# OPTIMIERUNG VON EINGANGSGRÖßEN FÜR RAUMAKUSTISCHE SIMULATIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG INVERSER METHODEN

**Jens Hellemann, Thomas Kletschkowski**

*Hochschule für Angewandte Wissenschaften, HAW-Hamburg, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg*

## EINLEITUNG

Die numerischen Algorithmen einer raumakustischen Simulation beinhalten stets eine vereinfachte Lösung der physikalischen Modelle. Es ist hinsichtlich des Rechenaufwands unvertretbar, alle Schallereignisse zwischen einer Quelle und einem Empfänger in einer Simulation zu berücksichtigen. Dazu zählen unter anderem Ereignisse wie Beugungseffekte, Streuungen, Phasensprünge sowie Transmissions- und Körperschallvorgänge, welche von den unterschiedlichen raumakustischen Simulationsmethoden vereinfacht betrachtet oder gar komplett vernachlässigt werden.

Auch hinsichtlich einer Messung können Veränderungen der Randbedingungen, wie die der Raumtemperatur dazu führen, dass die Ergebnisse deutlich variieren. Beispielsweise genügt das Einschalten einer Klimaanlage oder das Öffnen eines Fensters, um die akustischen Eigenschaften eines Raumes merklich zu verändern.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung eines systematischen Verfahrens, welches die Abweichung zwischen der Simulation und der Realität ausgleicht. Dies erfolgt über eine Anpassung der in der Simulation einzusetzenden Absorptionsgrade.

Die vorliegende Arbeit wurde in einem Zeitraum von sechs Monaten im Rahmen einer Masterarbeit an der HAW-Hamburg in Korporation mit der HEINKEL Group durchgeführt und greift Untersuchungen beispielsweise von Pelzer, et al., 2013 und Knauber, et al., 2013 auf.

## METHODIK

Das Berechnungshilfsprogramm *Room Absorption Property Optimizer* (RAPO) ist das Ergebnis der durchgeführten Arbeit. Es ist ein numerischer Optimierer, welcher die Bestimmung von Absorptionsgraden anhand eines Vergleiches zwischen gemessenen und berechneten Abklingkurven ermöglicht. Die hierfür benötigten numerischen Simulationen wurden mit Hilfe eines kommerziellen Ray Tracing Programmes durchgeführt. Deren Ergebnisse lassen sich als ASCII (*.dat) Format exportieren und werden in MATLAB über RAPO importiert und verarbeitet.

Als Ergebnis der Ray Tracing Simulation gilt ein Reflektogramm, welches die Energien der einzelnen Strahlen zum Zeitpunkt der „Detektion“ an einem (oder mehreren) definierten Empfänger aufzeichnet. Die exportierte Simulationsdatei beinhaltet alle benötigten Informationen, um das Reflektogramm gemäß **Gleichung 1** nach Pelzer, et al., 2013 in MATLAB nachzuberechnen

$$E_i(t,\alpha,n) = \frac{E_0}{(ct)^2} \cdot \exp(-mct) \cdot \prod_{k=1}^{K} (1-\alpha_k)^n \,, \quad (1)$$

wobei $E_0$ die Anfangsenergie des Strahls, $(ct)^2$ den zurückgelegten Weg und $m$ den Koeffizienten für die Schalldämpfung im Medium darstellen. Der hintere Term beschreibt den reflexionsbedingten Energieverlust, welchen die jeweiligen Strahlen anhand der Anzahl an Reflexionen $n$ an jeder Fläche $k$ mit einem Absorptionsgrad $\alpha$ erfahren.

Die Gesamtenergie, die zu einem diskreten Zeitpunkt am Empfänger eintrifft, wird über die Summe der Energien $E_S$ der Strahlen $i$ zum Zeitintervall $t_j \leq t < t_{j+1}$ berechnet (**Gleichung 2**)

$$E_{S,j} = \sum_i E_{S,i}\left(t_j \leq t < t_{j+1}\right) \qquad (2)$$

mit $\boldsymbol{t} = [t_0 \quad t_1 \quad t_2 \quad \cdots \quad t_j \quad \cdots \quad t_{J-2} \quad t_{J-1}]^\intercal$ und $j \in (0, J-1)$.

