zum anderen würde die Positionierung zweier LS- /Mikrofonpaare dazu führen, dass auf Schallstrecken reziprok gemessen werden kann und somit eine Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten nach [Bart 11] möglich wäre.

Einsatz konventioneller Audiokarten

Es ist nicht zwangsläufig eine spezialisierte Messkarte, wie sie für diese Arbeit verwendet wurde, nötig. Eine konventionelle Audiokarte mit hoher Abtastrate würde den Anforderungen ebenso entsprechen. Erste vielversprechende Tests wurden mit der On-Board-Soundkarte gemacht, die in dem Notebook aus Abschnitt 4.2 verbaut ist. Die Folge wäre eine sehr kostengünstige Hardware für das komplette Messsystem.

Messung im Ultraschallbereich

In Hinblick auf das störende Anregungssignal im Hörschallbereich, wäre eine Sondierung des Raumes mit einem möglichst ungerichteten Ultraschall-Emitter erstre-

benswert. Damit würden dauerhafte raumklimatologische Überwachungen trotz der Anwesenheit von Personen ermöglicht werden.

Implementierung einer GUI

Innerhalb von Matlab® würde eine grafische Bedienoberfläche den praktischen Messvorgang erleichtern.

Unabhängigkeit von Matlab®

Sollte die Messmethode regelmäßig angewendet werden, wäre eine hardwarenahe Implementierung des Messalgorithmus auf einem Mikrocontroller denkbar, oder er könnte als ausführbares Programm umgesetzt werden.

Automatische Bestimmung der Raumgeometrie

Es gibt Ansätze, die die Geometrie eines Raumes durch die Analyse der RIR, aufgenommen von einem oder mehreren Mikrofone an verschiedenen Stellen, schätzen [Ribe 12][Anto 12][Dokm 13]. Die Herangehensweisen, wie die Raumantwort analysiert wird, ähneln der Methode dieser Arbeit. Es könnte erreicht werden, dass die Raumtemperaturverteilung, ohne Informationen über die Raumgeometrie oder die Position von Sender und Empfänger, bestimmt werden kann.

Berücksichtigung der richtungsabhängigen LS-IR

Die Richtwirkung des LS könnte bei Messungen berücksichtigt werden, indem eine richtungsabhängige MLS für die jeweilige Raumrichtung zur Korrelation verwendet wird.

Literaturverzeichnis

- [Alle 79] J. B. Allen and D. A. Berkley. "Image method for efficiently simulating small-room acoustics". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, No. 4, pp. 943–950, 1979. 1, 3.7
- [Anto 12] F. Antonacci, J. Filos, M. R. Thomas, E. A. P. Habets, A. Sarti, P. A. Naylor, and S. Tubaro. "Inference of room geometry from acoustic impulse responses". *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, Vol. 20, No. 10, pp. 2683–2695, 2012. 8.2
- [Arno 00] K. Arnold. "Ein experimentelles Verfahren zur Akustischen Tomographie im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht". Tech. Rep. Band 18, Wissenschaftliche Mitteilung aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 2000. 1
- [Bart 09] M. Barth. "Akustische Tomographie zur zeitgleichen Erfassung von Temperatur- und Strömungsfeldern". Tech. Rep. Band 19, Wissenschaftliche Mitteilung aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 2009. 1, 2.4.1, 2.4.2, 5.2.12
- [Bart 11] M. Barth and A. Raabe. "Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air". *Measurement Science and Technology*, Vol. 22, No. 3, p. 035102, 2011. 1, 3.8, 3.8, 5.2.12, 8.2
- [Bohn 88] D. A. Bohn. "Environmental Effects on the Speed of Sound". *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 36, No. 4, pp. 223–231, 1988. 1
- [Bore 99] G. Bore and S. Peus. *Mikrophone - Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Vol. 5, Firmenschrift Georg Neumann GmbH, Berlin, 1999. 4.2
- [Brow 02] C. Brown. "mls.m - File Exchange - MATLAB Central". 2002. URL <http://www.mathworks.de/matlabcentral/fileexchange/1246-mls-m>, Zugriff: 17.09.2014. 5.2.3
- [Copp 83] P. Coppin and K. Taylor. "A three-component sonic anemometer/thermometer system for general micrometeorological research". *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 27, No. 1, pp. 27–42, 1983. 1, 5.1
- [Dokm 13] I. Dokmanic, R. Parhizkar, A. Walther, Y. M. Lu, and M. Vetterli. "Acoustic echoes reveal room shape". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 110, No. 30, pp. 12186–12191, 2013. 3.7, 8.2
- [DT98 13] *DT9847 Series - Dynamic Signal Analyzer for USB With Low THD and Wide Dynamic Range*. Data Translation, Inc., 100 Locke Drive, Marlboro, MA 01752-1192, dt9847-1-1 Ed., 2013. 4.2
- [Dunn 93] C. Dunn and M. J. Hawksford. "Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements". *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 41, No. 5, pp. 314–335, 1993. 3.4, 4.1.1

- [Foke 06] T. Foken. *Angewandte Meteorologie*. Springer, 2006. 1, 5.1
- [Harr 71] C. M. Harris. “Effects of humidity on the velocity of sound in air”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 49, No. 3B, pp. 890–893, 1971. 2.4.2, 2.4.2
- [Heiß 14] A. Heißmann. “mündliche Mitteilung”. 2014. URL <http://heissmann-acoustics.de/>, Zugriff: 27.08.2014. 4.1.2
- [Heri 12] E. Hering, R. Martin, and M. Stohrer. *Physik für Ingenieure, 11*. Springer, 2012. 7.3.4
- [Hofe 08] D. Hofer. *Implementierung eines 64 Kanal Mikrofonarrays*. Master’s thesis, Technische Universität Graz, 2008. 4.1.1
- [Hoff 98] R. Hoffmann. *Signalanalyse und -erkennung: Eine Einführung für Informationstechniker*. Springer, 1998. 4.2
- [Hols 04] P. Holstein, A. Raabe, R. Müller, M. Barth, D. Mackenzie, and E. Starke. “Acoustic tomography on the basis of travel-time measurement”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 7, p. 1420, 2004. 1
- [Jobs 12] Jobst-Audio. “Geschlossenes-Gehäuse berechnen”. 2012. URL <http://www.jobst-audio.de/tools-frequenzweiche/cbgehaeuse>, Zugriff: 29.08.2014. 4.1.2
- [Kaim 63] J. Kaimal and J. Businger. “A continuous wave sonic anemometer-thermometer”. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 2, No. 1, pp. 156–164, 1963. 1
- [Kaji 99] S. Kajita, K. Takeda, and F. Itakura. “Compensation of Room Acoustic Transfer Functions Affected by the Change of Room Temperature”. In: *Audio Engineering Society Convention 107*, Audio Engineering Society, 1999. 3.2
- [Khal 14] N. Khaled. “straight line and plane intersection - File Exchange - MATLAB Central”. 2014. <http://www.mathworks.fr/matlabcentral/fileexchange/17751-straight-line-and-plane-intersection>, Zugriff 29.09.2014. 5.2.7
- [Knes 61] H. Kneser. *Handbuch der Physik (Herausgeber S. Flügge)*. Springer, Bd. XI/1, 1961. 2.4.1
- [Kob 96] M. Kob and M. Vorländer. “Der Einfluß von Wind bei Maximalfolgenmessungen”. *Fortschritte der Akustik*, Vol. 22, pp. 280–281, 1996. 3.4, 5.2.4, 5.2.5
- [Kutt 07] H. Kuttruff. *Acoustics: An Introduction*. CRC Press, 2007. 2, 2.3
- [Lind 06] A. Lindau. *Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden*. Master’s thesis, TU Berlin, 2006. 5.2.4, 5.2.6
- [Luke 92] H. D. Luke. *Korrelationssignale*. Springer, 1992. 3.4, 5.2.3

