

## Zusammenfassung Projekt

### „Auditive Virtuelle Realität als Werkzeug zur Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten“

|                                    |                                                                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ausführlicher Projekttitel:</b> | Auditive Virtuelle Realität als Werkzeug zur Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten |
| <b>Kurztitel/Akronym:</b>          | AVR-Mi                                                                                                |
| <b>Projektlaufzeit:</b>            | 01.12.2021 bis 30.11.2024                                                                             |

| Projektbeteiligte Einrichtungen                                                                              | Ansprechpartner                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Technische Universität Dresden,<br>Professur für Akustik und Haptik,<br>Helmholtzstraße 18,<br>01069 Dresden | Prof. Dr.-Ing. habil M. Ercan Altinsoy |

## Inhaltsverzeichnis

|   |                                                                                    |   |
|---|------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 0 | Abstract .....                                                                     | 2 |
| 1 | Projektziele, Projektablauf, Projektergebnisse und deren potentielle Nutzung ..... | 2 |

Autoren: Tom Wühle, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

Version: 1.1; 29.09.2025; (Link zu Methodenempfehlung ergänz.)

## 0 Abstract

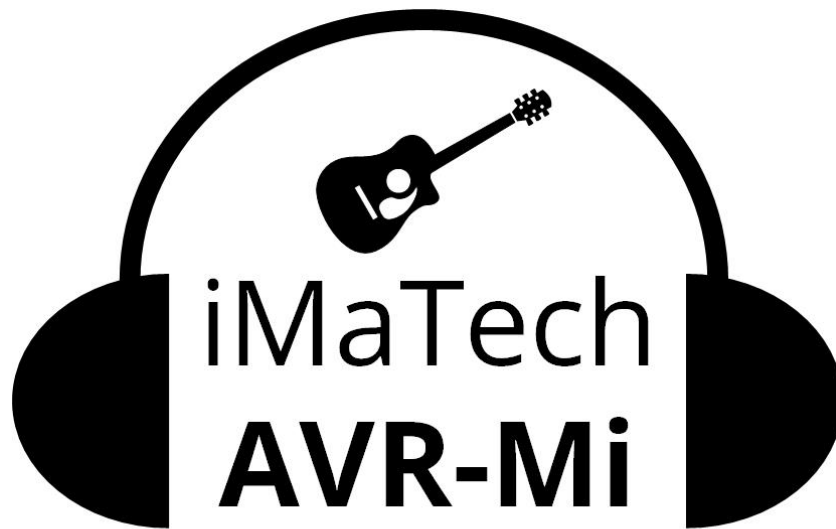
Das Projekt AVR-Mi wurde an der Technischen Universität Dresden durch die Professur für Akustik und Haptik durchgeführt. Übergreifendes Ziel von AVR-Mi war es, die Handwerksbetriebe im Musikinstrumentenbau in die Lage zu versetzen, Techniken der auditiven virtuellen Realität zu erschließen und gezielt zur Etablierung von virtuellen Produktvermarktungs- oder Produktentwicklungsprozessen nutzen zu können. Konkret sollte dafür untersucht werden, inwiefern die Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten mit Hilfe von Techniken der auditiven virtuellen Realität in virtuelle Szenarien überführt werden kann. Dabei stand die Verwendung kopfhörerbasierter Verfahren im Vordergrund. Mithilfe von psychoakustischen Wahrnehmungsuntersuchungen wurde am Beispiel Gitarre untersucht, inwiefern es möglich ist auditive virtuelle Realitäten realitätsnah genug zu gestalten, um eine verlässliche und reproduzierbare Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten zu erreichen. Ebenfalls wurde der Einfluss der Komplexität der virtualisierten auditiven Szene auf die erreichbare Realitätsnähe betrachtet. Als ausgewählte Ergebnisse wurden dabei neue Erkenntnisse zum Vergleich von Hör- und Spieltest erlangt. Darüber hinaus wurden neue Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Realitätsnähe bei der virtuellen Beurteilung in Abhängigkeit von der Methode zur Erzeugung der jeweiligen auditiven virtuellen Realität erreicht werden kann. Weiterhin wurden neue Erkenntnisse zur Rolle der Kopfhörerentzerrung bei der Erzeugung der auditiven virtuellen Realität gewonnen. Schließlich liegen Empfehlungen vor, welche Methoden zur Erzeugung der auditiven virtuellen Realität für bestimmte Anforderungsprofile der virtuellen Klangbeurteilung geeignet sind.

## 1 Projektziele, Projektablauf, Projektergebnisse und deren potentielle Nutzung

Die Ziele und der Ablauf des Projektes AVR-Mi wurden im zugehörigen Sachbericht dargestellt. Ebenso wurden darin die Ergebnisse von AVR-Mi und deren potentielle Nutzung diskutiert. Der Sachbericht kann unter dem folgenden Link dauerhaft und ohne Zugangsbeschränkung abgerufen werden: <https://doi.org/10.34657/18696>

Die Methodenempfehlung findet sich unter folgendem Link:

[https://gitlab.hrz.tu-chemnitz.de/aha-tud/avr-mi\\_methodenempfehlung](https://gitlab.hrz.tu-chemnitz.de/aha-tud/avr-mi_methodenempfehlung)



# Sachbericht

Projekttitel: **Auditive Virtuelle Realität als Werkzeug zur Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten**

Projektkurztitel: AVR-Mi

Projektlaufzeit: 01.12.2021 bis 30.11.2024

Förderkennzeichen: 03WIR0412

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil M. Ercan Altinsoy

Technische Universität Dresden,  
Professur für Akustik und Haptik,  
Helmholtzstraße 18,  
01069 Dresden

Autoren: Tom Wühle, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

# Teil I - Kurzbericht

## 1 Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich technischer Stand an den angeknüpft wurde

Die Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten ist in vielfältigen Anwendungskontexten des Musikinstrumentenbaus von Bedeutung. Bei der Produktvermarktung betrifft das z. B. das Testen der Instrumente durch Kund\*innen. Bisher ist dafür meist das reale Vorhandensein des zu beurteilenden Instrumentes im Umfeld der beurteilenden Person notwendig. In manchen Situationen ist dies jedoch nicht möglich, wie z. B. bei dem initialen Schritt der Kund\*innenakquise oder vor dem Hintergrund eines oft national bzw. international gestreuten Kund\*innenkreises. Bei dieser Problematik setzt AVR-Mi an. Ein möglicher Lösungsansatz ist hier die Nutzung auditiver virtueller Realität. Mit der dadurch entstehenden Aufhebung der Notwendigkeit des realen Vorhandenseins von Instrumenten zur Beurteilung von deren Klang, ergeben sich neben der Vermarktung auch neue Möglichkeiten für die Entwicklung der Instrumente, etwa im Rahmen eines Zielklangdesigns, das ggf. auch interaktiv mit den Kund\*innen erfolgen kann.

Übergreifendes Ziel von AVR-Mi war es, die Handwerksbetriebe im Musikinstrumentenbau in die Lage zu versetzen, Techniken der auditiven virtuellen Realität zu erschließen und gezielt zur Etablierung von virtuellen Produktvermarktungs- oder Produktentwicklungsprozessen nutzen zu können. Konkret sollte dafür untersucht werden, inwiefern die Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten mit Hilfe von Techniken der auditiven virtuellen Realität in virtuelle Szenarien überführt werden kann. Dabei stand die Verwendung kopfhörerbasierter Verfahren im Vordergrund.