Die Abklingkurve wird aus den nun zeitdiskreten Reflektogramm

$$\boldsymbol{E}_S = [E_{S,0} \quad E_{S,1} \quad \cdots \quad E_{S,j} \quad \cdots \quad E_{S,J-2} \quad E_{S,J-1}]^\intercal$$

über dessen kumulative Rückwärtssummation ermittelt. Daraus ergibt sich der Abklingvorgang als Funktion der Zeit gemäß **Gleichung 3** zu

$$E_{S,j} \rightarrow L_{S,j}^{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\sum_{m=(J-1)}^{m=j} E_{S,m}}{\sum_{m=(J-1)}^{m=0} E_{S,m}}\right). \qquad (3)$$

mit $m \in (j, J-1)$.

Die simulierten Abklingkurven werden über gemessene Impulsantworten eines vergleichbaren realen Raumes optimiert. Für den Optimierungsvorgang muss allerdings geachtet werden, dass Messung und Simulation über eine gemeinsame zeitliche Abtastung verfügen.

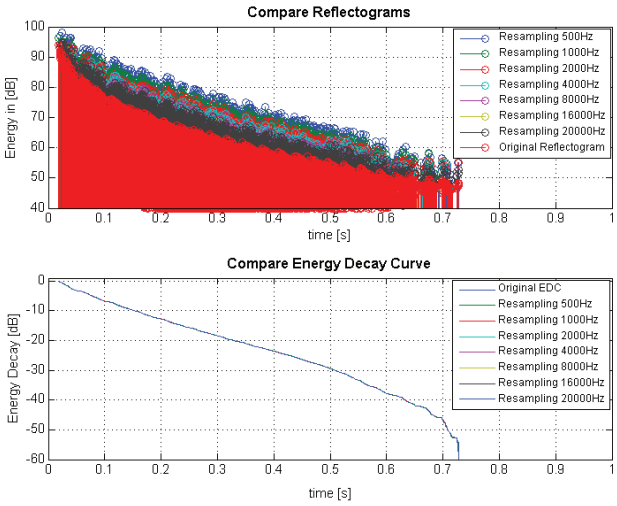


**Abb. 1 :** Vergleich zwischen Reflektogramm und Abklingkurve unter Berücksichtigung von diversen Abtastraten. Oben über $E_{S,j} \rightarrow L_{S,j} = 10\log_{10}(E_{S,j}/E_0)$ mit $E_0 = 10^{-12}$ [Nm]. Untern gemäß **Gleichung 3**.

Ein numerisches Experiment ergab, dass eine Neuabtastung der Reflektogramme keinen nennenswerten Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Abklingkurve hat (s. die Überlagerung der Kurven in **Abb. 1)**. Aus diesem Grund werden Abklingkurven als Eingangsparameter für die Kostenfunktion der Optimierung gewählt.

## OPTIMIERUNG

RAPO verwendet einen Optimierungsalgorithmus nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei wird die Abklingkurve der Simulation anhand der Absorptionsgrade über ein iteratives Verfahren solange verändert, bis die simulierte Abklingkurve der entsprechenden gemessenen Kurve so angepasst ist, dass die quadratische Abweichung beider Abklingkurven einen minimalen Betrag erreicht hat (s. **Abb. 2**).

