

OPRA: Akustische Analyse musikalischer Aufführungsräume im Browser

Markus von Berg, Paul Schwörer, Lukas Prinz, Jochen Steffens

Der Aufführungsraum leistet einen substantiellen Beitrag zum Erleben von Musikdarbietungen. Zur Beschreibung der Akustik von Aufführungsräumen haben sich dabei zahlreiche Messgrößen etabliert, welche bestimmte Wahrnehmungsqualitäten, wie z. B. die Halligkeit, abbilden sollen. Dem stellt jüngere Forschung rein perzeptive Messinventare gegenüber, die den Wahrnehmungseindruck als solchen, losgelöst vom physikalischen Ursprung, beschreiben. Dieser Artikel beschreibt einen Versuch, diese beiden Forschungsrichtungen zusammenzuführen, indem Bewertungen von Aufführungsräumen nach dem perzeptiven Room Acoustical Quality Index (RAQI) durch physikalische Messgrößen modelliert wurden, welche aus einfachen Impulsantwortmessungen ermittelt werden. Dazu wurde eine Auswahl raumakustischer Messgrößen auf fünf Dimensionen reduziert und diese als Prädiktoren für die einzelnen Wahrnehmungsgrößen des RAQI getestet. Die Berechnung dieser Prädiktionsmodelle wird vorgestellt und deren Präzision diskutiert. Anschließend wird die OPRA-Webanwendung vorgestellt, die sowohl die Berechnung der raumakustischen Messgrößen als auch die Prädiktion von RAQI-Wahrnehmungsgrößen für die drei Quellsignale Sprache, Orchester und Solotrompete im Browser ermöglicht. Auch wenn die Präzision der Prädiktionsmodelle noch nicht für alle RAQI-Faktoren zuverlässige Ergebnisse liefert, erlaubt OPRA eine umfangreiche akustische Analyse und eine erste Einschätzung der perzeptiven Wirkung von Aufführungsräumen.

Einführung

Ob Konzertsaal, Open-Air-Bühne oder altes Fabrikgelände: um Musik live erleben und genießen zu können, braucht es den richtigen Raum. Einem Sinfonieorchester in einer Kneipe zu lauschen ist ebenso schwer vorstellbar, wie der Auftritt eines Gangstarrappers in einer Kirche. Selbst wenn man vom unpassenden Ambiente absieht, würde das Orchester schlichtweg nicht in die Kneipe hineinpassen und durch den langen Nachhall der Kirche wäre es kaum möglich, die Texte des Rappers zu verstehen. Die Beschaffenheit musikalischer Aufführungsräume (Größe, Geometrie, Inneneinrichtung) muss somit im Kern zwei Anforderungen erfüllen. Erstens muss genug Platz für sowohl das Publikum als auch die Mu-

OPRA: acoustical analysis of musical performance spaces in a web browser

Performance spaces have a substantial influence on the experience of musical performances, and numerous physical measures have been proposed to describe different aspects of the perceptual impact singular of a performance space. Recent research complements these physical measures with purely perceptual inventories that describe the auditory impression as such, and somewhat detached from its physical origin. This article describes an attempt to bring these two research directions together by modelling evaluations of performance spaces according to the subject-centered Room Acoustical Quality Index (RAQI) based on physical measures obtained from simple impulse response measurements. A selection of room acoustical parameters was reduced to five dimensions which were tested then as predictors for the perceptual qualities of the RAQI. The calculation of these prediction models is presented and the models' prediction performance discussed. Then, the OPRA-online-tool is presented that enables both the calculation of the physical measures and the prediction of RAQI factors for the three source signals speech, orchestra and solo trumpet within the web browser. Even though the precision of the prediction models does not yet provide reliable estimates of all RAQI factors, OPRA allows a first assessment of the perceptual effect of performance spaces on speech and music.

sizierenden zur Verfügung stehen. Zweitens soll der Raum auf multimodaler Ebene positiv zum Musikerleben beitragen: visuell, z. B. durch Architektur, Größe, Lichtstimmung etc., und natürlich auch akustisch. Indem der Direktschall der Musikinstrumente mit Raumreflexionen überlagert wird, erhöht sich dessen Lautstärke, das verlängerte Ausklingen einzelner Schallereignisse (z. B. einzelner Töne) lässt diese miteinander verschmelzen, und das Publikum hat durch Nachhall aus vielen verschiedenen Richtungen das Gefühl, von der Musik umhüllt zu sein. Da diese Effekte frequenzabhängig auftreten, wird auch die Klangfarbe der Musik maßgeblich durch den Aufführungsraum beeinflusst [1]. Der akustische Beitrag des Raums wird nicht nur vom Publikum, sondern auch

von den Musizierenden und Dirigenten selbst wahrgenommen, so dass diese ihren Spielstil der gegebenen Raumakustik kontinuierlich anpassen [2, 3].

Idealerweise sollte es also eine Vorstellung dieser Raumakustik geben, bevor mit dem Bau eines Konzertsaals begonnen wird. Erste Berechnungen der akustischen Wirkung von Aufführungsräumen wurden durch die Arbeiten des amerikanischen Physikers W. C. Sabine möglich, der 1902 seine berühmte Formel zur Berechnung der Nachhallzeit eines Raumes aus dessen Volumen und Absorptionsverhalten vorstellte [4]. Seitdem haben sich zahlreiche Studien der quantitativen Beschreibung der Wahrnehmung von Raumakustik, insbesondere von Konzertsälen und Aufführungsräumen, gewidmet (siehe [1; 5] für eine Übersicht einschlägiger Publikationen).

Diese Forschung folgt im Wesentlichen zwei, manchmal widersprüchlichen Zielen. Das erste Ziel ist die Entwicklung einfacher und dennoch aussagekräftiger Messgrößen, um einzelne Wahrnehmungsqualitäten anhand einer gegebenen physikalischen Messung (in der Regel eine Impulsantwort) zu quantifizieren. Eine „Ground Truth“ solcher Größen wurde 2009 in der Norm DIN EN ISO 3382-1 [6] für Aufführungsräume und 2021 in der ISO 23591 für Proberäume standardisiert [7]. Der Anhang der DIN EN ISO 3382-1 definiert verschiedene Maße für die perzeptive Wirkung von Aufführungsräumen, wie die frühe Abklingzeit (*EDT*), das Stärkemaß (*G*), das Klarheitsmaß (C_{80}), den frühen seitlichen Energieanteil (J_{LF}) und die interaurale Kreuzkorrelation (*IACC*) [6]. Studien zur perzeptiven Aussagekraft dieser Messgrößen haben darüber hinaus diverse Abwandlungen vorgeschlagen, die z. B. bestimmte Zeitintervalle für die Berechnung festlegen [8] oder die Ausprägung einer Messgröße in bestimmten Frequenzbändern betrachten [9, 10]. Der Zweck all dieser Maße ist die möglichst einfache Beschreibung eines Wahrnehmungseindrucks auf Basis eines physikalischen Phänomens. Das zweite Ziel der Forschung zur Akustik, insbesondere musikalischer Aufführungsräume, ist die ganzheitliche Modellierung der Wirkung von Raumakustik aus verschiedenen Wahrnehmungseindrücken [5, 11, 12]. Hier geht es also weniger um die physikalische Ursache der einzelnen Wahrnehmungseindrücke, sondern darum, diese Eindrücke möglichst vollständig und differenziert abzubilden und messbar zu machen. Stand der Forschung stellt hier das an der TU Berlin entwickelte Room Acoustical Quality Inventory (RAQI) [5] dar, in welchem eine Reihe von Wahrnehmungsattributen anhand von Hörbeispielen für gegebene Raumakustiken bewertet werden. Diese Attribute decken sowohl die Hörbarkeit spezifischer, raumakustischer Eigenschaften (Nachhalldauer, Lautstärke, Flatterechos, Kammfiltereffek-

