

*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

**Lehrstuhl für Multimediakommunikation und  
Signalverarbeitung**

**Reflexionsfaktorschätzung auf Basis von  
Raumentzerrungsfilttern**

Bericht zum Forschungspraktikum

Florian Particke

Januar 2015

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Walter Kellermann, Michael Bürger, M.Sc.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung	1
2	Definition des Szenarios	3
3	Gesamtenergie der Filterkoeffizienten als Schätzparameter	5
3.1	Beschreibung des Verfahrens . . . . .	5
3.2	Abhängigkeit von variablen Parametern . . . . .	5
3.3	Kurze Zusammenfassung . . . . .	8
4	Absolute Reflexionsfaktorbestimmung	10
4.1	Beschreibung des Verfahrens . . . . .	10
4.2	Verallgemeinerung auf vier Wände . . . . .	11
4.3	Mittelung über alle Mikrofone . . . . .	14
4.4	Kurze Zusammenfassung . . . . .	15
5	Ausblick	19
	Literaturverzeichnis	20

# KAPITEL 1

---

## Einleitung

---

Die vorliegende Arbeit soll untersuchen, in wie weit der Reflexionsfaktor der Wände auf Basis von ELRE (Explicit Listening Room Equalization)-Filtern[1] geschätzt werden kann. Dieses einführende Kapitel soll hierbei einen kurzen Überblick über ELRE geben, auf dem die Reflexionsfaktorschätzung basiert. Hierbei wird keine vollständige Darstellung möglich sein, sondern es werden die wichtigsten Aspekte kurz angesprochen, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig sind. Für eine vollständige Darstellung wird auf die weiterführende Literatur verwiesen.

Ziel von ELRE ist es in den nachfolgenden Untersuchungen mit Hilfe eines Lautsprecherarrays, dessen Lautsprecher gleichmäßig an den Wänden eines rechteckigen bzw. quadratischen Raums verteilt sind, die Freifeldausbreitung eines Lautsprechers nachzubilden. Hierbei werden Filterkoeffizienten für alle Lautsprecher ermittelt, so dass in zwei definierten Zonen nur die Freifeldausbreitung wahrgenommen wird. Sei  $\mathbf{h}_{rev}^\lambda$  die Impulsantwort des Ziellautsprechers  $\lambda$  im halligen Raum (Spaltenvektor, welcher die tatsächliche widerhallende Impulsantwort enthält) und  $\mathbf{h}_{ff}^\lambda$  die gewünschte Impulsantwort des Ziellautsprechers  $\lambda$  bei Freifeldausbreitung (Spaltenvektor, welcher die gewünschte Impulsantwort im Freifeld enthält), so ergibt sich zur Ermittlung der Filterkoeffizienten  $w_{LRE}^{\lambda,l}(\omega), l = 1, \dots, N_L$  für  $N_L$  Lautsprecher das folgende Optimierungsproblem:

$$\min_{\mathbf{w}_{LRE}^\lambda(\omega)} \left\| \mathbf{H}_{rev}(\omega) \mathbf{w}_{LRE}^{\lambda,l}(\omega) - \mathbf{h}_{ff}^\lambda(\omega) \right\|_2^2 \quad (1.1)$$

wobei  $\mathbf{w}_{LRE}^\lambda(\omega) = [w_{LRE}^{\lambda,1}(\omega), \dots, w_{LRE}^{\lambda,N_L}(\omega)]^T$  und  $\mathbf{H}_{rev}(\omega) = [\mathbf{h}_{rev}^1(\omega), \dots, \mathbf{h}_{rev}^{N_L}(\omega)]$ . Dieses typischerweise über bestimmte System kann mit einer regularisierten Moore-Pseudoinverse

im Sinne des Least Square gelöst werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf Basis der durch ELRE ermittelten Filterkoeffizienten  $w_{LRE}^{\lambda,l}(\omega), l = 1, \dots, N_L$  den Reflexionsfaktor der Wände zu schätzen.

