

# Untersuchung der Einflussfaktoren des Fahrzeuginnenraum auf das abgestrahlte Schallfeld der Klimaanlage

Silke Hohls<sup>1</sup>, Benedikt Ach<sup>1</sup>, Thomas Biermeier<sup>2</sup>, Ralf Blaschke<sup>2</sup>, Stefan Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland,

E-Mail: [Silke.Hohls@ipat.uni-erlangen.de](mailto:Silke.Hohls@ipat.uni-erlangen.de)

<sup>2</sup> Audi AG, 85045 Ingolstadt, Deutschland

## Einleitung

Das in der Fahrgastzelle wahrnehmbare Schallfeld wird aufgrund der akustischen Optimierung der Hauptgeräuschquellen (z.B. Motor, Umströmung des Fahrzeugs) und dem Einsatz neuer Technologien wie Elektroantriebskonzepten zunehmend leiser. Hierdurch tritt das Klimatisierungssystem als Lärmquelle weiter in den Vordergrund.

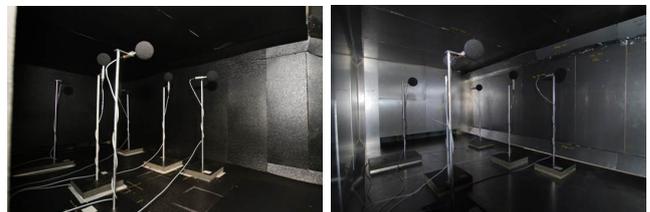
Die vorliegende Untersuchung soll dazu beitragen, das durch die Fahrzeuginsassen wahrnehmbare Schallfeld, das durch das Klimatisierungssystem induziert wird, besser analysieren und quantifizieren zu können und. Dabei wird bei diesen Untersuchungen der Einfluss, der durch das Ankoppeln von Armaturen und einer Fahrgastzelle an das Klimagerät entsteht, fokussiert. Das Schallfeld wurde hierfür unter Halbfreifeldbedingungen, in einem Fahrzeugmodell und im Serienfahrzeug vermessen sowie untereinander verglichen. Dabei wurden sowohl Schalldruckpegel als auch psychoakustische Größen ausgewertet, die zur Bewertung der wahrgenommenen Geräuschqualität geeignet sind.

## Versuchsaufbau

Für die Untersuchung des abgestrahlten Schallfeldes eines Klimagerätes in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen innerhalb eines kleinen Raumes, der die Fahrgastzelle modelliert, wurde das Klimagerät in ein Fahrzeugmodell im Maßstab 1:1 verbaut. Hierbei handelt es sich um das Modell der Society of Automotive Engineers (SAE-Körper), das aus einer Rahmenkonstruktion aus Holz aufgebaut ist. Die Wände des Modells wurden sowohl von innen als auch von außen auf die Rahmenkonstruktion mittels einer entkoppelnden Silikonschicht aufgebracht. Diese bestehen aus Schalldämmplatten, die wiederum als Sandwichelemente aus Sperrholz und einer akustisch wirksamen Kunststoffschicht ausgeführt sind. Zwischen den Innen- und Außenwänden befindet sich eine Schallabsorptionsschicht aus Mineralwolle. Dieser Aufbau dient dazu, dass ein Schalleintrag von außen in das Fahrzeugmodell bestmöglich vermieden wird. Das Klimagerät wurde in der Front des Modells verbaut und es wurden die zugehörigen Luftkanäle und Ausströmer angeschlossen. Das Klimagerät wurde mit einer generischen Instrumententafel aus Holz verkleidet und die Luft durch die Mannaströmer in den Innenraum des Modells eingeströmt. Das Klimagerät saugt die Luft durch eine Einlaufstrecke ein. Diese besteht aus einer Volumenstrom-

messdüse, an die ein Hilfsgebläse und nachfolgend eine Irisblende als Drossel angekoppelt sind, um die Betriebspunkte des Klimageräts analog eines Serienfahrzeugs nachbilden zu können. Hieran ist ein Rohrschalldämpfer angekoppelt, um den Eintrag von Schall einerseits durch Umgebungsgeräusche und andererseits durch das Hilfsgebläse und die Drossel zu vermeiden. Vom Schalldämpfer aus wird das Klimagerät mit einem Anschlussstück, das als Diffusor ausgeführt ist, angeschlossen und somit mit Luft versorgt. An der Fahrzeugrückwand kann die Luft durch einen Luftauslass, der wiederum mit einem Kulissenschalldämpfer ausgestattet ist, ausströmen.