te), als auch die subjektive Wirkung auf abstrakterer Ebene ab (z. B. Gefallen, Dröhnen, Wärme) und wurden von einer Expertengruppe ausgewählt und anschließend in Befragungen empirisch validiert. In der Auswertung werden die Einzelattribute zu neun übergeordneten Faktoren Qualität, Stärke, Halligkeit, Brillanz, ungleichmäßiger Nachhall, Coloration, Klarheit, Lebendigkeit und Intimität zusammengefasst. Der RAQI bietet somit sowohl ein validiertes Inventar von Wahrnehmungsattributen und übergeordneten Faktoren, als auch ein Verfahren für deren quantitative Bestimmung.

Im RAQI wird die Wirkung von Raumakustik aus einer rein wahrnehmungsbezogenen Perspektive erfasst, die konzeptionell weitestgehend losgelöst von physikalischen Messgrößen ist. Einige RAQI-Faktoren, wie Stärke, Halligkeit und Klarheit, werden jedoch auch in der DIN EN ISO 3382-1 genannt [6]. Nach Kenntnis der Autoren wurde bisher allerdings nicht untersucht, wie stark z. B. das physikalisch gemessene Stärkemaß der Norm mit dem Stärke-Faktor des RAQI zusammenhängt. Und für abstraktere Facetten des RAQI, wie Intimität oder Lebendigkeit, existieren nach Kenntnis der Autoren noch gar keine physikalischen Messgrößen [5].

Mit anderen Worten: der RAQI erlaubt eine differenzierte Betrachtung perzeptiver Größen, die auf Basis physikalischer Maße bisher so nicht möglich ist. Diese Lücke zu schließen, und Prädiktoren für RAQI-Faktoren zu finden, mit denen diese analytisch aus gemessenen Impulsantworten bestimmt werden können, erscheint ein logischer Schritt in der Forschung zur auditiven Wirkung von Konzertsälen. Auch wenn diese Prädiktion Hörversuche nicht ersetzen kann, kann sie einen ersten Eindruck von den Wahrnehmungsqualitäten eines Raumes vermitteln, der zum Beispiel beim Vergleich verschiedener Planungsentwürfe von Konzertsälen von Nutzen sein kann.

Eine solche Vorhersage von RAQI-Faktoren ist Ziel des hier vorgestellten Projektes OPRA (Online tool for the Prediction of Room Acoustical qualities). Mit einem Online-Tool soll eine einfache erste Einschätzung der Wirkung von Raumakustik bei Sprachdarbietung und Darbietung nach den Kriterien des RAQI ermöglicht werden. Im Rahmen der Prädiktion von RAQI-Faktoren werden auch diverse raumakustische Messgrößen berechnet, sodass OPRA nicht nur der Einschätzung von perzeptiven Größen dient, sondern auch eine einfache Analyse von Raumimpulsantworten auf physikalischer Ebene ermöglicht (siehe Abbildung 1). Die Webanwendung ist kostenfrei unter <https://opra.isave.hs-duesseldorf.de> nutzbar.

Im nächsten Kapitel wird die statische Modellierung von RAQI-Faktorwerten auf Basis einer Auswahl geeigneter physikalischer Messgrößen erläutert,

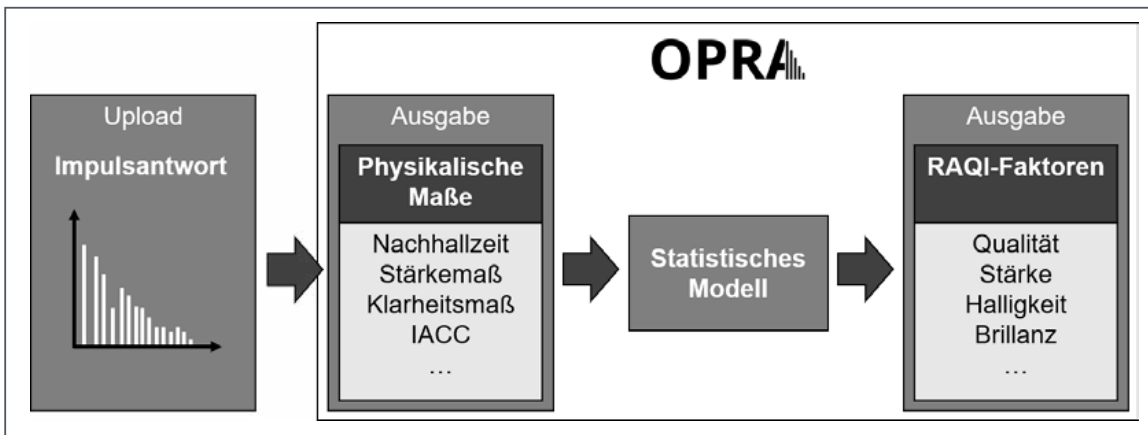


Abb. 1: Konzept der OPRA-Webanwendung

welche die theoretische Basis von OPRA bildet. Das darauffolgende Kapitel gibt einen Überblick über die Implementierung dieses Modells und aller dazugehörigen Berechnungen als Webanwendung. Abschließend werden im Ausblick weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Anwendung aufgezeigt.

Statistisches Modell zur Prädiktion von RAQI-Faktorwerten

Die Vorhersage von RAQI-Werten anhand physikalischer Parameter wirft zwei zentrale Probleme auf:

die Auswahl physikalischer Maße als geeignete Prädiktoren einerseits und eine hinreichende Anzahl von RAQI-bewerteten Impulsantworten als Datenbasis der statistischen Modellierung andererseits.

Datenbasis

Die Frage nach einer geeigneten Datenbasis ist schnell beantwortet, da bislang nur RAQI-Bewertungen aus der Pilotstudie von Weinzierl et al. [5] existieren und diese als Ground Truth on Room Acoustical Analysis and Perception (GRAP) [13] online verfügbar ist.

KURZUNDFISCHER
Beratende Ingenieure • Bauphysik

Die Kurz und Fischer GmbH ist ein international tätiges Planungs- und Beratungsbüro mit Schwerpunkten in den Bereichen Thermische Bauphysik, Raum- und Bauakustik, Schallmissionsschutz sowie nachhaltiges Bauen.

