Messung und Berechnung von Kantenabsorbern

Christoph Santer[1], Gerhard Graber[1], Eric Kurz[1], Werner Weselak[1]

[1] *Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation, Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich*

Email: c.santer@gmx.net, graber@tugraz.at, eric.kurz@tugraz.at, werner.weselak@tugraz.at

Einleitung

Der Kantenabsorber (KA) ist ein modernes und innovatives Mittel zur raumakustischen Gestaltung und vor allem im tieffrequenten Bereich sehr gut wirksam. In Räumen, die für Sprache und Unterricht genutzt werden, wird er gerne verwendet, um die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich zu reduzieren. H. V. Fuchs hat vor allem in für Bildung und Lehre genutzten Räumen zahlreiche raumakustische Optimierungen mit KA durchgeführt und gezeigt, dass mit diesen eindrucksvolle raumakustische Verbesserungen erreicht werden können [1, 2].

Der KA stellt dabei eine kostengünstige, platzsparende und mitunter unauffällige Lösung für raumakustische Sanierungen dar. Durch den Einbau in Trockenbauweise kann er schnell und einfach in bestehenden Räumen nachgerüstet werden.

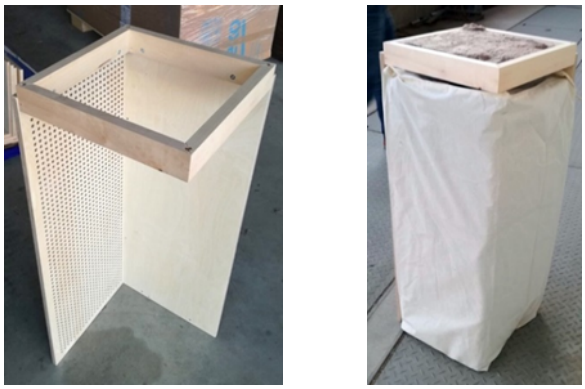
Die Wirkung des KA im tieffrequenten Bereich ist empirisch bereits sehr gut belegt. Für die Berücksichtigung dieses Absorbertyps bei der raumakustischen Planung und Sanierung fehlt allerdings bisher eine einfach anwendbare Berechnungsgrundlage.

Daniel Reisinger und Christoph Santer haben in ihren Masterarbeiten an der TU Graz [3, 4] den KA genauer untersucht und basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ein einfaches Berechnungs-Tool für eine Abschätzung der Wirksamkeit von KA entwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in diesem Beitrag vorgestellt und anhand von einem Fallbeispiel evaluiert.

Messkampagne

Für die Messkampagne wurde ein modulares KA-System konzipiert, welches für Messungen in unterschiedlichen Räumen einfach auf- und abgebaut werden kann. Gefertigt wurde der KA aus jeweils 2 Stück 15 mm dicken und 40 cm breiten rechtwinklig zusammengesetzten mehrschichtigen Birkensperrholzplatten, wovon eine zu 20% perforiert ist. Der Holzverbau wurde über Rahmen stabilisiert, die zugleich die steckbare Verbindung der Module ermöglichen (Abb. 1(a)). Gefüllt wurde der Holzverbau mit gebundener Glaswolle der Firma KNAUF Insulation, welche eine längenspezifische Strömungsresistanz $\Xi \geq 5\,\mathrm{kPas/m^2}$ aufweist. Zum einfacheren Transport wurden Säcke aus Baumwollstoff (Molino) angefertigt, die mit dem Absorptionsmaterial gefüllt wurden (Abb. 1(b)).

Insgesamt wurden 16 lange (1,5 m) und 9 kurze (1 m) Module gefertigt. Werden diese Elemente nun in einer Raumkante aufgestellt, entsteht ein KA mit einem Querschnitt von 40 x 40 cm. Mit diesem modularen KA-System wurden in 5 Räumen (Hallraum, 3 Hörsäle, 1 Klassenzimmer) Messungen mit unterschiedlichen KA-Konfigurationen durchgeführt. Es wurde die Nachhallzeit jeweils mit und ohne KA gemessen und als Vergleichswert die äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter KA $A_{e,1m}$ berechnet.



