



MASTERARBEIT

ANALYSE DES MODALEN SCHALLFELDES ZUR UNTERSUCHUNG DER FUNKTIONSWEISE VON KANTENABSORBERN

durchgeführt am
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
Technische Universität Graz

von
Robert Hofer, BSc

Begutachter
Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Betreuer
Dipl.-Ing. Eric Kurz
Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, September 2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

(Unterschrift)

Danksagung

Mit dem Abschluss der Masterarbeit endet ein lehrreicher und erlebnisreicher Lebensabschnitt. An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während dieser Zeit begleitet haben, wobei ich folgende Personen hervorheben möchte:

Ein besonderer Dank gilt Werner Weselak und Eric Kurz, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bedanken möchte ich mich für die außerordentliche Hilfsbereitschaft, sowie umfangreiche und zeitintensive Unterstützung in fachlicher und organisatorischer Hinsicht. Zudem möchte ich Eric Kurz für die Hilfe und das besondere Engagement bei der Planung, Durchführung und Auswertung der Messungen bedanken.

Beim Labor für Bauphysik möchte ich mich für die Bereitstellung des Hallraums, sowie das Einverständnis für das Entfernen der Diffusoren im Rahmen der Messungen bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Leon Merkel, Florian Kraxberger und Stefan Schoder für die Bereitstellung der Berechnungsergebnisse der FEM-Simulation, sowie für den Gedankenaustausch über die Thematik bedanken.

Ich möchte mich auch bei Michael Vatter und Jörg Felgitsch der Firma Vatter bedanken, die es mir durch außerordentliche Kulanz ermöglicht haben, während der Durchführung der Masterarbeit beruflich tätig zu sein.

Ein großer Dank gilt auch meinen Studienkolleg*innen, Mitbewohner*innen, Freund*innen und allen, die mich während meiner Studienzeit auf vielfältige Art und Weise unterstützt haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern bedanken, die mich stets in allen Lebensentscheidungen und -situationen unterstützt und mir somit das Studium und dessen Abschluss ermöglicht haben.

Kurzfassung

Raummoden sind in der Raumakustik unerwünscht, da sie zu einer schmalbandigen Pegelanhebung von einzelnen Frequenzen führen, was sich wiederum negativ auf die Klarheit von Musik, sowie auf die Verständlichkeit von Sprache auswirkt. Zur Dämpfung von Raummoden, bzw. zur Senkung der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen, ist der Einsatz von Kantenabsorbern, die in ihrer Wirkung auch als „Modenbremse“ verstanden werden können, sinnvoll. Diese kommen in der Praxis, wegen des Fehlens eines Berechnungsmodells, im raumakustischen Planungsprozess nur in wenigen Fällen zum Einsatz.

In bestehenden Berechnungsmodellen wird aus der Kenntnis der Pegelverteilung der Energie in der Raumkante, auf die Grenzfrequenzen, sowie auf die erwartete Bandbreite für die effektive Absorption des Kantenabsorbers rückgeschlossen. In einer Vorarbeit wurde die potentielle und kinetische Energie des Schallfeldes in der Raumkante, basierend auf den Interferenzmustern nach Richard V. Waterhouse, mithilfe eines Tools berechnet, sowie messtechnisch nachgewiesen. Bei diesem Ansatz wird jedoch nicht der Einfluss des Kantenabsorbers auf das modale Schallfeld berücksichtigt.

Um ein besseres Verständnis für die Absorptionseigenschaften des Kantenabsorbers im tieffrequenten Bereich zu erlangen, in welchem das Schallfeld gewöhnlich von Raummoden geprägt ist, soll in dieser Arbeit der Einfluss des Kantenabsorbers auf das modale Schallfeld untersucht werden. Dafür wird das modale Schallfeld im Bereich der Raumkante des Hallraumes mithilfe einer pv-Sonde mit und ohne Kantenabsorber messtechnisch untersucht. Für die Validierung der Messungen ohne Kantenabsorber wird unter anderem ein Vergleich der Messdaten mit den analytisch berechneten Interferenzmuster gemäß Richard V. Waterhouse, sowie den Berechnungsergebnissen einer Simulation, basierend auf der Finiten-Elemente-Methode, durchgeführt. Durch den Vergleich der Messergebnisse bei unterschiedlichen Konfigurationen des Kantenabsorbers im Hallraum soll dessen Einfluss auf das modale Schallfeld gezeigt werden. Letztlich soll durch die Messung der Nachhallzeit in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354 untersucht werden, inwiefern sich Messgrößen des instationären Schallfeldes durch Einbringen des Kantenabsorbers verändern.

Abstract

Room modes are problematic in room acoustics because they lead to a narrowband increase of individual frequencies, which in turn negatively influences the clarity of music and the intelligibility of speech. To attenuate room modes and reduce the reverberation time at low frequencies, the use of edge absorbers is recommended, as their effect can also be understood as a “modal brake”. In practice, they are hesitantly used, due to the lack of calculation models, in the room acoustics planning process.

In existing calculation models the knowledge of the level distribution of energy in the room edge is used to infer the cutoff frequencies and the expected bandwidth for the effective absorption of the edge absorber. In a preliminary work the potential and kinetic energy of the sound field at the edge was calculated according to the interference patterns of Richard V. Waterhouse with the help of a computational model and was verified by measurements in the reverberation chamber of the Graz University of Technology. However, this approach does not take into account the influence of the edge absorber on the modal sound field.

In order to improve the understanding of the absorption properties of the edge absorber in the low-frequency range, in which the sound field is usually dominated by room modes, the influence of the edge absorber on the modal sound field will be investigated in this work. For this purpose, the modal sound field in the area of the edge of the Graz University of Technology reverberation chamber is investigated by measurements with and without edge absorber using a pv-probe. For validation of the measurements without edge absorber, a comparison of the measured data with the analytically calculated interference patterns according to Richard V. Waterhouse as well as the calculation results of a simulation based on the finite element method, is carried out. The influence of the edge absorber on the modal sound field will be shown through the comparison of the measurement results for different configurations of the edge absorber. Additionally, by measuring the reverberation time according to ÖNORM EN ISO 354, it is investigated to what extent measured quantities of the non-stationary sound field change due to the placement of the edge absorber into the reverberation chamber.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Interferenzmuster vs. modales Schallfeld	15
3	Messkonzept	19
3.1	Allgemeines	19
3.2	Messsignal	19
3.2.1	Auswahl geeigneter Raummodenfrequenzen	19
3.2.2	Temperaturabhängigkeit	22
3.2.3	Anregungsdauer	23
3.3	Messequipment	24
3.3.1	Übersicht	24
3.3.2	Schallquelle	24
3.3.3	pv-Sonde	25
3.4	Messaufbau	26
3.4.1	Messumgebung	26
3.4.2	Positionierung der pv-Sonde	26
3.4.3	Positionierung der Schallquelle	31
3.4.4	Messkonfigurationen	31
3.4.5	Signalfluss	33
3.5	Messdurchführung	34
3.5.1	Zeitlicher Messablauf	34
3.5.2	Zeitlicher Messaufwand	36
3.6	Verarbeitung der Messdaten	37
3.6.1	Entzerrung der pv-Sonde	37
3.6.2	Bandpassfilterung	37
3.6.3	Quadrierung und Mittelwertbildung	38
3.6.4	Logarithmierung und Extrapolation	38
4	Messergebnisse	39
4.1	Allgemeines	39
4.2	Messergebnisse ohne KA (MK 4)	40
4.2.1	Pegelverteilung	40
4.2.2	Pegelverlauf entlang der Raumkante	43
4.2.3	Pegelverlauf senkrecht zur Raumkante	44
4.2.4	Vergleich von gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen	48
4.3	Messergebnisse mit KA (MK 1, MK 2, MK 3)	52
4.3.1	Pegelverteilung in Abhängigkeit der MK	52
4.3.2	Pegelverlauf entlang der Raumkante	57
4.3.3	Vergleich der absoluten Pegel	59
4.3.4	Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Anregungssignals	61
4.3.5	Einfluss des KA auf $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$	63
4.3.6	Pegelverteilung in Abhängigkeit der Frequenz	65