Für unseren Standort in Winnenden suchen wir in Voll- oder Teilzeit zum nächstmöglichen Zeitpunkt eine/n engagierte/n

**Beratungsingenieur
Schallmissionsschutz und Bauphysik
(m/w/d)**

Ihre Aufgaben:

- Selbstständige Bearbeitung von Projekten im Sachgebiet Schallmissionsschutz und der Bauphysik
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Messungen
- Durchführung von Simulationsberechnungen

Ihre Qualifikationen:

- Ingenieurwissenschaftliches Studium oder ein vergleichbarer Studiengang
- Bereitschaft zur Projektverantwortlichkeit
- Interesse an einer beratenden Tätigkeit mit direktem Kundenkontakt
- Reisebereitschaft und Flexibilität

Wir bieten Ihnen:

- Interessante und eigenverantwortliche Projekte und Aufgaben in einem erfolgreichen und wachsenden Unternehmen
- Familienfreundliche Arbeitszeitgestaltung
- Kollegiales Betriebsklima mit gemeinsamen Aktivitäten
- Fachliche und persönliche Weiterbildung

Fühlen Sie sich angesprochen? Dann freuen wir uns auf Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen, gerne auch per E-Mail an roland.kurz@kurz-fischer.com

Kurz und Fischer GmbH | Brückenstraße 9 | 71364 Winnenden
Tel: 07195 9147-0 | E-Mail: winnenden@kurz-fischer.com | www.kurz-fischer.com

Winnenden | Halle (Saale) | Bottrop | Feldkirchen-Westerham |
Bretten | Lübeck | Kiel | Schwerin | Budapest

CADFEM

WEITERBILDUNG

BEIM NR. 1 SCHULUNGSANBIETER FÜR CAE-SIMULATION

AKUSTIK SIMULIEREN UND MODELLE HÖRBAR MACHEN

In CADFEM Seminaren erlernen Sie die Simulationsmöglichkeiten in der Akustik: Emission, Schallausbreitung und Absorption, Raumakustik, Schallabstrahlung und Durchschallung bis zur Bewertung der Geräuschqualität Ihrer virtuellen Produkte.

www.cadferm.net/akustik

Tab. 1: Physikalische Maße, die als Prädiktoren für das statistische Modell ausgewählt wurden.

Parameter	Frequenzbereich für Einzahlwert	Quelle
Nachhallzeit (RT)	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1 [6]
Frühe Abklingzeit (EDT)	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Schwerpunktzeit (TS)	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Stärkemaß (G)	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
A-gewichtetes Stärkemaß (G_A)	63 Hz – 8 kHz	Soulodre und Bradley [10]
Frühes Stärkemaß (G_{early})	500 Hz – 1 kHz	Bradley [8]
Spätes Stärkemaß (G_{late})	500 Hz – 1 kHz	Bradley [8]
Klarheitsmaß (C_{80})	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Deutlichkeit (D_{50})	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Lautheitskorrigiertes Klarheitsmaß (C_{80adj})	63 Hz – 8 kHz	Soulodre und Bradley [10]
Früher seitlicher Energieanteil (J_{LF})	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Später Seitenschallgrad (LJ)	500 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient ($IACC$)	125 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Früher IACC ($IACC_{early}$)	125 Hz – 1 kHz	DIN EN ISO 3382-1
Bassverhältnis (BR)	–	Beraneck [9]
Frühes Bassstärkemaß (EBL)	–	Soulodre und Bradley [10]
Höhenverhältnis (TR)	–	Soulodre und Bradley [10]

Diese Datenbank umfasst Simulationen von 35 Räumen mit Volumina zwischen 166 m^3 und $43\,790\text{ m}^3$ und verschiedenen Raumgeometrien, welche mit dem RAVEN-Framework [14] erstellt wurden. Für jeden Raum beinhaltet die GRAP-Datenbank eine omnidirektionale Impulsantwort (gemessen mit einem Kugelmikrofon, welches Schall aus allen Richtungen aufnimmt) und eine binaurale Impulsantwort (gemessen mit einem Kunstkopf mit zwei Mikrofonen an der Position des Trommelfells) für jeweils zwei Empfängerpositionen. RAQI-Bewertungen der beiden Positionen jedes Raums liegen jeweils für die drei Quellensignale Sprache, Solotrompete und Orchester vor. Ausgenommen sind zehn Räume, für die es keine Orchester-Bewertungen gibt, da diese Räume zu klein sind, um als Orchesteraufführungsorte infrage zu kommen [5]. Während die in der Datenbank hinterlegten Impulsantworten mit omnidirektional, gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlenden Quellen simuliert wurden, basieren die RAQI-Bewertungen auf Auralisationen, in denen die Richtcharakteristik der jeweiligen Schallquell(en) berücksichtigt wurden. Insgesamt umfasst die GRAP-Datenbank 190 RAQI-Bewertungen und 70 Paare von omnidirektionalen und binauralen Impulsantworten, die als Datenbasis

für das Prädiktionsmodell fungieren. Es sei an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass das Modell also ausschließlich auf simulierten Raumimpulsantworten und keinen realen Messungen basiert.

Physikalische Messgrößen

Wie bereits erwähnt, gibt es einige „Überschneidungen“ zwischen dem RAQI und physikalischen Messgrößen, die daher als Indikatoren für die neun RAQI-Faktoren infrage kommen. Tabelle 1 zeigt die Auswahl von Parametern, die als Prädiktoren getestet wurden. Die meisten dieser Parameter stammen aus der DIN EN ISO 3382-1, andere sind Erweiterungen der ISO-Parameter, die sich in empirischen Untersuchungen als perzeptiv aussagekräftiger erwiesen haben [1, 8]. Hinzu kommen die Parameter Bassverhältnis, frühes Bassstärkemaß und Höhenverhältnis als Deskriptoren des Einflusses von Nachhall auf die Klangfarbe, welche in der Norm wenig Beachtung findet.

Da eine frequenzabhängige Betrachtung der Maße eine zu hohe Anzahl an Prädiktoren ergeben hätte, um eine sinnvolle statistische Modellierung durchführen zu können, wurden alle Werte als Mittelwerte über einen bestimmten Frequenzbereich betrachtet (siehe Tab. 1). Für die Größen aus der DIN EN ISO 3382-1

Tab. 2: Gewichtung der einzelnen physikalischen Maße zu drei übergeordneten Faktoren Verstärkung, Ausklang und Diffusion. Nur Gewichtungsfaktoren größer also $\pm 0,4$ sind dargestellt. Die Parameter Bassverhältnis und Höhenverhältnis waren von dieser Analyse ausgeschlossen.

Parameter	Verstärkung	Ausklang	Diffusion
Nachhallzeit (RT)		0,769	
Frühe Abklingzeit (EDT)		0,821	
Schwerpunktzeit (TS)		0,806	
Stärkemaß (G)	1,004		
A-gewichtetes Stärkemaß (G_A)	1,002		
Frühes Stärkemaß (G_{early})	0,964		
Spätes Stärkemaß (G_{late})	0,954		
Klarheitsmaß (C_{80})		-0,926	
Deutlichkeit (D_{50})		-1,001	
Lautheitskorrigiertes Klarheitsmaß (C_{80adj})	0,763	-0,521	
Früher seitlicher Energieanteil (J_{LF})			0,972
Später Seitenschallgrad (L_f)	0,815	0,454	
Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient ($IACC$)		-0,442	-0,686
Früher IACC ($IACC_{early}$)			-0,974
Frühes Bassstärkemaß (EBL)	0,902		

und für frühes und spätes Stärkemaß, die sich nur im analysierten Zeitintervall vom Norm-Stärkemaß unterscheiden, wurde über die im Standard empfohlenen Frequenzbereiche gemittelt [6]. Das A-bewertete Stärkemaß und das lautheitskorrigierte Klarheitsmaß nach Soulodre und Bradley [10] wurden über einen breiteren Frequenzbereich von 63 Hz bis 8 kHz ausgewertet. Die Parameter Bassverhältnis, frühes Bassstärkemaß und Höhenverhältnis sind per Definition Einzahlwerte, die durch Auswertung definierter Frequenzbänder berechnet werden [10].