(a) **(b)**

Abbildung 1: Aufbau eines KA-Moduls. Leerer Holzverbau mit Rahmen für die Steckverbindung der Module (a) und mit Absorptionsmaterial gefülltes KA-Modul (b).

Ergebnisse

Durch die Aufstellung des KA in der Fläche bzw. in der Raumlängskante l des Hallraums (Abb. 2), konnte gezeigt werden, dass in der Kante im tiefen Frequenzbereich eine deutlich höhere Absorption erreicht wird als in der Fläche (siehe Abb. 3).

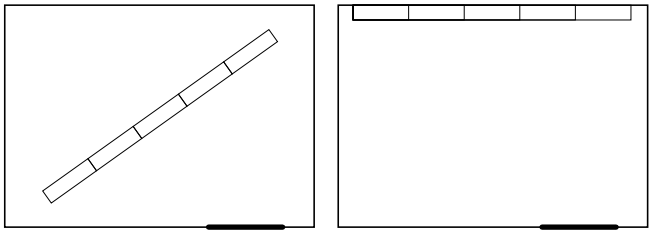


Abbildung 2: KA im Hallraum der TU Graz (L x B x H: 8.35 m x 5.99 m x 4.90 m). KA in der Fläche (links) und KA in der Längskante (rechts).

Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich, wenn der Vergleich der Wirkung des KA zwischen Fläche und der Breitenkante b bzw. der Höhenkante h durchgeführt wird. Abb. 4 zeigt die normierte Differenz der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter KA $\hat{A}_{e,1m}$ bei Positionierung in der Längs-, Breiten- und Höhenkante (l-, b- und h-Kante) im Vergleich zur Positionierung in der Fläche. Dabei wird deutlich, dass die maximale Wirkung des KA bei unterschiedlichen Frequenzen auftritt. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Modenfrequenzen, die durch die Raumabmessungen l, b

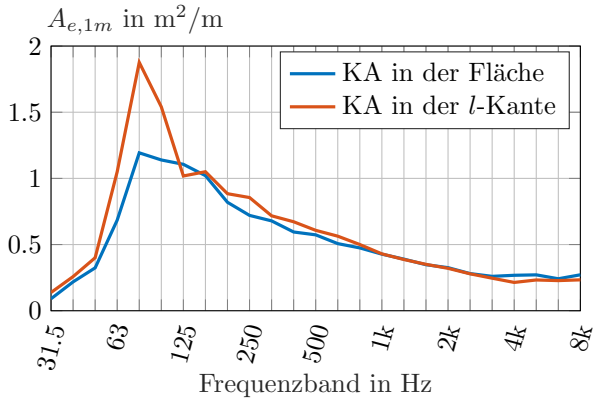


Abbildung 3: Vergleich der äquivalenten Absorptionsfläche je Laufmeter KA $A_{e,1m}$ für Anbringung des KA in der Fläche bzw. in der Kante des Hallraums.

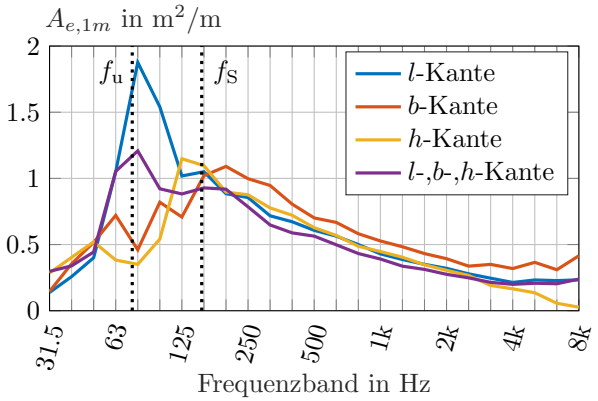


Abbildung 5: Vergleich der Wirkung des KA bei Positionierung in verschiedenen Kanten im Hallraum.