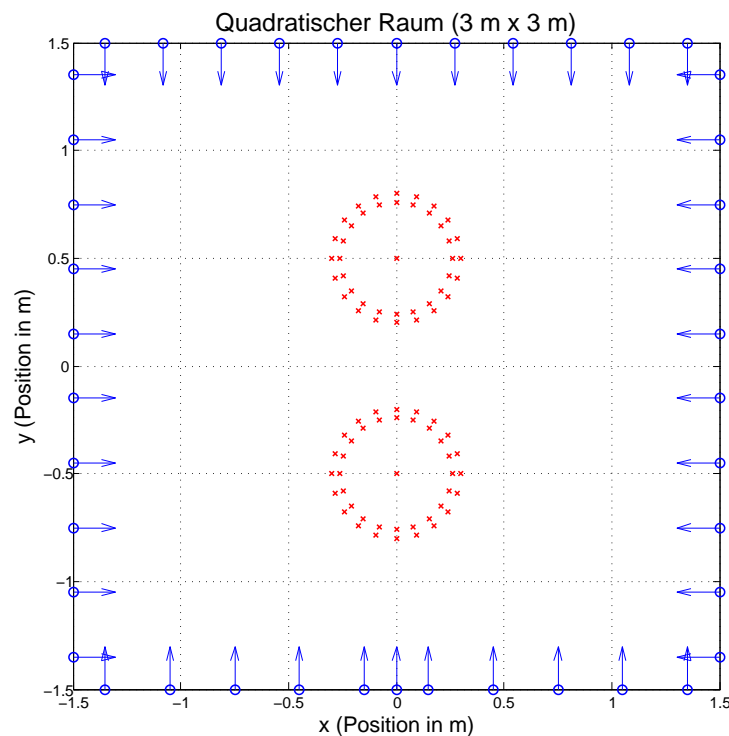
# KAPITEL 2

---

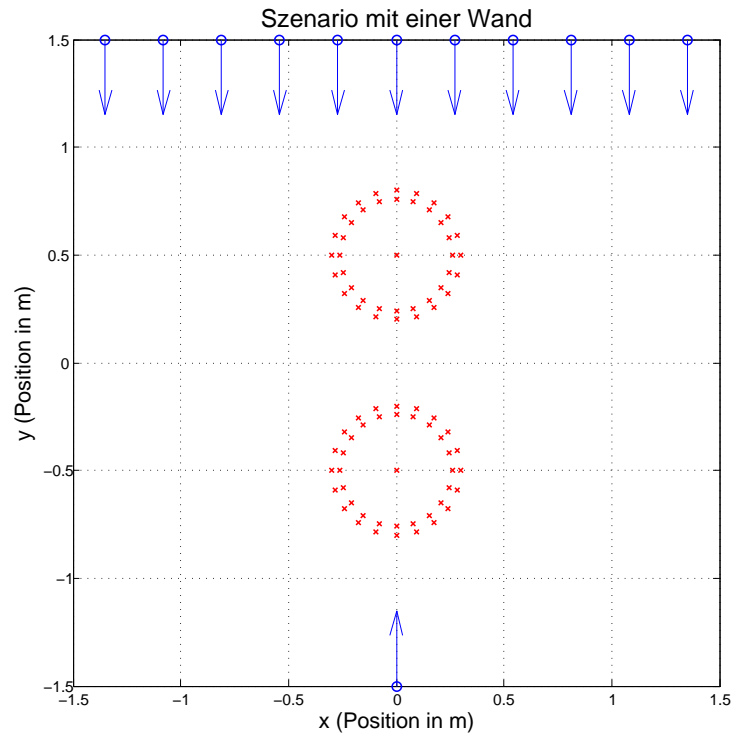
## Definition des Szenarios

---

Das vorliegende Kapitel soll kurz das Szenario definieren, auf dem aufbauend die verschiedenen Untersuchungen durchgeführt werden. Es wird ein quadratischer Raum (3 m x 3 m) mit den Raumgrenzen  $[-1.5, -1.5, 1.5, 1.5]$  angenommen, wobei der Ursprung im Mittelpunkt des Raumes liegt. In Abbildung 2.1 ist der Raum schematisch abgebildet.



**Abbildung 2.1:** Szenario: Vier Wände

**Abbildung 2.2:** Szenario: Eine Wand

Rote Kreuze repräsentieren Mikrofone und blaue Kreise repräsentieren Lautsprecher, wobei die Pfeilrichtung die jeweilige Senderichtung des Lautsprechers darstellt. Dieses Szenario wird für die ersten Versuche auf eine vereinfachte Problemstellung reduziert, wobei nur noch die Wand oben mit elf Lautsprechern und dem Ziellautsprecher  $\lambda$  unten zur Erzeugung der Freifeldausbreitung genutzt werden. Die anderen Wände und Lautsprecher sind nicht vorhanden. Es ergibt sich das in Abbildung 2.2 dargestellte Szenario. Dieses Szenario ist der Ausgangspunkt für die in Kapitel 3 und 4 untersuchten Verfahren. Anzumerken ist, dass der Reflexionsfaktor  $r$  als reine Dämpfung ohne Frequenzselektivität und Phaseneinfluss modelliert wird.

# KAPITEL 3

---

## Gesamtenergie der Filterkoeffizienten als Schätzparameter

---

### 3.1 Beschreibung des Verfahrens

Auf Basis des Szenarios von Abbildung 2.2 wurde untersucht, inwieweit der Reflexionsfaktor  $r$  der oberen Wand sich in der Wurzel der Gesamtenergie der Filterkoeffizienten der oberen Wand widerspiegelt, wobei die Wurzel der Energie der  $N_{oben}$  Lautsprecher sich proportional zum Reflexionsfaktor verhalten sollte. Mathematisch würde dies bedeuten:

$$\sqrt{E} = \sqrt{\sum_{l=1}^{N_{oben}} |\omega_{LRE}^{\lambda,l}(\omega)|^2} \sim r \quad (3.1)$$

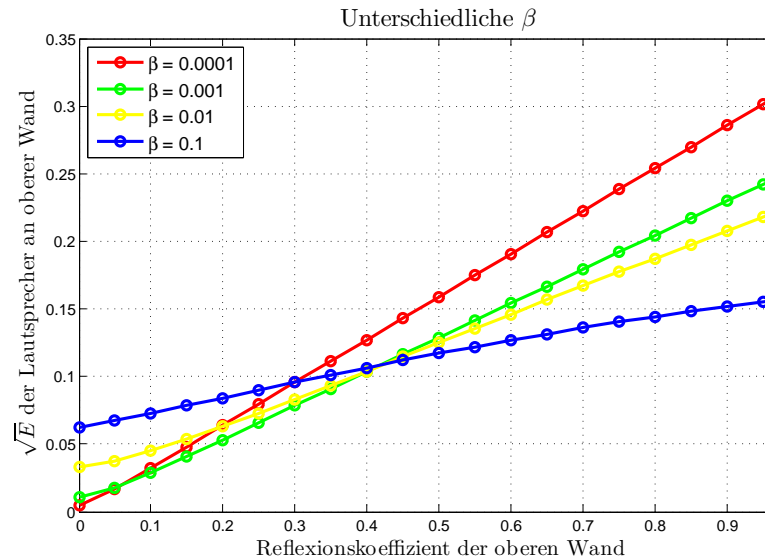
Erwartungsgemäß würden wir eine Gerade erwarten, die durch den Ursprung geht, da bei nicht vorhandener Reflexion keine Kompensation nötig ist, ansonsten aber eine direkte Proportionalität vorliegt. Dies konnte mit geringen Abweichungen bestätigt werden. Diese Ergebnisse sollen im nächsten Abschnitt genauer betrachtet werden.

### 3.2 Abhängigkeit von variablen Parametern

Hierbei spielen einige Einflussparameter eine Rolle, deren Einfluss auf das Verfahren besprochen werden sollen.