Eine besondere Herausforderung bei der Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten stellt die meist komplexe Zusammensetzung des Instrumentenklanges dar. Um die teils kleinen, aber oft entscheidenden Details darzustellen, muss der virtualisierte Klang daher ausreichend gut aufgelöst sein und darf gleichzeitig durch die Virtualisierung möglichst wenig verändert werden. Inwiefern ist es vor diesem Hintergrund möglich, entsprechende auditive virtuelle Realitäten realitätsnah genug zu gestalten, um eine verlässliche und reproduzierbare Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten zu erreichen? Welchen Einfluss hat dabei die Komplexität der virtualisierten auditiven Szene auf die erreichbare Realitätsnähe bei der Klangbeurteilung? Diese Fragen stellen den Schwerpunkt von AVR-Mi dar. Sie sollten mit Hilfe von psychoakustischen Wahrnehmungsuntersuchungen beantwortet werden. Die Untersuchungen sollten beispielhaft für die Gitarre durchgeführt werden.

## 2 Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn von AVR-Mi wurden konzeptionelle Arbeiten, wie die Schaffung eines Instrumentenpools, die Festlegung geeigneter Deskriptoren für Klangeigenschaften, oder die Festlegung geeigneter AVR-Methoden durchgeführt. Im nächsten Schritt von AVR-Mi erfolgte die Schaffung der notwendigen Datenbasis in Form von akustischen Aufnahmen der Instrumente. Im Hauptteil von AVR-Mi wurde zunächst eine Referenzbeurteilung der Klangeigenschaften ausgewählter Instrumente im Rahmen von realen Hör- und Spieltests durchgeführt. Daraufhin erfolgten umfangreiche virtuelle Beurteilungen der Klangeigenschaften mit virtualisierten auditiven Szenen mit unterschiedlicher Komplexität. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der virtuellen Beurteilungen mit der Referenzbeurteilung wurde untersucht, mit welchem Aufwand und mit welchen Methoden zur Erstellung der auditiven virtuellen Realität sich eine virtuelle Beurteilung der Klangeigenschaften bis zu welcher Realitätsnähe realisieren lässt. Auf Basis dieser Kenntnisse wurden zum Abschluss von AVR-Mi schließlich Empfehlungen abgeleitet, welche Methoden für welche Anforderungsprofile, z. B. für eine vergleichende Klangbeurteilung im Rahmen des Produktmarketings, geeignet sind.

## 3 Wesentliche Ergebnisse und ggf. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Es liegen umfangreiche akustische Aufnahmen mehrerer Stahlsaiten- und Konzertgitarren in verschiedenen akustischen Umgebungsbedingungen und mit mehreren Aufnahmetechniken vor. Darüber hinaus liegen Messungen zu wesentlichen akustischen Eigenschaften der Instrumente vor.

Im Rahmen der Referenzbeurteilung wurden neue Erkenntnisse zum Vergleich von Hör- und Spieltest erlangt. Weiterhin wurden neue Erkenntnisse zur Rolle der Dämpfung von Gitarrendecken in Bezug auf physikalische und perzeptive Aspekte des Klangs einer Stahlsaitengitarre gewonnen.

Im Rahmen des Vergleichs der virtuellen Beurteilungen mit der Referenzbeurteilung wurden neue Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Realitätsnähe bei der virtuellen Beurteilung in Abhängigkeit von der Methode zur Erzeugung der jeweiligen auditiven virtuellen Realität erreicht werden kann. Weiterhin wurden neue Erkenntnisse zur Rolle der Kopfhörerentzerrung bei der Erzeugung der auditiven virtuellen Realität gewonnen.

Es liegen Empfehlungen vor, welche Methoden zur Erzeugung der auditiven virtuellen Realität für bestimmte Anforderungsprofile der virtuellen Klangbeurteilung geeignet sind.

# Teil II – Ausführliche Darstellung

## 1 Durchgeführte Arbeiten

### 1.1 Konzeption

Zunächst wurde die bereits im Rahmen der Antragstellung begonnene Implementierung eines projektbegleitenden Ausschusses als Teilelement der projektbegleitenden Evaluation fortgesetzt. Dieser setzte sich unter anderem aus Musikinstrumentenmachern und Mitgliedern von Forschungseinrichtungen aus Sachsen, darunter auch aus dem westsächsischen Vogtland, zusammen. Ein Ausschusstreffen mit dem Themenschwerpunkt „Konzeption“ fand statt. Ein Ergebnis dieses Treffens war die Entscheidung im Rahmen von AVR-Mi nicht, wie ursprünglich geplant, ausschließlich Stahlsaitengitarren zu betrachten, sondern auch Konzertgitarren mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Ein weiteres Ergebnis war die Gewinnung von Ausschussmitgliedern als Leihgeber für die Schaffung des Instrumentenpools.

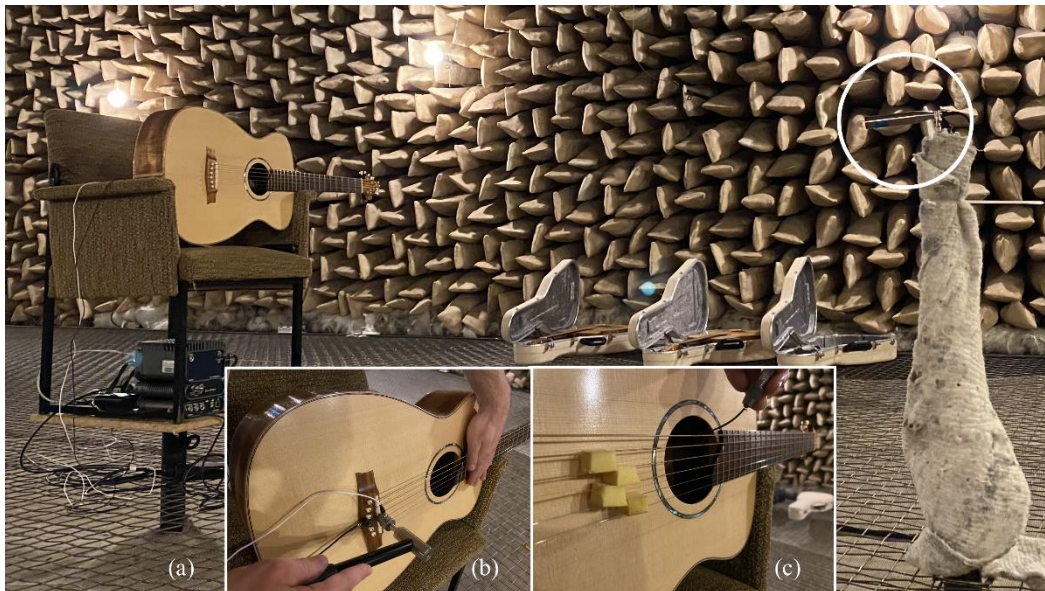


Bild 1 (a) Aufbau für die akustischen Messungen der Gitarren. Das markierte Messmikrofon wurde für die Aufzeichnung des nach der Anregung abgestrahlten Schalls genutzt. (b) Anklopfen am Steg mit Hilfe eines Impulshammers mit Kraftsensor. (c) Anzupfen mit Hilfe einer Vorrichtung aus Federstahl. Entnommen aus [3]

Im Rahmen der konzeptionellen Arbeiten wurde ein Instrumentenpool geschaffen. Dieser umfasste fünf Konzertgitarren und sieben Stahlsaitengitarren, die sich bezüglich verschiedener Parameter wie z. B. Bauart oder Materialkomposition unterscheiden. Durch akustische Messungen wurde für alle Instrumente wurde das Übertragungsverhalten nach Anklopfen charakterisiert. Für eine Gruppe von Stahlsaitengitarren (vgl. Abschnitt 1.3 „Gruppe 1“) wurde zudem das Ausklingverhalten nach Anzupfen charakterisiert. Bild 1 zeigt den verwendeten Messaufbau. Weitere Details zu durchgeführten Messungen und verschiedene Messergebnisse finden sich in [3] am Beispiel der Gruppe von Stahlsaitengitarren.