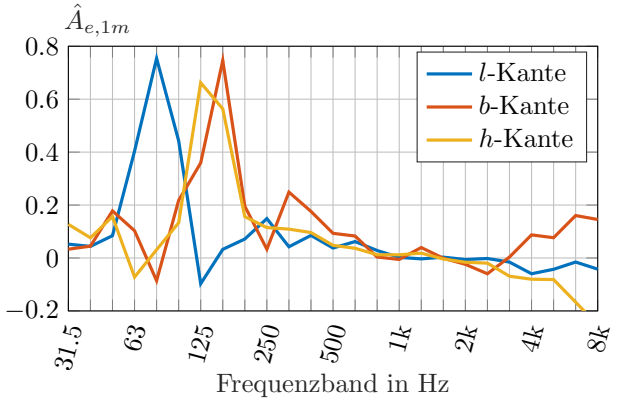


Abbildung 4: Normierte Differenz der Absorptionsfläche je Laufmeter KA $\hat{A}_{e,1m}$ bei Aufstellung in der l-, b- und h-Kante.

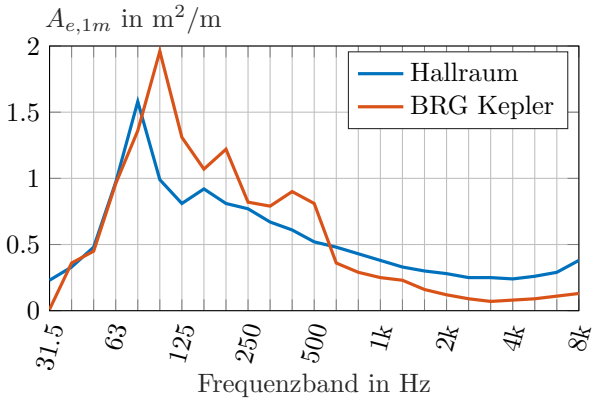


Abbildung 6: Resultierende äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter KA $A_{e,1m}$ bei Räumen mit unterschiedlichen Modenstrukturen.

und h bestimmt werden. Die Anbringung des KA an verschiedenen Kanten eines Raumes wirkt sich also stark auf dessen Absorptionsverhalten aus.

Raummoden im tiefen Frequenzbereich wirken sich sehr nachteilig auf die Raumakustik aus. Gerade in diesem Frequenzbereich zeigt der KA seine Stärke. Sobald er in einer Raumkante positioniert wird, dämpft er die durch die Abmessung dieser Raumkante verursachten Raummoden „automatisch“. Daher kann er als *breitbandige Modenbremse* bezeichnet werden. Es ist also beim KA nicht notwendig, eine Abstimmung auf bestimmte Modenfrequenzen vorzunehmen, wie dies bei Resonanzabsorbern der Fall ist.

In Abb. 5 werden Konfigurationen des KA in verschiedenen Raumkanten im Hallraum ausgewertet. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Konfigurationen unterhalb von 200 Hz sehr unterschiedlich wirken. Die Aufstellung in der Längskante bewirkt ein Maximum der Absorption bei 80 Hz, das auf eine axiale Mode 4. Ordnung zurückzuführen ist. Die Aufstellung in der Höhenkante beginnt erst bei höheren Frequenzen zu wirken, da diese Raumkante deutlich kürzer ist als die Längskante. Für eine möglichst hohe Absorption im tieffrequenten Bereich ist daher die Positionierung der KA an der längsten Raumkante erforderlich.

Ein weiteres sehr interessantes und zunächst durchaus auch überraschendes Ergebnis, wie sehr die Wirkung des KA mit der Modenstruktur des Raumes zusammenhängt, zeigt der Vergleich von sehr ähnlichen KA-Konfigurationen in unterschiedlichen Räumen.

