

# Erzeugung eines 2½-dimensionalen Schallfeldes mittels eines minimierten Lautsprecherarrays - Untersuchungen zur Realisierbarkeit

D. Krahe\*, M. Trimpop\*\*

\*Bergische Universität Wuppertal, [krahe@uni-wuppertal.de](mailto:krahe@uni-wuppertal.de)

\*\*Institut für Lärmschutz, Düsseldorf, [mtrimpop@ifl-acoustics.de](mailto:mtrimpop@ifl-acoustics.de)

## Einleitung

Wie u.a. in /1/ dargelegt wird, kann ein Schalldruckfeld innerhalb eines begrenzten Volumens durch Punktquellen auf der Grenzfläche des Volumens zumindest theoretisch genau nachgebildet werden, wenn die Punktquellen bei einer gegebenen oberen Grenzfrequenz des akustischen Signals einen bestimmten Abstand nicht überschreiten. Dies ist der Ansatz, um ein bestehendes Schalldruckfeld (Primärfeld) in dem Volumen durch ein zusätzlich erzeugtes Feld (Sekundärfeld) auszulöschen (Active Noise Control), wobei dieses zum ersten invers ist.

In dem Bestreben, diese komplexe Aufgabenstellung zu vereinfachen, wird bei dem Primärfeld häufig davon ausgegangen, dass es sich aus mehreren ebenen Schallfeldern zusammensetzt, die sich horizontal ausbreiten. Damit besteht keine Abhängigkeit in der Vertikalen. Ein solches Feld soll hier als 2½-dimensional bezeichnet werden.

Auch wenn jetzt noch weiter die Einschränkung gemacht wird, dass die Überlagerung und damit die gegenseitige Auslöschung des Primär- und Sekundärfeldes nur in einer horizontalen Ebene innerhalb des angesprochenen Volumens von Interesse ist, so reduziert sich damit das Problem nur scheinbar auf zwei Dimensionen, denn die Ausbreitung bleibt 3-dimensional bestimmt. Deshalb genügt es in diesem Fall nicht, Punktquellen auf dem Rand der sich ergebenden, begrenzten Fläche zu positionieren, sondern Linienschallquellen, die senkrecht auf dieser Fläche stehen /2/.

## Nachbildung von Linienschallquellen unter Berücksichtigung von Bodenreflexionen

In /2/ und /3/ wird gezeigt, dass mit dem Ansatz der Linienquellen und ihrer Nachbildung durch wenige Punktquellen der Fehler in der Approximation eines 2½-dimensionalen Schallfeldes in einer Ebene oder innerhalb einer horizontalen Schicht deutlich gemindert werden kann. Die dortigen Betrachtungen sind aber in der Hinsicht idealisiert, dass Reflexionen jeglicher Art ausgeschlossen sind. Doch selbst bei Anwendungen unter Freifeldbedingungen, an die durchaus gedacht wird, ist diese Randbedingung unrealistisch, da zumindest die Reflexionen am Boden zu beachten sind. Diese wurden in Ergänzung zu den Untersuchungen in /2/ nun mit in die Berechnungen einbezogen. Abb. 1 zeigt die Konfiguration beim Ansatz mit zwei Punkt- und den zwei resultierenden Spiegelquellen. Die Reflexionen am Boden wurden als ideal angenommen. Sicher können die Reflexionen komplizierterer Natur sein, doch scheint dieser Ansatz zulässig, da sich die Betrachtungen auch aus anderen Gründen auf langwellige Schallanteile beschränken.

Wie in /2/ wurden Berechnungen mit ein, zwei und drei Quellen durchgeführt, wobei die Frage im Raume stand, ob die Fehlerwerte bei Berücksichtigung der Bodenreflexionen gehalten werden können. Die folgende Abb. 2 zeigt zunächst das Ergebnis mit einer Quelle. Unter der Randbedingung einer optimalen Ansteuerung nach Betrag und Phase wird in Abb.2 die Wellenlänge und Position der Quelle variiert. Abb.2 ist deshalb interessant, weil sie die begrenzten Möglichkeiten bei

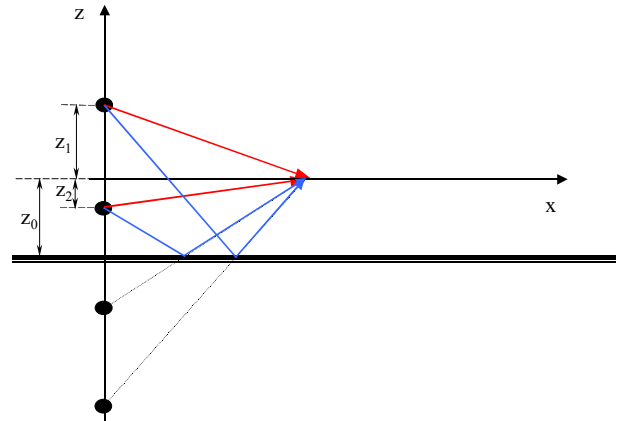


Abb. 1: Konfiguration mit zwei Punkt- und zwei Spiegelquellen; Abstimmung auf die Ebene  $z=0$ , Abstand  $z_0$  zum Boden