Im Rahmen der konzeptionellen Arbeiten wurde weiterhin eine Auswahl geeigneter Merkmale zur Beschreibung von Klangeigenschaften in den Referenzbeurteilungen bzw. virtuellen Beurteilungen von AVR-Mi festgelegt. Diese Auswahl wurde im Rahmen der projektbegleitenden Evaluation verfeinert. Tabelle 1 listet die ausgewählten Klangmerkmale auf. Sie wurden adaptiert von Gore et al.<sup>1</sup> und umfassen Lautheit und sowohl spektrale, als auch temporale Aspekte und sollen so einen differenzierten Einblick in den Instrumentenklang ermöglichen.

Tabelle 1 Klangmerkmale und Definitionen (vgl. [1, 3]).

| Klangmerkmal    | Definition                                                                                        |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lautheit        | ... beschreibt wie laut der Gitarrenklang ist.                                                    |
| Tiefenanteil    | ... beschreibt wie stark der tiefe Frequenzbereich im Gitarrenklang ausgeprägt ist.               |
| Mittenanteil    | ... beschreibt wie stark der mittlere Frequenzbereich im Gitarrenklang ausgeprägt ist.            |
| Höhenanteil     | ... beschreibt wie stark der hohe Frequenzbereich im Gitarrenklang ausgeprägt ist.                |
| Ausgewogenheit  | ... beschreibt wie ausgewogen der tiefe, mittlere und hohe Frequenzbereich im Gitarrenklang sind. |
| Ausklingsdauer  | ... beschreibt wie stark der Gitarrenklang nach dem Schlagen oder Zupfen ausklingt.               |
| Obertonreichtum | ... beschreibt wie stark die Anzahl und Amplituden der Obertöne ausgeprägt sind.                  |

Ein weiterer Aspekt der konzeptionellen Arbeiten war die Festlegung geeigneter AVR-Methoden für die Verwendung im Rahmen der virtuellen Beurteilungen. Dabei wurden Anforderungen, welche sich hinsichtlich der Nutzbarkeit im Umfeld der Handwerksbetriebe ergeben, wie beispielsweise die Anwendbarkeit mit einem Standard-PC oder ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis berücksichtigt. Im Rahmen von Voruntersuchungen, beispielsweise hinsichtlich der Anforderungen an das Quellmaterial und geeigneter Aufnahmeverfahren, wurde diese Auswahl verfeinert. Die ausgewählten Methoden erfordern Aufnahmen mit Mikrofonen aus drei Kategorien: Standardmikrofone, binaurale Mikrofone und Schallfeldmikrofone. Abhängig von der Methode sind darüber hinaus Signalverarbeitungsschritte von der Entzerrung bis hin zur virtuellen Raumkodierung erforderlich.

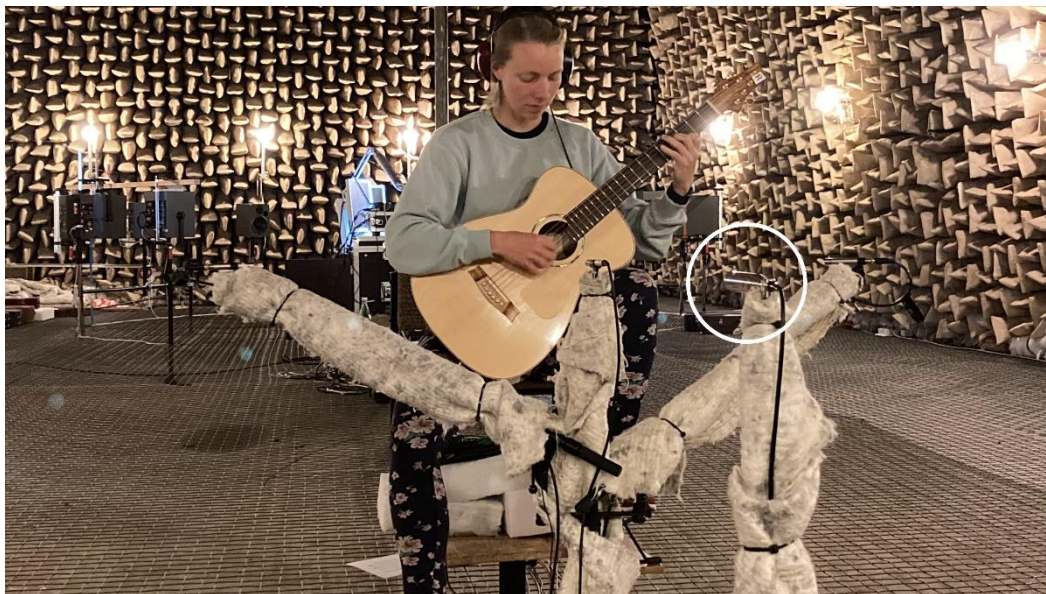
## 1.2 Aufnahmen

Im Rahmen der Aufnahmen sollte unter anderem ein binaurales Mikrofon verwendet werden. Professionelle binaurale Mikrofone sind jedoch nur in geringen Varianten und meist zu einem sehr hohen Preis verfügbar. Sie eignen sich daher möglicherweise nur eingeschränkt zum Einsatz im handwerklichen Umfeld. Um diese Einschränkung aufzuheben sollte in AVR-Mi zunächst eine vereinfachte Konfiguration eines binauralen Mikrofons auf Basis günstiger Einzelkomponenten geschaffen werden. In diesem Kontext wurden Prototypen einfacher Ohrkanalmikrofone aufgebaut und deren akustische

<sup>1</sup> Gore, T.; Gilet, G. Contemporary Acoustic Guitar Design and Build, 2nd ed.; Trevor Gore: Cottage Point, NSW, Australia, 2016; Volume 1.

Eigenschaften charakterisiert. Im Rahmen der projektbegleitenden Evaluation wurde daraufhin jedoch entschieden, das einfache binaurale Mikrofon nicht, wie ursprünglich geplant, aus einzelnen Komponenten aufzubauen. Um eine potentielle Anwendbarkeit im Umfeld von Handwerksbetrieben im Musikinstrumentenbau möglichst niederschwellig zu gestalten, wurde stattdessen ein einfacher, kommerziell verfügbarer, Kopfhörermessadapter<sup>2</sup> als Basis für das einfache binaurale Mikrofon beschafft, getestet und schließlich im Rahmen der Aufnahmen verwendet. Im weiteren Verlauf von AVR-Mi wurde dieser einfache Kopfhörermessadapter durch die Schaffung spezieller Entzerrungsfiler als einfaches binaurales Mikrofon nutzbar gemacht (vgl. Abschnitt 1.4).