5	Nachhallzeitmessung	71
5.1	Allgemeines	71
5.2	Messequipment und Messaufbau	71
5.3	Messergebnisse	73
5.3.1	Pegeldifferenz vs. äquivalente Absorptionsfläche	75
5.3.2	Einfluss der Raumausstattung	76
6	Fazit	79
6.1	Zusammenfassung	79
6.2	Ausblick	81
	Literaturverzeichnis	82
	Abkürzungsverzeichnis	87
A	Raummoden	89
B	Messpunktkoordinaten	93
C	Messablauf	95
D	Messergebnisse	97
D.1	Messergebnisse ohne KA (MK 4)	97
D.1.1	Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$	97
D.1.2	Pegelverteilung der $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten	100
D.1.3	Vergleich von gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen	108
D.2	Messergebnisse mit KA (MK 1, MK 2, MK 3)	116
D.2.1	Pegelverteilungen in Abhängigkeit der MK	116
D.2.2	Pegelverlauf entlang der Raumkante	132
D.2.3	Vergleich der absoluten Pegel	133
D.2.4	Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Anregungssignals	134
D.2.5	Pegelverteilung in Abhängigkeit der Frequenz	135

1

Einleitung

Wird ein Raum mit einer seiner Eigenfrequenzen angeregt, kommt es durch die Überlagerung von hin- und rücklaufenden Schallwellen zwischen den Raumbegrenzungsflächen zur Entstehung von Raummoden. Diese sind im tieffrequenten Bereich besonders stark ausgeprägt und führen bei spezifischen Frequenzen zu einer schmalbandigen Pegelanhebung. In diesem Frequenzbereich wird dadurch die Nachhallzeit stark angehoben, was in der Raumakustik üblicherweise als ungünstig betrachtet wird. Die akustische Beschaffenheit eines Raums im Frequenzbereich unterhalb von 150 Hz gilt hinsichtlich der Qualität für Sprache und Musik im Allgemeinen als wichtig [1, S.14]. Hier spielen hörphysiologische und psychoakustische Effekte, insbesondere die spektrale Maskierung der hohen durch tiefe Frequenzen, eine wichtige Rolle [2, S.26]. Eine zu geringe Dämpfung von tiefen Frequenzen und die daraus resultierende erhöhte Nachhallzeit verschlechtert die Verständlichkeit von Sprache und wirkt sich negativ auf die Klarheit und Transparenz von Musik aus [3, S.54][2, S.325-326]. Zur Senkung der Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich bzw. zur Absorption der Raummoden werden verschiedene Schallabsorbertypen verwendet. Dazu gehören Verbundplattenresonatoren (VPR), Plattenresonatoren (PR), Breitbandkompaktabsorber (BKA) oder Kantenabsorber (KA) (siehe Fuchs [2, S.132]), wobei sich letztere durch deren vergleichsweise kostengünstigen Aufbau, ihre platzsparende Montage und ihre ästhetisch ansprechenden Eigenschaften auszeichnen [4].

Wie der Name bereits errahnen lässt, spricht man von einem Kantenabsorber (KA), wenn ein Schallabsorber in der Kante eines Raums positioniert wird, wobei die Breiten- und Tiefenabmessung des Kantenabsorbers klein im Vergleich zu dessen Längsabmessung ist. Üblicherweise besteht ein KA aus einer Schachtkonstruktion, bestehend aus Holz, Gips, Kunststoff oder Blech, welche mit porösem Absorbermaterial gefüllt wird [1, 4]. Der in der Vorarbeit von Steffek [5] und im Rahmen dieser Arbeit verwendete KA grenzt sich hingegen hinsichtlich der Bauform ab, da keine Schachtkonstruktion, sondern nur poröses Absorbermaterial verwendet wird.

Das bisherige Wissen über den Einfluss des KA auf das Schallfeld basiert lediglich auf Erfahrungen aus empirischen Untersuchungen. Als Pionier in der Erforschung der Wirkungsweise des KA gilt Helmut V. Fuchs. Dieser hat bereits in zahlreichen Publikationen messtechnisch belegt, dass durch den Einsatz des KA eindrucksvolle Ergebnisse hinsichtlich der akustischen Eigenschaften eines Raums erreicht werden [2, 4, 6].

Am Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation (SPSC) der Technischen Universität Graz (TU Graz) werden ebenfalls seit einiger Zeit die akustischen Eigenschaften des KA untersucht. Dabei ist ein Ziel, dessen Absorptionseigenschaften prognostizieren zu können. Erste Versuche dazu werden in den Arbeiten von Reisinger [1] und Santer [7] gemacht. Diese basieren auf dem Ansatz, die äquivalente Absorptionsfläche des KA zu skalieren. Die Skalierungsfaktoren für die Berechnung der Absorptionseigenschaften werden dabei aus dem Kenntnis von Raummodenverteilung und -dichte, sowie aus dem Verhältnis zwischen der vom KA bedeckten und unbedeckten Kantenlänge berechnet. Die berechneten Gewichtungskurven werden in einem Abschätzungstool implementiert [1]. Mittels Optimierungsalgorithmen kann die Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Absorptionseigenschaften zusätzlich verringert

werden [7]. Einen ähnlichen Ansatz wie Reisinger [1] und Santer [7] verfolgt Zhou, welcher ein Modell zur Berechnung der Nachhallzeit in Räumen mit streifenförmigen KA, durch Berücksichtigung von Korrekturgrößen für die äquivalente Absorptionsfläche, vorschlägt [8].

Die Berechnung der raumakustischen Eigenschaften eines Raums wird üblicherweise mithilfe von Simulationsprogrammen durchgeführt. Diese basieren auf Ray-Tracing bzw. Strahlenverfolgung und berücksichtigen Raummodenphänomene daher nicht. Die erhöhten Absorptionseigenschaften des KA im tieffrequenten Bereich können nicht simuliert werden. Ein weiteres Problem liegt darin, dass in den Simulationsprogrammen mit äquivalenten Absorptionsflächen bzw. Absorptionsgraden gerechnet wird. Auch wenn die erhöhten Absorptionseigenschaften mithilfe der erwähnten Berechnungstools abgeschätzt werden können, ist es wegen des eingeschränkten Wertebereiches der Absorptionsparameter nur über Umwege möglich, diese auch in raumakustischen Simulationsprogrammen zu berücksichtigen. Eine Anpassung der Absorptionseigenschaften des KA kann dabei über die Vergrößerung der akustisch wirksamen Oberfläche erfolgen. Diese Methode ist jedoch mit zahlreichen Fehlerquellen verbunden [7].

Zudem gibt es auch kein genormtes Messverfahren zur Bestimmung der Absorptionseigenschaften des KA und daher auch keine allgemein gültigen Absorptionskoeffizienten. Die üblicherweise für die Messung der Absorptionseigenschaften verwendete ÖNORM EN ISO 354 schreibt nämlich vor, dass ein Mindestabstand von 1 m zwischen Prüfobjekt und Raumkante eingehalten werden muss. Aus diesem Grund wird der KA bei raumakustischen Planungs- und Sanierungsprozessen nur selten eingesetzt, da eine Prognose der akustischen Beschaffenheit eines Raums im tieffrequenten Bereich mit einer erhöhten Fehleranfälligkeit verbunden ist.

Kurz [9] verfolgt indessen einen analytischen Ansatz zu Berechnung der akustischen Eigenschaften des KA, durch welchen Absorptionsparameter des KA aus den Schalldruck- und Schallschnelleverteilungen, auf Basis der Interferenzmuster (IM) nach Waterhouse, hergeleitet werden. Die berechneten Grenzfrequenzen konnten zudem durch den Vergleich mit den Messergebnissen von Reisinger [1] und Santer [7] bestätigt werden.

Dieser Ansatz wird auch von Steffek [5] aufgegriffen, welcher die Interferenzeffekte von Schalldruck und -schnelle gemäß Waterhouse [10] messtechnisch überprüft. Zudem wird ein Berechnungstool erstellt, mit welchem die beschriebenen IM simuliert und analysiert werden können. Durch das Einbringen verschiedener Konfigurationen des KA in den Hallraum, wird dessen Einfluss auf die IM beschrieben. Durch die reine Betrachtung von Interferenzmustern wird aber der Einfluss von Raummoden nicht berücksichtigt. Wie von Reisinger[1] bzw. Santer [7] gezeigt, spielt dieser besonders im tieffrequenten Bereich eine wesentliche Rolle für das Absorptionsverhalten des KA.