Dimensionsreduktion

Auch wenn alle ausgewählten Maße gleichermaßen als Prädiktoren für RAQI-Faktorwerte infrage kommen, gibt es unter einigen große Ähnlichkeiten oder sogar Abhängigkeiten, da z. B. das A-bewertete Stärkemaß auf dem Stärkemaß nach DIN ISO EN 3382-1 basiert. Die hier verwendeten Regressionsmodelle folgen allerdings einer strengen Aufteilung in unabhängige Größen (Ursachen, in diesem Fall physikalische Maße) und abhängige Größen (Wirkungen, hier die RAQI-Faktorbewertung) und modellieren individuelle Effekte jeder unabhängigen Größe auf die Ausprägung einer abhängigen Größe (z. B. bildet ein Modell die Effekte physikalischer Maße auf den

RAQI-Faktor Halligkeit ab). Die statistische Berechnung dieser individuellen Effekte wird allerdings verfälscht, wenn die unabhängigen Größen gar nicht unabhängig voneinander sind [15], wie es z. B. bei den verschiedenen Stärkemaßen der Fall ist.

Es wäre jedoch auch beliebig, aus diesem Grund nur jeweils einen Stärkemaß- oder Klarheitsparameter auszuwählen. Daher wurden stattdessen mithilfe einer explorativen Faktorenanalyse übergeordnete Faktoren als RAQI-Prädiktoren bestimmt – genauso, wie beim RAQI die neun Faktoren aus jeweils drei bis vier Attributen berechnet werden. Dazu wurden alle physikalischen Messgrößen für die GRAP-Impulsantworten berechnet und miteinander verglichen. Basierend auf den Korrelationen dieser Maße wurden dann übergeordnete Faktoren ermittelt, welche zentrale akustische Eigenschaften eines Raumes abbilden. Die Parameter Bassverhältnis und Höhenverhältnis wurden im Vorfeld von dieser Faktorenanalyse ausgeschlossen, da diese zu gering mit anderen Parametern korreliert waren, um sinnvoll zu übergeordneten Faktoren zusammengefasst zu werden [16]. Die Anzahl der übergeordneten Faktoren wurde nach Auswertung des sogenannten Eigenwertkriteriums auf drei festgelegt. Tabelle 2 zeigt als Ergebnis der Faktorenanalyse die berechneten Gewichtungsfaktoren

Tab. 3: Prädiktionskoeffizienten der fünf Prädiktoren für jeden RAQI-Faktor. Nur statistisch signifikante Prädiktionseffekte sind dargestellt.

Modell / RAQI-Faktor	Verstärkung	Ausklang	Diffusion	Bassverhältnis	Höhenverhältnis
Qualität				0,149	0,218
Stärke	0,538	0,262			
Halligkeit	0,131	0,929	-0,216		
Brillanz	0,436	0,181	-0,253	-0,111	0,112
Unregelmäßiger Nachhall		0,554		-0,106	
Coloration			0,242		-0,148
Klarheit		-0,547		0,134	
Lebendigkeit	0,597		-0,282		
Intimität	0,538	-0,526		0,133	

(Faktorladungen; mit einem üblichen Wertebereich von ± 1), mit denen sich diese drei Faktoren aus den einzelnen physikalischen Maßen zusammensetzen. Jeder Faktor kann also berechnet werden, indem die einzelnen Maße mit den jeweiligen Faktorladungen als gewichtete Linearkombination aufsummiert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur Faktorladungen über 0,4 angegeben.

Der erste Faktor weist hohe positive Ladungen aller stärkemaßbasierten Parameter auf und wurde daher – in Abgrenzung zum Stärkemaß der ISO-Norm und dem Stärke-Faktor des RAQI – als *Verstärkung* betitelt. Den zweiten Faktor kennzeichnen hohe positive Ladungen von Maßen zur Dauer des Nachhalls und hohe negative Faktorladungen der Klarheitsmaße, die durch einen hohen Energieanteil innerhalb der ersten 50 ms bis 80 ms gekennzeichnet sind [6, 10]. Dieser Faktor wurde daher *Ausklang* genannt – ebenfalls in Abgrenzung zur Halligkeit und Klarheit des RAQI und Nachhall- und Klarheitsmaßen der Norm. Der dritte Faktor setzt sich aus drei Maßen der räumlichen Verteilung der Schallenergie bzw. der (In-)Kohärenz des Schalleinfalls aus verschiedenen Richtungen zusammen, und wurde daher als *Diffusion* bezeichnet.

Wenig überraschend spiegeln diese drei Faktoren jeweils einen der in der Einführung genannten Einflüsse des Aufführungsraumes auf musikalische Darbietungen wider: die Verstärkung der Lautstärke, zeitliche Verschmelzung und die Wahrnehmung von Hall durch verlängertes Ausklingen und räumliche Diffusion. Eine ähnliche Aufteilung findet sich auch in einem Literaturreview von Bradley [1], nur dass dort zwischen Klarheitsmaßen und Nachhallmaßen unterschieden wird, welche hier im Faktor Ausklang zusammenfallen. Außerdem ergab die explorative Faktorenanalyse vereinzelt unerwartete Faktorladungen, z. B. des späten Seitenschallgrads, der in der

DIN EN ISO 3382-1 als Maß für räumliche Umhüllung angegeben wird [6], hier aber keine nennenswerte Ladung auf den „Räumlichkeits-Faktor“ Diffusion zeigt. Hierin zeigt sich der Vorteil der Methode, die statt konzeptionellen Gruppierungen übergeordnete Faktoren ermittelt, die rein auf faktischen Korrelationen im Datensatz basieren und darüber hinaus durch konkrete Gewichtungen einzelner Parameter quantitativ bestimmt werden können.

Dass die beiden Klangfarbendescriptoren Bassverhältnis und Höhenverhältnis aus der Faktorenanalyse ausgeschlossen wurden, spiegelt in gewisser Weise deren Unterrepräsentation in bisheriger Forschung zum akustischen Beitrag von Aufführungsräumen wider [1, 5]. Um diese perzeptiv relevante Klangfarbe in der statistischen Modellierung der RAQI-Faktoren allerdings nicht zu vernachlässigen, wurden beide Größen als singuläre Parameter neben den drei aggregierten Größen Verstärkung, Ausklang und Diffusion als Prädiktorvariablen getestet.

Prädiktion der RAQI-Faktorwerte

Die fünf Prädiktorgößen charakterisieren den Einfluss jeden Raums der GRAP-Datenbank bzw. beider Hörpositionen innerhalb jeden Raums auf Sprach- oder Musikdarbietungen nach etablierten physikalischen Kriterien. Da die Wirkung eines Aufführungsraumes jedoch stark von der Darbietung abhängt, sind die gegebenen RAQI-Faktorwerte an jeder Hörposition und in jedem Raum spezifisch für die drei Quellsignale Sprache, Soloinstrument (Trompete) und Orchester gegeben. Dementsprechend wurden die Regressionsmodelle, die jeweils einen RAQI-Faktor aus den Prädiktoren vorhersagen, zu gemischten linearen Modellen erweitert, welche zusätzliche Effekte des speziellen Raums bzw. der Hörerposition einerseits sowie dem Quellsignal andererseits als „zu-

fällige“ Effekte (d. h., Konstanten) berücksichtigen. Tabelle 3 stellt die geschätzten Regressionskoeffizienten für jedes Vorhersagemodell bzw. für jeden RAQI-Faktor dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die Koeffizienten statistisch signifikanter Prädiktionseffekte angegeben. Ein negatives Vorzeichen bedeutet, dass z. B. ein geringeres Bassverhältnis zu einer höheren wahrgenommenen Brillanz führt. Die Skalierung der Koeffizienten ist abstrakt und nur im relativen Vergleich aussagekräftig. So lässt sich der Tabelle entnehmen, welche der fünf Prädiktoren jeweils einen positiven oder negativen Effekt haben, und dass z. B. der RAQI-Faktor Stärke von einer hohen Verstärkung stärker beeinflusst wird als von einem langen Ausklang des Nachhalls.