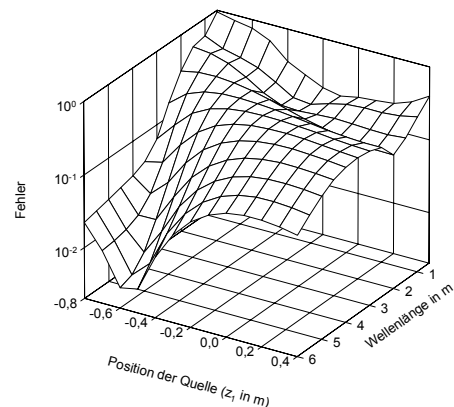


Abb.2: Relativer, mittlerer quadratischer Fehler bei einer Quelle mit Berücksichtigung der Bodenreflexion bei Variation der Position und Wellenlänge

einer Quelle verdeutlicht. Entweder wird die Quelle so positioniert, dass der Fehler in etwa unabhängig von der Wellenlänge ist, dann ist er aber generell ziemlich hoch und beträgt 2 bis  $3 \cdot 10^{-1}$ . Oder der Fehler kann bei großen Wellenlängen deutlich gemindert werden, was allerdings mit einer markanten Verschlechterung bei kürzeren Wellenlängen verbunden ist. Welche Fehler mit zwei und drei Quellen erreicht werden können, zeigen die folgenden Abbildungen.

Bei Abb.3 werden von der Wellenlänge abhängige, optimale Positionen vorgegeben, um das Potenzial der Verringerung zu verdeutlichen. Der Fehler kann über einen großen Wellenlängenbereich stark reduziert werden, und zwar bei drei Quellen noch einmal deutlicher als bei zwei. Die Fehlerwerte liegen im Vergleich zu den in /2/ und /3/ berechneten Werten so, dass der Einfluss der Bodenreflexion nicht gravierend zu Buche schlägt. Der scheinbare Ausreißer bei zwei Quellen und der Wellenlänge 2m weist auf ein Problem der Optimierung, die lokalen Minima. Möglicherweise kann dieser durch eine Feinabstimmung noch eliminiert werden, doch ist dieses Detail weniger von Interesse, da die beweglichen Quellen sowieso eine Fiktion sind. In Abb. 4 werden demgegenüber realistischerweise fixe Quellen angenommen, die sich an den optimalen Positionen bei mittleren Wellenlängen orientieren.

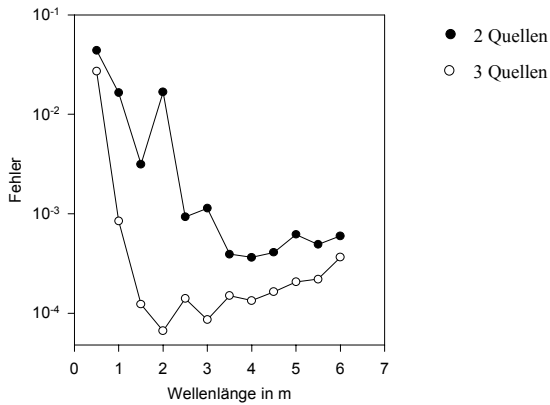


Abb.3: Fehler bei zwei und drei Quellen unter Berücksichtigung von Bodenreflexionen bei optimaler Ansteuerung und optimalen Positionen

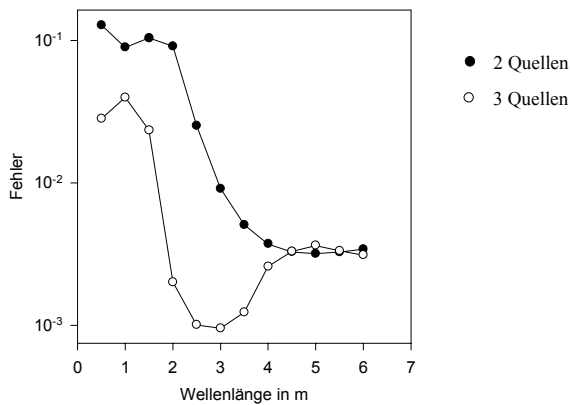


Abb. 4: Fehler bei zwei und drei Quellen unter Berücksichtigung von Bodenreflexionen bei optimaler Ansteuerung und fixen Positionen

Es ist festzuhalten, dass sich insbesondere die bisher guten Werte verschlechtern, wodurch der angesprochene Ausreißer wieder "ins Glied zurücktritt". Trotz der Verschlechterung verbleibt noch ein klarer Abstand zu den Werten mit einer Quelle. Bemerkenswert ist auch das ausgeprägte Minimum im Verlauf für drei Quellen, dessen Lage durch die Wahl der Quellenpositionen bestimmt ist. D. h. mit der Wahl der Positionen können frequenzspezifische Anforderungen an den Fehlerverlauf in gewissem Rahmen realisiert werden. Weitgehend unabhängig und ohnedies auf einem hohen Niveau sind die Werte bei kürzeren Wellenlängen. Das Niveau ist allerdings abhängig vom minimalen Abstand in  $x$ , der bei der Mittelung über den Bereich in  $x$  angesetzt wird und der bei diesen Berechnungen zu 0,5 bis 5m gewählt wurde. Inwieweit hier noch weitergehende Optimierungen möglich sind, ist noch näher zu untersuchen.