Daher soll in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen werden, inwiefern die Erkenntnisse von Steffek auf das modale Schallfeld übertragbar sind. Dadurch soll die Wirkung des KA auf das modale Schallfeld beschrieben werden. Dafür soll im Rahmen dieser Arbeit analog zu Steffek das Schallfeld in der Raumkante, sowie der Einfluss des KA auf dieses, durch Messungen mit einer pv-Sonde analysiert werden. Das von Steffek verwendete Anregungssignal (Terzbandrauschen) wird dabei durch ein Sinussignal ersetzt, dessen Frequenz jener einer Raummode des Hallraums der TU Graz entspricht. Da durch die Änderung des Anregungssignals und somit der Isotropie des Schallfeldes die kinetische und potentielle Energie abhängig von der Position entlang der Raumkante ist, wird auch das Messraster angepasst. Die Messergebnisse aus dem Hallraum ohne KA sollen bewertet werden, indem diese unter anderem den analytisch berechneten IM nach Waterhouse, sowie den Berechnungsergebnissen einer Simulation, basierend auf der Finiten-Elemente-Methode (FEM), gegenübergestellt werden. Aus dem Vergleich der gemessenen Pegelverteilungen bei den unterschiedlichen Konfigurationen des KA soll dessen Einfluss

auf das modale Schallfeld beschrieben werden. Zudem soll die Nachhallzeit in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354 in Abhängigkeit des KA gemessen und mit den Messgrößen des stationären Schallfeldes in Verbindung gebracht werden.

Damit soll ein weiterer Aspekt für ein zukünftiges, vollständiges Berechnungsmodell des KA untersucht werden. Dieses Berechnungsmodell soll es ermöglichen den KA vermehrt bei raumakustischen Planungs- und Sanierungskonzepten einzusetzen.

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich inhaltlich in folgende Kapitel:

Kapitel 2: In diesem Kapitel werden die für die Arbeit relevanten Eigenschaften des Schallfeldes beschrieben und die Begriffe „Interferenzmuster“ und „Modales Schallfeld“ voneinander abgegrenzt.

Kapitel 3: Dieses Kapitel beschreibt das Messsignal, das Messequipment, sowie den Messaufbau. Weiters wird der zeitliche Ablauf, sowie der zeitliche Aufwand der Messung erläutert. Zudem werden die einzelnen Schritte der Messsignalverarbeitung beschrieben.

Kapitel 4: In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der gemäß Kapitel 2 durchgeführten Messungen gezeigt. Die Analyse der Messergebnisse gliedert sich in die Auswertung der Messergebnisse mit und ohne KA. Die Messergebnisse des leeren Hallraums werden dabei den analytisch berechneten IM gemäß Waterhouse, sowie den Berechnungsergebnissen einer FEM-Simulation, gegenübergestellt. Bei der Analyse der Messergebnisse bei unterschiedlichen Konfigurationen des KA, wird dessen Einfluss auf das modale Schallfeld, sowie auf die absoluten Pegel gezeigt.

Kapitel 5: Dieses Kapitel beschreibt das Messkonzept, sowie die Analyse der Messergebnisse einer Nachhallzeitmessung in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354. Diese wurden im Hallraum des Labors für Bauphysik an der TU Graz durchgeführt. Zudem werden die Ergebnisse der Nachhallzeitmessung mit Messgrößen des stationären Schallfeldes in Verbindung gebracht.

Kapitel 6: In diesem Kapitel werden schließlich die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für zukünftige Aufgabenstellungen zu dieser Thematik gegeben.

2

Interferenzmuster vs. modales Schallfeld

Durch die Überlagerung von einfallenden und rücklaufenden Schallwellen vor einer schallreflektierenden Begrenzungsfläche kommt es zu Interferenzerscheinungen bei Schalldruck p und Schallschnelle v . Mathematisch wurden die dadurch entstehenden IM erstmals in einer Publikation von R.V. Waterhouse [10] beschrieben. In der von Steffek [5] durchgeführten Vorarbeit wurden die IM an der Raumkante des Hallraums für den Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f \leq 450 \text{ Hz}$ messtechnisch überprüft. Als Anregungssignal wurde dabei bandbegrenztes weißes Rauschen mit der Bandbreite einer Terz verwendet. Es wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die Korrelation zwischen Berechnung und Messung von der Frequenz, sowie von der Messgröße ($\langle p^2 \rangle$ oder $\langle v^2 \rangle$) abhängig ist. So gibt es erst ab einer Frequenz von $f = 100 \text{ Hz}$ eine hinreichende Übereinstimmung zwischen den Berechnungs- und Messergebnissen für die kinetische Energie $\langle v^2 \rangle$ (siehe Abbildung 2.1). Für die potentielle Energie $\langle p^2 \rangle$ ist eine gute Korrelation bereits bei tieferen Frequenzen gegeben (siehe Abbildung 2.2). Steffek [5] beschreibt die Beobachtungen wie folgt:

„Anhand von Abbildung 5.11 (Abbildung 2.4 in der vorliegenden Arbeit) kann gezeigt werden, dass sich eine zu geringe Anzahl von Raummoden in einem Frequenzband (siehe 63 Hz und 80 Hz Terzbänder) negativ auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation der Interferenzmuster auswirkt.“ (Steffek [5, S.99])

In den Abbildungen 2.3 und 2.4 ist erkennbar, dass der absolute Fehler zwischen Berechnung und Messung für $\langle p^2 \rangle$ relativ konstant über den gesamten Frequenzbereich ist. Für $\langle v^2 \rangle$ hingegen ist der Fehler im tieffrequenten Bereich (unter 100 Hz) größer als bei den höheren Terzbandmittefrequenzen.

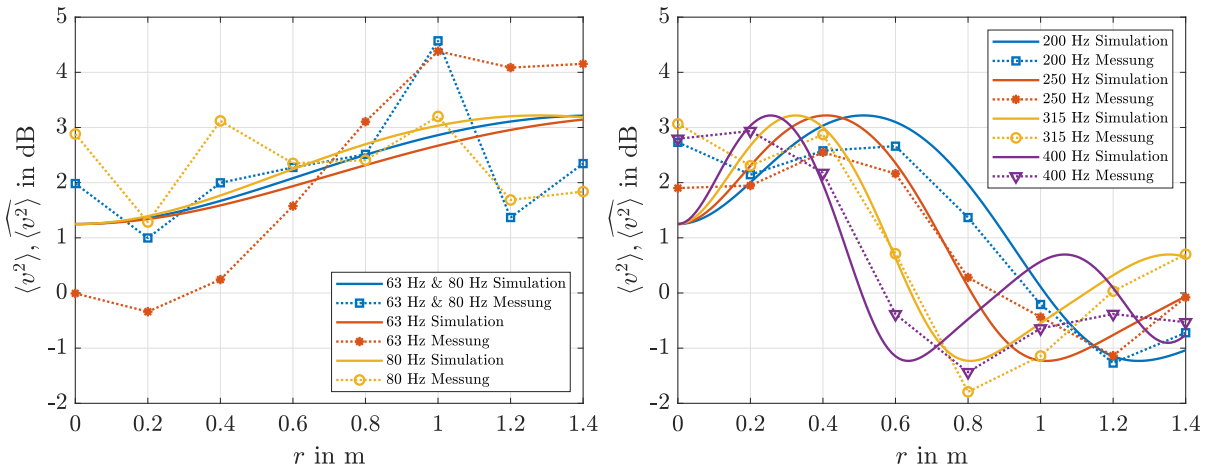


Abbildung 2.1: Mittlere kinetische Energie aus Simulation $\langle v^2 \rangle$ und Messung $\widehat{\langle v^2 \rangle}$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Kante r für verschiedene Frequenzbänder [5]

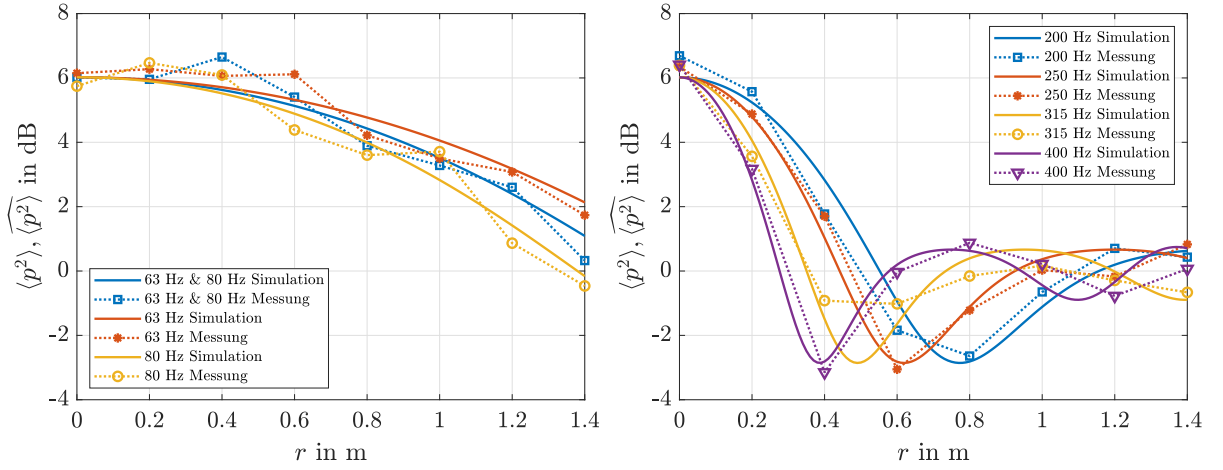


Abbildung 2.2: Mittlere potentielle Energie aus Simulation $\langle p^2 \rangle$ und Messung $\widehat{\langle p^2 \rangle}$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Kante r für verschiedene Frequenzbänder [5]