Der Innenraum des Fahrzeugs wurde in dieser Untersuchung entsprechend Abbildung 1 einerseits mit Akustikschaumstoffen der Stärke 50 mm und andererseits mit Stahlblechen der Stärke 1 mm ausgekleidet. Dies entspricht den möglichen Grenzfällen von absorbierenden und reflektierenden Randbedingungen.



**Abbildung 1:** Innenauskleidung des Fahrzeugmodells; links: Schaumstoff (absorbierend), rechts: Stahlblech (reflektierend).

Gemessen wurde jeweils an sechs Mikrofonpositionen. Vier davon entsprechen den Sitzpositionen im Fahrzeug auf Höhe der Ohren eines durchschnittlich großen Mannes, d.h. der Fahrer- und Beifahrerposition sowie den Sitzen hinten links und rechts. Zwei weitere Messpositionen wurden symmetrisch im Abstand von 1 m vom Klimagerät definiert. Es wurde mit Freifeldmikrofonen des Typs 4189-L-001 des Herstellers Brüel&Kjaer gemessen.

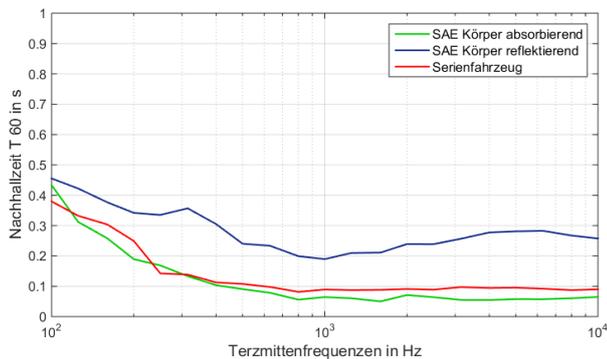
Als Vergleichsmessungen wurden sowohl Messungen bei Halbfreifeldbedingungen im Akustikraum als auch im Serienfahrzeug durchgeführt.

## Ergebnisse

### Nachhallzeit

Um die akustischen Eigenschaften des Raumes grundsätzlich zu charakterisieren, wurden zunächst

die Nachhallzeiten T60 bestimmt. Diese wurden mittels der Anregung mit einem Sweep durch eine omnidirektionale Schallquelle gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 aufgetragen.

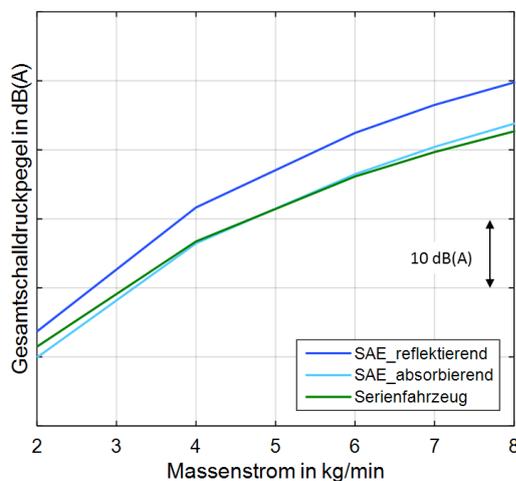


**Abbildung 2:** Nachhallzeiten T60 für das Fahrzeugmodell (SAE-Körper) absorbierend und reflektierend sowie des Serienfahrzeugs.

Erwartungsgemäß liegen die Nachhallzeiten bei reflektierender Auskleidung deutlich oberhalb denen bei absorbierender Auskleidung. Die gemessenen Werte für das Serienfahrzeug liegen für die meisten Frequenzbereiche zwischen den Grenzfällen im Fahrzeugmodell. Das bedeutet, dass das Absorptionsvermögen eines Serienfahrzeugs durch das Fahrzeugmodell abgebildet werden kann. In diesem Fall sind die Werte für das Serienfahrzeug vergleichsweise ähnlich zu denen im absorbierend ausgekleideten SAE Körper, d.h. das Absorptionsverhalten des Serienfahrzeugs kann durch diesen Grenzfall besser beschrieben werden.

**Schalldruck**

Um den Einfluss des Fahrzeuginnenraumes auf das Schallfeld der Klimaanlage zu bestimmen, wurden zunächst die Gesamtschalldruckpegel verglichen. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt.