- [Masi 11] B. Masiero, M. Pollow, and J. Fels. “Design of a fast broadband individual head-related transfer function measurement system”. In: *Proc. Forum Acusticum*, p. 136, 2011. 4.1.1, 4.1.2
- [Math 14] Mathworks. “Data Acquisition Toolbox”. 2014. URL <http://www.mathworks.de/products/daq/>, Zugriff 09.09.2014. 4.4
- [Mesc 02] D. Meschede. *Gerthsen Physik, 21., völlig neubearbeitete Auflage*. Springer, 2002. 4.3
- [Möse 10] M. Möser. *Messtechnik der Akustik*. Springer, 2010. 5.2.3
- [Möse 12] M. Möser. *Technische Akustik*. Springer, 2012. 2, 2.3, 2.5
- [Osta 09] V. E. Ostashev, S. N. Vecherin, K. D. Wilson, A. Ziemann, and G. H. Goedecke. “Recent progress in acoustic travel-time tomography of the atmospheric surface layer”. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 18, No. 2, pp. 125–133, 2009. 1
- [Peif 94] T. Peifer and P. Profos. *Handbuch der industriellen Messtechnik*. Oldenbourg Industrieverlag, 1994. 7.3.2
- [Pier 89] A. D. Pierce. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America, 1989. 1, 2.4.3
- [Ribe 12] F. Ribeiro, D. Florencio, D. Ba, and C. Zhang. “Geometrically constrained room modeling with compact microphone arrays”. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, Vol. 20, No. 5, pp. 1449–1460, 2012. 8.2
- [Riet 04] H. Rietschel and K. Fitzner. *Raumklimatechnik: Band 3: Raumheiztechnik*. Springer, 2004. 7.3.4, 7.10
- [Schu 11] F. Schultz. *Elektroakustisch optimierte Wiedergabe binauraler Signale*. Master’s thesis, TU Berlin, 2011. 4.1.1
- [Seli 05] M. Seliger. “Die Anwendung breitbandiger Signale für ein Messsystem zur akustischen Laufzeittomographie”. 2005. Diplomarbeit an der Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften. 2.4.1, 3.4
- [Star 99] B. Stark. *Lautsprecher Handbuch*. Pflaum, 1999. 4.1.1
- [Sven 99] P. Svensson and J. L. Nielsen. “Errors in MLS measurements caused by time variance in acoustic systems”. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 47, No. 11, pp. 907–927, 1999. 1, 3.4, 3.5, 3.1, 3.5.2
- [Terv 11] S. Tervo. *Localization and Tracing of Early Acoustic Reflections*. Vol. 143/2011 Doctoral Dissertations, Aalto University publication series, 2011. 3.6.1, 3.6.1, 5.2.5
- [Ushe 10] J. Usher. “An improved method to determine the onset timings of reflections in an acoustic impulse response”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 4, pp. EL172–EL177, 2010. 3.6.2, 3.6.2, 5.2.6

- [Vech 13] S. N. Vecherin, V. E. Ostashhev, and D. K. Wilson. “Assessment of systematic measurement errors for acoustic travel-time tomography of the atmosphere”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 134, No. 3, pp. 1802–1813, 2013. 8.2
- [Vorl 94] M. Vorländer. “Anwendung der Maximalfolgenmeßtechnik in der Akustik”. *Fortschritte der Akustik*, Vol. 20, pp. 83–102, 1994. 3.3
- [Vorl 95] M. Vorländer and H. Bietz. “Der Einfluß von Zeitvarianzen bei Maximalfolgenmessungen”. *Fortschritte der Akustik*, Vol. 21, pp. 675–678, 1995. 3.4
- [Vorl 97] M. Vorländer, Mnder and M. Kob. “Practical aspects of MLS measurements in building acoustics”. *Applied Acoustics*, Vol. 52, No. 3, pp. 239–258, 1997. 1, 3.5
- [Wein 08] S. Weinzierl. *Handbuch der Audiotechnik*. Springer, 2008. 2.3, 3.1, 3.2, 4.1.1, 4.1.3
- [Ziem 00] A. Ziemann. “Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht”. Tech. Rep. Band 19, Wissenschaftliche Mitteilung aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 2000. 1
- [Zirn 06] O. Zirn and S. Weikert. *Modellbildung und simulation hochdynamischer Fertigungssysteme*. Springer, 2006. 7.3.4
- [Zmar 02] E. Zmarsly, W. Kuttler, H. Pethe, and . Zmarsly-Kuttler-Pethe. *Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen: eine Einführung mit Übungen, Aufgaben und Lösungen*. E. Ulmer, 2002. 2.4.2

A Anhang

A.1 Matlab-Code

A.1.1 DAQrun.m

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % runs a measurement to determine the temperature distribution in a
3 % rectangular room.
4 %
5 % before running this:
6 % parameter settings in "DAQinit.m"
7 % reference measurement with "DAQrun_captureRef.m"
8 %
9 % various temperature outputs in Workspace:
10 % kurtosisTemperature:          average absolute acoustic virtual
    temperature
11 %                               on the sound rays
12 % kurtosisTemperatureRel:      average relative acoustic virtual
    temperature
13 %                               on the sound rays
14 % kurtosisTemperatureMean:     absolute acoustic virtual mean
    temperature
15 %                               averaged over sound rays
16 % kurtosisTemperatureMeanRel:  relative acoustic virtual mean
    temperature
17 %                               averaged over sound rays
18 % tomoTemperature:            absolute acoustic virtual temperature of
19 %                               the tomographic voxels
20 % tomoTemperatureRel:         absolute acoustic virtual temperature of
21 %                               the tomographic voxels
22 % tomoTemperatureMean         absolute acoustic virtual temperature
23 %                               averaged over voxels
24 % tomoTemperatureMeanRel:     absolute acoustic virtual temperature
25 %                               averaged over voxels
26 %
27 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
    Berlin
28 % marcus.bleisteiner@gmail.com
29 % Leipzig, 02.06.2014
30 % last change 24.10.2014
31 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32
33 clear all
34 close all
35
36 if (~isempty(daqfind))
37     stop(daqfind)
38 end
39
40 %% load initial parameters
41 [room, r, s, fs, sampleRateIn, sampleRateOut, exOrder, lengthIn,
    amplification, ...
```

```
42     measNr, measInterval, refDist, initialTemp, corrLength, windowLength,
43         ...
44     cellOrder, excludeRay , kurtosisWindowLengthL, kurtosisWindowLengthM,
45         ...
46     WeightDirect, WeightDiagonal] = DAQinit;
47 %%
48 SpecificHeatRatio = 1.4;
49 GasConstantAir = 287.058;
50
51 % loading data from reference measurement
52 load('MeasRef.mat');
53
54 % initial speed of sound at initialTemp
55 c = 331.5+0.596*initialTemp;
56
57 % initial time of arrival for direct sound
58 refDistSmp = refDist/(c/sampleRateIn);
59 refDistSmpRel = refDistSmp;
60
61 % calc Image Model
62 [imMout] = imageModel(room,s,r,fs,corrLength,c,0);
63 imMoutRel = imMout;
64 % adjustment of the image model, to center the window around the
65     reflections
66 imMout(:,3) = imMout(:,3)+AdjWRef;
67 imMoutRel(:,3) = imMoutRel(:,3)+AdjWRef;
68
69 % calc matrix for tomography
70 [tomMa] = cellSoundRays(room,s,r,imMout,cellOrder);
71 tomMaRel = tomMa;
72
73 % check if sum of ray length in cells is identical with ray length
74     calculated by
75     the image model
76 rayCheck = [sum(tomMa,2) imMout(:,5)];
77 if abs(rayCheck(:,1)-rayCheck(:,2)) >= 1e-6
78     error('tomography matrix not calculated correctly','model error');
79 end
80
81 %% Signal
82 % MLS
83 exSignal = mls(exOrder,1);
84
85 % normalisation and amplification
86 exSignal = exSignal/abs(max(exSignal)) * amplification;
87
88 % load Referenz-Signal for Correlation
89 load('mls18_noFilt_216kHz_0.mat')
90
91 %% init DAQ card
92 % Output Ch
93 ao = analogoutput('dtol');
94 addchannel(ao,0);
95 ao.BufferingMode = 'Auto';
96 ao.TriggerType = 'Manual';
97 set(ao, 'SampleRate', sampleRateOut);
98 % Make sure the analog output is at zero.
```

```

96 putsample(ao,0)
97
98 % Input Ch
99 ai = analoginput('dtol');
100 addchannel(ai, 0);
101 ai.BufferingMode = 'Auto';
102 ai.TriggerType = 'Manual';
103 set(ai, 'SampleRate', sampleRateIn);
104
105 % polarization voltage (IEPE)
106 set(ai.Channel, 'ExcitationCurrentSource', 'internal')
107 set(ai.Channel, 'Coupling', 'AC')
108 ai.channel.GainPerChan = 10;
109
110 requiredSamples = floor(sampleRateIn * lengthIn);
111 set(ai, 'SamplesPerTrigger', requiredSamples);
112
113 % initialize measurement
114 % Load test signal into the analog output buffer.
115 putdata(ao,exSignal');
116 start([ai,ao]);
117
118 % pause because of IEPE (loading mic condenser)
119 pause(20)
120
121 %%
122 % init: maximum of each window where a reflection is expected
123 kurtosisWindowMax = zeros(length(imMout),measNr);
124 kurtosisWindowMaxRel = zeros(length(imMout),measNr);
125
126 % init: different temperature calculations
127 kurtosisTemperature = zeros(length(imMout),measNr);
128 kurtosisTemperatureRel = zeros(length(imMout),measNr);
129 kurtosisTemperatureMean = zeros(1,measNr);
130 kurtosisTemperatureMeanRel = zeros(1,measNr);
131 % init: temperature for tomography
132 tomoTemperature = zeros(cellOrder^3,measNr);
133 tomoTemperatureRel = zeros(cellOrder^3,measNr);
134 tomoTemperatureMean = zeros(1,measNr);
135 tomoTemperatureMeanRel = zeros(1,measNr);
136 % init: running time for tomography algorithm input
137 kurtosisRunningTime = zeros(length(imMout),1);
138 kurtosisRunningTimeRel = zeros(length(imMout),1);
139
140 % init: individual reflexion window adaption for the relative temperature
141 % detection
142 WinAdaptRel = zeros(length(imMoutRel),1);
143
144 % init: SNR of each measurement
145 SNR = zeros(1,measNr);
146
147 % DAQ-trigger command needs a waiting time depending on the lenght of
    recording
148 waitTime = lengthIn * 1.1 + 0.5;
149
150 %%
151
152 % figure for plotting correlation result at run-time

```