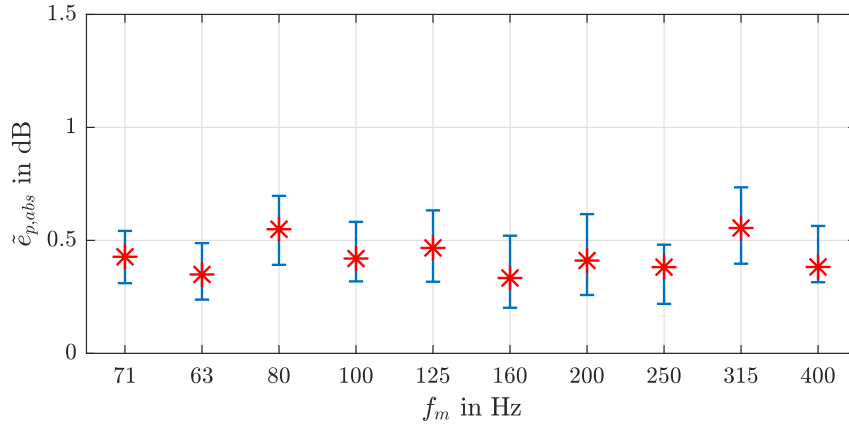


Abbildung 2.3: Absoluter Fehler für $\langle p^2 \rangle$ $\tilde{e}_{p,abs}$ in Abhängigkeit der Terzbandmittenfrequenz f_m , gemittelt über alle Trajektorienwinkel (0° , $22,5^\circ$ und 45°) und Messpositionen (1 - 8) [5]

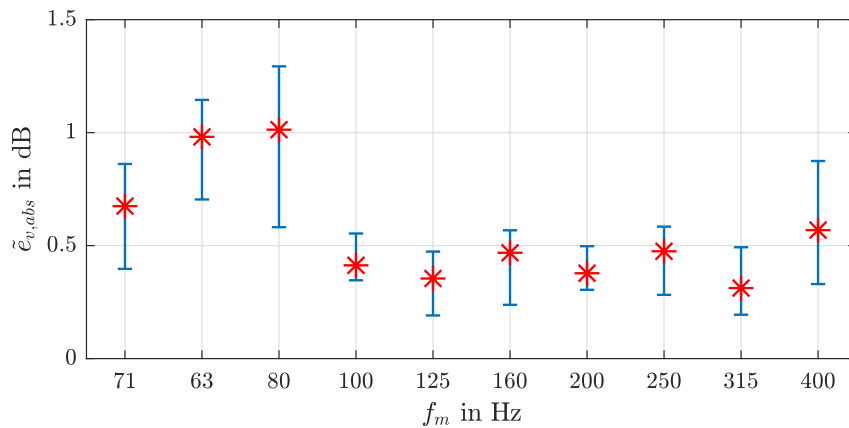


Abbildung 2.4: Absoluter Fehler für $\langle v^2 \rangle$ $\tilde{e}_{v,abs}$ in Abhängigkeit der Terzbandmittenfrequenz f_m , gemittelt über alle Trajektorienwinkel (0° , $22,5^\circ$ und 45°) und Messpositionen (1 - 8) [5]

In der vorliegenden Arbeit soll das bandbegrenzte Rauschsignal (von Steffek [5]) durch ein Sinussignal ersetzt werden. In Abbildung 2.5 ist $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit des Abstandes x dargestellt [10]. Hierbei stellt die blaue Kurve das IM für Schallwellen mit einer sinusförmigen Wellenform

bei einer Einzelfrequenz und die rote Kurve das IM für Schallwellen mit einer rauschartigen Wellenform mit einer Bandbreite von $\pm 10\%$ dar. Die Bandbreite von $\pm 10\%$ entspricht ungefähr der von Steffek [5] verwendeten Terzbandbreite. Man erkennt, dass die Abweichung zwischen den Verläufen der IM beider Anregungssignale relativ gering ist. Demnach sollten im betrachteten Frequenzbereich, unter der Annahme, dass unendlich viele, allseitig einfallende, ebene Schallwellen auf die Wand auftreffen, auch für jedes sinusförmige Anregungssignal die IM an den Begrenzungsflächen auftreten. Im mathematischen Modell von R.V. Waterhouse handelt es sich um eine theoretische Betrachtung, welche einen isotropen und inkohärenten Schalleinfall voraussetzt.

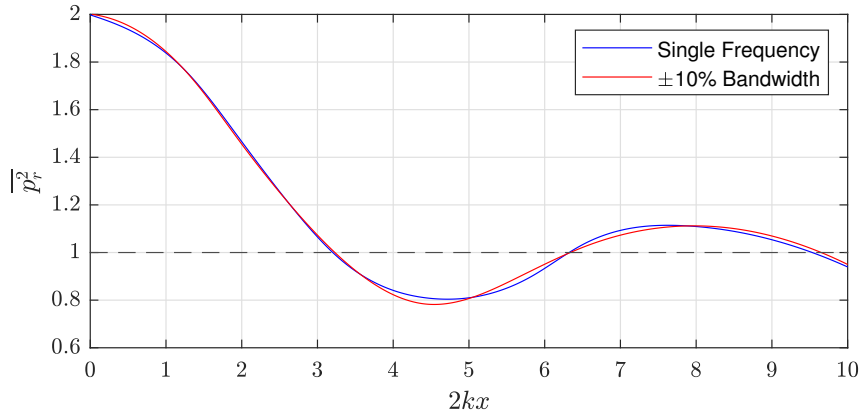


Abbildung 2.5: Mittlere potentielle Energie $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit des Abstandes x zur Wand bei allseitigem Einfall von unendlich vielen ebenen Schallwellen (r... reverberant sound field) mit einem Sinussignal (blau) und einem Rauschsignal mit $\pm 10\%$ Bandbreite (rot) als Anregungssignal [10]

Wird der Raum bei seinen Eigenfrequenzen angeregt, kommt es zur Ausbildung von Raummoden. Diese können in axiale, tangentielle und schräge Raummoden unterteilt werden. Dabei haben axiale Raummoden eine Ordnungszahl ungleich Null, tangentielle Raummoden zwei Ordnungszahlen ungleich Null und schräge Raummoden alle Ordnungszahlen ungleich Null. Für einen Quaderraum können die Raummodenfrequenzen nach Gleichung 2.1 berechnet werden [3]. Dabei geben die Ordnungszahlen n_x , n_y und n_z Auskunft über die Anzahl der Schalldruckknoten entlang der dazugehörigen Koordinatenachse (n_x - Anzahl der Schalldruckknoten in x-Richtung, n_y - Anzahl der Schalldruckknoten in y-Richtung, n_z - Anzahl der Schalldruckknoten in z-Richtung). l_x , l_y und l_z beschreiben die Kantenlängen des Quaderraums und c die Schallgeschwindigkeit.

$$f_{n_x/n_y/n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.1)$$

In Abbildung 2.6 ist die Schalldruckverteilung der Raummode 2-0-0 (entspricht im Hallraum der TU Graz der Raummodenfrequenz $f = 41,1$ Hz) abgebildet. Die Eigenfrequenzen, sowie die dazugehörigen Eigenmoden, werden mithilfe einer Eigenfrequenzanalyse in der Software COMSOL Multiphysics berechnet [11, 12]. Das Berechnungsskript wird dabei zu großen Teilen aus der Arbeit von Plagg und Pobitzer übernommen [13].

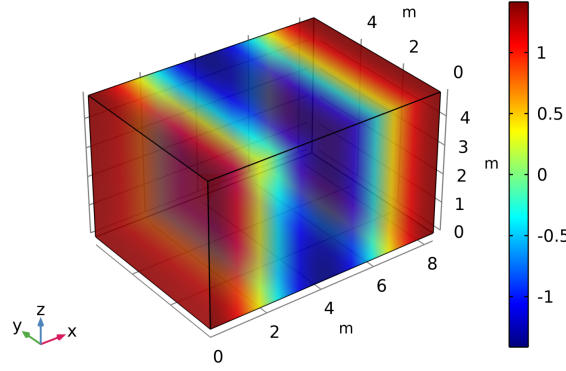


Abbildung 2.6: Schalldruckverteilung der Raummode 2-0-0 ($f = 41,1$ Hz) im Hallraum der TU Graz ($l = 8,34$ m, $b = 5,99$ m, $h = 4,90$ m)

Für die Messung spielt im Hinblick auf das modale Schallfeld die Dichte (Anzahl der Raummoden je Terzband) eine Rolle, wobei die Raummodenanzahl N je Terzband mit zunehmender Frequenz stark ansteigt. Abbildung 2.7 zeigt die Anzahl der Raummodenfrequenzen je Terzband im Frequenzbereich von $20 \text{ Hz} \leq f \leq 160 \text{ Hz}$.