Nun stellt sich die Frage, wie groß der Effekt der Prädiktoren auf den jeweiligen RAQI-Faktor ist, bzw. wie präzise sich diese Faktoren auf Basis des Prädiktionsmodells vorhersagen lassen. Hierbei spielen nicht nur die fünf Prädiktoren, sondern auch das jeweilige Quellsignal, das im Modell als spezifische Konstante mitmodelliert wird, eine wichtige Rolle. Tabelle 4 zeigt zwei Gütekriterien der Prädiktionsmodelle.

Das marginal R^2 (R^2_m) nach Nakagawa und Schielzeth [17] beschreibt, wieviel Prozent der Varianz eines RAQI-Faktors über die Impulsantworten der GRAP-Datenbank durch die Prädiktionseffekte aus Tabelle 3 erklärt werden kann (ein R^2_m von 0,137 entspricht 13,7% Varianzaufklärung). In der dritten Spalte in Tabelle 4 sind die Intraclass Correlation Coefficients berechnet aus Null-Modellen dargestellt, welche nur den Effekt des Quellsignals auf die RAQI-Bewertungen betrachten (ICC_{src}). Diese geben analog zum R^2_m an, wieviel Varianz in den RAQI-Faktoren jeweils durch das Quellsignal als zufälligen Faktor erklärt werden kann.

In Tabelle 4 wird ersichtlich, dass die Präzision der Prädiktionsmodelle für die einzelnen RAQI-Faktoren sehr unterschiedlich ausfällt. Mit physikalischen Messgrößen lässt sich nur die Halligkeit mit knapp 70% Varianzaufklärung relativ zuverlässig vorhersagen. Die zweithöchste Varianzaufklärung durch physikalische Größen wird beim RAQI-Faktor Klarheit erreicht, für das ebenfalls mehrere Maße existieren. Interessanterweise ist jedoch die Prädiktion der Stärke im Vergleich dazu recht unpräzise, obwohl diese in den getesteten physikalischen Maßen am prominentesten vertreten war. Kurioserweise ist die Prädiktion der Stärke sogar schlechter als die der Intimität, denen sich ursprünglich keine der verwendeten physikalischen Messgrößen widmet, die aber offenbar durch eine hohe Verstärkung, einen kürzeren Ausklang sowie eine Betonung der Bässe begünstigt wird. Insgesamt spiegelt Tabelle 4 wieder, wie gut sich die perzeptive Wirkung von Raumakustik im Kontext

Tab. 4: Bestimmtheitsmaße der Prädiktionsmodelle

Modell / RAQI-Faktor	R^2_m	ICC_{src}
Qualität	0,137	0,483
Stärke	0,280	0,539
Halligkeit	0,696	0,126
Brillanz	0,112	0,412
Unregelmäßiger Nachhall	0,334	0,416
Coloration	0,189	0,416
Klarheit	0,469	0,212
Lebendigkeit	0,176	0,550
Intimität	0,350	0,433

von Sprach- und Musikaufführungen durch bisher verfügbare, physikalische Maße beschreiben lassen. Dabei sticht die Halligkeit, die in gewisser Weise schon durch Sabines Nachhallformel behandelt wird, positiv heraus, während die Stärke als ähnlich prominenter Faktor überraschend unpräzise prädiziert wird. Am geringsten ist die Varianzaufklärung allerdings für Brillanz, Qualität und Lebendigkeit. Brillanz beschreibt eine Auswirkung auf die Klangfarbe, wofür es in der Raumakustik, wie oben erwähnt, bisher an aussagekräftigen Prädiktorgroßen mangelt. Qualität ist der erwartbar subjektivste und am schwierigsten zu erklärende Faktor, und Lebendigkeit eine bisher selten betrachtete Größe [5], so dass in beiden Fällen die geringe Varianzaufklärung wenig verwunderlich ist. Wegen der teils durchwachsenen Effektstärken der physikalischen Maße ist der Anteil an Varianzaufklärung durch die Quellsignale (ICC_{src}) für die Konstruktion von brauchbaren Prädiktionsmodellen umso interessanter. Hier zeigt sich einerseits, dass die akustische Wirkung eines Aufführungsraums maßgeblich vom Quellsignal abhängt [18] und dass andererseits diese Relevanz des Quellsignals vom jeweiligen RAQI-Faktor abhängt. So scheint die wahrgenommene Halligkeit und Klarheit im Vergleich von Sprache, Solotrompete und Orchester wesentlich konstanter (geringe ICC_{src}), als etwa die der Stärke oder Lebendigkeit. Man könnte somit schlussfolgern, dass Halligkeit und Klarheit zwei relativ stabile Wahrnehmungsqualitäten des Aufführungsraums selbst sind, während die anderen Faktoren, mit jeweils 40% – 50% Varianzaufklärung nur durch das Quellsignal, in der Wahrnehmung wesentlich schwieriger von diesem zu trennen sind. Auch die Qualität ist stark vom Quellsignal abhängig, was letztlich nur bedeutet, dass ein Konzertsaal unterschiedlich gut für Sprach- und Musikaufführungen geeignet ist.



Abb. 2: Graphische Darstellung physikalischer Maße in Oktavbandauflösung mit Konfiguration der Anzeige. Die dargestellten Impulsantworten entstammen der GRAP-Datenbank [13].

Aufgrund der Relevanz des Quellsignals werden in der OPRA-Webanwendung, die im nächsten Abschnitt im Detail vorgestellt wird, RAQI-Faktorwerte spezifisch für die drei Quellsignale Sprache, Soloinstrument bzw. Solotrompete und Orchester vorhergesagt.

Implementierung in der Webanwendung

Mit diesen Prädiktionsmodellen ermöglicht OPRA nun also die Vorhersage von RAQI-Faktoren für drei Quellsignale im Webbrowser. Anwender:innen können eine oder mehrere Impulsantwortmessungen als Audiodateien hochladen und erhalten eine Berechnung aller physikalischen Messgrößen aus Tabelle 1, sowie geschätzte RAQI-Faktorwerte (siehe Abbildung 1). Die Ergebnisse können als JSON-Datei heruntergeladen und die Impulsantworten mit eigens hochgeladenen Quellsignalen oder einer nachhallfreien Saxophonaufnahme auralisiert werden.

Die Webanwendung führt alle Berechnungen im Browser der Benutzer:innen durch und benötigt somit keine zusätzliche Verarbeitung auf einem Server. Für Oktavbandfilterung und Echtzeit-Auralisierung wird auf die Web Audio API zurückgegriffen, während rechenintensivere Fourier-Transformationen bei der Bestimmung des IACC für kürzere Berechnungsdauern in Rust geschrieben und in WebAssembly kompiliert wurden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Analyse hochgeladener Impulsantworten näher betrachtet.