- **Regularisierung:** Die sogenannte Regularisierung  $\beta$  stellt bei der Berechnung von 1.1 einen konstanten Bruchteil einer Einheitsmatrix dar, welcher auf die Kanalmatrix  $\mathbf{H}_{rev}^{org}(\omega)$  addiert wird. Mathematisch gilt:  $\mathbf{H}_{rev}(\omega) = \mathbf{H}_{rev}^{org}(\omega) + \beta \cdot \mathbf{I}$ . Dies

ist nötig, da ohne Regularisierung auf Grund von möglichen Singularitäten in der Kanalmatrix sehr große Filterkoeffizienten entstehen können. Diese führen zu ungünstigen Eigenschaften. Als Beispiel sei hierbei der erhöhte Verschleiß der Lautsprecher genannt.



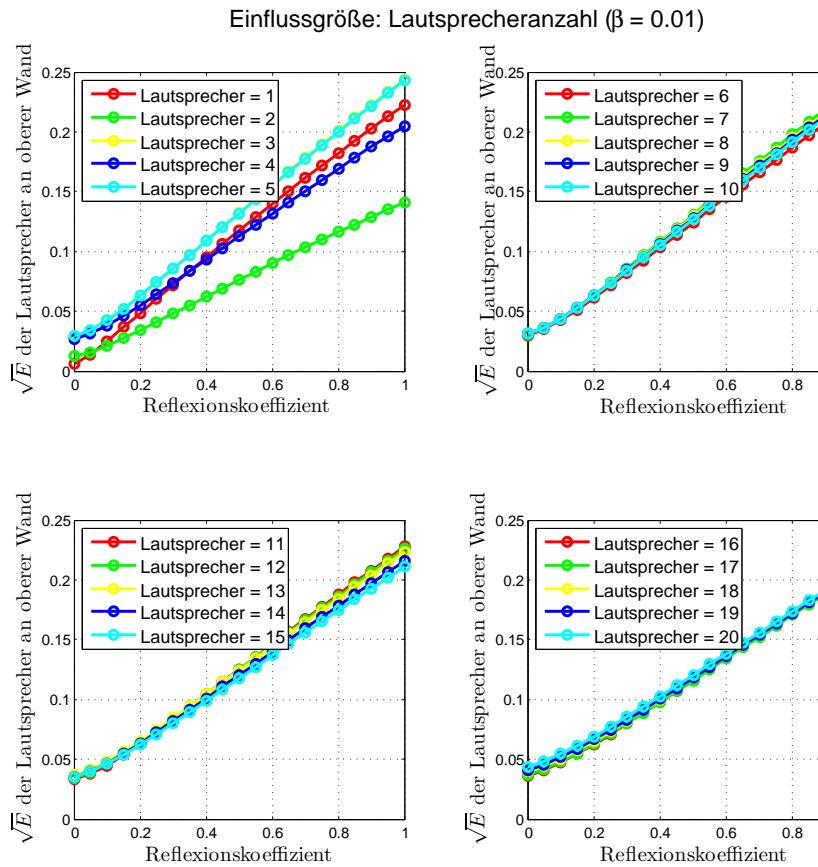
**Abbildung 3.1:** Einflussgröße: Regularisierung

In Abbildung 3.1 zeigen sich unabhängig von der Größe der Regularisierung Geraden, welche sich sowohl in der Steigung als auch im y-Achsenabschnitt untereinander unterscheiden. Je größer die Regularisierung ist, desto flacher ist die Gerade und desto größer ist der y-Achsenabschnitt. Das lässt sich insoweit erklären, da die Regularisierung eine Art von Fehler darstellt, welcher sowohl im y-Achsenabschnitt sichtbar wird als auch in der geringeren Variabilität des Verfahrens für steigende Reflexionsfaktoren. Als guter Kompromiss soll im weiteren Verlaufs dieses Kapitels eine Regularisierung von  $\beta = 0.01$  verwendet werden.

- **Anzahl der Lautsprecher:** Die Anzahl der Lautsprecher wird an der oberen Wand gleich verteilt variiert.

In Abbildung 3.2 ist sehr schön zu sehen, dass mehr als fünf Lautsprecher das Ergebnis nicht mehr maßgeblich verändern. Auch wenn weniger als fünf Lautsprecher ebenfalls