```
153 interactiveFigure = figure(1);
154 set(gcf, 'units', 'normalized', 'outerposition', [0 0 1 1]);
155
156 % create directory for saving
157 % create date and time string
158 datetime = datestr(clock, 31);
159 datetime = [datetime(1:10), '_', datetime(12:13), '-', datetime(15:16), '-',
    datetime(18:19)];
160
161 % make directory for measurement raw data
162 dname = sprintf('%s', datetime);
163 mkdir(dname);
164
165 %% exclusion of faulty sound rays (effects only tomography)
166 % very important: start from the highest!!!
167 for ex = 1:1:length(excludeRay)
168     tomMa(excludeRay(1,ex), :) = [];
169     tomMaRel(excludeRay(1,ex), :) = [];
170 end
171
172 %%
173 for i=1:1:measNr;
174     tic
175
176     % create date and time string
177     datetime = datestr(clock, 31);
178     datetime = [datetime(1:10), '_', datetime(12:13), '-', datetime(15:16), '-',
        datetime(18:19)];
179
180     % init: time data vector calculated with image model
181     kurtosisReflTimes = zeros(corrLength*sampleRateIn, 1);
182
183     % init: current room temperature calculation
184     refDistSmpSum = 0;
185
186     % starts measurement
187     trigger([ai, ao])
188     wait(ai, waitTime);
189     % read data
190     [data, time] = getdata(ai);
191
192     % remove DC offset
193     data = data - mean(data);
194
195     % WRITE RECORDED DATA
196     fname = sprintf('%s_data%d.mat', datetime, i);
197     save([dname, '\', fname], 'data');
198
199     % restart measurement for next triggering
200     putdata(ao, exSignal');
201     start([ai, ao]);
202
203     % HP Filter
204     [data_filt] = hpZeroPhase(data, sampleRateIn);
205
206     % recorded MLS in RAR
207     % remove DC offset of recorded reference signal
208     MLSrec = MLSrec - mean(MLSrec);
```



```

209 [dataCorr, lags] = xcorr(data_filt, MLSrec);
210
211 %%
212 % absolute temperature calculations
213
214
215 % consideration of the absolute running time
216 [Value, Ind] = max(abs(dataCorr));
217 dataCorr_cut = dataCorr(:, (Ind-floor(refDistSmp)):end);
218
219 % cut to image model length
220 dataCorr_cut = dataCorr_cut(:, 1:corrLength*sampleRateIn);
221
222 % calculation to find the reflexion time
223 kurtosisEstimate = kurtosis(dataCorr_cut, kurtosisWindowLengthM,
    kurtosisWindowLengthL);
224
225 % find maxima in each window
226 for j = 1:length(imMout)
227     % windowing to find the maximum (kurtosis)
228     windKurtosis = kurtosisEstimate((imMout(j,3)+runningTimeAdj(j,1))
        -windowLength/2:(imMout(j,3)+runningTimeAdj(j,1))+windowLength
        /2);
229     [kurtosisMaxValue, kurtosisMaxInd] = max(windKurtosis);
230     kurtosisWindowMax(j,i) = kurtosisMaxInd;
231     % absolute running time from mic to walls to receiver by adding
        the
232     % window to the simulated window running time (kurtosis)
233     kurtosisPksDistAbs = imMout(j,3)-windowLength/2+kurtosisWindowMax
        (j,i);
234     % running time (s)
235     kurtosisTerm = (kurtosisPksDistAbs- AdjWRef(j,1))/sampleRateIn;
236     % running time (ms) for tomography
237     kurtosisRunningTime(j,1) = kurtosisTerm*1000;
238     % speed of sound (m/s)
239     kurtosisMeasC = imMout(j,5)/kurtosisTerm;
240     %  $T_{av} = c^2/\gamma \cdot R$ 
241     kurtosisT = kurtosisMeasC^2./(SpecificHeatRatio*GasConstantAir);
242     % Temperatur in °C
243     kurtosisTemperature(j,i) = kurtosisT-273.15;
244     kurtosisTemperatureMean(1,i) = sum(kurtosisTemperature(:,i))/
        length(imMout);
245
246     % calculating a new reference distance (time in samples)
        depending on the actual temperature
247     % using the time between direct sound and each "first order"
        reflection
248     if isnan(imMout(j,9))
249         refDistSmpSum = refDistSmpSum+(kurtosisPksDistAbs-refDistSmp)
            /((imMout(j,5)/refDist)-1);
250     end
251 end
252 %%
253 % relative temperature calculations with initial reference
254
255
256 % consideration of the absolute running time
257 [ValueRel, IndRel] = max(abs(dataCorr));

```

```

258 dataCorr_cutRel = dataCorr(:, (IndRel-floor(refDistSmpRel)):end);
259
260 % SNR
261 MS_inigap = mean(dataCorr_cutRel(:, 10:floor(refDistSmpRel)-200).^2);
262 MS_50 = mean(dataCorr_cutRel(:, floor(refDistSmpRel):floor(
    refDistSmpRel)+sampleRateIn*0.05).^2);
263 SNR(1,i) = 10*log((MS_50-MS_inigap)/(MS_inigap));
264
265 % cut to image model length
266 dataCorr_cutRel = dataCorr_cutRel(:, 1:corrLength*sampleRateIn);
267
268 % alternative calculation to find the reflexion time
269 [kurtosisEstimateRel] = kurtosis(dataCorr_cutRel,
    kurtosisWindowLengthM, kurtosisWindowLengthL);
270
271 % find maxima in each window
272 for j = 1:1:length(imMoutRel)
273     % windowing to find the maximum (kurtosis)
274     windKurtosisRel = kurtosisEstimateRel(((imMoutRel(j,3)+
        runningTimeAdj(j,1))-windowLength/2)+WinAdaptRel(j,1)):(((
        imMoutRel(j,3)+runningTimeAdj(j,1))+windowLength/2))+
        WinAdaptRel(j,1)-1);
275     [kurtosisMaxValueRel, kurtosisMaxIndRel] = max(windKurtosisRel);
276     kurtosisWindowMaxRel(j,i) = kurtosisMaxIndRel;
277     % calculate the window centering
278     if kurtosisMaxIndRel ~= windowLength/2
279         WinAdaptRel(j,1) = WinAdaptRel(j,1)+kurtosisMaxIndRel-
            windowLength/2;
280     end
281     kurtosisWindowMaxRel(j,i)=kurtosisWindowMaxRel(j,i)+WinAdaptRel(j,
        1);
282     % absolute running time from mic to walls to receiver by adding
        the
283     % window to the simulated window running time (kurtosis)
284     kurtosisPksDistAbsRel = imMoutRel(j,3)-windowLength/2+
        kurtosisWindowMaxRel(j,i);
285     % running time (s)
286     kurtosisTermRel = (kurtosisPksDistAbsRel - AdjWRef(j,1))/
        sampleRateIn;
287     % running time (ms) for tomography
288     kurtosisRunningTimeRel(j,1) = kurtosisTermRel*1000;
289     % speed of sound (m/s)
290     kurtosisMeasCRel = imMoutRel(j,5)/kurtosisTermRel;
291     % Tav = c^2/y*R
292     kurtosisTRel = kurtosisMeasCRel^2./(SpecificHeatRatio*
        GasConstantAir);
293     % Temperatur in°C
294     kurtosisTemperatureRel(j,i) = kurtosisTRel-273.15;
295     kurtosisTemperatureMeanRel(1,i) = sum(kurtosisTemperatureRel(:,i)
        )/length(imMoutRel);
296 %
297
298 end
299 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
300
301 % First order rays temperature (just for displaying in a table)
302 % init: first order ray temperature
303 rayTemp = [];

```