Input-Handling

OPRA kann Aufnahmen von omnidirektionalen, binauralen, oder aus Mitten- und Seitenkanal bestehenden Impulsantworten in allen gängigen Audio-

formaten mit beliebigen Abtastraten verarbeiten. Mono-Dateien werden als omnidirektionale Impulsantworten behandelt, und zweikanalige Dateien werden standardmäßig als binaurale Impulsantworten interpretiert und können manuell als Mitten-/Seiten-Aufnahmen deklariert werden. Die meisten der berechneten physikalischen Maße basieren auf omnidirektionalen Impulsantworten, und bei Mitten-/Seiten-Impulsantworten wird hierfür der erste Kanal als Mittensignal interpretiert und nur dieser zur Berechnung dieser Maße verwendet. Bei binauralen Aufnahmen wird eine omnidirektionale Impulsantwort angenähert, indem beide Kanäle durch energetische Mittelung zu einem Kanal zusammengefasst und dieser mit einer inversen Diffusfeldentzerrung nach DIN EN ISO 11904-1 [19] gefiltert wird, um den Effekt der Außenohrübertragungsfunktion (HRTF) des Kunstkopfes über alle Einfallrichtungen näherungsweise zu kompensieren.

Berechnung physikalischer Messgrößen

Alle in Tabelle 1 dargestellten physikalischen Maße werden in Oktavbandauflösung zwischen 63 Hz und 8 kHz berechnet und zusätzlich als Einzahlwerte über die Frequenzbereiche, die ebenfalls in Tabelle 1 angegeben sind, gemittelt. Die Oktavband-Berechnungen der Parameter werden graphisch dargestellt, mit der Option, einzelne Parameter oder Impulsantworten ein- oder auszublenden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die grafische Darstellung der Stärkemaße und Seitenschallgrade. Jeder Plot verfügt zudem über eine Hilfeseite („Was ist das?“-Buttons in Abbildung 2), welche die Berechnung und den Ursprung der Parameter erläutert.

Tab. 5: Abweichungen der berechneten Normparameter von den Angaben der GRAP-Datenbank. Die letzte Spalte gibt ebenmerkliche Unterschiede (JND) für jede Größe nach DIN EN ISO 3382-1 an [6].

Messgröße	Mittlere Differenz	Standardabweichung der Differenz	JND nach DIN EN ISO 3382-1
RT	0,21 s	0,38 s	-
EDT	0,26 s	0,21 s	5 %
T_s	0,01 s	0,01 s	0,01 s
G	1,67 dB	1,49 dB	1 dB
C_{80}	1,16 dB	0,83 dB	1 dB
D_{50}	0,05	0,03	0,05
J_{LF}	0,06	0,06	0,05
$IACC$	0,07	0,05	-

Zur akkuraten Berechnung können Umgebungsvariablen, wie die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon während der Impulsantwortmessung definiert werden. Stärkemaß-Parameter benötigen eine Referenz-Freifeldmessung der Schallquelle in 10 m Entfernung [6]. Deshalb kann die Schallleistung der Quelle und die digitale Amplitude, die einem Pascal entspricht, angegeben werden, um eine entsprechende Referenzmessung anzunähern. Sind die Informationen nicht bekannt, wird ein Diracimpuls mit der Maximalamplitude der Impulsantwort skaliert, da dieser als Direktchallanteil angenommen wird. Dieser Impuls wird um eine frequenzabhängige Luftabsorpti-

on nach DIN EN ISO 9613-1 [20] und ggf. für eine Entfernung von zehn Metern korrigiert und als angenäherte Freifeldmessung verwendet.

Die Präzision der Berechnungen wurde getestet, indem für alle Impulsantworten der GRAP-Datenbank die Parameter aus der DIN EN ISO 3382-1 mit der Webanwendung berechnet und die Ergebnisse mit Angaben aus der Datenbank verglichen wurden (in der nur die Normparameter angegeben sind). Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen Webanwendung und GRAP-Datenbank, sowie, als Referenzrahmen, den ebenmerklichen Unterschied für jeden Parameter laut Norm (sofern angegeben) [6].

Abb. 3: Geschätzte RAQI-Faktorwerte

RAQI Faktoren		Stimulus auswählen	
A prediction model uses calculated technical parameters to infer Room Acoustical Quality Inventory (RAQI) factor scores (Weinzierl et al., 2018). Different coefficients are used for omnidirectional, binaural and mid/side impulse responses. Optimizing for specific stimuli allows for more accurate results. Select a stimulus, which best matches your needs.		Sprache	
	RNo01_R1_RIR.wav	RNo08_R2_BRIR_000.flac	
Quality	0.1536	0.2294	
Strength	0.6754	0.5926	
Reverberance	0.4979	0.2184	
Brilliance	0.3153	0.2922	
Irregular Decay	0.3608	0.1728	
Coloration	0.4336	0.4027	
Clarity	0.4408	0.5878	
Liveliness	0.6371	0.5623	
Intimacy	0.4055	0.4860	

Tab. 6: Korrelation zwischen geschätzten und tatsächlichen RAQI-Faktorwerten

RAQI-Faktor	Sprache	Solo-trompete	Orchester
Qualität	0,374	0,236	0,547
Stärke	0,840	0,816	0,807
Halligkeit	0,892	0,889	0,889
Brillanz	0,494	0,559	0,507
Unregelmäßiger Nachhall	0,789	0,789	0,769
Coloration	0,459	0,371	0,426
Klarheit	0,830	0,759	0,783
Lebendigkeit	0,715	0,552	0,737
Intimität	0,833	0,743	0,814
Mittelwert	0,691	0,634	0,698
Standardabweichung	0,195	0,220	0,162

Die einzigen größeren Abweichungen zeigen sich bei Nachhallzeit (RT) und der frühen Abklingzeit (EDT). Dies könnte daran liegen, dass die GRAP-Datenbank T_{30} Werte angibt, während in der Webanwendung T_{20} berechnet wird, um die Anwendung robust für Impulsantworten mit hohen Störgeräuschpegeln zu machen. Auch beim Stärkemaß zeigen sich leicht erhöhte Abweichungen, vermutlich, da in der Webanwendung die Referenz-Freifeldmessung nur angenähert werden kann. Insgesamt kann jedoch von einer validen Berechnung der physikalischen Maße als Basis der RAQI-Faktor-Prädiktion ausgegangen werden

Prädiktion von RAQI-Faktoren

Um die Güte der Prädiktion von RAQI-Faktoren zu verbessern, werden diese individuell für die drei Quellsignale Sprache, Soloinstrument und Orchester bestimmt (siehe Abb. 3). So kann der wahrgenommene akustische Beitrag des Aufführungsraumes für die jeweilige Darbietungsform eingeschätzt werden. Zur Prädiktion der RAQI-Faktoren werden die berechneten physikalischen Messgrößen (als Einzahlwerte) zunächst mit den Gewichten aus Tabelle 2 zu den drei Faktoren Verstärkung, Ausklang und Diffusion zusammengefasst. Dann werden diese drei aggregierten Maße gemeinsam mit den individuell betrachteten Parametern Bass- und Höhenverhältnis für jeden RAQI-Faktor mit den jeweiligen Regressionskoeffizienten aus Tabelle 3 gewichtet und einschließlich der spezifischen Konstante für jedes Quellsignal aufsummiert.