Ab einer bestimmten Grenzfrequenz f_g werden Raummoden nicht mehr als isolierte, störende Raumresonanzen empfunden [3]. In der Literatur existieren mehrere Ansätze diese zu ermitteln. Die Grenzfrequenz für Hallräume $f_{g,H}$ (oder allgemein für Quaderräume mit schallharten Raumbegrenzungsflächen) kann auf Basis des Raumvolumens durch Gleichung 2.2 berechnet werden [3]:

$$f_{g,H} = \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{245 \text{ m}^3}} = 160 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

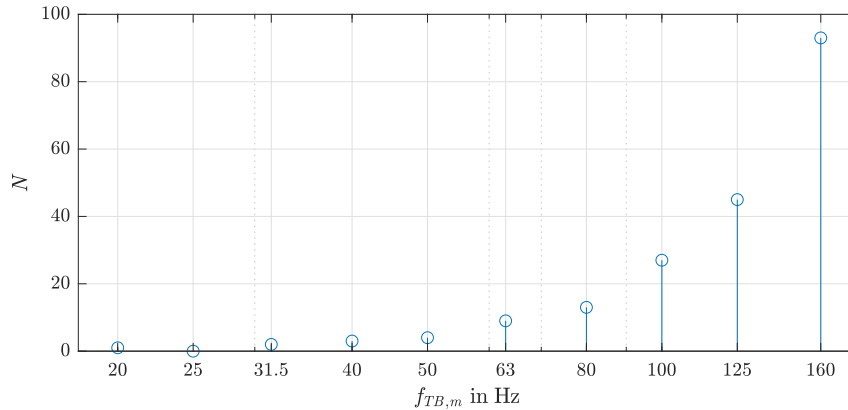


Abbildung 2.7: Anzahl N der Raummoden je Terzband für die Terzmittenfrequenzen $f_{TB,m}$ im Frequenzbereich von $20 \text{ Hz} \leq f_{TB,m} \leq 160 \text{ Hz}$

Laut Steffek [5] ist die schlechte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen $\langle v^2 \rangle$ bzw. $\langle \widehat{v^2} \rangle$ (siehe Abbildung 2.1 (links) bzw. Abbildung 2.4) der geringen Raummodendichte und der dadurch unzureichenden Isotropie des Schallfeldes unterhalb des 100 Hz-Terzbandes geschuldet. Für eine ausreichende Isotropie im Schallfeld vor der Raumkante müssen mindestens 20 Raummoden je Terzband enthalten sein. Wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, wird diese Forderung ($N \geq 20$) erst ab dem 100 Hz-Terzband erfüllt. Bei breitbandiger Anregung erhöht sich, bedingt durch die größere Anzahl an Raummoden je Terzband, die Isotropie des Schallfeldes.

3

Messkonzept

3.1 Allgemeines

Wie im vorherigen Kapitel diskutiert, treten im Raum, je nach Messgröße, Entfernung zu den Begrenzungsflächen, Frequenz und der daraus resultierenden Isotropie sowohl IM als auch Raummoden in unterschiedlich starker Deutlichkeit auf. In dieser Messkampagne wird zunächst das Verhalten des modalen Schallfeldes in Abhängigkeit von KA bei unterschiedlichen KA-Konfigurationen untersucht. Dafür wird sowohl im leeren Hallraum als auch bei Vorhandensein des KA das Schallfeld entlang der Raumkante des Hallraumes örtlich abgetastet. Gleichzeitig soll überprüft werden, ob IM nach Waterhouse, bei Anregung des Schallfeldes mit einer Raummodenfrequenz, vorhanden sind.

3.2 Messsignal

Als Anregungssignal wird ein Sinussignal verwendet, dessen Frequenz jener einer Raummode des Hallraums der TU Graz entspricht.

3.2.1 Auswahl geeigneter Raummodenfrequenzen

Das Absorptionsverhalten und somit auch das Absorptionsmaximum eines KA ist abhängig von den bautechnischen Eigenschaften (Dimensionen, Material), vom Raum (Dimensionen) in welchem der KA eingebracht wird, sowie von der Positionierung des KA im Raum. Laut Reisinger [1] und Santer [7] erreicht der KA durch erhöhte Absorption an Schallschnellemaxima in modalen Schallfeldern entlang der Raumkante im tiefen und mittleren Frequenzbereich sein Absorptionsmaximum. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete KA besitzt sein Absorptionsmaximum (bei Messkonfiguration 1¹) im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_{TB,m} = 80$ Hz (siehe Steffek [5, S.95] bzw. Abbildung 3.1). Auch von Santer [7, S.25 - 26] konnte das Absorptionsmaximum in diesem Frequenzband gemessen werden. Um den Frequenzbereich zu erweitern, wird nicht nur im 80 Hz-Terzband, sondern auch in dessen benachbarten Frequenzbändern ($f_{TB,m} = 100$ Hz und 125 Hz) nach Raummodenfrequenzen gesucht, die sich für ein Anregungssignal eignen. Durch die Wahl der zu untersuchenden Frequenzbänder, wird der Frequenzbereich festgelegt, welcher von der unteren Grenzfrequenz des 80 Hz-Terzbandes $f_{TB,u,min} = 70,8$ Hz bis zur oberen Grenzfrequenz des 125 Hz-Terzbandes $f_{TB,o,max} = 141$ Hz reicht. Alle Raummodenfrequenzen innerhalb dieses Frequenzbereichs ($f_{TB,u,min} \leq f \leq f_{TB,o,max}$) erfüllen die Frequenzbereichbedingung (FBB) und sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

¹ Details zu den Messkonfigurationen in Abschnitt 3.4.4

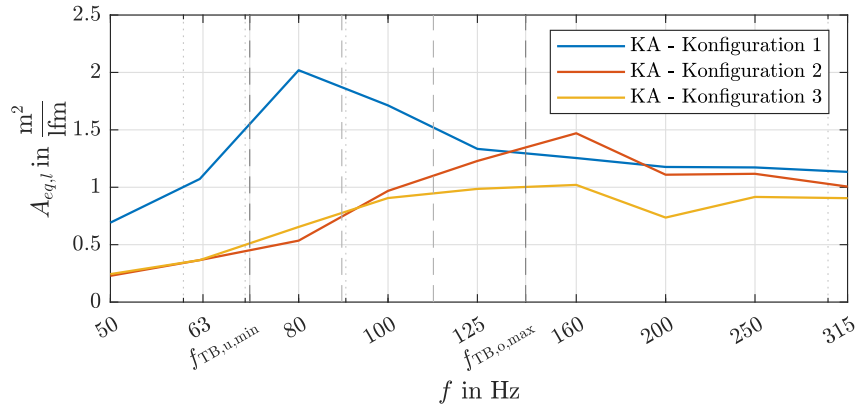


Abbildung 3.1: Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter $A_{eq,l}$ in Abhängigkeit der Frequenz f bei verschiedenen Messkonfigurationen. $f_{TB,u,min}$ beschreibt die untere Grenzfrequenz des 80 Hz-Terzbandes und $f_{TB,o,max}$ die obere Grenzfrequenz des 125 Hz-Terzbandes [5]

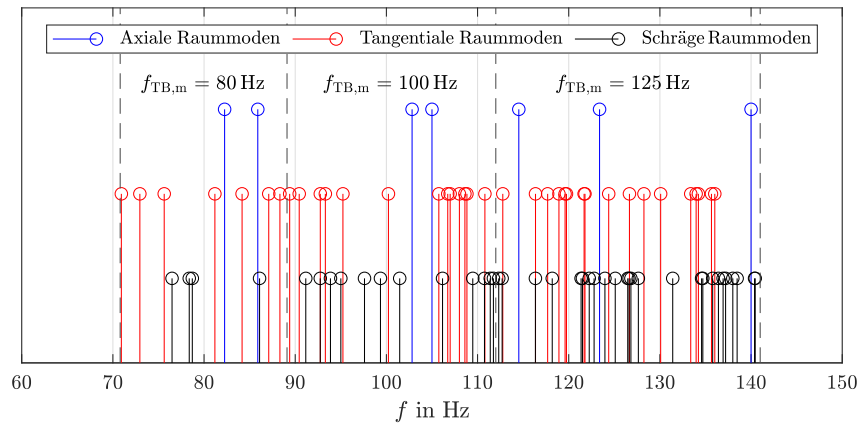


Abbildung 3.2: Axiale, tangentielle und schräge Raummoden, welche die FBB erfüllen