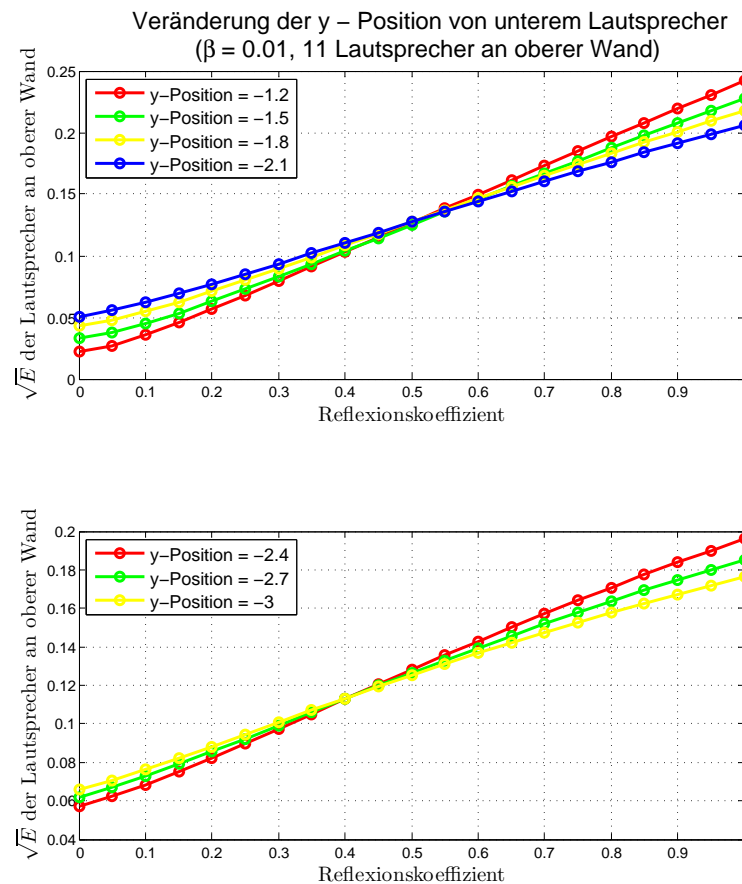


**Abbildung 3.2:** Einflussgröße: Lautsprecher

Geraden liefern, so pendeln diese aber um die Gerade, welche dann mit zunehmender Lautsprecheranzahl immer genauer erreicht wird. Als guter Kompromiss sollen im Folgenden elf Lautsprecher verwendet werden. Anzumerken ist, dass eine ideale Gerade durch den Ursprung verlaufen würde. Dies ist auf Grund des Offsets nicht gegeben.

- **Position des unteren Lautsprechers:** Die Position des unteren Lautsprechers soll variiert werden, wobei sich dadurch der Abstand vom unteren Lautsprecher zur oberen Wand reduziert.

In Abbildung 3.3 zeigt sich, dass die Position des unteren Lautsprechers nicht völlig unerheblich ist. Mit steigendem Abstand zwischen Lautsprecher und Wand nimmt der y-Achsenabschnitt zu und die Steigung nimmt ab. Dies lässt sich insoweit interpretieren, da der Abstand umgekehrt proportional in den Schalldruck eingeht und somit der Schalldruck ausgehend vom unteren Lautsprecher bei Erreichen der oberen Wand



**Abbildung 3.3:** Einflussgröße: Position des unteren Lautsprechers

mit steigendem Abstand geringer ausfällt. Die reflektierte Schallwelle, welche von den oberen Lautsprechern kompensiert wird, ist somit auch geringer ausgeprägt. Dadurch steigt der Einfluss der Regularisierung, welche für den y-Achsenabschnitt verantwortlich ist. Als Resultat ergibt sich eine geringere Steigung und ein größerer y-Achsenabschnitt.

### 3.3 Kurze Zusammenfassung

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der Reflexionsfaktor und die Wurzel der Energie der Filterkoeffizienten proportional zueinander sind. Größten Einfluss haben dabei die Regularisierung (y-Achsenabschnitt) und die Anzahl der gewählten Lautsprecher, wobei hierbei eine Mindestgrenze nicht unterschritten werden sollte. Grundsätzlich konnte der

Reflexionsfaktor nur relativ bestimmt werden. Eine absolute Bestimmung des Reflexionsfaktors aus der Energiebetrachtung war nicht möglich. Dies liegt u.a. an der großen Anzahl an variabel einstellbaren Parametern, die einen Einfluss auf die Energie haben. Als Beispiel wurde hier die Entfernung des unteren Lautsprechers zur Wand betrachtet. Ein Ansatz zur absoluten Bestimmung des Reflexionsfaktors soll in Kapitel 4 untersucht werden.

# KAPITEL 4

---

## Absolute Reflexionsfaktorbestimmung

---

### 4.1 Beschreibung des Verfahrens

Wie sich in Kapitel 3 gezeigt hat, ist eine absolute Reflexionsfaktorbestimmung auf Basis der Wurzel der Gesamtenergie schwierig. Deshalb soll im Folgenden ein anderer Ansatz gewählt werden. Dabei wird ausgenutzt, dass in den gewünschten Zonen der Schalldruckpegel der reflektierten Welle null sein soll. Dies wird durch die Lautsprecher an der oberen Wand erreicht. Somit löscht sich die von den oberen Lautsprechern gebildete Welle und die Reflexion der Freiraumausbreitung in den Zonen aus. Somit müssen sich die Beträge der reflektierten Welle und der von den oberen Lautsprechern gebildete Welle entsprechen. Sei  $W_{LRE}^{\lambda,l}(\omega)$ ,  $l = 1, \dots, N_{oben}$  das Spektrum des entsprechenden Filterkoeffizienten der oberen Kompensationsfilter,  $H_{rev}^{l,m}(\omega)$  das Spektrum der Impulsantwort des  $l$ -ten Lautspechers zum  $m$ -ten Mikrofon in der Zone und  $H_{ff}^m(\omega)$  das Spektrum der gewünschten Impulsantwort (Freifeldausbreitung) zum  $m$ -ten Mikrofon. Des Weiteren sei  $d_{unten}$  die Distanz des Mikrofons zum unteren Lautsprecher und  $d_{oben}$  die Distanz des Mikrofons zur oberen Wand. Sei der Schalldruck des Ziellautspechers  $\lambda$  zum Mikrofon  $m$  folgendermaßen definiert: [2]

$$p_{ff}^{\lambda,m}(r,t) = A \frac{1}{d_{unten}} e^{-jk d_{unten}} \quad (4.1)$$

Nimmt man weiterhin an, dass die Lautsprecher an der oberen Wand eine Spiegelquelle bilden, welche die reflektierte Welle kompensiert, so ergibt sich der Schalldruck von der imaginären Spiegelquelle zum Mikrofon  $m$  als

$$p_{rev}^{\lambda,m}(r,t) = A \frac{1}{d_{unten} + 2d_{oben}} e^{-jk(d_{unten} + 2d_{oben})} \quad (4.2)$$

Nimmt man an, dass sich beide Schallwellen betragsmäßig entsprechen, so ergibt sich nach Umstellung der jeweiligen Gleichungen 4.1 und 4.2 nach  $A$ :

$$A = |p_{ff}^{\lambda,m}(r,t)| \cdot d_{unten} \quad (4.3)$$

$$A = |p_{rev}^{\lambda,m}(r,t)| \cdot (d_{unten} + 2d_{oben}) \quad (4.4)$$

Dies führt schließlich zu der nachfolgenden Gleichung:

$$\sum_{\omega} \left| \sum_{l=1}^{N_{oben}} W_{LRE}^{\lambda,l}(\omega) H_{rev}^{l,m}(\omega) \right| = \sum_{\omega} \left| \frac{d_{unten}}{d_{unten} + 2d_{oben}} H_{ff}^m(\omega) r \right| \quad (4.5)$$