Um die Vorhersagegüte zu testen, wurde wieder die GRAP-Datenbank verwendet, um die in der Daten-

bank gegebenen Faktorwerten mit der Prädiktion durch die Webanwendung abzugleichen. Tabelle 6 zeigt die Korrelationen zwischen geschätzten und tatsächlichen RAQI-Faktorwerten sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Korrelationen für jedes Quellsignal. Abbildung 4 stellt die Korrelationen grafisch dar, indem die prädizierten Faktorwerte den geschätzten zugeordnet werden. Bei einer perfekten Korrelation entspräche die Punktwolke einer Diagonalen zwischen beiden Achsen.

Ein weiteres Mal wird die Relevanz des Quellsignals ersichtlich. Außer für Qualität, Brillanz und Intimität scheint die Vorhersage für Sprache am genauesten und für Orchester ähnlich akkurat zu sein.

Die Korrelationen der Faktorwerte für Solotrompete (Tabelle 6) weisen den niedrigsten Mittelwert und die größte Standardabweichung auf, was für eine heterogenere Präzision der Schätzungen über die neun Faktoren hinweg spricht. Dass die Standardabweichung für Orchester am geringsten ist, kann daran liegen, dass nicht für alle Räume Orchester-Bewertungen vorlagen.

Wie schon bei den Gütemaßen der Prädiktionsmodelle in Tabelle 4 wird in Abbildung 4 ersichtlich, dass beim Faktor Qualität nur in Bezug auf das Quellsignal eine Struktur der Punktwolke erkennbar ist, nämlich dass sowohl die tatsächlichen als auch die prädizierten Bewertungen bei Sprachdarbietungen niedriger sind, als bei Orchester und Solotrompete. Ähnlich verhält es sich bei den klangfarbenbezogenen Maßen Brillanz und Coloration, die ebenfalls Verschiebungen der Bewertungen je nach Quellsignal, sonst aber eher geringe Übereinstimmung zwischen Prädiktion und tatsächlicher Bewertung aufweisen. Auch beim Stärke-Faktor funktioniert die Vorhersage zwar insgesamt besser, für Orchester wird der Faktor jedoch tendenziell unter- und bei Solotrompete überschätzt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zwischen Prädiktion und tatsächlicher Bewertung akzeptable Korrelationen von mehr als 0,7 für jedes Quellsignal in den Faktoren Stärke, Halligkeit, unregelmäßiger Nachhall, Klarheit und Intimität erreicht werden. Auch in Hinblick auf die grafische Darstellung nähern sich die Punktwolken dieser Faktoren relativ gut einer Diagonalen an. Insbesondere für die zeitliche Verformung von Musik und Sprache durch den Aufführungsraum, also die Wahrnehmung von Halligkeit, einer (unregelmäßigen) Nachhallfahne, zeitlicher Prägnanz, bzw. Klarheit, sowie für die Verstärkungswirkung eines Raumes liefern die Prädiktionsmodelle passable Einschätzungen.

Ausblick und Fazit

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, besteht gerade in Bezug auf die Vorhersage von RAQI-Faktoren sicherlich

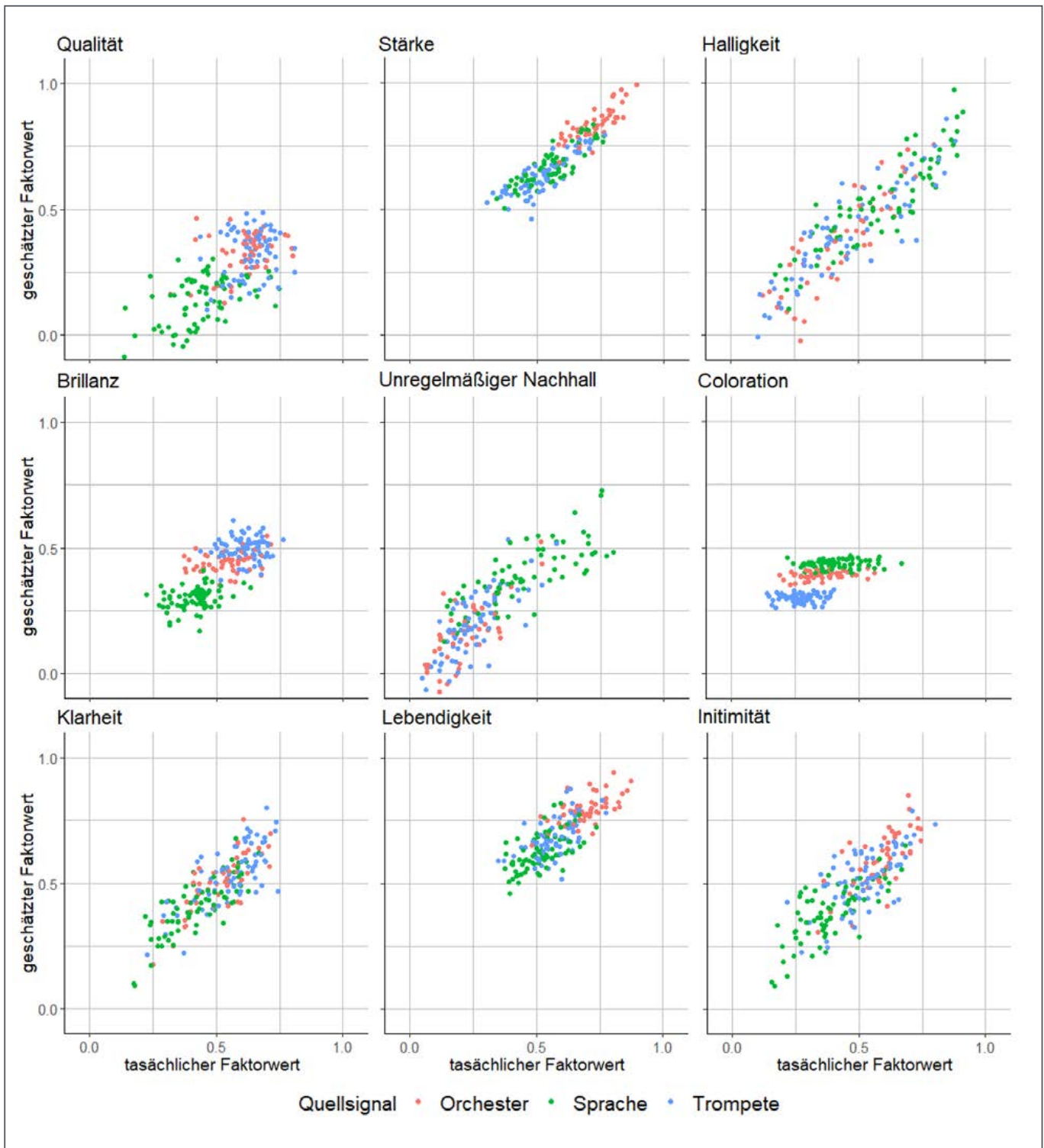


Abb. 4: Vergleich der tatsächlichen mit den geschätzten RAQI-Faktorwerten. Die Wertebereiche sind standardisiert und um Null zentriert.