```

304     for t = 1:1:size(kurtosisTemperature,1)
305         if isnan(imMout(t,2))
306             % rayTemp = [rayTemp; imMout(t,1) kurtosisTemperature(t,i)];
307             rayTemp = [rayTemp; imMout(t,1) kurtosisTemperatureRel(t,i)];
308         end
309     end
310
311     %% exclusion of faulty sound rays (only for tomography)
312     for ex = 1:1:length(excludeRay)
313         kurtosisRunningTime(excludeRay(1,ex),:) = [];
314         kurtosisRunningTimeRel(excludeRay(1,ex),:) = [];
315     end
316
317
318     %% tomography
319     xin = zeros(size(tomMaRel,2),1); % Anfangsverteilung
320     Average.Flag = 'on'; % keine Mittelung
321     Average.WeightDirect = WeightDirect;
322     Average.WeightDiagonal = WeightDiagonal;
323     Grid.NoOfTomoCells.XDir = cellOrder;
324     Grid.NoOfTomoCells.YDir = cellOrder;
325     Grid.NoOfTomoCells.ZDir = cellOrder;
326     [x,iter] = SirtATOM(tomMa,kurtosisRunningTime,15,xin,0,Grid,Average);
327     [xRel,iterRel] = SirtATOM(tomMaRel,kurtosisRunningTimeRel,15,xin,0,
328         Grid,Average);
329     % x is the slowness
330
331     tTemp = 1000^2./x.^2./SpecificHeatRatio/GasConstantAir;
332     tTempRel = 1000^2./xRel.^2./SpecificHeatRatio/GasConstantAir;
333     tTemp = tTemp -273.15;
334     tTempRel = tTempRel -273.15;
335
336     tomoTemperature(:,i) = tTemp;
337     tomoTemperatureRel(:,i) = tTempRel;
338     tomoTemperatureMean(1,i) = sum(tomoTemperature(:,i))/cellOrder^3;
339     tomoTemperatureMeanRel(1,i) = sum(tomoTemperatureRel(:,i))/cellOrder^3;
340
341     %% new reference distance (time in samples) for next measurement
342     refDistSmp = refDistSmpSum/6;
343
344     % new c
345     c = refDist/(refDistSmp/sampleRateIn)
346
347     % calc image model
348     [imMout] = imageModel(room,s,r,fs,corrLength,c,0);
349
350     %% PLOT
351
352     % Plot (at run-time)
353     clf;
354
355     figure(1)
356
357     subplot(2,1,1)
358
359     runningTimePlot(imMoutRel, corrLength, sampleRateIn,
360         kurtosisEstimateRel, runningTimeAdj);

```

```

359
360     set(interactiveFigure, 'ButtonDownFcn', ...    %# Set the ButtonDownFcn
           for the figure
361     @(s,e) interactivePlot(imMoutRel, interactiveFigure, runningTimeAdj))
           ;
362
363     if ~isempty(get(interactiveFigure, 'UserData'))
364         runningTimeAdj = runningTimeAdj + get(interactiveFigure, 'UserData
           ');
365         set(interactiveFigure, 'UserData', []);
366     end
367
368     uitable('Data', rayTemp, 'ColumnName', {'wall', 'temperature [C°]',
           'Position', [0 340 200 130]});
369
370
371     subplot(2,2,3)
372     imageModel(room, s, r, fs, corrLength, c, 1);
373
374
375     subplot(2,2,4)
376     plotTemp3D(room, cellOrder, tTempRel)
377
378     drawnow;
379
380     %%
381     toc
382     ttt = toc;
383
384     % timing control
385     pause(measInterval-ttt);
386
387 end
388
389 if (~isempty(daqfind))
390     stop(daqfind)
391 end

```

A.1.2 hpZeroPhase.m

```

1 function[data_filt] = hpZeroPhase(data, sampleRateIn)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % hp filtering with tools included in the signal processing toolbox
4 %
5 % inputs:
6 % data:          signal that should be processed
7 % sampleRateIn: sampling rate of data
8 %
9 % outputs:
10 % data_filt:     processed data
11 %
12 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
           Berlin
13 % marcus.bleisteiner@gmail.com
14 % Leipzig, 06.08.2014

```

```

15 % last change 13.10.2014
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18 cut_off_freq = 150;
19 hp_order = 18;
20
21 Wn1 = (cut_off_freq * 2) / sampleRateIn;
22 h=fdesign.highpass('N,F3dB',hp_order,Wn1);
23 d=design(h,'butter');
24 data_filt = filtfilt(d.sosMatrix,d.ScaleValues,data);
25 data_filt = data_filt';

```

A.1.3 imageModel.m

```

1 function [imMout] = imageModel(room,s,r,fs,duration,c,plotFlag)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % computes and visualises a second order image model and its sound rays
4 % of a rectangular room
5 %
6 % inputs:
7 % room:      room Dimension [x y z] (m)
8 % s:         source position [x y z] (m)
9 % r:         receiver position [x y z] (m)
10 % fs:        sampling frequency (Hz)
11 % duration:  length of time domain (s)
12 % c:         speed of sound (m/s)
13 % plotFlag  1 for showing the model in a plot
14 %
15 % outputs:
16 % imMout:    a matrix with the following content:
17 %            rows: sound ray numbers
18 %            columns:  1: wall number first reflection
19 %                     2: wall number second reflection
20 %                     3: time of incoming reflections (samples)
21 %                     4: time of incoming reflections (s)
22 %                     6,7,8: point of first order reflection and
23 %                           point of first second order reflection
24 %                     9,10,11: point of second second order reflection
25 %
26 %
27 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
28 %            Berlin
29 % marcus.bleisteiner@gmail.com
30 % Leipzig, 07.06.2014
31 % last change 13.10.2014
32 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
33 nsamples = duration*fs;
34
35 % Create output vectors
36 reflt1 = zeros(nsamples,1);
37 reflt2 = zeros(nsamples,1);
38
39 %% image model
40 % room/plane definition

```

```
41 % unit normals of room
42 n = [0 -1 0; 1 0 0; 0 1 0; -1 0 0; 0 0 1; 0 0 -1];
43 % points part of the walls
44 p = [0 0 0; room(1,1) 0 0; 0 room(1,2) 0; 0 0 0; 0 0 room(1,3); 0 0 0];
45
46 % init first order image sources
47 ss1 = [];
48 % init second order image sources
49 ss2 = [];
50
51 % output [i j "t1s or t2s" "t1 or t2" "reflPathLen1 or reflPathLen1" "I
    or J1" J2]
52 % i: wall number first reflection
53 % j: wall number second reflection
54 % t1s,t2s: time of incoming reflections (samples)
55 % t1,t2: time of incoming reflections (seconds)
56 % reflPathLen1 or reflPathLen2: length of sound ray
57 % I: point of first order reflection
58 % J1: point of first second order reflection
59 % J2: point of second second order reflection
60 out = [];
61
62 % first order image sources
63 for i = 1:1:6
64     s1 = s+2*dot((p(i,:)-s),n(i,:))*n(i,:);
65     reflPathLen1 = norm(s1-r);
66     t1 = reflPathLen1/c;
67     [I,check] = plane_line_intersect(n(i,:),p(i,:),r,s1);
68     ss1 = [ss1; s1 t1 i I reflPathLen1];
69     % s1: point of first order image source
70     % t1: time of incoming first order reflection
71     % i: wall number
72     % I: reflection point
73     % reflPathLen1: length of reflected sound ray
74
75     t1s = floor(t1*fs);
76     reflt1(t1s,1) = 1;
77
78     out = [out; i NaN t1s t1 reflPathLen1 I NaN NaN NaN];
79
80 % second order image sources
81 % here the new source is s1
82 for j = 1:1:6
83     s2 = s1+2*dot((p(j,:)-s1),n(j,:))*n(j,:);
84     reflPathLen2 = norm(s2-r);
85     t2 = reflPathLen2/c;
86     [J1,check] = plane_line_intersect(n(j,:),p(j,:),r,s2);
87     [J2,check] = plane_line_intersect(n(i,:),p(i,:),s1,J1);
88
89     if j ~= i && J1(1,1) >= 0 && J1(1,1) <= room(1,1) ...
90         && J1(1,2) >= 0 && J1(1,2) <= room(1,2) ...
91         && J1(1,3) >= 0 && J1(1,3) <= room(1,3)
92         ss2 = [ss2; s2 t2 i j J2 J1 reflPathLen2];
93         % s2: point of second order image source
94         % t1: time of incoming second order reflection
95         % i: wall number first reflection
96         % j: wall number second reflection
97         % J1: point of first second order reflection
```

```

98         % J:    point of second second order reflection
99         % reflPathLen2: length of reflected sound ray
100
101         t2s = floor(t2*fs);
102         reflt2(t2s,1) = 1;
103
104         out = [out; i j t2s t2 reflPathLen2 J1 J2];
105
106     end
107 end
108 end
109
110 imMout = out;
111
112
113
114 %% Plots
115
116 if plotFlag == 1
117
118     % figure
119     % hold on
120     % t=length(reflt1)/fs;    % overall time
121     % dt=t/length(reflt1);    % time increment
122     % tv=0:dt:t-dt;          % time vector
123     % plot(tv,reflt1,'b')
124     % plot(tv,reflt2,'r')
125
126     % Room
127     % figure
128     hold on
129     A = [0 0 0];
130     B = [room(1,1) 0 0];
131     D = [0 room(1,2) 0];
132     E = [0 0 room(1,3)];
133     H = [0 room(1,2) room(1,3)];
134     F = [room(1,1) 0 room(1,3)];
135     C = [room(1,1) room(1,2) 0];
136     G = [room(1,1) room(1,2) room(1,3)];
137
138     P = [A;B;F;G;C;D;A;E;H;G;F;E;H;D;C;B];
139     % P = [A;B;F;H;G;C;A;D;E;H;F;D;E;C;G;B];
140     plot3(P(:,1),P(:,2),P(:,3),'k','LineWidth',1.5)
141     xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]'); zlabel('z [m]');
142     title('Image Model')
143     axis equal
144
145     % receiver
146     scatter3(r(1,1),r(1,2),r(1,3),'fill');
147     % source
148     scatter3(s(1,1),s(1,2),s(1,3),'fill');
149     % first order image sources
150     % scatter3(ss1(:,1),ss1(:,2),ss1(:,3),'k','*')
151     % reflection point
152     scatter3(ss1(:,6),ss1(:,7),ss1(:,8),'b','*')
153     % second order image sources
154     % scatter3(ss2(:,1),ss2(:,2),ss2(:,3),'k')
155     % points of first second order reflections

```