Abb. 6 zeigt $A_{e,1m}$ im Hallraum und im Klassenzimmer 003 im BRG Kepler (L x B x H: 10 m x 6,6 m x 3,7 m). Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen und der damit einhergehenden Raummodenstrukturen ergibt sich im Hallraum das Absorptionsmaximum im 80 Hz Terzband und im BRG Kepler im 100 Hz Terzband. Der KA entfaltet also gerade bei jenen Frequenzen seine maximale Wirkung, bei denen Raummoden am stärksten auftreten und störend wahrgenommen werden.

Die Messkampagne lässt auch erkennen, dass die Wirkung des KA hin zu sehr tiefen Frequenzen abnimmt. In Abhängigkeit von den Querabmessungen des KA kann dabei grob eine untere Grenzfrequenz f_u abgeschätzt werden, für die in [3] die empirische Formel

$$f_u = \frac{c}{d_{KA} \cdot 8} \quad \text{in Hz} \qquad (1)$$

angegeben wird. d_{KA} ist hierbei die Länge der Diagonale des KA-Querschnitts in m.

Zu hohen Frequenzen hin wird die charakteristische Bandbreite, für welche der KA als *breitbandige Modenbremse* wirkt, durch die Schröderfrequenz

$$f_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad \text{in Hz} \qquad (2)$$

begrenzt. Oberhalb von f_S kann *keine* erhöhte Absorptionswirkung durch Einbringung des porösen Absorbermaterials in die Raumkante erwartet werden.

Optimierungsansatz für KA-Berechnung

Da die Wirkung des KA sehr stark von der Modenstruktur des Raumes abhängt und damit KA auch in jedem Raum anders wirken, kann gerade im interessanten tieffrequenten Bereich kein raumunabhängiger Absorptionsgrad angegeben werden. Daher wurde ein Tool entwickelt, das ausgehend von der Modenstruktur eines Raumes, die Wirkung des KA für genau diesen Raum berechnet. Dazu werden für Quaderräume in Abhängigkeit von den Raumabmessungen die Modenfrequenzen berechnet. Fünf geeignete Parameter, nämlich die Anzahl der Moden ($p_{n,1}(f)$ - axial, $p_{n,2}(f)$ - tangential, $p_{n,3}(f)$ - schräg) und der Abstand der Moden zueinander ($p_{n,4}(f)$ und $p_{n,5}(f)$) werden mit entsprechenden Gewichten $\mathbf{c}(f)$ versehen. Danach wird eine Optimierung von $\mathbf{c}(f)$ gemäß Gl. 3 durchgeführt. Die Matrix $\mathbf{P}(f)$ setzt sich aus den Parametervektoren $\mathbf{p}_n(f)$ der fünf Räume ($n = 1 \ldots 5$) aus der Messkampagne zusammen. Der Vektor $\mathbf{A}_{e,1m}(f)$ repräsentiert die äquivalenten Absorptionsflächen pro Laufmeter KA aus den Messergebnissen je Raum.

$$\mathbf{c}_{\text{opt}}(f) = \arg\min_{\mathbf{c}(f)} ||\mathbf{P}(f) \cdot \mathbf{c}(f) - \mathbf{A}_{e,1m}(f)||_2^2 \,, \quad (3)$$

$$\text{wobei } \mathbf{c}(f) \overset{!}{\geq} \mathbf{0}$$

$\mathbf{P}(f)$, $\mathbf{c}(f)$ und $\mathbf{A}_{e,1m}(f)$ sind wie folgt definiert:

$$\mathbf{P}(f) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1'(f) \\ \vdots \\ \mathbf{p}_5'(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,1}(f) & \cdots & p_{1,5}(f) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{5,1}(f) & \cdots & p_{5,5}(f) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{c}(f) = \begin{bmatrix} c_1(f) & \cdots & c_5(f) \end{bmatrix}', \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_{e,1m}(f) = \begin{bmatrix} A_{e,1m,1}(f) & \cdots & A_{e,1m,5}(f) \end{bmatrix}'. \quad (6)$$

Die Optimierung wird für jedes Terzband $f = 31.5\,\text{Hz}$ bis $315\,\text{Hz}$ separat durchgeführt, da der KA in diesem Bereich seine spezifische raummodenabhängige Absorptionswirkung aufweist.