noch Raum für Verbesserung. Sowohl bei der Auswahl der Prädiktorgößen als auch beim Test der Prädiktionsgüte zeigt sich, dass der Effekt eines Aufführungsraumes auf die Klangfarbe noch unzureichend modelliert wird. Ein erster Schritt, spektrale Effekte besser abzubilden, ist die frequenzabhängige Betrachtung jener physikalischen Maße, die bisher nach DIN EN ISO 3382-1 als Mittelwerte über teils relativ geringe Frequenzbereiche ausgewertet wurden. Eine Oktav-

banddarstellung von 63 Hz bis 8 kHz würde die Anzahl dieser Messgrößen um den Faktor acht erhöhen. Bei einer solchen Anzahl an Prädiktoren böten sich Methoden des maschinellen Lernens an, die allerdings deutlich größere Mengen an Daten benötigen. Dies führt zum zentralen Problem des Prädiktionsmodells in seiner bisherigen Form, nämlich die Datenbasis von lediglich 70 Impulsantworten. Schon für die hier angewendete explorative Faktoranalyse

mit drei Faktoren ist diese Anzahl relativ gering [21]. Eine Verbesserung des Prädiktionsmodells, ob mit Faktorenanalyse oder komplexeren Methoden der Prädiktorselektion bedarf also einer größeren Menge an Impulsantworten mit RAQI-Bewertungen, die neben simulierten auch real gemessene Impulsantworten beinhalten sollte. Besonders die RAQI-Bewertungen erfordern allerdings zeitaufwändige Hörversuche, die idealerweise unter kontrollierten Bedingungen im Labor durchgeführt werden sollten. Um zumindest softwareseitig die Infrastruktur für solche Versuche bereitzustellen, ist geplant, die OPRA-Anwendung um ein Umfragemodul zu ergänzen, mit dem eine hochgeladene Impulsantwort nicht nur analysiert, sondern auch direkt nach RAQI-Attributen bewertet werden kann. Da diese Funktionalität neue Anforderungen an den Betrieb der Anwendung stellt, befindet sich die Implementierung allerdings noch in der Planungsphase.

Auch ohne die Möglichkeit, neue Daten für das Prädiktionsmodell zu generieren, bietet OPRA „auf Knopfdruck“ eine Analyse musikalischer Aufnahmeräume, die mit einer Vielzahl von raumakustischen Parametern und geschätzten RAQI-Faktorwerten sowohl die physikalische, als auch die perzeptive Ebene betrachtet. Da das Vorhersagemodell einen neuen Vorstoß der Verbindung dieser beiden Ebenen darstellt, ist der einfache Zugang zu RAQI-Prädiktionen für eine pragmatische Planung von Aufführungsräumen ebenso von Interesse wie der theoretische Hintergrund ihrer Berechnung. Die Weiterentwicklung und Optimierung von OPRA kann also nicht nur die Performance der Anwendung als Analysetool verbessern, sondern auch wertvolle Erkenntnisse über die Wirkung akustischer Eigenschaften musikalischer Aufführungsräume auf einzelne Facetten des Musikerlebens liefern.

Literatur

- [1] Bradley, J. S.: Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics* 72, Nr. 10, S. 713–720, 2011.
- [2] Schärer Kalkandjiev, Z.; Weinzierl, S.: The Influence on Room Acoustics on Solo Music Performance: An Empirical Case Study. *Acta Acustica united with Acustica* 99, Nr. 3, S. 433–441, 2013.
- [3] Kob, M.; Amengual Garí, S.V.; Schärer Kalkandjiev, Z.: Room Effect on Musicians' Performance. In: Blauert, J.; Braasch, J. (Hrsg.): *The Technology of Binarual Understanding*. Cham (Schweiz), Springer Nature Switzerland 2020.
- [4] Sabine, W.C.: *Architectural Acoustics*. In: *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 42, Nr. 2, S. 51–84, 1906.
- [5] Weinzierl, S.; Lepa, S.; Ackermann, D.: A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, Nr. 3, S. 1245–1257, 2018.
- [6] DIN EN ISO 3382-1: *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 1: Aufführungsräume*. Berlin, Beuth Verlag, 2009.
- [7] ISO 23591: *Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces*. International Standardization Organization, Geneva, 2021.
- [8] Bradley, J. S.: Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. *Acoustical Science and Technology* 26, Nr. 2, S. 170–178, 2005.
- [9] Beranek, L.: *Concert Halls and Opera Houses – Music, Acoustics and Architecture*. New York, Springer Verlag 2004.
- [10] Soulodre, G.A.; Bradley, J. S.: Subjective evaluation of new room acoustic measures. *The Journal of the Acoustical Society of America* 98, Nr. 1, S. 294–301, 1995.
- [11] Lokki, T.; Pätynen, J.; Kuusinen, A.; Vertanen, H.; Tervo, S.: Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 130, Nr. 2, S. 835–849, 2011.
- [12] Lokki, T.; Pätynen, J.; Kuusinen, A.; Tervo, S.: Disentangling preference ratings of concert hall acoustics with individually elicited attributes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132, Nr. 5, S. 3148–3161, 2012.
- [13] Ackermann, D.; Ilse, M.; Grigoriev, D.; Lepa, S.; Pelzer, S.; Vorländer, M.; Weinzierl, S.: A ground truth on room acoustical analysis and perception (GRAP). 2018. <https://doi.org/10.14279/depositonnce-7003.4>
- [14] Schröder, D.; Vorländer, M.: RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments. In: *Forum Acusticum 2011*, Aalborg, Dänemark, S. 1541–1546, 2011.
- [15] Wang, G. S. C.: How to handle multicollinearity in regression modeling. *The Journal of Business Forecasting Methods & Systems* 15, Nr. 1, S. 23–27, 1996.
- [16] Kaiser, H. F.; Rice, J.: Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement* 34, Nr. 1, S. 111–117, 1974.
- [17] Nakagawa, S.; Schielzeth, H.: A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* 4, Nr. 1, S. 133–142, 2013.
- [18] Weinzierl, S.; Vorländer, M.: Room Acoustical Parameters as Predictors of Room Acoustical Impression: What Do We Know and What Would We Like to Know? *Acoustics Australia* 43, Nr. 1, S. 41–48, 2015.
- [19] DIN EN ISO 11904-1: *Akustik – Bestimmung von ohrnahen Schallquellen – Teil 1: Verfahren mit Mikrofonen in menschlichen Ohren*. Berlin, Beuth Verlag, 2002.
- [20] DIN EN ISO 9613-1: *Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch Luft*. Berlin, Beuth Verlag 1993.
- [21] Fabrigar, L. R.; Wegener, D. T.; MacCallum, R. C.; Strahan, E. J.: Evaluating the Use of Exploratory Factor Analysis in Psychological Research. *Psychological Methods* 4, Nr. 3, S. 272–299, 1999. ■

M. Sc. Markus von Berg

Hochschule Düsseldorf,
Institute of Sound and
Vibration Engineering
(ISAVE)

M. Sc. Paul Schwörer

Hochschule Düsseldorf,
Institute of Sound and
Vibration Engineering
(ISAVE)

M. Sc. Lukas Prinz

Hochschule Düsseldorf,
Institute of Sound and
Vibration Engineering
(ISAVE)

Prof. Dr.-Ing. Jochen Steffens

Hochschule Düsseldorf,
Institute of Sound and
Vibration Engineering
(ISAVE);
TU Berlin, Fachgebiet
Audiokommunikation