Für die Aufnahmen wurden zwei verschiedene akustische Umgebungsbedingungen gewählt: Reflexionsarme Umgebung und Studioumgebung. Die Aufnahmen in reflexionsarmer Umgebung fanden im reflexionsarmen Raum der Professur für Akustik und Haptik statt. Bild 2 zeigt den verwendeten Aufbau. Die Aufnahmen mit dem markierten Messmikrofon wurden im Rahmen der Referenzbeurteilung verwendet. Es wurden weitere Messmikrofone an unterschiedlichen Positionen um das Instrument platziert, um die zugehörigen Aufnahmen in Kombination mit speziellen Signalverarbeitungsschritten gegebenenfalls zusätzlich im Rahmen der virtuellen Beurteilungen verwenden zu können.



*Bild 2 Aufbau für die Aufnahmen in reflexionsarmer Umgebung im reflexionsarmen Raum der Professur für Akustik und Haptik. Die Aufnahmen mit dem markierten Messmikrofon wurden im Rahmen der Referenzbeurteilung verwendet. Entnommen aus [3]*

Die Aufnahmen in Studioumgebung wurden in einem Studioraum der Professur für Akustik und Haptik durchgeführt, dessen akustische Eigenschaften im Vorfeld durch akustische Messungen dokumentiert wurden. Vergleichbare akustische Eigenschaften könnten beispielsweise auch in einem Showroom eines Handwerksbetriebes im Musikinstrumentenbau vorliegen. Bild 3 zeigt den verwendeten Aufbau. Gemäß den festgelegten AVR-Methoden wurden verschiedene Standardmikrofone, binaurale

<sup>2</sup> <https://www.minidsp.com/products/acoustic-measurement/ears-headphone-jig> (abgerufen am 20.05.2025)

Mikrofone und Schallfeldmikrofone verwendet. Die zugehörigen Aufnahmen stellten die Basis zur Erstellung der virtualisierten Szenen für die virtuellen Beurteilungen dar.



*Bild 3 Aufbau für die Aufnahmen in Studioumgebung in einem Studioraum der Professur für Akustik und Haptik. Die Aufnahmen ausgewählter Standardmikrofone, binauraler Mikrofone bzw. Schallfeldmikrofone wurden im Rahmen der virtuellen Beurteilungen verwendet (vgl. Bild 9).*

Für das Anspiel der Instrumente während den Aufnahmen wurde eine professionelle, akademische ausgebildete Musikerin engagiert. Insgesamt wurden für das Anspiel drei Sequenzen ausgewählt um variierende Stilrichtungen und entsprechend variierende Anregungen der Instrumente abzudecken: Strumming, Para Gitarra, und Blues. Bild 4 zeigt die zugehörigen Noten und Tabulaturen.

Der resultierende Datensatz umfasst für jedes der 12 Instrumente des Instrumentenpools insgesamt zwei Aufnahmen je Sequenz, für jede der beiden akustischen Umgebungen und jede der dort verwendeten Aufnahmetechniken.

$\text{♩} = 70$



mf

T  
A  
B

Strumming

$\text{♩} = 70$



let ring

mf

T  
A  
B

Para Guitarra

Slow Blues  $\text{♩} = 80$  ( $\text{♩} = \text{♩}$ )



let ring

mf

T  
A  
B

Blues

Bild 4 Noten und Tabaturen der Sequenzen für die Aufnahmen

### 1.3 Referenzbeurteilung

Basierend auf der, im Rahmen der projektbegleitenden Evaluation getroffenen, Entscheidung neben Stahlsaitengitarren auch Konzertgitarren mit in die Betrachtungen von AVR-Mi einzubeziehen, wurden aus dem Instrumentenpool zunächst zwei Instrumentengruppen zusammengestellt, für die jeweils eine separate Referenzbeurteilung durchgeführt wurde. Gruppe 1 umfasste drei Stahlsaitengitarren desselben Modells, die sich durch die Dämpfung ihres Deckenholzes unterschieden und sonst identisch waren. Gruppe 2 umfasste fünf Konzertgitarren, die sich in ihren akustischen Eigenschaften zum Beispiel durch die Art ihrer Konstruktion oder durch die verwendeten Materialien unterschieden. Gruppe 1 diente zur Repräsentation des Anwendungsfalls der Beurteilung von Instrumenten mit einem gering streuenden Qualitätsspektrum, wie er beispielsweise im Rahmen der Fertigung ein und desselben Modells durch eine\*n Handwerksmeister\*in auftritt. Gruppe 2 diente zur Repräsentation des Anwendungsfalls der Beurteilung von Instrumenten mit einem stärker streuenden Qualitätsspektrum, wie er beispielsweise im Rahmen der Fertigung verschiedener Modelle durch eine\*n oder mehrere Handwerksmeister\*innen auftritt.

Die Referenzbeurteilung erfolgte im Rahmen eines Hörtests und eines Spieltests. Dabei wurden professionelle, akademisch ausgebildete Musiker\*innen, Musikinstrumentenbauer\*innen, sowie ambitionierte Hobbymusiker\*innen mit mehrjähriger Erfahrung einbezogen. In beiden Tests wurden sowohl die Präferenz als auch die ausgewählten Merkmale des Gitarrenklangs beurteilt (vgl. Tabelle 1). Hör- und Spieltest wurden in demselben Studioraum der Professur für Akustik und Haptik durchgeführt, in dem auch die Aufnahmen für die späteren virtuellen Beurteilungen erfolgten.

Im Hörtest wurde ein reales Anspiel des jeweiligen Instruments durch eine musizierende Person nachgebildet, die sich vor der beurteilenden Person befindet. Dazu wurde die zugehörige Aufnahme des Anspiels aus reflexionsarmer Umgebung über einen Studiolausprecher wiedergegeben, welcher vor der beurteilenden Person platziert war. Die Wiedergabe der Anspiele und die Datenakquise erfolgten PC-gestützt. Dafür wurde eine Versuchsplattform auf Basis des webMUSHRA<sup>3</sup>-Frameworks erstellt, das für die Verwendung im Rahmen der Referenzbeurteilungen von AVR-Mi abgewandelt wurde. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau für den Hörtest. Bild 6 zeigt die verwendete graphische Nutzeroberfläche beispielhaft für den Hörtest mit den Stahlsaitengitarren. In diesem Hörtest wurde die Sequenz „Strumming“ genutzt (vgl. Abschnitt 1.2). Im Hörtest mit den Konzertgitarren wurde die Sequenz „Para Gitarra“ verwendet (vgl. Abschnitt 1.2).

---

<sup>3</sup> Schoeffler, M.; Bartoschek, S.; Stöter, F.R.; Roess, M.; Westphal, S.; Edler, B.; Herre, J. webMUSHRA—A Comprehensive Framework for Web-based Listening Tests. J. Open Res. Softw. 2018, 6, 1–8.