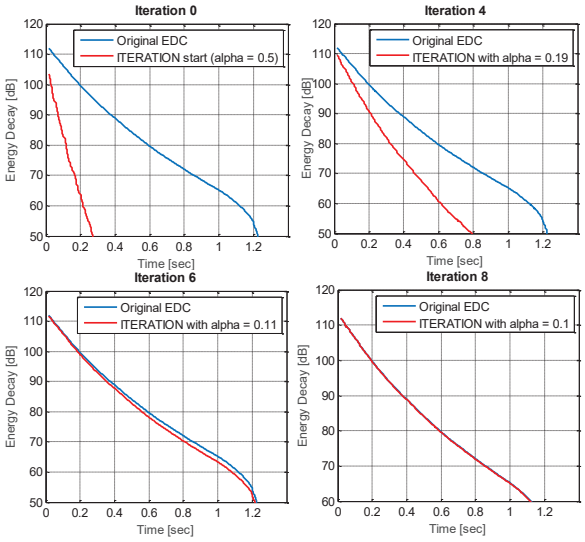


**Abb. 2:** Optimierungsziel, dB rel. zu $10^{-12}$ [Nm]

Die Optimierung des Problems wird über LSQCURVEFIT in MATLAB durchgeführt, wobei der simulierten Abklingkurve eine Abhängigkeit zu den Absorptionsgraden zugewiesen wird.

$$J = \min_{\alpha} \left\| L_m^{\Sigma} - L_S^{\Sigma}(\alpha) \right\|_2^2 = \min_{\alpha} \sum_i [L_m^{\Sigma} - L_S^{\Sigma}(\alpha)]^2 \qquad (4)$$

Die Kostenfunktion $J$ setzt sich somit gemäß **Gleichung 4** zusammen. Die gemessene Abklingkurve $L_m^{\Sigma}$ wird nach ISO 3382, 2009 erfasst.

## TESTFALL

RAPO wurde am Beispiel eines leeren Quaderraumes erprobt. Die Flächeneigenschaften der Wände variieren zwischen den Testfällen, um eine Veränderung hinsichtlich der Anzahl an berücksichtigten Absorptionsgraden sowie hinsichtlich der zugewiesenen Flächengröße im Raum zu erzielen. Es werden zudem gemittelte und frequenzabhängige Absorptionsgrade berücksichtigt.

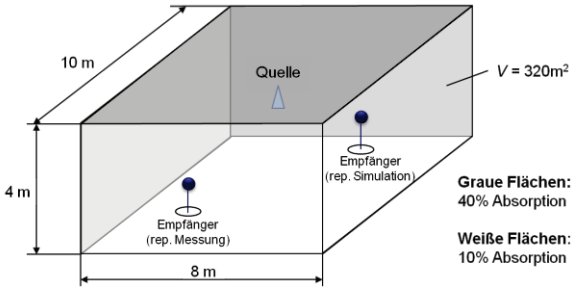


**Abb. 3:** Schematische Darstellung des leeren Quaderraumes mit einer gleichmäßigen Flächengrößenverteilung der Absorptionsgraden.

Die folgenden Ergebnisse wurden am Beispiel des in **Abb. 3** dargestellten Raumes erzielt, wobei die gemessene Abklingkurve durch Simulationsdaten ersetzt wurde. Die repräsentativen Messdaten wurden aus den Ergebnissen der Simulation an einem Empfänger „Empfänger (rep. Messung)“ abgelesen. Die Abklingkurve des Empfängers „Empfänger (rep. Simulation)“ wird an die der „Messung“ angepasst.

## ERGEBNISSE

**Abb. 4** zeigt den Vergleich zwischen simulierten und den optimierten Absorptionsgraden des exemplarischen Versuches gemäß **Abb. 3**. In der Optimierung „verschmelzen“ die Absorptionsgraden. Es wird eine „gemittelte“ Raumabsorption „vorgeschlagen“. Dies spiegelt sich bei der Betrachtung der frequenzabhängigen Nachhallzeit im Vergleich zwischen der Simulation und den Ergebnissen nach der Optimierung wieder (s. **Abb. 5**). RAPO präsentiert somit Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Eigenschaften einzelner Flächen im Raum.

Eine detaillierte Betrachtung der Kostenfunktion des Problems zeigt einen sehr flachen Verlauf besonders im Bereich des globalen Optimums (s. **Abb. 6**).