Da der Reflexionsfaktor  $r$  frequenzunabhängig ist, lässt dieser sich somit gemäß folgender Formel bestimmen:

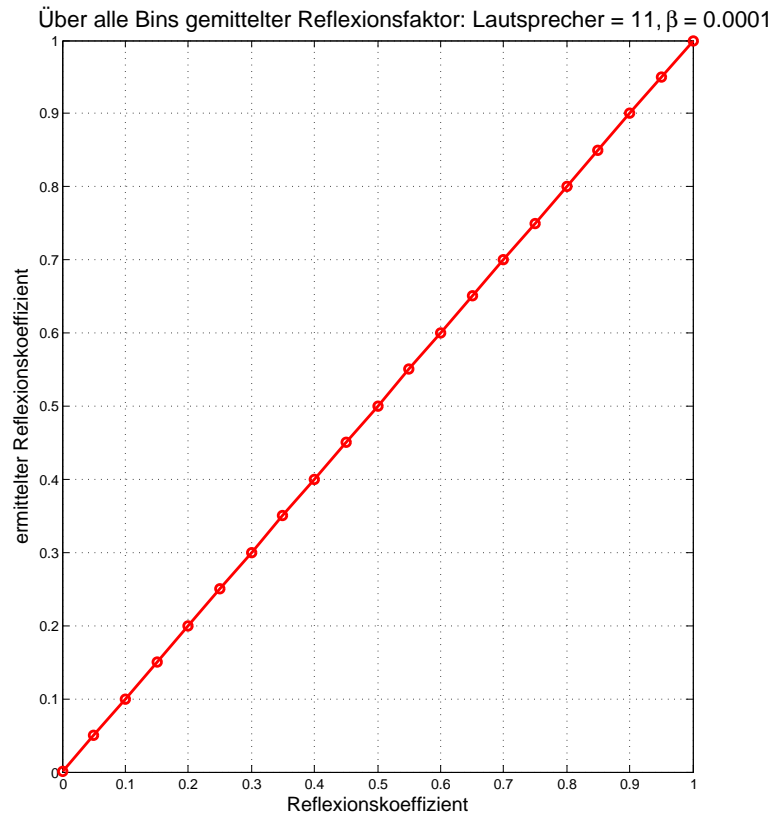
$$r = \frac{\sum_{\omega} \left| \sum_{l=1}^{N_{oben}} W_{LRE}^{\lambda,l}(\omega) H_{rev}^{l,m}(\omega) \right|}{\sum_{\omega} \left| \frac{d_{unten}}{d_{unten} + 2d_{oben}} H_{ff}^m(\omega) \right|} \quad (4.6)$$

Anzumerken ist, dass im Folgenden das Mikrofon in der Mitte der oberen Zone von Abbildung 2.2 genommen wurde. Dieses eignete sich auf Grund der geometrischen Verhältnisse besonders gut. Als Resultat ergibt sich das in Abbildung 4.1 dargestellte Bild.

Für das Szenario mit nur einer Wand kann der Reflexionsfaktor sehr gut geschätzt werden, wobei dieser sehr empfindlich gegenüber der Regularisierung ist. Dieses Verfahren soll im Folgenden auf vier Wände erweitert werden. (vgl. Abbildung 2.1)

## 4.2 Verallgemeinerung auf vier Wände

Betrachtet man die Impulsantwort des Kompensationsfilters des Lautsprechers an der oberen Wand direkt gegenüber vom unteren Lautsprecher, welcher für die Freiraumausbreitung verantwortlich ist, so zeigen sich für die beiden Szenarien aus Abbildung 2.2 und 2.1 die in Abbildung 4.2 (eine Wand) und 4.3 (vier Wände) dargestellten Impulsantworten. Im Falle



**Abbildung 4.1:** Absolute Reflexionsfaktorbestimmung

des Szenarios mit nur einer Wand, sieht man sehr deutlich, wie die Filteramplitude sehr schnell wieder auf Null zurückfällt. Betrachtet man dagegen Abbildung 4.3, so sieht man die weitere Kompensation nachfolgender Reflexionen. Folglich muss der relevante Bereich der Impulsantwort des Filters herausgeschnitten bzw. der nicht relevante Bereich auf Null gesetzt werden. In Anlehnung an Abbildung 4.2 geschieht dies in einem zentrierten Fenster der Breite 16 um die größte Amplitude. Das korrespondierende Spektrum sei im Folgenden definiert als  $H_{LRE}^{\lambda,l}(\omega)$ ,  $l = 1, \dots, N_{oben}$ , wobei die Modifikation sich im Zusätzlichen „ $l$ “ im unteren Index wiederfindet.