```

156     scatter3(ss2(:,7),ss2(:,8),ss2(:,9),'r')
157     % points of second second order reflections
158     scatter3(ss2(:,10),ss2(:,11),ss2(:,12),'g')
159
160     % plot paths first order
161     for i = 1:1:size(ss1)
162         toward = [s;ss1(i,6:8)];
163         line(toward(:,1), toward(:,2), toward(:,3), 'Color','b')
164         backward = [ss1(i,6:8);r];
165         line(backward(:,1), backward(:,2), backward(:,3))
166     end
167
168     % plot paths second order
169     for i = 1:1:size(ss2)
170         toward = [s;ss2(i,7:9)];
171         line(toward(:,1), toward(:,2), toward(:,3),'Color','r')
172         transverse = [ss2(i,7:9);ss2(i,10:12)];
173         line(transverse(:,1), transverse(:,2), transverse(:,3),'Color','r
174             ')
175         backward = [ss2(i,10:12);r];
176         line(backward(:,1), backward(:,2), backward(:,3),'Color','r')
177     end
178
179     axis equal %vis3d
180     grid on
181     ViewAngle = 'view(-15,9)';
182     eval(ViewAngle);
183 end

```

A.1.4 kurtosis.m

```

1 function [kurtosisEstimate] = kurtosis(dataCorr_cut,kurtosisWindowLengthM
2     ,kurtosisWindowLengthL)
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 % computes the kurtosis estimation of a signal
5 % reference:
6 % J. Usher. ?An improved method to determine the onset timings of
7 % reflections in an acoustic impulse response.?
8 % The Journal of the Acoustical Society of America,
9 % Vol. 127, No. 4, pp. EL172?EL177, 2010.
10 %
11 % inputs:
12 % dataCorr_cut:          input signal
13 % kurtosisWindowLengthM: short window
14 % kurtosisWindowLengthL: long window
15 %
16 % outputs:
17 % kurtosisEstimate:      kurtosis estimation
18 %
19 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
20 % Berlin
21 % marcus.bleisteiner@gmail.com
22 % Leipzig, 10.07.2014
23 % last change 13.10.2014

```



```

22 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23
24 kurtosisEstimate = zeros(1,length(dataCorr_cut));
25 % running kurtosis analysis
26 for u = kurtosisWindowLengthM/2:1:length(dataCorr_cut)-
    kurtosisWindowLengthM/2
27     kurtosisWindowL = dataCorr_cut(1,u-kurtosisWindowLengthL/2+1:u+
        kurtosisWindowLengthL/2);
28     kurtosisWindowM = dataCorr_cut(1,u-kurtosisWindowLengthM/2+1:u+
        kurtosisWindowLengthM/2);
29     kurtosisEst = (mean(kurtosisWindowL)-mean(kurtosisWindowM))^4 / (std(
        kurtosisWindowM))^4;
30     kurtosisEstimate(1,u) = kurtosisEst;
31 end

```

A.1.5 runningTimePlot.m

```

1 function runningTimePlot(imMout, corrLength, sampleRateIn,
    kurtosisEstimate, runningTimeAdj)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % specialized plot function used by "DAQrun.m" "DAQrun_captureRef.m"
    while execution
4 %
5 % inputs:
6 % im Mout:          matrix with various values computed by "imageModel.m"
7 % corrLength:       length of analysis window (Reflektogramm)
8 % sampleRateIn:     sampling rate
9 % kurtosisEstimate:  kurtosis estimation (Reflektogramm)
10 % runningTimeAdj:   manual running time correction values
11 %
12 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
    Berlin
13 % marcus.bleisteiner@gmail.com
14 % Leipzig, 15.09.2014
15 % last change 14.10.2014
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18 kurtosisReflTimes = zeros(corrLength*sampleRateIn,1);
19
20 % amp image model data (just for displaying)
21 for l = 1:1:length(imMout)
22     kurtosisReflTimes((imMout(1,3)+runningTimeAdj(1,1)),1) = max(
        kurtosisEstimate);
23 end
24
25
26 t=length(kurtosisEstimate)/sampleRateIn;    % overall time
27 dt=t/length(kurtosisEstimate);              % time increment
28 tv=(0:dt:t-dt)*1000;                       % time vector
29
30 hold on
31 plot(kurtosisEstimate);
32 plot(kurtosisReflTimes,'r');
33 for i = 1:1:length(imMout)
34     if isnan(imMout(i,2))

```

```

35     walls = imMout(i,1);
36     else
37         walls = [imMout(i,1) imMout(i,2)];
38     end
39     walls = num2str(walls);
40     rayNumber = num2str(i);
41     w(i) = text((imMout(i,3)+runningTimeAdj(i,1)),max(kurtosisEstimate)*1
42         .02/4,walls,'Rotation',90);
43     r(i) = text((imMout(i,3)+runningTimeAdj(i,1)),max(kurtosisEstimate)*0
44         .95/4,rayNumber,'Rotation',90);
45
46 end
47
48 set(w(:),'fontw','bold','fonts',8)
49 set(r(:),'fontw','bold','fonts',8)
50 hold off
51 axis([0 length(kurtosisReflTimes) 0 max(kurtosisEstimate)/4])
52 title('Kurtosis')
53 xlabel('Time / Samples');
54 ylabel('Amplitude');

```

A.1.6 interactivePlot.m

```

1 function interactivePlot(imMout, interactiveFigure, runningTimeAdj)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % enables interactivity in "runningTimePlot.m"
4 %
5 % inputs:
6 % im Mout:          matrix with various values computed by "
7 %                   imageModel.m"
8 % interactiveFigure: graphic object
9 % runningTimeAdj:   manual running time correction values
10 %
11 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
12 %            Berlin
13 % marcus.bleisteiner@gmail.com
14 % Leipzig, 07.06.2014
15 % last change 30.06.2014
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18 interactiveRunningTimeAdj = zeros(length(imMout),1);
19
20 xx = (imMout(:,3)+runningTimeAdj);
21
22 [xm1, ym1] = ginput(1); %xmouse, ymouse
23 [xm2, ym1] = ginput(1);
24
25 %Engine
26 [~, xidx] = min(abs(xx-xm1)); %closest index
27 % [~, yidx] = min(abs(yy-ym));
28 % x_closest = xx(xidx) %extract
29 % y_closest = yy(yidx)
30
31 interactiveRunningTimeAdj(xidx,1) = xm2 - (imMout(xidx,3)+runningTimeAdj(
32     xidx,1));

```

```

30 interactiveRunningTimeAdj = floor(interactiveRunningTimeAdj);
31 set(interactiveFigure, 'UserData', interactiveRunningTimeAdj);

```

A.1.7 cellSoundRays.m

```

1 function [tomMa] = cellSoundRays(room,s,r,imMout,cellOrder)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % computes the length of sound rays contained in defined cell volumes
4 % (voxels) dividing a rectangular room. Rays are calculated by the
5 % function
6 % "imageModel.m" which has "imMout" as output. It can be used for the
7 % tomography function "SirtATOM_MBL.m".
8 % The room volume is divided into "cellOrder"-parts in each dimension.
9 % The numbering of the voxels is done in layers from bottom to top.
10 % Each level is composed of ascending series starting from the room
11 % origin.
12 %
13 % input:
14 % room:      room Dimension [x y z] (m)
15 % s:         source position [x y z] (m)
16 % r:         receiver position [x y z] (m)
17 % imMout:    sound ray data
18 % cellOrder: determines the space division
19 %
20 % output:
21 % tomMa: matrix for tomography containing the sections of each sound
22 % ray in every voxel.
23 % rows: sound rays
24 % columns: voxels
25 %
26 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
27 % Berlin
28 % marcus.bleisteiner@gmail.com
29 % Leipzig, 07.06.2014
30 % last change 14.10.2014
31 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32 %% room/plane definition
33 % unit normals of room
34 n = [0 -1 0; 1 0 0; 0 1 0; -1 0 0; 0 0 1; 0 0 -1];
35 % points part of the walls
36 p = [0 0 0; room(1,1) 0 0; 0 room(1,2) 0; 0 0 0; 0 0 room(1,3); 0 0 0];
37
38 %% cell calculation
39 % cell planes (same size for every cell)
40 cellPlanes = p./cellOrder;
41 % origins of the cells
42 po = zeros(cellOrder^3,3);
43 counter = 1;
44 zValue = -room(1,3)/cellOrder;
45 for k = 1:1:cellOrder
46     zValue = zValue+room(1,3)/cellOrder;
47     yValue = -room(1,2)/cellOrder;

```