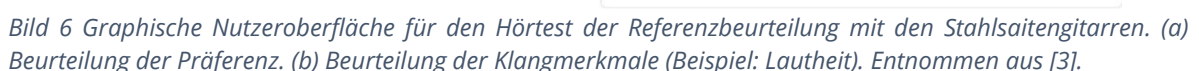
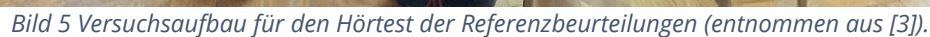


Bild 7 zeigt als beispielhaftes Ergebnis die Beurteilung der Präferenz für jede Gitarre der Referenzbeurteilung mit den Konzertgitarren. Die Präferenzurteile in Hörtest und

Spieltest unterscheiden sich jeweils zwischen den Gitarren und sind über einen weiten Wertebereich verteilt. Zwischen den beiden Testformen lagen die Urteile meist in guter Übereinstimmung. Neben einem oft gleichen Ranking zeigte sich häufig sogar eine Überlappung der Konfidenzintervalle. Für eine der untersuchten Gitarren (G3) trat jedoch eine deutliche Abweichung zwischen den beiden Testformen auf. Diese Ergebnisse unterstützen die Anwendbarkeit von Hörtests im Umfeld von Handwerksbetrieben im Musikinstrumentenbau, auch wenn sie Spieltests nicht vollständig ersetzen können.

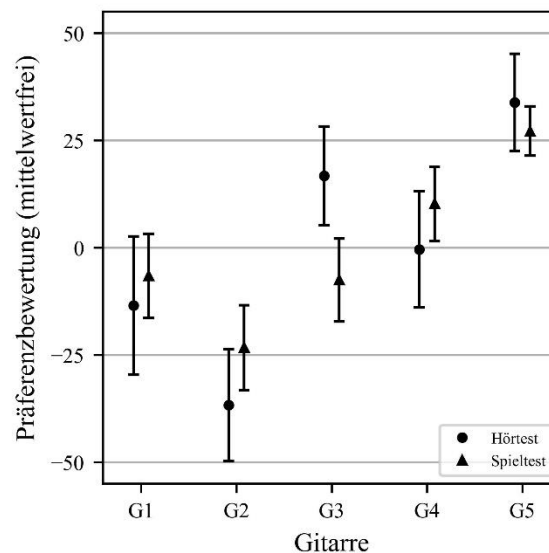
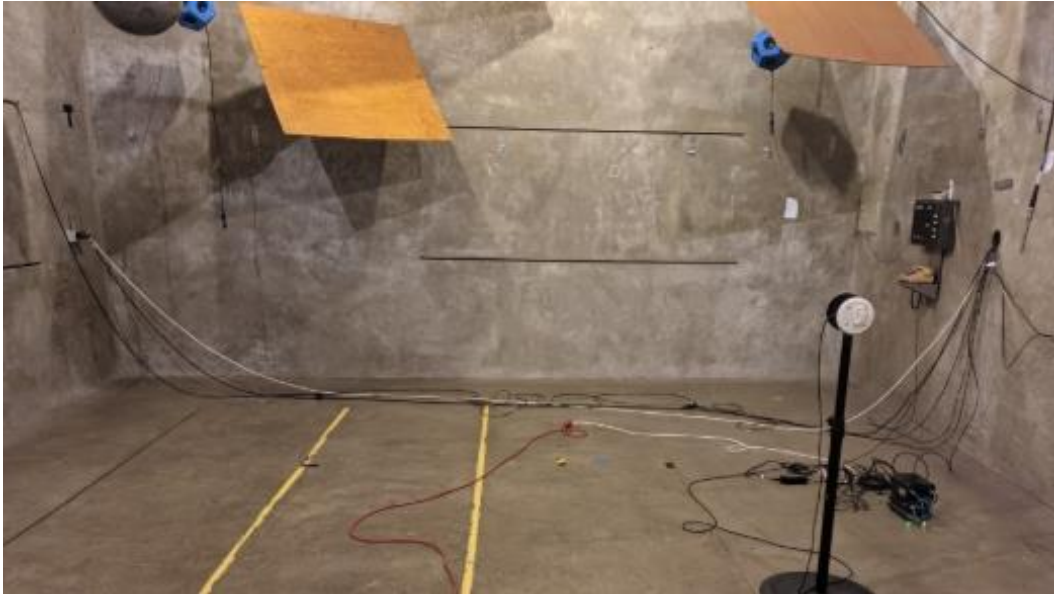


Bild 7 Mittelwert und 95% Konfidenzintervall der Beurteilung der Präferenz für jede Konzertgitarre in Hörtest und Spieltest. Entnommen aus [1].

## 1.4 Virtuelle Beurteilungen

Begleitend zu den Arbeiten in AVR-Mi wurden die akustischen Eigenschaften des Kopfhörermessadapters charakterisiert. Dazu wurden unter anderem umfassende akustische Messungen im freien und diffusen Schallfeld im Vergleich mit professionellen binauralen Mikrofonen durchgeführt. Bild 8 zeigt beispielhaft den Aufbau der Messungen im diffusen Schallfeld, die im Hallraum der Professur für Akustik und Haptik durchgeführt wurden. Um den Kopfhörermessadapter auf Basis der gesammelten Messdaten zu entzerren wurden zunächst verschiedene Methoden recherchiert, implementiert und untersucht. Daraufhin wurde ein Satz spezieller Entzerrungsfiler erstellt, um den Kopfhörermessadapter als einfaches binaurales Mikrofon nutzbar zu machen und im Umfeld der Handwerksbetriebe anwenden zu können. Diese Entzerrungsfiler wurden bei der Erstellung der virtualisierten Szenen für die virtuellen Beurteilungen genutzt<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Gegen Ende von AVR-Mi wurde eine Application Note zur Nutzung des einfachen Kopfhörermessadapters für binaurale Aufnahmen aufgefunden (<https://www.minidsp.com/applications/headphone-equalization/binaural-recording-with-ears>, abgerufen am 22.10.2024). Darin werden unter anderem Parameter eines Kerbfilters zur Entzerrung angegeben. Der Umfang und Präzisionsgrad dieses Entzerrungsfilters, sowie der zugrundeliegenden Messungen, ist im Vergleich zu dem in AVR-Mi geschaffenen Satz Entzerrungsfiler deutlich geringer. Dennoch unterstreicht die aufgefundene Application Note das Potential des einfachen Kopfhörermessadapters als einfaches binaurales Mikrofon.