Berechnungs-Tool *EACT*

Das Ergebnis der Optimierung wird im *Edge Absorber Calculation Tool* (*EACT*) verwendet (Abb. 7). *EACT* bietet die Möglichkeit, die Absorptionswirkung eines KA mit einem Querschnitt von $40 \times 40\,\text{cm}$ in quaderförmigen Räumen zu berechnen. Nach Eingabe der Raumdimensionen werden die Modeneigenschaften berechnet und diese mit den optimierten Konstanten $\mathbf{c}_{\text{opt}}(f)$ multipliziert. Als Ergebnis erhält man das zu erwartende $\tilde{A}_{e,1m}(f)$ des KA im jeweiligen Raum. Da oberhalb von $315\,\text{Hz}$ die raummodenabhängige Wirkung des KA nicht mehr gegeben ist und der KA wie ein poröser Absorber wirkt, wird für diesen Frequenzbereich der Mittelwert von $A_{e,1m}(f)$ aller Messungen verwendet. Das mit *EACT* berechnete Ergebnis für den Hörsaal FSI2 ist in Abb. 8 dargestellt und wird für das abschließende Fallbeispiel verwendet.

Fallbeispiel Hörsaal FSI2

Die für die Messungen verwendeten KA wurden nach der Messkampagne im Rahmen einer akustischen Sanierung

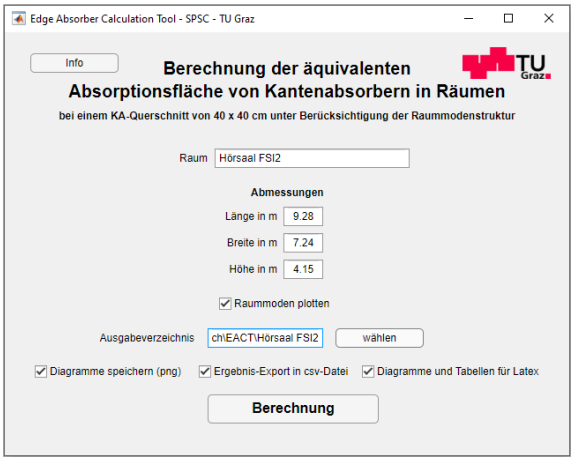


Abbildung 7: Graphical User Interface (GUI) des Tools *EACT* zur Abschätzung der Absorptionswirkung von KA.

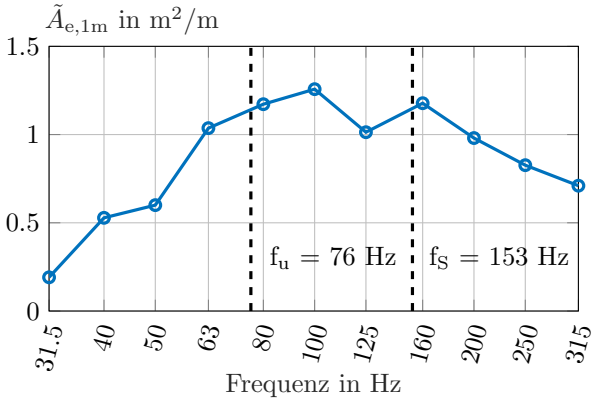


Abbildung 8: Mit *EACT* berechnete äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter KA $\tilde{A}_{e,1m}$ für den Hörsaal FSI2 (Quaderraum mit den Maßen 9.28 x 7.24 x 4.15 m).