```
48     for l = 1:1:cellOrder
49         yValue = yValue+room(1,2)/cellOrder;
50         xValue = -room(1,1)/cellOrder;
51         for m = 1:1:cellOrder
52             xValue = xValue+room(1,1)/cellOrder;
53             po(counter,:) = [xValue yValue zValue];
54             counter = counter+1;
55         end
56     end
57 end
58
59 % placing cell planes to cell origins
60 pc = cell(1,cellOrder^3);
61 for k = 1:1:length(pc)
62     for l = 1:1:length(cellPlanes)
63         pc{k} = [pc{k}; cellPlanes(l,:)+po(k,:)];
64     end
65 end
66
67 %%
68 % intersection points
69 % length of rays in cells
70
71 % init: matrix with data for tomography
72 tomMa = zeros(length(imMout),cellOrder^3);
73
74 % to detect all intersection points of a ray with a cell, the cell has to
    be
75 % shrunk slightly due to rounding issues
76 shrink = 1e-9;
77
78 for k = 1:1:length(imMout)
79     for l = 1:1:length(pc)
80
81         % intersection points of a cell
82         % first order ray from source to wall reflection
83         Ic1DistPoints = [];
84         % first order ray from receiver to wall reflection
85         Ic2DistPoints = [];
86         % second order ray from source to first wall reflection
87         Ic3DistPoints = [];
88         % second order ray from first wall reflection to second wall
            reflection
89         Ic4DistPoints = [];
90         % second order ray from receiver to second wall reflection
91         Ic5DistPoints = [];
92
93         for m = 1:1:6
94             % intersection of FIRST ORDER sound rays with every plane of
95             % every cell
96
97             % calc a extended vector from source or receiver to the point
98             % of the reflection
99             vec = imMout(k,6:8)-s;
100             normVec = vec/norm(vec);
101             % start point
102             vStart = s;
103             % end point
```

```

104     vEnd = imMout(k,6:8)+normVec*0.2;
105     % length of ray from source to refelction point
106     [Ic,check] = plane_line_intersect(n(m,:),pc{1}(m,:),vStart,
107         vEnd);
108     % ROUND e.g. to the 10th decimal because otherwise not all
109     % logical operators return the correct result
110     Ic = round(Ic.*1e10)./1e10;
111     if Ic(1,1) >= po(1,1)-shrink && Ic(1,1) <= po(1,1)+room
112         (1,1)/cellOrder+shrink ...
113         && Ic(1,2) >= po(1,2)-shrink && Ic(1,2) <= po(1,2)+room
114         (1,2)/cellOrder+shrink ...
115         && Ic(1,3) >= po(1,3)-shrink && Ic(1,3) <= po(1,3)+room
116         (1,3)/cellOrder+shrink ...
117         && isnan(imMout(k,9)) && check == 1
118         Ic1DistPoints = [Ic1DistPoints; Ic];
119         if size(Ic1DistPoints,1) == 2
120             Ic1Dist = norm(Ic1DistPoints(1,:)-Ic1DistPoints(2,:))
121             ;
122             tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+Ic1Dist;
123         end
124     % case for cell where source is located
125     if s(1,1) >= po(1,1) && s(1,1) <= po(1,1)+room(1,1)/
126         cellOrder...
127         && s(1,2) >= po(1,2) && s(1,2) <= po(1,2)+room(1,2)/
128         cellOrder...
129         && s(1,3) >= po(1,3) && s(1,3) <= po(1,3)+room(1,3)/
130         cellOrder...
131         && isnan(imMout(k,9))
132         tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+norm(s-Ic);
133     end
134 end
135
136 % calc a extended vector
137 vec = imMout(k,6:8)-r;
138 normVec = vec/norm(vec);
139 % start point
140 vStart = r;
141 % end point
142 vEnd = imMout(k,6:8)+normVec*0.2;
143 [Ic,check] = plane_line_intersect(n(m,:),pc{1}(m,:),vStart,
144     vEnd);
145 Ic = round(Ic.*1e10)./1e10;
146 if Ic(1,1) >= po(1,1)-shrink && Ic(1,1) <= po(1,1)+room
147     (1,1)/cellOrder+shrink...
148     && Ic(1,2) >= po(1,2)-shrink && Ic(1,2) <= po(1,2)+room
149     (1,2)/cellOrder+shrink...
150     && Ic(1,3) >= po(1,3)-shrink && Ic(1,3) <= po(1,3)+room
151     (1,3)/cellOrder+shrink...
152     && isnan(imMout(k,9)) && check == 1
153     Ic2DistPoints = [Ic2DistPoints; Ic];
154     if size(Ic2DistPoints,1) == 2
155         Ic2Dist = norm(Ic2DistPoints(1,:)-Ic2DistPoints(2,:))
156         ;
157         tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+Ic2Dist;
158     end
159 % case for cell where receiver is located

```

```

148         if      r(1,1) >= po(1,1) && r(1,1) <= po(1,1)+room(1,1)/
149             cellOrder...
150             && r(1,2) >= po(1,2) && r(1,2) <= po(1,2)+room(1,2)/
151                 cellOrder...
152             && r(1,3) >= po(1,3) && r(1,3) <= po(1,3)+room(1,3)/
153                 cellOrder...
154             && isnan(imMout(k,9))
155                 tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+norm(r-Ic);
156         end
157     end
158
159     % intersection of SECOND ORDER sound rays with every plane of
160     % every cell
161
162     % Note the order of reflections in "imMout". The point of the
163     % second reflection faces the point of the first reflection.
164
165     % calc a extended vector from source or receiver to the point
166     % of the reflection
167     vec = imMout(k,9:11)-s;
168     normVec = vec/norm(vec);
169     % start point
170     vStart = s;
171     % end point
172     vEnd = imMout(k,9:11)+normVec*0.2;
173     % length of ray from source to refelction point
174     [Ic,check] = plane_line_intersect(n(m,:),pc{1}(m,:),vStart,
175         vEnd);
176     Ic = round(Ic.*1e10)./1e10;
177     % check if first or second order and if there is a unique
178     % point of intersection on the sound ray
179     % check if point of intersection is really on the sound ray (
180     % small distance to the ray)
181     if      Ic(1,1) >= po(1,1)-shrink && Ic(1,1) <= po(1,1)+room
182         (1,1)/cellOrder+shrink ...
183         && Ic(1,2) >= po(1,2)-shrink && Ic(1,2) <= po(1,2)+room
184         (1,2)/cellOrder+shrink ...
185         && Ic(1,3) >= po(1,3)-shrink && Ic(1,3) <= po(1,3)+room
186         (1,3)/cellOrder+shrink ...
187         && ~isnan(imMout(k,9)) && check == 1
188             Ic3DistPoints = [Ic3DistPoints; Ic];
189         if size(Ic3DistPoints,1) == 2
190             Ic3Dist = norm(Ic3DistPoints(1,:)-Ic3DistPoints(2,:))
191             ;
192             tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+Ic3Dist;
193         end
194     % case for cell where source is located
195     if      s(1,1) >= po(1,1) && s(1,1) <= po(1,1)+room(1,1)/
196         cellOrder...
197         && s(1,2) >= po(1,2) && s(1,2) <= po(1,2)+room(1,2)/
198             cellOrder...
199         && s(1,3) >= po(1,3) && s(1,3) <= po(1,3)+room(1,3)/
200             cellOrder...
201         && ~isnan(imMout(k,9))
202             tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+norm(s-Ic);
203     end
204 end

```