*Bild 8 Aufbau für die Messungen zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften des einfachen Kopfhörermessadapters im diffusen Schallfeld im Hallraum der Professur für Akustik und Haptik.*

Anhand der Ergebnisse der Referenzbeurteilung wurden zunächst die Gruppe der Konzertgitarren als Basis für die virtuellen Beurteilungen ausgewählt, da diese im Vergleich zu den Stahlsaitengitarren ein breiteres Präferenzspektrum aufweisen und so potentielle Unterschiede zwischen virtuellen Beurteilungen auf Basis verschiedener AVR Methoden leichter erkannt werden können. Unter Nutzung der Aufnahmen mit den Konzertgitarren aus dem Studioraum wurden daraufhin, gemäß den festgelegten AVR-Methoden, virtualisierte Szenen mit einem breiten Komplexitätsspektrum von niedrig (z. B. die ausschließliche Nutzung einer Monoaufnahme) bis hoch (z. B. die Kombination von verschiedenen Mikrofonaufnahmen mit teils mehrstufiger virtueller Quell- bzw. Raumkodierung) erstellt. Im Rahmen von Vorversuchen wurden aus diesem breiten Spektrum repräsentative Komplexitätsstufen und somit deren zugrundeliegende AVR-Methoden für die Durchführung der virtuellen Beurteilung ausgewählt. Dabei wurde ein Expertengremium der Professur für Akustik und Haptik mit Erfahrung im Bereich der räumlichen Audiowiedergabe einbezogen. Insgesamt wurden sieben AVR-Methoden ausgewählt. Sie weisen ein breites Komplexitätsspektrum auf und basieren auf fünf Aufnahmetechniken mit Mikrofonen aus den Kategorien Standardmikrofone (MONO, ORTF), binaurale Mikrofone (HATS, simpAH) und Schallfeldmikrofone (SFLD), die mit verschiedenen Signalverarbeitungsschritten kombiniert wurden. Bild 9 fasst die ausgewählten Methoden schematisch zusammen. Eine Diskussion und ein Vergleich der der Methoden finden sich in [4].

Weiterhin wurden aus den fünf Konzertgitarren drei Instrumente für die Durchführung der virtuellen Beurteilungen ausgewählt, welche die Ränder und die Mitte des im Rahmen der Referenzbeurteilung ermittelten Präferenzspektrums bilden und eine hohe Übereinstimmung in den zugehörigen Beurteilungen zwischen Hörtest und Spieltest aufweisen.

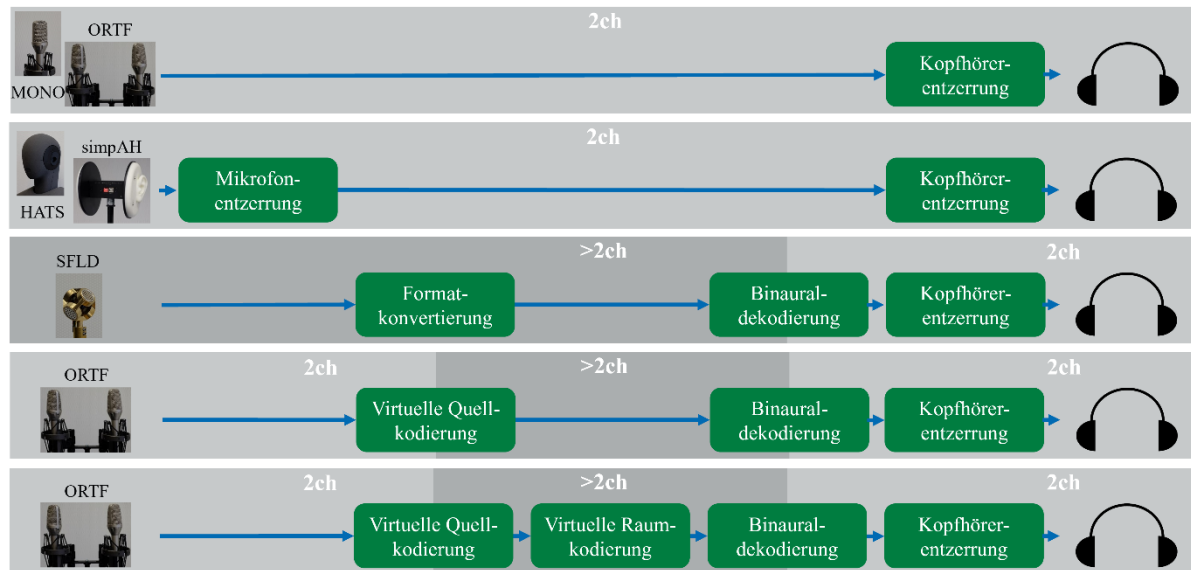


Bild 9 Schematische Darstellung von Signalverarbeitungsverfahren zur Umsetzung einer virtuellen Klangbeurteilung. Die zugrundeliegende Aufnahmetechnik ist jeweils links angegeben. Die oberen beiden Verfahren werden mit jeweils zwei verschiedenen Aufnahmetechniken kombiniert. Somit ergeben sich insgesamt sieben AVR-Methoden. (Die abgebildeten Mikrofone stellen mögliche Ausführungsvarianten dar). Entnommen aus [4].

Die virtuellen Beurteilungen erfolgten im Rahmen von Hörtests. Dabei wurden professionelle, akademisch ausgebildete Musiker\*innen, Musikinstrumentenbauer\*innen, sowie ambitionierte Hobbymusiker\*innen mit mehrjähriger Erfahrung einbezogen. Die Hörtests wurden in einem Laborraum der Professur für Akustik und Haptik durchgeführt. Die virtualisierten Szenen wurden über Kopfhörer wiedergegeben. Die Wiedergabe und die Datenakquise erfolgten PC-gestützt. Dafür wurde eine Versuchsplattform auf Basis des webMUSHRA<sup>3</sup>-Frameworks erstellt, das für die Verwendung im Rahmen der virtuellen Beurteilungen von AVR-Mi abgewandelt wurde. Bild 10 zeigt den Versuchsaufbau für die virtuellen Beurteilungen. Die graphische Nutzeroberfläche war dabei ähnlich zu Bild 6 (b). Wie in der zugehörigen Referenzbeurteilung mit den Konzertgitarren, wurde im Rahmen der virtuellen Beurteilungen die Sequenz „Para Gitarra“ verwendet (vgl. Abschnitt 1.2).

Im ersten Schritt der virtuellen Beurteilungen wurde der verwendete Kopfhörer, und damit die zugehörige Entzerrung, für alle AVR-Methoden konstant gehalten und ein generischer Entzerrungsfilter verwendet. Es wurde sowohl die Präferenz des Gitarrenklangs als auch die Realitätsnähe der zugrundeliegenden akustischen Szene im Hinblick auf das Beurteilungsszenario „Demonstration einer Gitarre im Showroom“ beurteilt. Dieses Szenario wurde den beurteilenden Personen schriftlich, sowie unter Nutzung eines Fotos verdeutlicht.



Bild 10 Versuchsaufbau für die virtuellen Beurteilungen

Bild 11 zeigt als beispielhaftes Ergebnis die Beurteilung der Präferenz für die Konzertgitarren und jede AVR-Methode. Über alle AVR-Methoden gemittelt ergibt sich zunächst die gleiche Rangordnung zwischen den untersuchten Konzertgitarren wie in der Referenzbeurteilung. Es ist jedoch erkennbar, dass Unterschiede zwischen den Präferenzbeurteilungen mit den einzelnen AVR-Methoden bestehen. Um die Realitätsnähe der Präferenzbeurteilung mit den jeweiligen AVR-Methoden aus der virtuellen Beurteilung zu beurteilen wurde untersucht inwiefern diese Präferenzbeurteilungen mit der Präferenzbeurteilung aus der Referenzbeurteilung übereinstimmen. Hierfür wurde unter anderem das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  betrachtet. Mit drei AVR-Methoden wurde hierbei ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 0,95 erreicht, was eine hohe Übereinstimmung bedeutet: simpAH, ORTF (1st) und SFLD (1st).