Abbildung 9: Hörsaal FSI2 nach der akustischen Sanierung mit den eingebauten KA an der Decke.

in den Hörsaal FSI2 an der TU Graz eingebaut (siehe Abb. 9). Dieses raumakustische Sanierungsprojekt wurde auch zu einer ersten Überprüfung der Praxistauglichkeit der Berechnungsergebnisse von *EACT* herangezogen.

Abb. 10 zeigt die Nachhallzeit vor und nach dem Einbau der KA in den Hörsaal FSI2. Die starke Absorptionswirkung der KA im tiefen Frequenzbereich und der dadurch erreichte nahezu ideale Nachhallzeitverlauf ist deutlich zu sehen.

Aus der Vorher-/Nachhermessung wurde die eingebrachte äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter KA $A_{e,1m}$ ermittelt und mit den berechneten Werten von *EACT* $\tilde{A}_{e,1m}$ verglichen (siehe Abb. 11). Man sieht, dass die meisten $\tilde{A}_{e,1m}$ innerhalb eines $\pm 20\%$ Bereichs

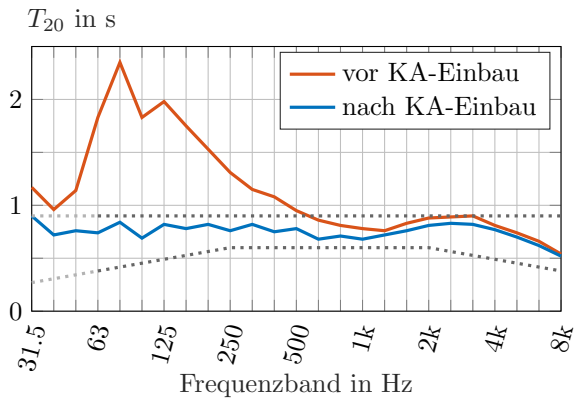


Abbildung 10: Nachhallzeit vor und nach dem Einbau der KA im HS FSI2 mit Toleranzband nach ÖNORM B 8115-3.

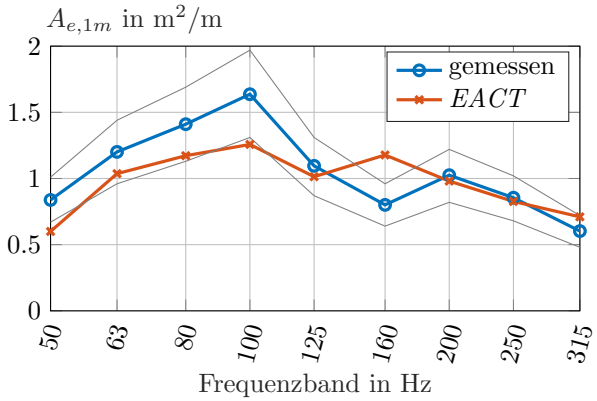


Abbildung 11: Vergleich zwischen gemessener und mit *EACT* berechneter äquivalenter Absorptionsfläche der KA im Hörsaal FSI2 mit ± 20% Bereich um die gemessenen Werte.

um die gemessenen $A_{e,1m}$ liegen. Insbesondere im tiefen Frequenzbereich unter 125 Hz fällt auf, dass die durch *EACT* berechneten $\tilde{A}_{e,1m}$ niedriger sind als die gemessenen $A_{e,1m}$. In diesem Frequenzbereich wird also die Absorptionswirkung des KA durch *EACT* unterschätzt. Diese systematische Abweichung resultiert aus dem Optimierungsverfahren.