```

193
194
195     % calc a extended vector from source or receiver to the point
196     % of the reflection HERE ON BOTH SIDES
197     vec = imMout(k,9:11)-imMout(k,6:8);
198     normVec = vec/norm(vec);
199     % start point
200     vStart = imMout(k,6:8)-normVec*0.2;
201     % end point
202     vEnd = imMout(k,9:11)+normVec*0.2;
203     % length of ray from refelction point to refelction point
204     [Ic,check] = plane_line_intersect(n(m,:),pc{1}(m,:),vStart,
        vEnd);
205     Ic = round(Ic.*1e10)./1e10;
206     if Ic(1,1) >= po(1,1)-shrink && Ic(1,1) <= po(1,1)+room
        (1,1)/cellOrder+shrink ...
207         && Ic(1,2) >= po(1,2)-shrink && Ic(1,2) <= po(1,2)+room
        (1,2)/cellOrder+shrink ...
208         && Ic(1,3) >= po(1,3)-shrink && Ic(1,3) <= po(1,3)+room
        (1,3)/cellOrder+shrink ...
209         && ~isnan(imMout(k,9)) && check == 1
210             Ic4DistPoints = [Ic4DistPoints; Ic];
211         if size(Ic4DistPoints,1) == 2
212             Ic4Dist = norm(Ic4DistPoints(1,:)-Ic4DistPoints(2,:))
                ;
213             tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+Ic4Dist;
214         end
215     end
216
217
218     % calc a extended vector from source or receiver to the point
219     % of the reflection
220     vec = imMout(k,6:8)-r;
221     normVec = vec/norm(vec);
222     % start point
223     vStart = r;
224     % end point
225     vEnd = imMout(k,6:8)+normVec*0.2;
226     % length of ray from source to refelction point
227     [Ic,check] = plane_line_intersect(n(m,:),pc{1}(m,:),vStart,
        vEnd);
228     Ic = round(Ic.*1e10)./1e10;
229     if Ic(1,1) >= po(1,1)-shrink && Ic(1,1) <= po(1,1)+room
        (1,1)/cellOrder+shrink ...
230         && Ic(1,2) >= po(1,2)-shrink && Ic(1,2) <= po(1,2)+room
        (1,2)/cellOrder+shrink ...
231         && Ic(1,3) >= po(1,3)-shrink && Ic(1,3) <= po(1,3)+room
        (1,3)/cellOrder+shrink ...
232         && ~isnan(imMout(k,9)) && check == 1
233             Ic5DistPoints = [Ic5DistPoints; Ic];
234         if size(Ic5DistPoints,1) == 2
235             Ic5Dist = norm(Ic5DistPoints(1,:)-Ic5DistPoints(2,:))
                ;
236             tomMa(k,1)=tomMa(k,1)+Ic5Dist;
237         end
238     % case for cell where source is located
239     if r(1,1) >= po(1,1) && r(1,1) <= po(1,1)+room(1,1)/
        cellOrder...

```

```
240         && r(1,2) >= po(1,2) && r(1,2) <= po(1,2)+room(1,2)/  
           cellOrder...  
241         && r(1,3) >= po(1,3) && r(1,3) <= po(1,3)+room(1,3)/  
           cellOrder...  
242         && ~isnan(imMout(k,9))  
243             tomMa(k,l)=tomMa(k,l)+norm(r-Ic);  
244         end  
245     end  
246 end  
247 end  
248 end
```


A.2 DAQinit.m: Parameter der Beispielmessung

```

1 function [room, r, s, fs, sampleRateIn, sampleRateOut, exOrder, lengthIn,
2     ...,
3     amplification, measNr, measInterval, refDist, initialTemp, corrLength
4     , ...
5     windowLength, cellOrder, excludeRay, kurtosisWindowLengthL, ...
6     kurtosisWindowLengthM, WeightDirect, WeightDiagonal] = DAQinit
7 % In this script, all relevant parameters for a temperature distribution
8 % measurement in a rectangular room with "DAQrun_wRel2_captureRef.m",
9 % "DAQrun_wRel2" and "DAQrun_wRel2_reconstruction.m" are listed.
10 %
11 % copyright: Marcus Bleisteiner, Audiokommunikation und -technologie, TU-
12 % Berlin
13 % marcus.bleisteiner@gmail.com
14 % Leipzig, 07.06.2014
15 % last change 30.06.2014
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17 % Sonotec Halle
18 room = SonotecHalle; % Room Dimension [x y z] (m)
19
20 r = [6.1 5.5 0.9];
21 s = [3.1 1.8 2.4];
22
23 %%
24 refDist = 5.03; % distance source - receiver (m)
25 initialTemp = 25.5; % initial (current) room temperature
26 % (K)
27
28 exOrder = 18; % order of mls / sweep (17: lengthIn
29 % = 1, 18: lengthIn = 2, 19: lengthIn = 4)
30 % watch the correct (recorded) MLS for correlation
31 lengthIn = 2; % recording length (s)
32
33 amplification = 0.3; % power of output-signal (factor)
34
35 measNr = 1080; % measurements (number)
36 measInterval = 10; % time between measurements (s)
37
38 corrLength = 0.1; % length of correlation vector (s)
39 % (depends on room-size)
40 windowLength = 120; % length of window for each
41 % reflection (samples)
42 % (influences corr signal and kurtosis)
43 cellOrder = 3; % cells for tomography (number)
44
45 excludeRay = [20 19 15 14 10 8 4 2 1];
46 % here you can exclude spezific sound rays from the tomography algorithm.
47 % (start from the highest ray number)
48
49 % kurtosis parameter
50 % short window
51 kurtosisWindowLengthL = 4; %gut:4

```