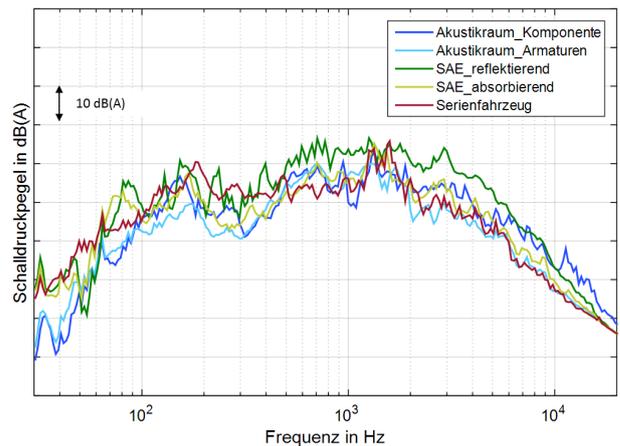


**Abbildung 3:** Gesamtschalldruckpegel an der Fahrerposition in Abhängigkeit des Massenstroms.

Alle drei Konfigurationen weisen einen qualitativ

ähnlichen Verlauf auf. Dies bedeutet wiederum, dass das Fahrzeugmodell in Bezug auf den Gesamtschalldruckpegel ein ähnliches Verhalten aufweist, wie ein Serienfahrzeug. Die Werte des Serienfahrzeugs sind vergleichbar zum absorbierend ausgekleideten Fahrzeugmodell.

Um den spektralen Einfluss des Fahrzeuginnenraumes auf das Schallfeld zu untersuchen, sind die Frequenzspektren verschiedener Konfigurationen in Abbildung 4 aufgetragen. Es wurde jeweils das Mikrophon an der Fahrerposition bei einem Massenstrom von 4 kg/min aufgetragen. Der Graph „Akustikraum\_Komponente“ zeigt die Schallabstrahlung der Komponente bei Halbfreifeldbedingungen im Akustikraum. Werden die Luftkanäle, Ausströmer und die generische Instrumententafel an das Klimagerät angebaut sowie die verbleibenden offenen Flächen mit schallabsorbierenden Materialien verschlossen, kann bei selbem Massenstrom das Frequenzspektrum „Akustikraum\_Armaturen“ gemessen werden. Es ist eine Dämpfung von 5-8 dB(A) im hochfrequenten Bereich ab etwa 2000 Hz sowie eine Erhöhung der Schalldruckpegel im tieffrequenten Bereich bis 100 Hz erkennbar. In den mittleren Frequenzen zwischen 100 und 2000 Hz ist eine Glättung des Spektrums sichtbar.



**Abbildung 4:** Frequenzspektren bei verschiedenen Konfigurationen.

Die in Abbildung 4 grün dargestellten Spektren stellen das gemessene Schallfeld für das Klimagerät dar, wenn es in das Fahrzeugmodell eingebaut und die Wände des Modells entweder absorbierend oder reflektierend ausgekleidet sind. Für beide Konfigurationen ist erkennbar, dass die Ankopplung des Raumes einen Schallbeitrag, also eine Erhöhung der Schalldruckpegel über den gesamten Frequenzbereich zur Folge hat. Für Frequenzen oberhalb ca. 200 Hz ist der Schallbeitrag durch den reflektierend ausgekleideten SAE-Körper größer als für absorbierende Randbedingungen. Dies ist durch das schlechtere Absorptionsverhalten begründet. Im Frequenzbereich unterhalb von 200 Hz ist die Schalldruckpegeldifferenz zwischen den Randbedingungen im SAE-Körper verhältnismäßig klein gegenüber der Differenz zu beiden Messungen im Akustikraum bei Halbfreifeldbedingungen. Hier ist ein dominierender Einfluss des Fahrzeuginnenraumes zu erkennen und die Schalldruckpegel liegen bis zu 15 dB(A) oberhalb

denen im Akustikraum.

Zu Vergleichszwecken ist zusätzlich das Frequenzspektrum der Fahrzeugmessung aufgetragen. Im sehr tieffrequenten Bereich fällt auf, dass die Schalldruckpegel im Serienfahrzeug vergleichbar mit denen im Fahrzeugmodell sind. Hier liegt also eine gute Nachbildung durch das Fahrzeugmodell vor. In den Frequenzen bis 100 Hz liegt eine große Ortsabhängigkeit im Raum vor, wodurch die Pegel teilweise stark von denen im Serienfahrzeug abweichen. Im Frequenzbereich zwischen 200 und 500 Hz werden die Ergebnisse im Fahrzeugmodell gegenüber denen im Serienfahrzeug tendenziell unterschätzt, wobei die Werte im Fahrzeugmodell die Werte im Serienfahrzeug besser annähern als die Ergebnisse im Akustikraum. Zwischen 500 und 1000 Hz werden die Schalldruckpegel im Serienfahrzeug von allen Messungen überschätzt. Weiterhin auffällig ist, dass die Schalldruckpegel zwischen etwa 1000 und 2000 Hz nahezu unabhängig von der Konfiguration sind, d.h. weder von den Armaturen noch von der Fahrgastzelle maßgeblich beeinflusst werden. Im hochfrequenten Bereich ab 2000 Hz besteht eine große Abweichung zwischen den Messungen im Serienfahrzeug und der Komponentenmessung bzw. der Messung im reflektierend ausgekleideten SAE-Modell. Eine gute Annäherung wird durch den absorbierend ausgekleideten SAE-Körper bzw. durch die Akustikraummessung mit Armaturen erzielt.