Simulation mit CATT-Acoustic

Zusätzlich wurde vom HS FSI2 eine raumakustische Simulation erstellt und mit der Vorhermessung kalibriert. Die eingebauten KA wurden mit den von *EACT* berechneten Absorptionsgraden in die Simulation eingegeben. Dabei wurden die Absorptionsgrade der KA auf ≤ 1 skaliert und im gleichen Ausmaß die dem Schallfeld zugewandte Fläche der KA vergrößert. Über 315 Hz liefert *EACT* keine Werte, daher wurde in diesem Frequenzbereich der Mittelwert aller Messungen verwendet. Dabei ist klar festzuhalten, dass unterhalb von f_S eine Simulation des KA mit CATT-Acoustic mit Vorsicht zu interpretieren ist. Die mathematischen Grundlagen der Software sind für diesen Frequenzbereich nicht gedacht. Eine grobe Abschätzung ist aber möglich und macht durchaus Sinn, da sie zumindest einen groben Anhaltspunkt über die Wirkungsweise des KA liefert. Abb. 12 zeigt den Vergleich der gemessenen Nachhallzeit mit der mit CATT-Acoustic simulierten Nachhallzeit nach dem Einbau der KA. Es ist deutlich zu sehen, dass simulierte und gemessene Nachhallzeit gut übereinstimmen und den gleichen

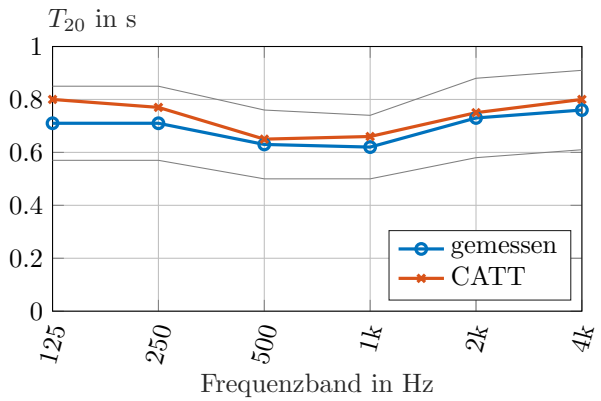


Abbildung 12: Vergleich zwischen gemessener und mit CATT simulierter Nachhallzeit nach dem Einbau der KA im FSI2 mit ± 20% Bereich um die gemessenen Werte.

Verlauf über der Frequenz aufweisen, wobei die gemessene Nachhallzeit durchgehend niedriger ist als die simulierte.

Zusammenfassung

Abschließend kann gesagt werden, dass es mit *EACT* erstmals gelungen ist, ein einfaches Berechnungs-Tool zur Verfügung zu stellen, das die Wechselwirkung des KA mit der Raummodenstruktur berücksichtigt und brauchbare Absorptionsgrade liefert. Die Verwendung dieser Absorptionsgrade in der raumakustischen Simulation mit CATT-Acoustic zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Das *Edge Absorber Calculation Tool* ist unter [5] frei verfügbar.

Im Zuge der Messung im Hörsaal FSI2 wurden auch Kunstkopfaufnahmen vor und nach der akustischen Sanierung durchgeführt, um den ortsabhängigen Einfluss der akustischen Sanierung hörbar zu machen. Die Kunstkopfaufnahmen sind als Hörvergleich unter [6] verfügbar.

Literatur

[1] Fuchs, H. V.: Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume – Teil 2: Bass-Verhältnis und Schallbelastung in kleineren Räumlichkeiten. Akustik Journal (03/2018), 39-51

[2] Fuchs, H. V.: Harte Kanten für klare Worte. Trockenbau Akustik (06/2018), 70-73

[3] Reisinger, D.: Entwicklung und Messung von Kantenabsorbern. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019

[4] Santer, C.: Messung und Berechnung von Kantenabsorbern. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2021

[5] Link zum *Edge Absorber Calculation Tool* (*EACT*), URL: https://cloud.tugraz.at/index.php/s/9bQCeSrGQiRRmKe

[6] Link zu den Kunstkopfaufnahmen, URL: https://cloud.tugraz.at/index.php/s/KMkMfXfMNWkknC9