```
49 % long window
50 kurtosisWindowLengthM = 380;%gut:380
51 % Window widths are likely to be selected according to the sampling
52 % frequency, the length of the correlation signal and the room size
53
54 % tomography parameter
55 WeightDirect = 0.05; % (factor)
56 WeightDiagonal = 0.05; % (factor)
57
58 fs = 216000; % (Hz)
59 sampleRateIn = fs;
60 sampleRateOut = fs;
```

A.3 Datenblätter

Visaton FRS 5 XTS - 8 Ohm

Breitband-Systeme / Fullrange Systems

GERMANY
VISATON

FRS 5 XTS - 8 Ohm

Art. No. 2239



5 cm (2") Breitbandlautsprecher mit schwarzem Korb und zwei Befestigungslaschen. Aufgrund der niedrigen Resonanzfrequenz beginnt der Übertragungsbereich schon bei 120 Hz. Geeignet als Breitbandlautsprecher oder Mitteltöner in Lautsprecherzeilen für HiFi- und Beschallungsanlagen sowie für ELA-Systeme in 100-V-Technik. Durch die geringen Abmessungen auch sehr gut als Kontroll-Lautsprecher in elektronischen Geräten geeignet.

Ausgerüstet mit Flachsteckern 4,8 x 0,8 mm (+) und 2,8 x 0,8 mm (-), 30° angewinkelt sowie einer Schaumstoffdichtung.

5 cm (2") full-range speaker with black basket and two fixing lugs. Due to its low resonant frequency the frequency response starts already at 120 Hz. Suitable as full-range speaker and medium-range driver in speaker systems for HiFi and background music and for 100 V PA systems. Thanks to the slim construction, also suitable as a control speaker in electronic devices.

Equipped with blade terminals 4.8 x 0.8 mm (+) and 2.8 x 0.8 mm (-), bent by 30° and with a foam gasket.

Anwendungsmöglichkeiten / Typical applications

- Sehr schmale ELA-Zeilen
- Kontroll-Lautsprecher für elektronische Geräte
- Modellbau
- Elektronische Musikinstrumente

- Very narrow network column speakers
- Control speaker for electronic devices
- Model construction
- Electronic musical instruments

24.07.2013

VISATON GmbH • Ohligser Straße 29-31 • D-42781 Haan • Tel.: 02129/552-0 • Fax 02129/552-10 • E-Mail: visaton@visaton.com

Breitband-Systeme / Fullrange Systems



Eigenschaften / Attributes

- Feuchtigkeitsimprägnierte Membran
- Metallausführung

- Moisturised cone
- Metal basket

24.07.2013

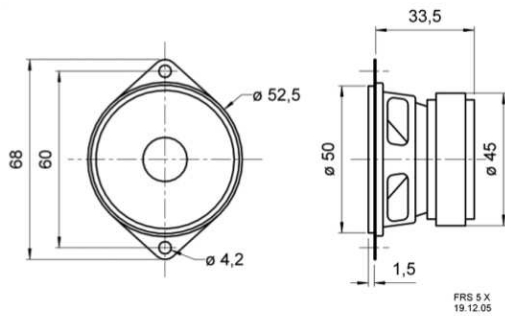
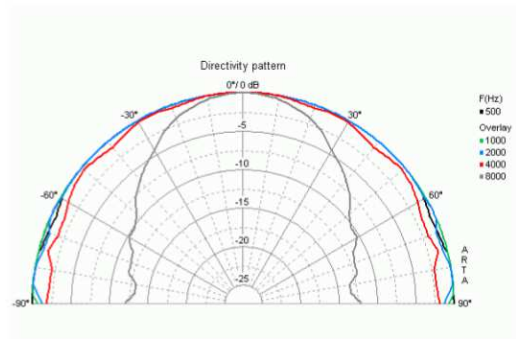
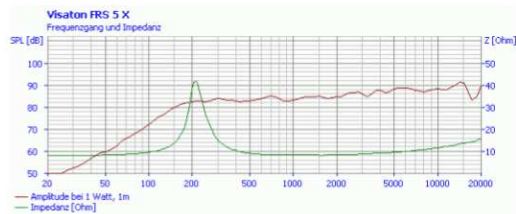
VISATON GmbH • Ohligser Straße 29-31 • D-42781 Haan • Tel.: 02129/552-0 • Fax 02129/552-10 • E-Mail: visaton@visaton.com

Breitband-Systeme / Fullrange Systems



FRS 5 XTS - 8 Ohm

Art. No. 2239

FRS 5 X
19.12.05

Technische Daten / Technical data

Nennbelastbarkeit Rated power	5 W
Musikbelastbarkeit Maximum power	8 W
Nennimpedanz Z Nominal impedance Z	8 Ohm
Übertragungsbereich Frequency response	120–20000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel Mean sound pressure level	86 dB (1 W/1 m)
Abstrahlwinkel (-6 dB) Opening angle (-6 dB)	180°/4000 Hz
Resonanzfrequenz f _s Resonance frequency f _s	190 Hz
Schwingspulendurchmesser Voice coil diameter	14 mm
Schallwandöffnung Cutout diameter	46 mm
Gewicht netto Net weight	0,14 kg
Gleichstromwiderstand R _{dc} D.C. resistance R _{dc}	7,7 Ohm
Mechanischer Q-Faktor Q _{ms} Mechanical Q factor Q _{ms}	3,49
Elektrischer Q-Faktor Q _{es} Electrical Q factor Q _{es}	0,88
Gesamt-Q-Faktor Q _{ts} Total Q factor Q _{ts}	0,7
Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen V _{as} Equivalent volume V _{as}	0,23 l
Effektive Membranfläche S _d Effective piston area S _d	12,5 cm ²
Dynamische bewegte Masse M _{ms} Dynamically moved mass M _{ms}	0,7 g
Antriebsfaktor B _{xl} Force factor B _{xl}	2,67 Tm
Anschlüsse Connections	4,8 x 0,8 mm (+) 2,8 x 0,8 mm (-)
Temperaturbereich Temperature range	-25 ... 70 °C

24.07.2013

VISATON GmbH • Ohligser Straße 29-31 • D-42781 Haan • Tel.: 02129/552-0 • Fax 02129/552-10 • E-Mail: visaton@visaton.com

Measurement Microphone AVM MI 17



Measurement Microphone MI 17 for ICP-Power Supply

The MI17 ICP measurement microphone provides a cost-effective solution for acoustic measurements. It can be used in combination with any instrument that has an ICP® or constant current power supply. The frequency behaviour is according to Class 1 specification DIN/IEC 651.

Ideal Applications include the measurement of:

- Product noise
- Environmental noise
- Acoustic modes
- Sound power

Specifications:

- Mic.Type: Electret prepolarised
- Mic.Size: 1/4"
- Response: Free-field
- Frequ.Range: 20Hz..4kHz ± 1 dB
4kHz..20kHz ± 1.5 dB
- P_{max} : 130dB (140dB on request)
- Sensitivity: 50mV/Pa(0db)
- Noise: <26dB(A) 20Hz..20kHz
- Supply: 2..6mA @ 5..28VDC
- Temp.Range: -10..50°C
- Dimension: $\varnothing 12 \times 88$ mm
- Connector: BNC female (male, TNC or Microdot on request)



Recommended Accessory:

SL05000 Calibrator

- Accuracy: Meets Class1 requirements
- Cal.Level: 94dB @ 1kHz

ICP® is a registered trademark of PCB Piezotronics Inc.



www.systemtech.se

Tel: 013-35 70 30
sales@systemtech.se
Linnégatan 14 • 582 25 LINKÖPING

Kemo M032S - Universal Verstärker 12 W

Friday, 07. November 2014



Kemo Electronic GmbH
Klaus Kemchen, Mato Vukovic
Leher Landstr. 20
27607 Langen
Germany

Phone: +49 4743 9338-0
Fax: +49 4743 9338-22

<http://www.kemo-electronic.de>
email: info@kemo-electronic.de

HR.Nr. HRB 111 486
Ust.Nr. DE 814 380 369

M032S - Universal Verstärker 12 W "Plug & Play"



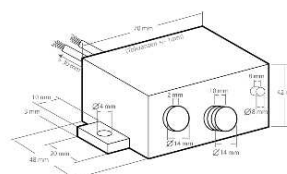
Verstärkermodul mit Buchsen für den Signaleingang und für die Stromversorgung.
Eingebauter Lautstärkeregler, Lautsprecheranschluss über Kabel.
Lieferbares Zusatzmodul: M040N - Universal Vorverstärker

Technische Daten:

Betriebsspannung: 6 - 16 V/DC
Stromaufnahme: max. 800 mA
Eingangsempfindlichkeit: < 80 mV
Lautsprecheranschluss: 4 - 16 Ohm
Musikleistung: max. 12 W bei 16 V/DC an einem 4 Ohm Lautsprecher
Frequenzgang: ca. 40 - 20.000 Hz
Stromversorgungsbuchse: für Netzstecker 2,5 mm
Maße: ca. 72 x 50 x 42 mm (ohne Befestigungslaschen)



M032S



Testo testostor 171-3

testo

testostor 171-3

testostor 171-3, a compact data logger with an internal humidity/temperature probe which can be quickly positioned directly on site.

The saved data can be documented on site on the Testo printer or can be analysed on your PC via interface and software.

testostor 171-3, humidity data logger for %RH, °C with starting magnet, battery and calibration protocol

Part no.
0577 1713

Internal humidity/temperature sensor

- Attachable display, checks readings on site
- Control and adjustment option using adjustment set
- Measuring cycle: 2 s to 24 h, selectable
- Easy battery replacement
- DKD calibration possible
- Sintered cap protection for dusty environments (see Accessories)
- Suitable for outdoor use
- Protection class IP65
- Data analysis on PC



Accessories	Part no.
Transport and Protection	
Transport case (plastic) for measurement data storage instruments (max. 6 off) and accessories, for safe transport	0516 0117
Holder with lock for data logger, theft-proof	0594 1782
Stainless steel sintered cap, Ø 21 mm, can be screwed onto humidity probe, protection in case of high mechanical load and high velocities	0594 0540
Additional Accessories and Spare Parts	
Spare battery for testostor 171, quick and easy battery replacement	0515 0018
testo saline pots for control and humidity adjustment of humidity probes, 11.3 %RH and 75.3 %RH with adapter for humidity probe, quick checks or calibration of humidity probe	
11.3 %RH	0594 0660
75.3 %RH	0594 0661
Software and Accessories	
ComBdt 3 - Professional with data management, ind. database, analysis and graphics function, data analysis, trend curve	0594 0830
ComBdt 3 - For requirements to DIN 21 Part 11, ind. database, analysis and graphics function, data analysis, trend curve (w/o interface)	0594 0821
Interface, attachable to testostor 171 data logger	0594 1781
BNet adapter, RS232 - BNet ind., software driver, mains unit, facilitates data communication in network	0594 1711
Calibration Certificates	
ISO calibration certificate temperature, temp. data logger; calibration points - 8 °C/0 °C; +40 °C per channel/instrument	0520 0171
DKD calibration cert./humidity, humidity data logger; cal. points 11.3 %RH and 75.3 %RH at +25 °C; per channel/instrument	0520 0246
ISO calibration certificate humidity, humidity data logger; calibration points 11.3 %RH and 75.3 %RH at +25 °C/47 °F; per channel/instrument	0520 0076

Set		Part no.
Set testator 171-3, ind. humidity data logger for %RH, °C with starting magnet, battery, calibration protocol and software with interface		0563 1713
Technical data		
Probe type	NTC	Testo humid. sensor, cap.
Meas. range	-10 to +60 °C	0 to +100 %RH
Accuracy at digit	±0.5 °C (-10 to +35.9 °C) ±0.6 °C (+40 to +60 °C)	±3 %RH (+2 to +98 %RH)
Resolution	0.1 °C	0.1 %RH
Oper. temp.	-20 to +70 °C	Protection class
Storage temp.	-40 to +85 °C	IP65
Memory	20000	Warranty
Material/Housing	Aluminium anodised	2 years
Battery type	Lithium battery	Measuring rate
Dimensions	131 x 68 x 84 mm	2 s to 24 h, selectable
Weight	330 g	Battery life
		up to 5 years
		Software
		menu driven from Microsoft Windows 95/ME/2000/XP/Vista

A.4 Vom Autor verwendete Software

- **ARTA**
Version: 1.7.1
ARTALABS
- **Boxsim**
Version: 1.20
Boxsim
- **DAQ Adaptor for Matlab®**
Data Translations
- **Data Aquisition Toolbox**
Version: 3.3
MathWorks
- **DOSBox**
Version: 0.74
DOSBox
- **ET Commander**
Version: 3.3
Outline
- **ITA Toolbox**
Revision: 11139
Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University
- **Matlab®**
Version: 2013a
MathWorks
- **Monkey Forest**
Build: 26.11.2008 - Reciprocity
Four Audio
- **Signal Processing Toolbox**
Version: 6.19
MathWorks

A.5 Inhalt Datenträger

Der Arbeit liegt ein Datenträger mit folgendem Inhalt bei:

- **Abschlussarbeit**
Masterarbeit im Volltext als PDF
- **Beispielmessung**
Daten der Referenztemperaturmessung
Rohdaten
Ergebnisse
- **Datenblätter**
AVM Measurement Microphone MI 17
Kemo M032s - Universal Verstärker
Testo testestor 171-3
Visaton FRS 5 XTS 8 Ohm
- **Korrelationssignale**
MLS verschiedener Ordnungen
- **Lautsprecher-Validierung**
Directivity Daten
- **Literatur**
Literatur im Volltext
Literaturverzeichnisse
- **Quellcode**
Matlab-Skripte und Funktionen