Nell [14], welcher in seiner Arbeit unter anderem das Absorptionsverhalten von Plattenabsorbern bei Anregung des Raumes mit Raummodenfrequenzen untersucht hat, konnte feststellen, dass bei schlechter Frequenztrennung das Absorptionsverhalten der Plattenabsorber bei einzelnen Raummodenfrequenzen nicht mehr analysiert werden kann. Sowohl die räumliche Trennung (Positionierung der Mikrofone) als auch die separierte Anregung der Raummodenfrequenzen kann nicht mehr gewährleistet werden, wenn der Raummodenfrequenzabstand zu gering ist. Deswegen wird als Kriterium für die Wahl der Anregungsfrequenzen der Frequenzabstand zwischen benachbarten Raummodenfrequenzen festgelegt. Für die Wahl der Raummodenfrequenzen wird ein minimal zulässiger Modenfrequenzabstand von $\Delta f = 0,4$ Hz gewählt. Im Folgenden wird diese Bedingung als Frequenzabstandsbedingung (FAB) bezeichnet. Abbildung 3.3 zeigt alle Raummodenfrequenzen, welche sowohl die FBB als auch die FAB einhalten.

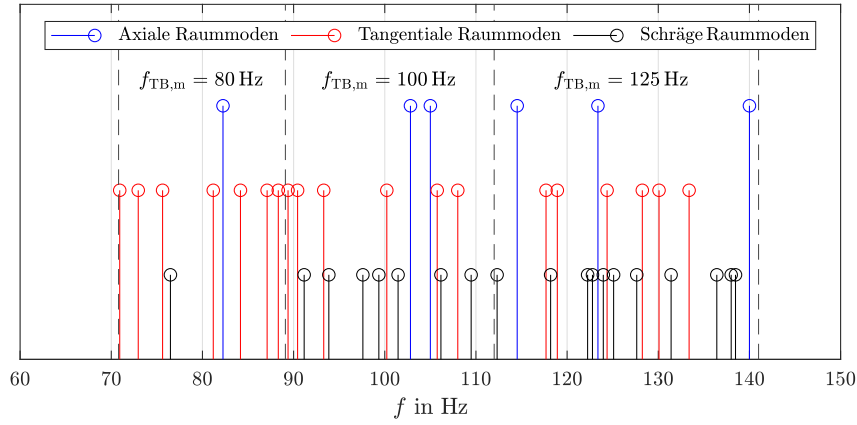


Abbildung 3.3: Axiale, tangentielle und schräge Raummoden, welche die FBB und FAB erfüllen

Im letzten Eingrenzungsschritt werden auch die Ordnungszahlen (n_x , n_y oder n_z) auf einen bestimmten Wertebereich limitiert. Dafür muss bereits an dieser Stelle erwähnt werden, dass das Messraster, auf welchem die pv-Sonde bei den Messungen positioniert wird, entlang der Längskante festgelegt wird (siehe Abbildung 3.16). Erklärungen zur Wahl der Messpositionen sind in Abschnitt 3.4.2 zu finden. Im gewählten örtlichen Messbereich soll durch die Vorgabe des Wertebereichs von n_x das Abtasten einer Raummode in x-Richtung gewährleistet werden. Durch die Einschränkung von n_y und n_z soll der Einfluss einer Raummode auf die IM möglichst konstant gehalten werden um eine Überlagerung von $\langle p^2 \rangle$ -Modenminima mit den $\langle p^2 \rangle$ -Minima der IM bzw. von $\langle v^2 \rangle$ -Modenmaxima mit den $\langle v^2 \rangle$ -Maxima der IM zu vermeiden. Im Rahmen der Messungen sollen nicht nur axiale, sondern auch tangentielle und schräge Raummoden untersucht werden. Um den Einfluss des modalen Schallfeldes auf die IM dennoch so konstant wie möglich zu halten, wird der Wertebereich der Ordnungszahlen in y- und z-Richtung auf $n_y \leq 1$ und $n_z \leq 1$ beschränkt. Die Bedingungen für den Wertebereich der Raummodenordnungen werden in weiterer Folge als Ordnungszahlbedingung (OZB) bezeichnet. In Abbildung 3.4 werden alle Raummodenfrequenzen gezeigt, welche die FBB, FAB und OZB einhalten.

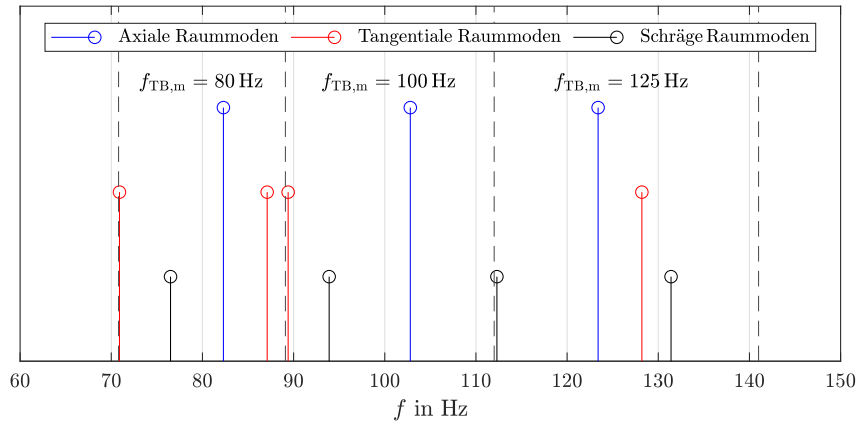


Abbildung 3.4: Axiale, tangentielle und schräge Raummoden, welche die FBB, FAB und OZB erfüllen

Somit ergeben sich die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Bedingungen, welche eine Raummodenfrequenz bzw. deren zugehörige Raummode erfüllen muss, um als Frequenz des Anregungssignals geeignet zu sein.

Tabelle 3.1: Bedingungen zur Auswahl von Raummodenfrequenzen

Nr.	Bezeichnung	Bedingung
1	FBB	$70,8 \text{ Hz} \leq f \leq 141 \text{ Hz}$
2	FAB	$\Delta f \geq 0,4 \text{ Hz}$
3	OZB	$n_x \geq 1$
		$n_y \leq 1$
		$n_z \leq 1$

Insgesamt gibt es 11 Raummodenfrequenzen, welche die FBB, FAB und OZB erfüllen. Für den weiteren Verlauf der Messungen werden nun 8 Raummodenfrequenzen ausgewählt, welche in Tabelle 3.2 aufgelistet sind.

Tabelle 3.2: Ausgewählte Raummodenfrequenzen

Nr.	f in Hz	Ordnungszahlen			$\frac{\lambda}{4}$ in m	Modentyp	Terzbänder in Hz		
		n_x	n_y	n_z			$f_{\text{TB,u}}$	$f_{\text{TB,m}}$	$f_{\text{TB,o}}$
1	82,3	4	0	0	1,04	axial	70,8	80	89,1
2	87,1	4	1	0	0,98	tangential			
3	89,4	4	0	1	0,96	tangential	89,1	100	112
4	93,9	4	1	1	0,91	schräg			
5	102,8	5	0	0	0,83	axial			
6	112,3	5	1	1	0,76	schräg	112	125	141
7	123,4	6	0	0	0,69	axial			
8	128,3	6	0	1	0,67	tangential			

3.2.2 Temperaturabhängigkeit

Um die Wellenlänge der Schallwelle konstant zu halten ($\lambda = \frac{c}{f} = \text{konst.}$), was Voraussetzung für die Anregung der Raummoden ist, muss bei einer etwaigen Änderung der Schallgeschwindigkeit, bedingt durch die Veränderung der Raumtemperatur, auch die Frequenz angepasst werden. Für die Berechnungen wird als Referenzschallgeschwindigkeit $c_{ref} = c(\vartheta_{ref}) = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ verwendet, was der Schallgeschwindigkeit bei einer Raumtemperatur von ca. $\vartheta_{ref} = 20^\circ\text{C}$ entspricht. Für $\vartheta \ll 273,15^\circ\text{C}$ kann die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit $c(\vartheta)$ über eine Näherungsformel berechnet werden [3].

$$c(\vartheta) = (331,3 + 0,6 \vartheta) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.1)$$

$$\Delta f(\vartheta) = f_{\vartheta_{ref}} - f(\vartheta) = f_{\vartheta_{ref}} \left(1 - \frac{331,3 + 0,6 \vartheta}{c_{\vartheta_{ref}}} \right) \quad (3.2)$$

Abbildung 3.5 zeigt die gemäß Gleichung 3.2 berechnete Frequenzänderung Δf bei verschiedenen Temperaturen ϑ in Abhängigkeit der Frequenz f im Frequenzbereich von $70 \text{ Hz} \leq f \leq 150 \text{ Hz}$ für den Temperaturbereich von $10^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 30^\circ\text{C}$.