Aus den Untersuchungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Ankopplung von Armaturen und eines Raumes einen nicht vernachlässigbaren Einfluss in Bezug auf die Wahrnehmung des Schallfeldes der Klimaanlage im Fahrzeuginnenraum hat. Der Einfluss wirkt sich insbesondere in den tiefen und hohen Frequenzbereichen aus.

### Psychoakustische Parameter

In vorausgegangenen Probandenstudien wurden die Lautheit und die Schärfe für die Bewertung der Geräuschqualität von Klimaanlage identifiziert [1, 2].

In Abbildung 5 ist die Lautheit über den Massenstrom für das Fahrzeugmodell in beiden Auskleidungsvarianten sowie für das Serienfahrzeug aufgetragen.

Die Lautheit nimmt mit steigendem Massenstrom progressiv zu, was eine überproportionale Verschlechterung der Geräuschqualität zur Folge hat. Die Steigung im reflektierend ausgekleideten Fahrzeugmodell („SAE\_reflektierend“) ist größer als im absorbierend ausgekleideten Modell („SAE\_absorbierend“), so dass bei hohen Massenströmen der Lautheitsunterschied zwischen den Grenzfällen der beiden Ausstattungsvarianten zunimmt. Die Ergebnisse für das Serienfahrzeug können erneut sehr gut durch das absorbierend ausgekleidete Fahrzeugmodell angenähert werden.

Die Schärfe ist in Abhängigkeit des Massenstroms in Abbildung 6 dargestellt. Wiederum ist ein positiver Zusammenhang der Schärfe mit dem Massenstrom erkennbar, wobei in diesem Fall ein degressiver Verlauf vorliegt.

Die Schärfe im reflektierend ausgekleideten SAE-Modell

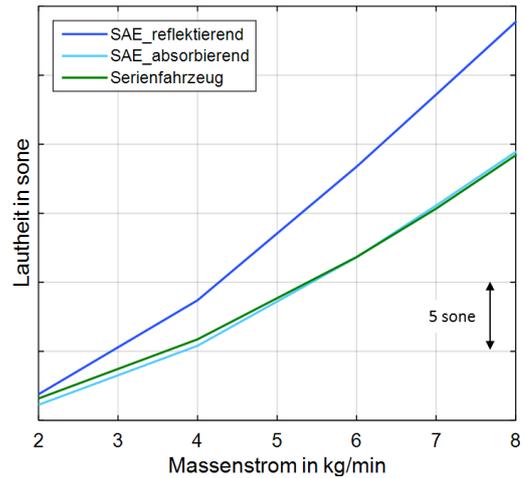


Abbildung 5: Lautheit über Massenstrom bei verschiedenen Konfigurationen an der Fahrerposition.

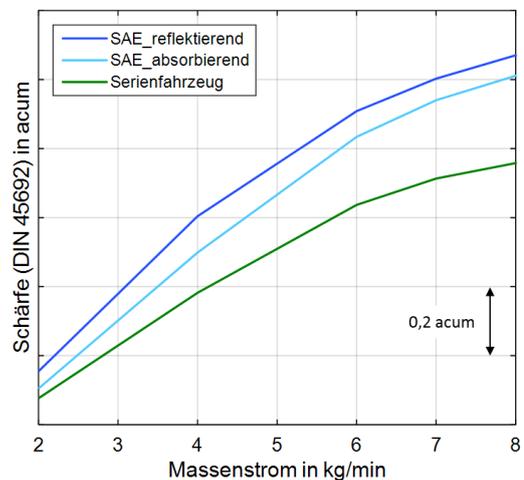
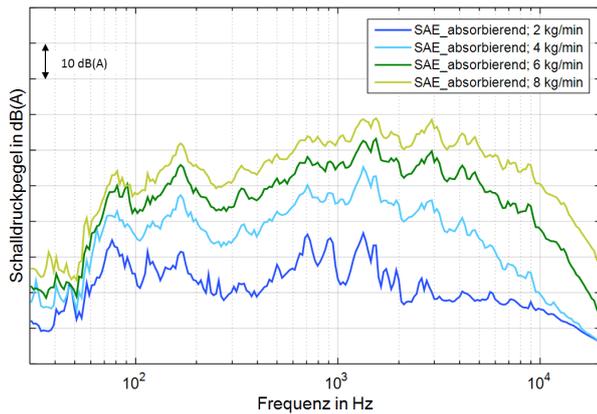