Auf Grund der zusätzlichen Wände entstehen auch zusätzliche Reflexionen bei den Impulsantworten des  $l$ -ten Lautsprechers zum  $m$ -ten Mikrofon. Betrachtet man Abbildung 4.4 (Szenario mit einer Wand), wobei hierbei die Impulsantwort des Lautsprechers an der oberen Wand direkt gegenüber vom unteren Lautsprecher zum Mikrofon in der Mitte der ersten Zone abgebildet ist, so sieht man sehr deutlich, dass nur der Direktschall das Mikrofon

erreicht und keine Reflexionen auftreten. Betrachtet man dagegen Abbildung 4.5, so werden die nachfolgenden Reflexionen deutlich. Anzumerken ist, dass eine Reflexionsordnung von  $O = 2$  eingestellt wurde, d.h. es treten maximal Reflexionen zweiter Ordnung auf. Folglich muss in diesem Fall in Anlehnung an Abbildung 4.2 der Direktpfad herausgeschnitten werden bzw. die irrelevanten Reflexionen zu Null gesetzt werden. Dies geschieht automatisiert, indem der höchste Punkt der Impulsantwort gesucht wird und davon ausgehend die geringsten lokalen Minima in beide Richtungen gesucht werden. Alle Bereiche jenseits der geringsten Minima werden zu Null gesetzt. Das korrespondierende Spektrum sei im Folgenden definiert als  $H_{rev'}^{l,m}(\omega)$ . Des Weiteren wird v.a. im Szenario mit vier Wänden deutlich, dass nur die Lautsprecher in der Mitte für die Aussendung der „Gegenwelle“ verantwortlich sind. Dementsprechend sinnvoll erscheint es auch, nur diese Lautsprecher in die Berechnung des Reflexionsfaktors einzubeziehen. Die Anzahl der verwendeten Lautsprecher reduziert sich somit auf  $N_{rel}$ . Es wird der Reflexionsfaktor folgendermaßen bestimmt:

$$r = \frac{\sum_{\omega} \left| \sum_{l=1}^{N_{rel}} H_{LRE'}^{\lambda,l}(\omega) H_{rev'}^{l,m}(\omega) \right|}{\sum_{\omega} \left| \frac{d_{unten}}{d_{unten} + 2d_{oben}} H_{ff}^m(\omega) \right|} \quad (4.7)$$

Zusammenfassend soll nochmal der vollständige Algorithmus dargestellt werden:

1. Berechnung der Impulsantworten im halligen Raum und bei Freifeldausbreitung
2. Berechnung der Filterkoeffizienten auf Basis von ELRE
3. Selektion der relevanten Lautsprecher an der oberen Wand gegenüber vom Lautsprecher  $\lambda$
4. Modifikation der Filterimpulsantworten
5. Modifikation der Impulsantworten der relevanten Lautsprecher zum Mikrofon
6. Berechnung des Reflexionsfaktors

Als Resultat des automatischen Algorithmus ergeben sich die Ergebnisse in Abbildung 4.6 (Szenario mit einer Wand) und 4.7 (Szenario mit vier Wände). In beiden Fällen ergeben sich v.a. in den Reflexionsfaktorbereichen von 0.2 bis 0.8 respektable Ergebnisse, auch wenn gewisse Abweichungen zu sehen sind. Anzumerken ist hierbei die Überhöhung bei dem Szenario mit einer Wand. Des Weiteren soll betont werden, dass die in Kapitel 4 angemerkten variablen Parameter für beide Szenarien identisch sind.

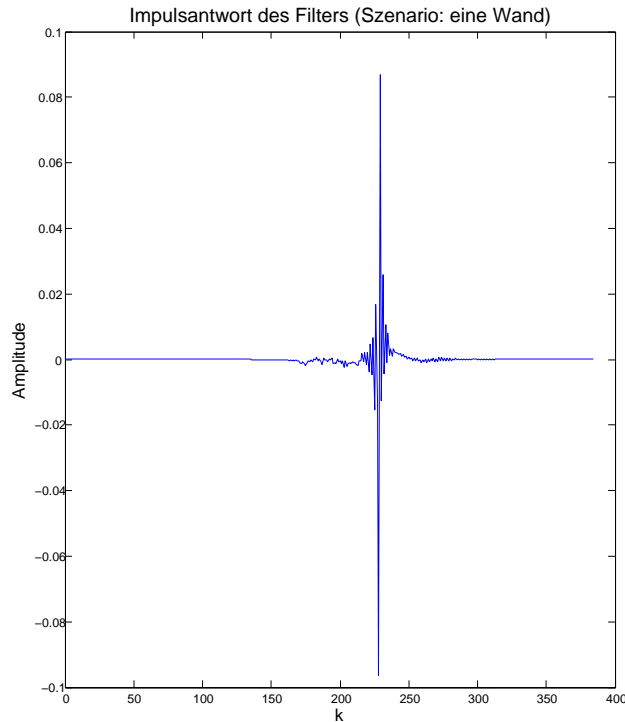


Abbildung 4.2: Impulsantwort des Filters (eine Wand)

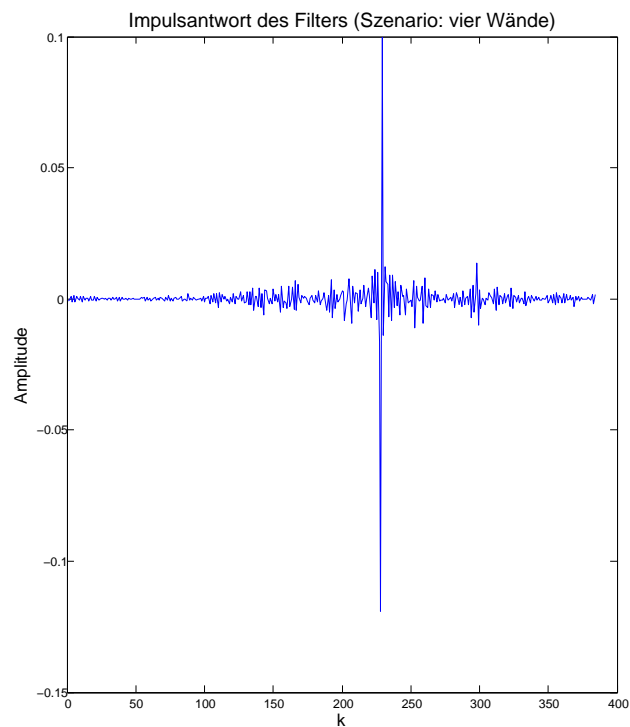
### 4.3 Mittelung über alle Mikrofone

Als weitere Untersuchung soll im Folgenden die Mittelung über alle Mikrofone betrachtet werden. Als verallgemeinerte Formel zur Reflexionsfaktorbestimmung ergibt sich somit nachfolgende Gleichung, wobei  $N_M$  Mikrofone verwendet werden und  $d_S^m$  die Distanz der Spiegelquelle des Ziellautsprechers  $\lambda$  an der oberen Wand zum Zielmikrofon  $m$  und  $d_\lambda^m$  die Distanz des Ziellautsprechers  $\lambda$  zum Zielmikrofon  $m$  darstellt:

$$r = \frac{1}{N_M} \sum_m \frac{\sum_\omega \left| \sum_{l=1}^{N_{oben}} W_{LRE}^{\lambda,l}(\omega) H_{rev}^{l,m}(\omega) \right|}{\sum_\omega \left| \frac{d_\lambda^m}{d_S^m} H_{ff}^m(\omega) \right|} \quad (4.8)$$