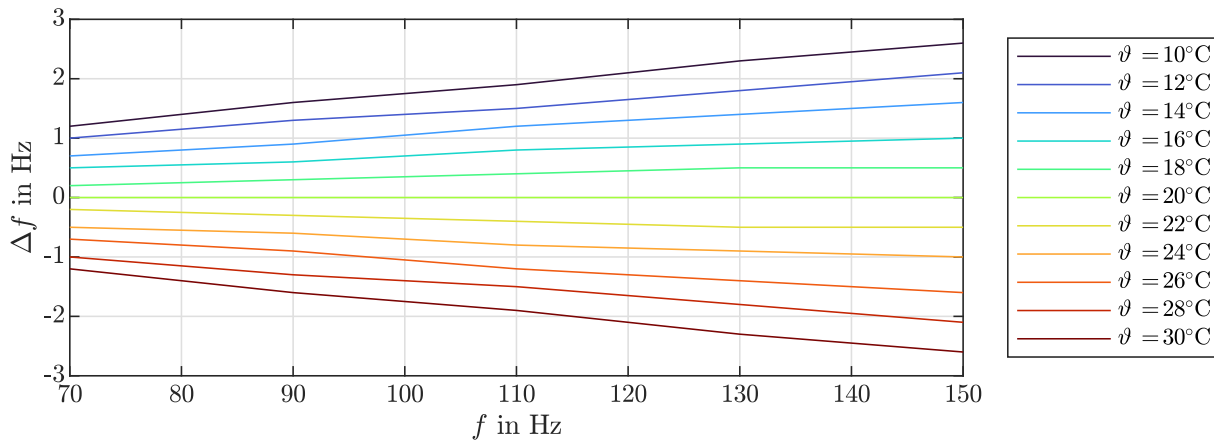


Abbildung 3.5: Frequenzänderung Δf bei verschiedenen Temperaturen ϑ in Abhängigkeit der Frequenz f für den Temperaturbereich von $10^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 30^\circ\text{C}$ im Frequenzbereich von $70\text{ Hz} \leq f \leq 150\text{ Hz}$

3.2.3 Anregungsdauer

Bei Anregung eines Raumes mit einer Schallquelle, stellt sich nach einer gewissen Zeit (Anhallzeit) ein stationärer Zustand ein, in welchem die Energiedichte des Schallfeldes im Raum zeitlich konstant ist. Die stationäre Energiedichte ist abhängig vom Leistungszufluss in Form der Schallquelle sowie von den Absorptionsflächen (Raumbegrenzungsflächen, Einrichtung). Durch das Einbringen des KA in einen Raum wird die Absorptionsfläche erhöht und dadurch die Energiedichte reduziert. Die in der Arbeit durchgeführten Messungen werden im stationären Zustand des Schallfeldes durchgeführt. Nach dem Abschalten der Quelle sinkt die Schallenergie im Raum exponentiell ab (siehe Abbildung 3.6). Zur Bestimmung der Anregungsdauer im leeren Hallraum werden die Messergebnisse von Nell [14, S.38] als Anhaltspunkt herangezogen. Im Frequenzbereich $70,8\text{ Hz} \leq f \leq 141\text{ Hz}$ wurde dabei eine maximale terzgemittelte Nachhallzeit von $T_{30} = 30\text{ s}$ gemessen. Diese Nachhallzeit ist für die spätere Messdurchführung relevant (siehe Abschnitt 3.5.1).

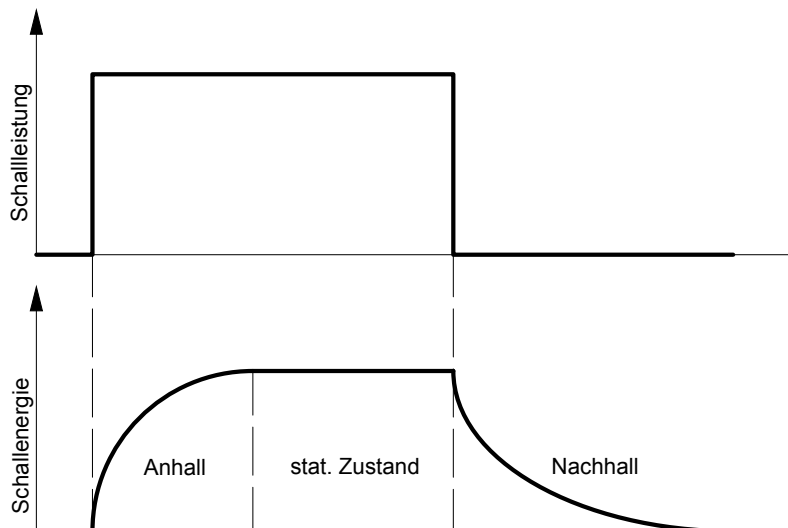


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des zeitlichen Verhaltens von Anhall, stationärem Zustand und Nachhall

3.3 Messequipment

3.3.1 Übersicht

Für die Messungen wird das in Tabelle 3.3 aufgelistete Equipment verwendet. Dieses wird mit Ausnahme des Tieftöners (Eigentum der Hochschülerinnen- und Hochschülerschaft an der TU Graz), vom Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der TU Graz entlehnt.

Tabelle 3.3: Auflistung des für die Messung benötigten Mess-Equipments

Bezeichnung	TU Graz Inventarnummer
Microflown 1/2" pv-Sonde	0138939
Microflown MFSC-2 Signalaufbereiter	0138939
Mackie SRM1850 Tieftöner	-
RME Fireface UCX Soundkarte	0138931
Thermohygrometer testo 608-H1	9525956
Laptop Lenovo ThinkPad T14s mit MATLAB	0199249

Diverse Adapter und Kabel, sowie ein Mikrofonstativ zur Fixierung der pv-Sonde, sind in Tabelle 3.3 nicht aufgelistet.

3.3.2 Schallquelle

Als Schallquelle wird der Tieftöner SRM1850 von Mackie [15], dessen Schalldruckpegelfrequenzgang in Abbildung 3.7 dargestellt ist, verwendet.

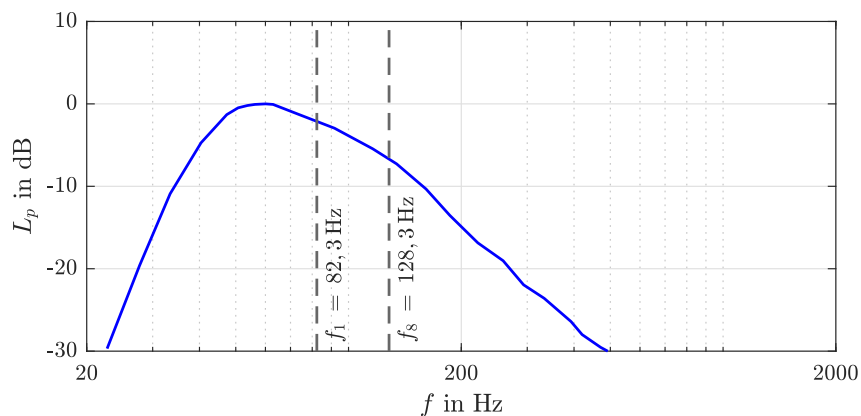


Abbildung 3.7: Auf 0 dB SPL normierter Schalldruckpegel L_p des Tieftöners (Mackie SRM1850 [15]) in Abhängigkeit der Frequenz f . Gekennzeichnet ist die niedrigste und höchste Frequenz der verwendeten Raummoden ($f_1 = 82,3$ Hz und $f_8 = 128,3$ Hz, vgl. Tabelle 3.2)

Aus den Schalldruckpegelfrequenzgang in Abbildung 3.7 ist erkennbar, dass der relative Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz nicht konstant ist. Zwischen den Raummodenfrequenzen 1 und 8, ist dabei eine Pegeldifferenz von $\Delta L_p \approx 5$ dB vorhanden. Zudem gibt es bei wandnaher Positionierung des Tieftöners im Raum, durch die Wechselwirkung zwischen Schallquelle und Raumbegrenzungsflächen, eine frequenzabhängige Schallleistungsabstrahlung [16, 17]. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird jedoch der frequenzabhängige Einfluss der Schallquelle auf das Schallfeld nicht berücksichtigt.