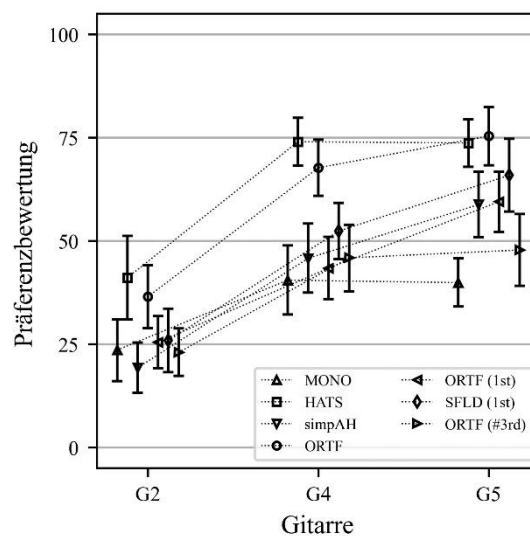
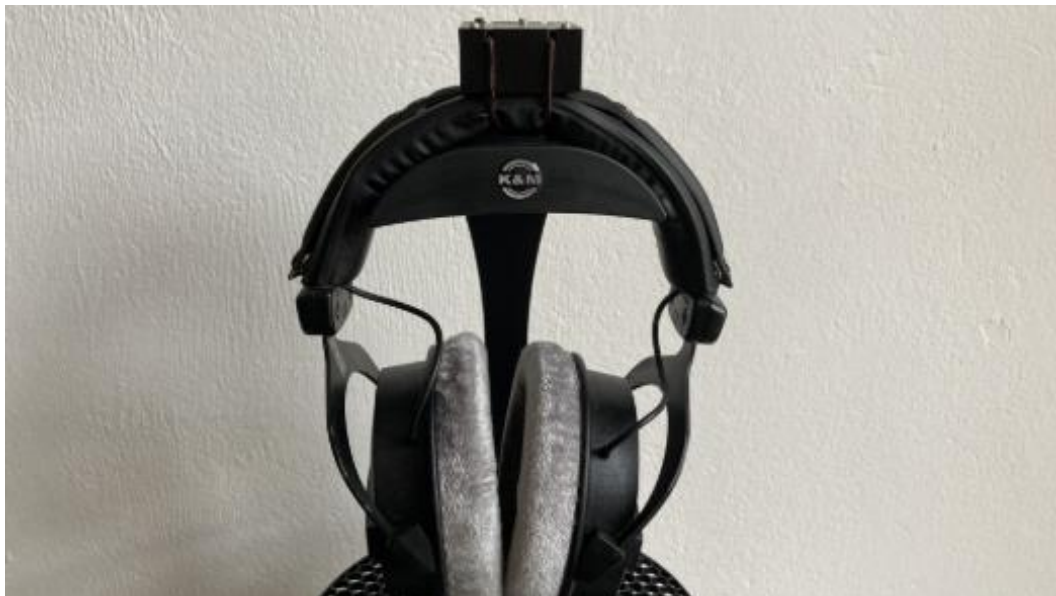


Bild 11 Mittelwert und 95% Konfidenzintervall der Beurteilung der Präferenz der ausgewählten Konzertgitarren mit den verschiedenen AVR-Methoden.

Im zweiten Schritt der virtuellen Beurteilungen wurden ausschließlich die drei AVR-Methoden betrachtet, bei deren Präferenzbeurteilung eine hohe Übereinstimmung mit der Referenzbeurteilung erreicht wurde (simpAH, ORTF (1st), SFLD (1st)). Für diese Methoden wurde nun der Kopfhörer bzw. die verwendete Kopfhörerentzerrung als Einflussfaktor untersucht. Von Bedeutung im Rahmen von AVR-Mi ist hierbei vor allem die Frage, welchen Einfluss die Nutzung eines Kopfhörers, für den nicht die korrekte Entzerrung verwendet wurde bzw. werden konnte auf die virtuellen Beurteilungen hat. Dazu wurden neben dem zur verwendeten Entzerrung passenden Kopfhörer (HpM), drei weitere Modelle gewählt, deren Übertragungseigenschaften sich mehr oder weniger stark von diesem Kopfhörer unterscheiden (HpA, HpB, HpC). Damit die beurteilenden Personen den Kopfhörer während den virtuellen Beurteilungen nicht wechseln müssen, wurden die variierenden Übertragungseigenschaften durch zusätzliche, speziell geschaffene Filter realisiert, die zusätzlich zum passenden Entzerrungsfilter verwendet wurden.



*Bild 12 Aufgebauter Prototyp eines Headtrackers, montiert auf einen Kopfhörer.*

Ein weiterer potentieller Untersuchungsaspekt war der Einfluss der Einbeziehung der Kopfdrehung in die Wiedergabe. Zur Detektion der Kopfdrehung wird ein sogenanntes Headtrackingsystem benötigt. Ähnlich wie bei im Bereich der binauralen Mikrofone sind auch professionelle Headtrackingsysteme nur in geringen Varianten und meist zu einem sehr hohen Preis verfügbar. Sie eignen sich daher möglicherweise ebenfalls nur eingeschränkt zum Einsatz im handwerklichen Umfeld. Um diese Einschränkung aufzuheben sollte in AVR-Mi eine einfache Konfiguration eines Headtrackers auf Basis günstiger Einzelkomponenten geschaffen werden. In diesem Kontext wurden Prototypen von verschiedenen Varianten des MrHeadTracker<sup>5</sup>-Projekts aufgebaut. Bild 12 zeigt einen dieser Prototypen montiert auf einen Kopfhörer. Diese Prototypen wurden im Hinblick auf deren Nutzung im Rahmen der virtuellen Beurteilungen charakterisiert. Im Zuge der

<sup>5</sup> <https://git.iem.at/DIY/MrHeadTracker> (abgerufen am 21.05.2025)

projektbegleitenden Evaluation wurde jedoch entschieden, Einbeziehung der Kopfdrehung zunächst nicht im Rahmen der virtuellen Beurteilungen zu berücksichtigen, da vor dem Hintergrund des räumlich relativ feststehenden Beurteilungsszenarios „Demonstration einer Gitarre im Showroom“ nur eine vergleichsweise geringe Verbesserung von perzeptiven Aspekten wie beispielsweise der Externalisierung erreicht werden konnte.

Zur Untersuchung des Einflusses des Kopfhörers bzw. der vorgesehenen Kopfhörerentzerrung wurde erneut die Präferenz des Gitarrenklangs, sowie das Klangmerkmal „Ausgewogenheit“ beurteilt. Der Versuchsaufbau wurde dabei weitgehend vom ersten Schritt der virtuellen Beurteilungen übernommen. Die Versuchsplattform auf Basis des webMUSHRA<sup>3</sup> Frameworks wurde entsprechend angepasst.

Bild 13 zeigt als beispielhaftes Ergebnis die Beurteilung der Präferenz für die Konzertgitarren und jeden Kopfhörer am Beispiel der AVR-Methode SFLD (1st). Es ist der Trend erkennbar, dass die Präferenzbeurteilung sinkt, wenn ein Kopfhörer verwendet wird, der nicht zur verwendeten Entzerrung passt. Dieser Trend zeigt sich ebenfalls für die anderen AVR-Methoden (simpAH, ORTF (1st)). Er hing jedoch meist nicht von der zugrundeliegenden Gitarre ab, wodurch insbesondere relative Instrumentenvergleiche auch mit Kopfhörern möglich erscheinen, die nicht zur verwendeten Entzerrung passen. Die Präferenzbeurteilung mit dem zur verwendeten Entzerrung passenden Kopfhörer lag für alle Methoden in guter Übereinstimmung mit der Präferenzbeurteilung aus dem ersten Schritt der virtuellen Beurteilungen, was eine hohe Reproduzierbarkeit bedeutet.