Als Ergebnis über alle  $N_M = 82$  Lautsprecher ergibt sich das in Abbildung 4.8 abgebildete Ergebnis. So zeigt sich die verschlechterte Schätzung sehr deutlich. So führt ein tatsächlicher Reflexionsfaktor von  $r = 1$  zu einer Schätzung von  $r \approx 0.75$ . Dieses Verhalten widerspricht der generellen Annahme, dass die Mittelung zu einer Verbesserung führen sollte. Die Gründe hierfür konnten aus Zeitgründen nicht genauer untersucht werden.

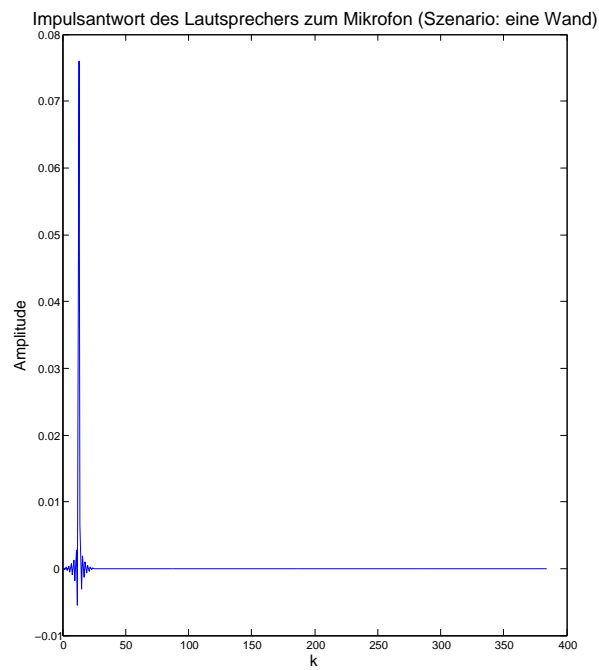




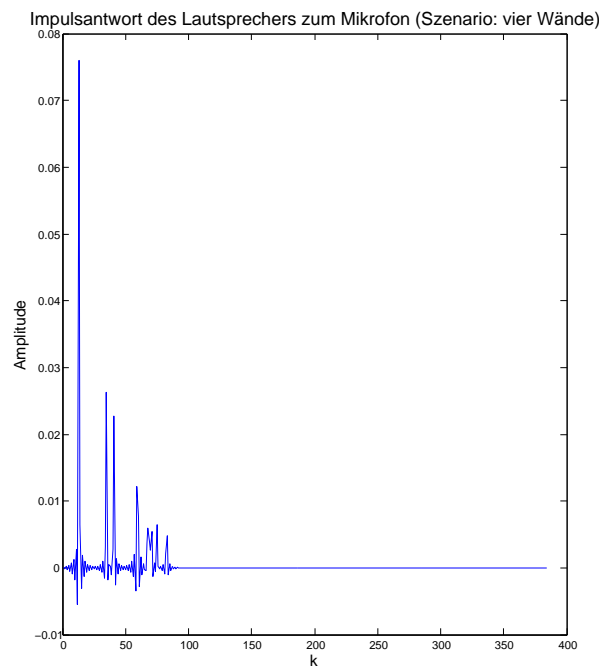
**Abbildung 4.3:** Impulsantwort des Filters (vier Wände)

## 4.4 Kurze Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurde ein Verfahren eingeführt, um eine absolute Reflexionsfaktorschätzung zu ermöglichen. Dieses Verfahren wurde automatisiert und von dem Szenario mit einer Wand (Abbildung 2.2) auf das Szenario mit vier Wänden (Abbildung 2.1) erweitert. In beiden Fällen wurden respektable Ergebnisse erzielt. Bei der Mittelung über viele Mikrofone zeigt sich, dass diese zu keiner Verbesserung führt.



**Abbildung 4.4:** Impulsantwort des Lautsprechers zum Mikrofon (eine Wand)



**Abbildung 4.5:** Impulsantwort des Lautsprechers zum Mikrofon (vier Wände)

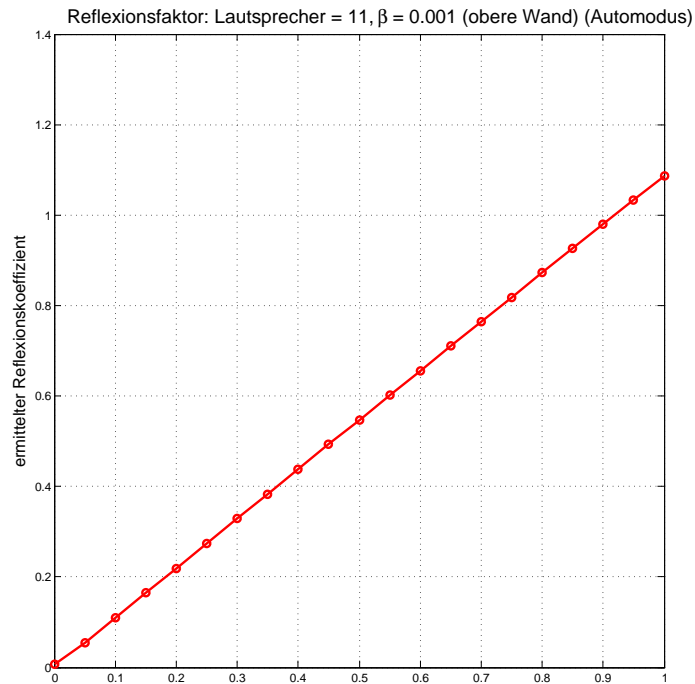


Abbildung 4.6: Absolute Reflexionsfaktorbestimmung (eine Wand, Automodus)