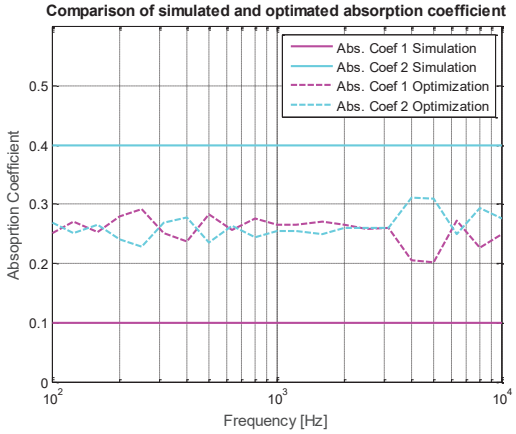


**Abb. 4:** Vergleich zwischen sim. und opt. Absorptionsgrade

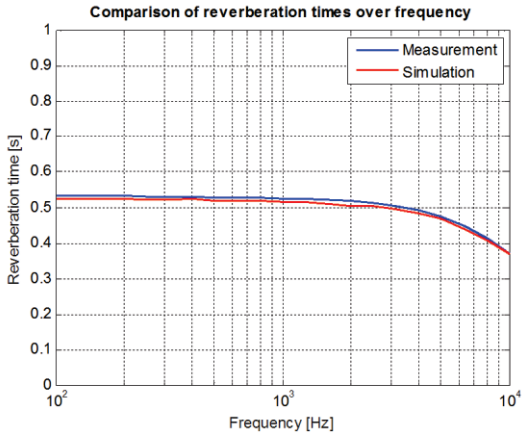


**Abb. 5:** Vergleich der Nachhallzeiten.

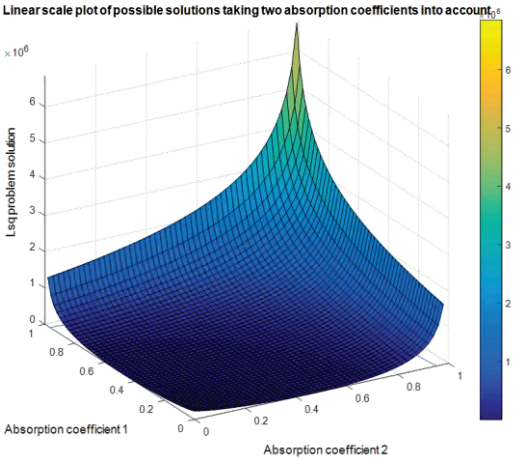


**Abb. 6:** Plot der Kostenfunktion. Hierbei sind 50% der Raumflächen mit einem gemittelten Absorptionsgrad von 10% belegt. Der restliche Anteil des Raumes besitzt einen gemittelten Absorptionsgrad von 40% (Beispiel gemäß **Abb. 3**).