Abbildung 6: Schärfe über Massenstrom bei verschiedenen Konfigurationen an der Fahrerposition.

verläuft oberhalb dem Schärfeverlauf des reflektierend ausgekleideten Modell mit einem Abstand von ca. 0,05 - 0,1 acum. Die gemessene Schärfe im Serienfahrzeug weist jedoch eine deutlich geringere Steigung auf und wird somit durch beide Auskleidungsvarianten überschätzt.

Um den Verlauf der Lautheit und der Schärfe zu erklären, sind in Abbildung 7 die Frequenzspektren, gemessen an der Fahrerposition im absorbierend ausgekleideten SAE-Körper bei den Massenströmen 2, 4, 6 und 8 kg/min, visualisiert.

Es ist ersichtlich, dass alle Spektren einen qualitativ ähnlichen Verlauf aufweisen, jedoch mit steigendem Massenstrom eine Verschiebung zu höheren Schalldruckpegeln stattfindet. Weiterhin ist mit zunehmendem Massenstrom eine stärkere Anhebung der hochfrequenten Schallanteile erkennbar. Dieser resultiert aus den höheren Ausströmgeschwindigkeit bei höheren Massenströmen, was wiederum zu einer höheren Reynoldszahl führt. Es werden somit mehr Schallanteile aus der Turbulenz ge-



**Abbildung 7:** Frequenzspektren bei verschiedenen Massenströmen im Fahrzeugmodell (SAE Körper) bei absorbierender Auskleidung an der Fahrerposition.

neriert, die einen hochfrequenten Breitbandanteil liefern. Hierdurch lässt sich der progressive Verlauf der Lautheit erklären. Neben der Anhebung des Spektrums durch den höheren Massenstrom, nehmen die hochfrequenten Anteile überproportional zu. Der progressive Anstieg der Lautheit liegt demnach in der überproportionalen Anhebung der hohen Frequenzen begründet. Dies spiegelt sich direkt in dem Parameter Schärfe wider, der mit steigendem Massenstrom zunimmt.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurde das abgestrahlte Schallfeld in Abhängigkeit verschiedener Aufbauten untersucht. Es wurden Aufbauten unter Halbfreifeldbedingungen mit denen in einem Fahrzeugmodell (SAE-Körper) sowie mit Messungen im Serienfahrzeug verglichen. Für das Fahrzeugmodell wurden zwei Auskleidungsvarianten entsprechend der Grenzfälle gewählt: Zum einen wurde das Modell schallabsorbierend mit Schaumstoffen auskleidet zum anderen wurde es schallreflektierend gestaltet, indem es mit Stahlblechen ausgekleidet wurde. Es konnte gezeigt werden, dass das Absorptionsverhalten eines Serienfahrzeugs durch das Fahrzeugmodell nachbildbar ist. Dabei kann das Absorptionsverhalten und der Gesamtschalldruckpegel sehr gut durch das Fahrzeugmodell mit absorbierender Auskleidung angenähert werden. Die Ankopplung von Armaturen und eines Raumes in der Größe einer Fahrgastzelle hat einen signifikanten Einfluss auf das Frequenzspektrum, insbesondere aber in den hohen und tiefen Frequenzbereichen. Die Auswertung der relevanten psychoakustischen Parameter Lautheit und Schärfe zeigen jeweils eine Zunahme mit steigendem Massenstrom. Die Lautheitswerte können erneut gut durch das absorbierende Fahrzeugmodell angenähert werden, wobei die Werte für die Schärfe in beiden Auskleidungsvarianten überschätzt werden.

## Literatur

- [1] Hohls, S.; Biermeier, T.; Blaschke, R. & Becker, S. (2014), Psychoacoustic evaluation of HVAC noise, in Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow.
- [2] Hohls, S.; Biermeier, T.; Blaschke, R. & Becker, S. (2014), Psychoacoustic analysis of HVAC noise with equal loudness, in Proceedings of Internoise 2014, Melbourne.