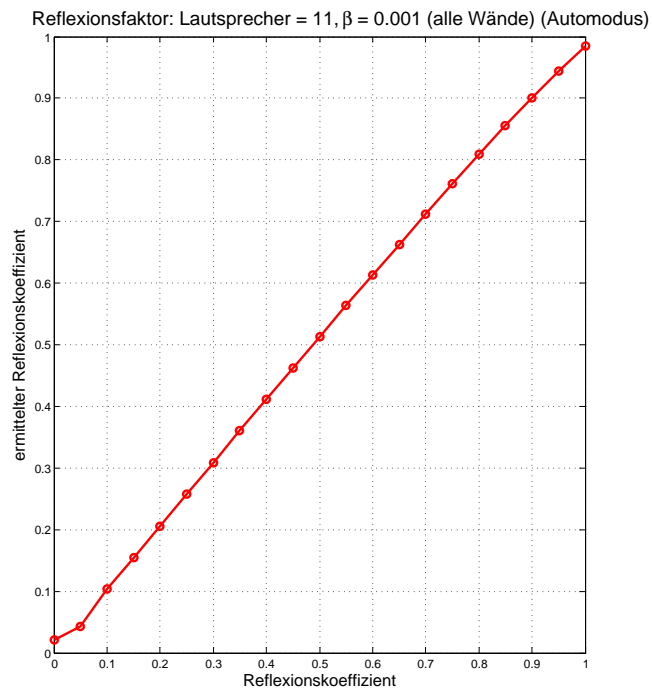
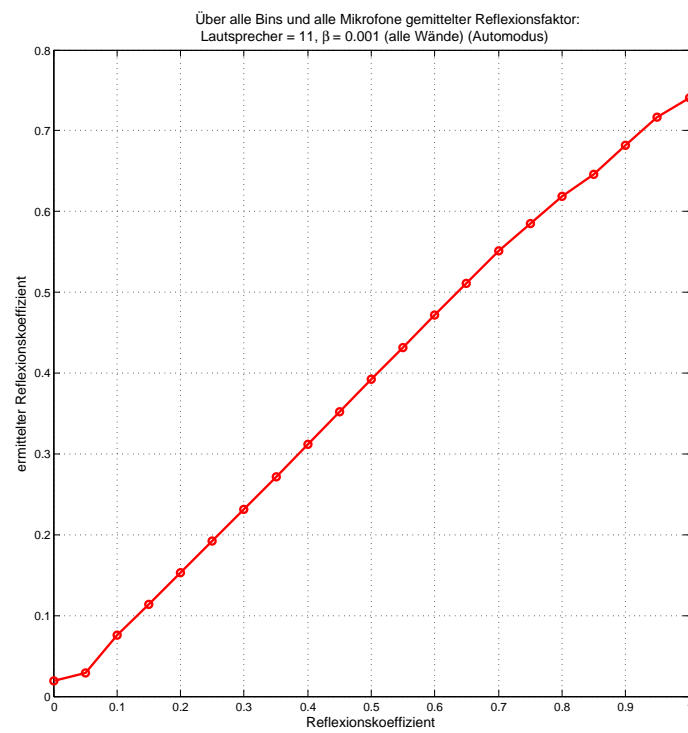


Abbildung 4.7: Absolute Reflexionsfaktorbestimmung (vier Wände, Automodus)



**Abbildung 4.8:** Absolute Reflexionsfaktorbestimmung (vier Wände, alle Mikrofone, Automodus)

# KAPITEL 5

---

## Ausblick

---

In dem vorliegenden Bericht wurde in Kapitel 1 ELRE kurz beschrieben und die notwendigen Formeln und Bezeichnungen eingeführt. In Kapitel 2 wurden die für die Untersuchungen relevanten Szenarien definiert. In den anschließenden Kapiteln 3 und 4 wurden zwei Verfahren entwickelt. Das erste Verfahren beruhte auf der Berechnung der Energie der Impulsantworten der Filter von den oberen Lautsprechern, welches nur eine relative Bestimmung des Reflexionsfaktors ermöglichte. Das zweite Verfahren nutzte aus, dass sich die von den oberen Lautsprechern gebildete Welle und die Reflexion der ersten Wellenfront an der oberen Wand in den Zonen idealerweise vollständig auslöschen. Hierbei ist eine absolute Reflexionsfaktorbestimmung möglich. Dieses Verfahren wurde automatisiert und es wurden erste Untersuchungen durchgeführt. Folgende offene Punkte bestehen und sollten Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden:

- Das Verständnis des Verfahrens sollte erweitert werden.
- Die Raumgrenzen sollten variiert werden.
- Die Lautsprecherposition des unteren Lautsprechers sollte sowohl horizontal als auch vertikal verändert werden.
- Das Verfahren sollte auf die Bestimmung von Reflexionsfaktoren der vier Wände erweitert werden.
- Frequenzselektivität und Phasenmodellierung des Reflexionsfaktors sollte berücksichtigt werden

---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] BÜRGER, Michael: *Internes Paper, LMS*. 2014 (Zitiert auf Seite 1)
- [2] ZOLLNER, Manfred: *Elektroakustik*. Softcover reprint of the original 3rd ed. 1993. Wiesbaden : Springer Berlin Heidelberg, 1993. – ISBN 978-3-540-56600-7 (Zitiert auf Seite 10)