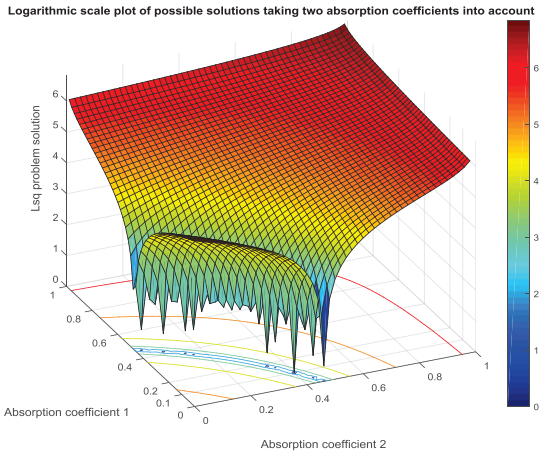


**Abb.7:** Log. Darstellung von **Abb. 6**, mit $J \rightarrow L_J = \log_{10}(J\,/1\ [\mathrm{dB}])$

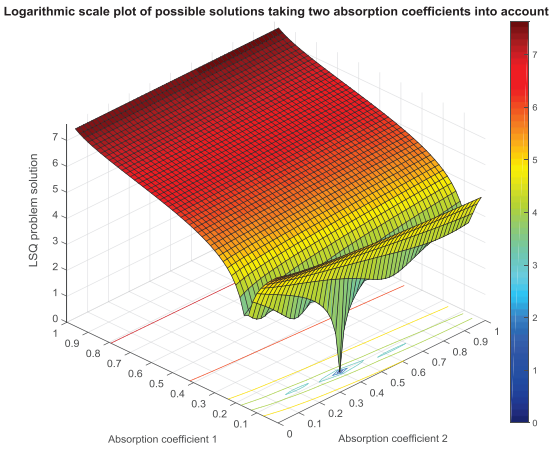


**Abb. 8:** Logarithmischer Plot einer exempl. Kostenfunktion. mit $J \rightarrow L_J = \log_{10}(J\,/1\ [\mathrm{dB}])$

Erst über eine logarithmische Betrachtung der Kostenfunktion gemäß **Abb.7** werden die einzelnen Lösungen klar dargestellt. Hierbei kann festgestellt werden, dass eine gleichmäßige Flächenverteilung der Absorptionsgraden eine bedeutende Anzahl an möglichen Lösungen hervorruft. Die Kostenfunktion präsentiert sich zudem leicht symmetrisch. Alle Optima des numerischen Experimentes befinden sich im Bereich der mittleren Raumabsorption (s. **Abb. 8** hellblaue Bereich).

Ein Vergleich bietet die Kostenfunktion, welche in **Abb. 8** dargestellt wird. Hierbei wurde lediglich der Decke des Raumes (gemäß **Abb. 3**) einen mittleren Absorptionsgrad von 40% zugewiesen. Somit sind 74% des Raumes mit 10% Absorption und 26% mit 40% Absorption belegt. Es konnte festgestellt werden, dass die Flächenverteilung der Absorptionsgraden den Verlauf der Kostenfunktion stark beeinflusst. Besonders interessant ist, dass die Absorptionsgrade kleinerer Flächen einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Kostenfunktion haben. Dies kann anhand des flachen Verlaufes der Kostenfunktion entlang des zweiten Absorptionsgrades in **Abb. 8** bemerkt werden.

## DANKSAGUNG

Diese Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit

*HEINKEL Engineering GmbH & Co.KG*
*Hein-Saß-Weg 30, 21129 Hamburg*

durchgeführt.

## FAZIT

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Umsetzung eines inversen Verfahrens zur Bestimmung von Absorptionsgraden durch einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Abklingkurven. Dies wurde über das Optimierungsprogram RAPO umgesetzt. Obwohl die vorgelegten Testfälle bzw. numerische Experimente zu plausiblen Ergebnisse führten, weißt RAPO Verbesserungsbedarf hinsichtlich des Optimierungsalgorithmus und der Datenverarbeitung auf. Die Zuverlässigkeit von RAPO muss unter Berücksichtigung realer Messdaten weiterhin untersucht werden. Es ist aber grundsätzlich möglich über RAPO die gemittelte Raumabsorption über den Vergleich zwischen Simulation und Messung zu ermitteln, wobei vorab besonders auf Simulations- und Messergebnisse geachtet werden muss. Dies wird in der vorliegenden Masterarbeit ausführlich dargestellt und diskutiert.

## LITERATUR

**ISO:3382. 2009.** *Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume*. s.l.: Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.

**Knauber, Pelzer, und Vorländer. 2013.** *Inverse Ray Tracing for the optimization of acoustical properties in auralizations of real rooms*. AIA-DAGA. 2013.

**Pelzer, und Vorländer. 2013.** *Inversion of a room acoustics model for the determination of acoustical surface properties in enclosed spaces*. Proceedings of Meetings on Accoustics. 2013, Bd. 19