### Variationen der Ansteuerungsparameter

Bei der Vorgabe der festen Positionen konnte beobachtet werden, dass die dazu gehörenden optimalen Ansteuerungsgrößen (Amplitude und Phase) stark variieren können. Dies und der Ausreißer in Abb. 3 ließen befürchten, dass die erzielte Reduktion des Fehlers damit auch stark von der erreichbaren Genauigkeit abhängt, mit der die Amplituden- und Phasenwerte umgesetzt werden können. Es bestand die Frage, inwieweit die Fehlerwerte gehalten werden können, wenn die Amplitude und die Phase innerhalb realistischer Toleranzbereiche schwanken können.

Abb. 5 zeigt das Ergebnis für variierende Amplitudenwerte bei einer Variationsbreite von  $\pm 10\%$  und einer Wellenlänge von

$\lambda=3\text{m}$ . Entsprechend zeigt Abb. 6 den Fehler bei im Bereich von  $\pm 0.175 \text{ rad}$  ( $\approx \pm 10^\circ$ ) variierenden Phasenwerten.

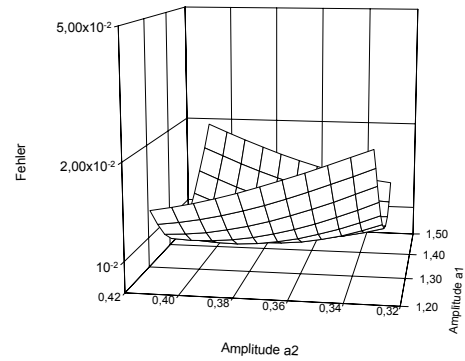


Abb.5: Fehler bei in zwei Quellen variierenden Amplitudenwerten und optimalen Phasenwerten;  $\lambda=3\text{m}$

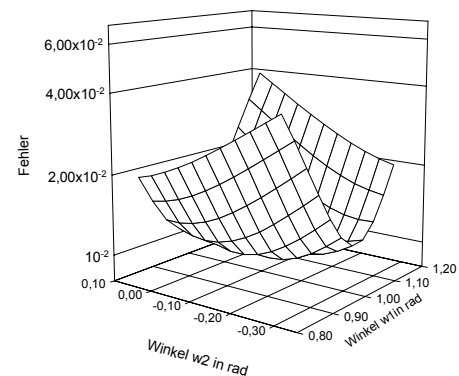


Abb.6: Fehler bei in zwei Quellen variierenden Phasenwerten und optimalen Betragswerten;  $\lambda=3\text{m}$

Bei den Betragswerten verschlechtert sich der Fehler nur mäßig, bei den Phasen zwar schon etwas deutlicher, doch bleibt ein klarer Abstand zu dem Fehler, der bei einer Quelle erreichbar ist. Insgesamt reagiert der Fehler moderater und unkritischer als erwartet. Die Tendenz bei anderen Wellenlängen ist so, dass zu kleineren Wellenlängen der Fehler weniger zunimmt, zu größeren Wellenlängen der Fehler stärker zunimmt. Dies verträgt sich aber mit dem absoluten Fehlerverlauf, indem bei großen Wellenlängen von einem sehr niedrigen Fehlerverlauf auszugehen ist.

### Zusammenfassung

Bei der praktischen Anwendung des Konzeptes sind zumindest Bodenreflexionen und Toleranzen in den Übertragungsfunktionen (Betrag und Phase) zu berücksichtigen. In einer Analyse beider Einflüsse zeigen beide unter realistischen Annahmen eine dahingehende begrenzte Wirkung, dass sich schon bei nur zwei Quellen gegenüber einer Quelle deutliche Verbesserungen im Fehlerverhalten ergeben. Die Analysen werden z.Z. durch Experimente verifiziert.

### Literatur

- /1/ Trimpop, M. ; Krahé, D. : Simulation der aktiven Schallunterdrückung bei monofrequenten und breitbandigen Geräuschen im Freifeld, DAGA 2000, Oldenburg
- /2/ Krahé, D. ; Trimpop, M. : Nachbildung eines "zweidimensionalen" Schallfeldes in einem begrenzten Volumen mit einer minimierten Anzahl von Schallquellen, DAGA 2000, Oldenburg
- /3/ Krahé, D. ; Trimpop, M. : Minimizing a three-dimensional loudspeaker array for reconstructing a two dimensional sound field, Active 99, Fort Lauderdale