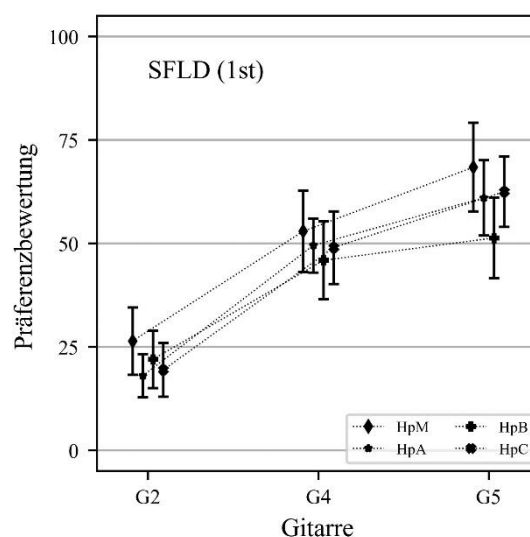


Bild 13 Mittelwert und 95% Konfidenzintervall der Beurteilung der Präferenz der ausgewählten Konzertgitarren mit den verschiedenen Kopfhörern für die AVR-Methode SFLD (1st).

## 1.5 Methodenempfehlung

Die Ergebnisse von AVR-Mi unterstützen zunächst die Anwendbarkeit von Hörtests im Umfeld von Handwerksbetrieben im Musikinstrumentenbau. Von den in AVR-Mi im Hinblick auf die Verwendung in diesem Umfeld ausgewählten AVR-Methoden haben sich drei Methoden als besonders geeignet erwiesen. Diese Methoden basieren auf

Aufnahmetechniken mit Mikrofonen aus unterschiedlichen Kategorien und erfordern die Kombination mit Signalverarbeitungsschritten unterschiedlicher Anzahl und Komplexität. Insgesamt stehen den Handwerksbetrieben damit AVR-Methoden mit einem breiten Spektrum hinsichtlich des notwendigen Aufwands zur Realisierung von virtuellen Klangbeurteilungen zur Verfügung, aus denen Sie gemäß ihren individuellen Voraussetzungen vor Ort wählen können. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Kopfhörers bzw. der vorgesehenen Kopfhörerentzerrung im Hinblick auf die Anwendbarkeit virtueller Klangbeurteilungen charakterisiert, was insbesondere vor dem Hintergrund der Realisierung von virtuellen Klangbeurteilungen auf Kund\*innenseite, einen wichtigen Aspekt darstellt. Die gesammelten Erkenntnisse, eine Vorstellung der ausgewählten Methoden, sowie eine Anleitung zur Umsetzung der besonders geeigneten Methoden wurden in einer Methodenempfehlung im Charakter eines Tutorials kompakt für das handwerkliche Umfeld aufbereitet.

## 2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position stellen die Lohnkosten für die projektbearbeitende Person dar. Weitere wichtige Positionen sind Aufwendungen für die Schaffung des Instrumentenpools (z. B. Vorbereitung, Lagerung und Transport der Leihinstrumente), die Vergütung der musizierenden Person für das Anspiel der Instrumente während der Aufnahmen, sowie die Vergütung der Versuchsteilnehmenden für die Teilnahme an den Referenzbeurteilungen und virtuellen Beurteilungen. Darüber hinaus stellen Aufwendungen um Projekteinhalte in einem breiten Rahmen erfahrbar zu machen (z. B. Erstellung von vergleichenden Demonstratoren für verschiedene Hörtestverfahren), sowie Kosten für die Veröffentlichung von Projektergebnissen (z. B. Teilnahme an Tagungen), wichtige Positionen dar.

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Arbeiten im Projekt AVR-Mi waren notwendig, um den im Rahmen der Aufgabenstellung geforderten Erkenntnisgewinn bzgl. der Nutzung von auditiver virtueller Realität im Musikinstrumentenbau zu erlangen. Der Zuschnitt der geleisteten Arbeiten erfolgte stets unter der Maßgabe größtmöglicher Effizienz und Nachnutzbarkeit um die zur Verfügung gestellten Ressourcen des Fördermittelgebers möglichst optimal und nachhaltig einzusetzen.

## 4 Voraussichtlicher Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wesentliche Verwertbarkeit der Ergebnisse besteht im Rahmen der Umsetzung virtueller Beurteilungen von Klangeigenschaften von Musikinstrumenten. Im Umfeld des

Zuwendungsempfänger können solche Beurteilungen beispielsweise im Rahmen von Wahrnehmungsuntersuchungen im Forschungskontext erfolgen. Im Umfeld von Bündnisunternehmen können solche Beurteilungen hingegen beispielsweise im Rahmen virtuellen Produktvermarktungsprozessen erfolgen.

## 5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keiner.

## 6 Erfolgte bzw. Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der Laufzeit von AVR-Mi wurden Ergebnisse in Form von Beiträgen zu einer wissenschaftlichen Konferenz [1] und einer anwendungsorientierten Summerschool [2], sowie in Form eines Artikels in einem wissenschaftlichen Journal [3] veröffentlicht. Nach Ende der Projektlaufzeit fand bereits eine weitere Veröffentlichung in Form eines Beitrages zu einer wissenschaftlichen Tagung statt [4]. Die Veröffentlichung in Form eines Beitrags zur Fachtagung Zukunft Musikinstrumentenbau [5] ist bereits zugesagt. Weitere Veröffentlichungen von Projektergebnissen in verschiedenen Formen sind beabsichtigt.

[1] Wühle, T., Merchel, S., Altinsoy, M. Ercan: „Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten in Hörtest und Spieltest: Ein Vergleich am Beispiel Konzertgitarre“, DAGA 2024 - 50th German Annual Conference on Acoustics, 2024.

[2] Wühle, T.: „Beurteilung der Klangeigenschaften von Musikinstrumenten in Hörtest und Spieltest: Ein Vergleich am Beispiel Konzertgitarre und die Betrachtung der Umsetzbarkeit im handwerklichen Umfeld“, Summerschool Musikinstrumentenbau, Markneukirchen, 07.09.2025

[3] Wühle, T., Merchel, S., Altinsoy, M. Ercan: „Evaluation of Soundboard Damping Variations on Physical and Perceptual Aspects of the Sound of a Steel-String Acoustic Guitar“, Acoustics, Vol. 7, No. 11, 2025, <https://doi.org/10.3390/acoustics7010011>

[4] Wühle, T., Merchel, S., Altinsoy, M. Ercan: „Methoden der auditiven virtuellen Realität für die Virtualisierung der Klangbeurteilung im Musikinstrumentenbau“, DAGA 2025 – 51<sup>st</sup> German Annual Conference on Acoustics, 2025.

[5] Wühle, T.: „Virtualisierung der Klangbeurteilung im Musikinstrumentenbau am Beispiel Gitarre“, Fachtagung Zukunft Musikinstrumentenbau, Zwickau, 27.09.2025.