3.3.3 pv-Sonde

Zur Beschreibung des Schallfeldes soll die potentielle Energie $\langle p^2 \rangle$ sowie die kinetische Energie $\langle v^2 \rangle$ ermittelt werden. Dafür soll mithilfe einer pv-Sonde der Schalldruck p und die Schallschnelle v gemessen werden. Für die Messungen wird eine 1/2" pv-Sonde des Herstellers Microflown Technologies verwendet. Details zur pv-Sonde, zum pv-Sondengehäuse sowie zum Signalaufbereiter sind in der Arbeit von Kaiser & Wutti [18], sowie im Herstellerhandbuch der pv-Sonde [19], zu finden. Wie in den Abbildungen 3.8 und 3.9 ersichtlich, sind die Empfindlichkeit der pv-Sonde sowie die Übertragungsfunktion des pv-Sondengehäuses frequenzabhängig. Die Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigen den Betrags- und Phasenfrequenzgang von p - und v -Kanal der pv-Sonde sowie von deren Gehäuse.

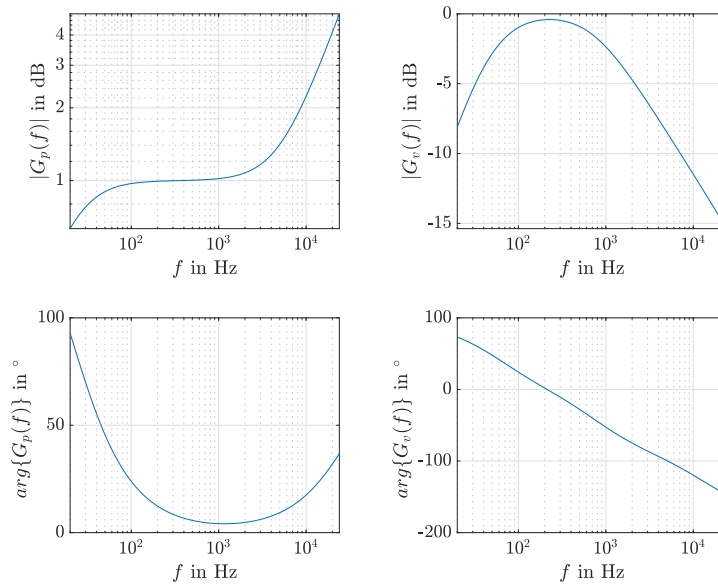


Abbildung 3.8: Betrags- und Phasenfrequenzgang von p - und v -Kanal der pv-Sonde [19]

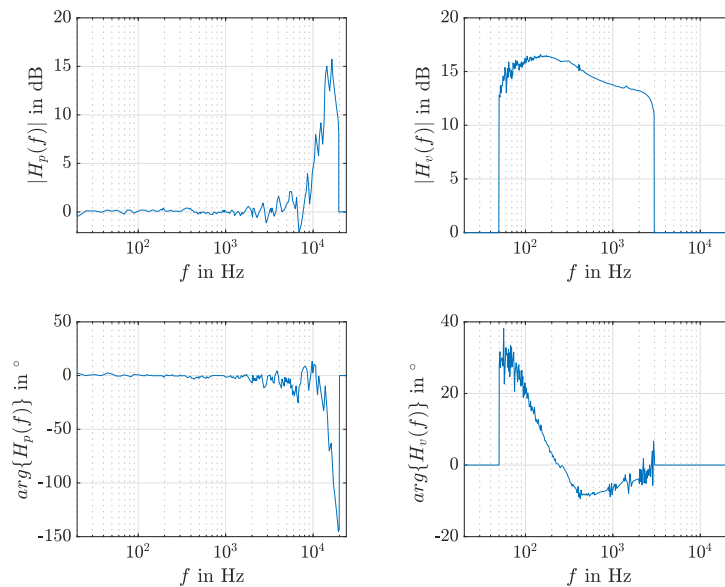


Abbildung 3.9: Betrags- und Phasenfrequenzgang von p - und v -Kanal des pv-Sondengehäuses [19]

3.4 Messaufbau

3.4.1 Messumgebung

Um ein möglichst ideales modales Schallfeld zu generieren, wird ein Raum mit möglichst schallharten, parallel gegenüberliegenden Begrenzungsflächen benötigt. Deswegen werden die Messungen im Hallraum des Labors für Bauphysik an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Dieser besitzt die Form eines Quaders mit den Abmessungen 8,34 m x 5,99 m x 4,90 m ($l \times b \times h$). Somit beträgt die Grundfläche $A = 50 \text{ m}^2$ und das Raumvolumen $V = 245 \text{ m}^3$. Da der Raum unter anderem für die Messung der Schallabsorption gemäß ÖNORM EN ISO 345 [20] verwendet wird, sind zur Erhöhung der Schallfeldhomogenität, die dafür notwendigen Diffusoren von der Decke abgehängt. Zudem sind drei PR zur Tiefenabsorption im Raum installiert. Sowohl die Diffusoren als auch die PR werden im Vorfeld der Messungen aus dem Hallraum entfernt.



Abbildung 3.10: Der Hallraum des Instituts für Bauphysik ohne PR und Diffusoren

3.4.2 Positionierung der pv-Sonde

Durch eine geeignete Positionierung der pv-Sonde sollen sowohl IM als auch modale Effekte für die ausgewählten Anregungsfrequenzen messtechnisch erfasst werden. Analog zur Arbeit von Steffek [5] können die IM von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ durch Messungen an diskreten Punkten entlang einer Geraden ermittelt werden (siehe Abbildung 3.14). Diese Gerade wird im Folgenden als Trajektorie bezeichnet. In der Arbeit von Steffek wurden die Messungen entlang von 3 Trajektorien mit den Elevationswinkeln 0° , $22,5^\circ$ und 45° durchgeführt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen beschränken sich lediglich auf die 45° -Trajektorie. Durch die Messung von p und v entlang einer einzelnen Trajektorie können keine Rückschlüsse auf das modale Schallfeld in x-Richtung gezogen werden. Daher soll die Trajektorie an mehrere Positionen entlang der Raumkante platziert werden. Die Raumkante, in welcher die Positionen für die pv-Sonde gewählt werden, ist in Abbildung 3.16 ersichtlich. Dabei kommt als sinnvolle Wahl nur eine der vier Längskanten des Raumes infrage, da die Längskanten der Decke schwierig zu erreichen sind und sich bei der nicht gewählten unteren Längskante die Eingangstür zum Hallraum befindet. Messpunkte entlang einer Trajektorie werden im Folgenden als Mikrofonpositionen (MP) und die Positionen der Trajektorien entlang der Raumkante als Trajektorienpositionen (TP) bezeichnet.

Positionen der Trajektorien entlang der Kante (TP)

Abstand und Anzahl der TP sollen so gewählt werden, dass sowohl ein Minimum als auch ein Maximum jeder Raummode erfasst werden kann. Zur Erfüllung dieser Bedingung muss mindestens eine Viertelwelle jeder Raummode abgetastet werden. Um nicht für jede Raummodenfrequenz die Position der pv-Sonde anpassen zu müssen, soll der Abstand zwischen den TP unabhängig von der Frequenz gewählt werden. Der Abstand soll dabei so gewählt werden, dass die Viertelwelle jeder Raummode mindestens fünf Mal abgetastet wird. Da sich die von Steffek gewählte TP im Abstand von $x = 0,6$ m von der Raummitte befindet, soll der Abstand zwischen den TP auch ein Teiler von 0,6 m sein [5, S.25]. Unter Einhaltung aller Aspekte wurde daher ein Abstand zwischen den TP von $x = 0,15$ m gewählt. Um mit dem gewählten TP-Abstand auch eine Viertelwelle von Raummode 4-0-0 (Raummode mit der größten Wellenlänge (siehe Tabelle 3.2)) vollständig abtasten zu können sind somit 8 TP erforderlich. Um etwaige örtliche Verschiebungen erfassen zu können, wird eine 9. TP definiert.

Eine schematische Darstellung der Trajektorienpositionen TP 1 bis TP 9, sowie eine schematische Darstellung der Viertelwelle der $\langle p^2 \rangle$ -Raummoden 4-0-0 und 6-0-1 wird in Abbildung 3.11 gezeigt. Die x-Achse der Abbildung 3.11 repräsentiert einen Abschnitt der Längskante des Hallraums, wobei sich TP 1 in der Mitte der Längskante befindet. Die Darstellungen des modalen Schallfeldes der Raummoden 4-0-0 und 6-0-1 sind in Abbildung 3.12 zu sehen.

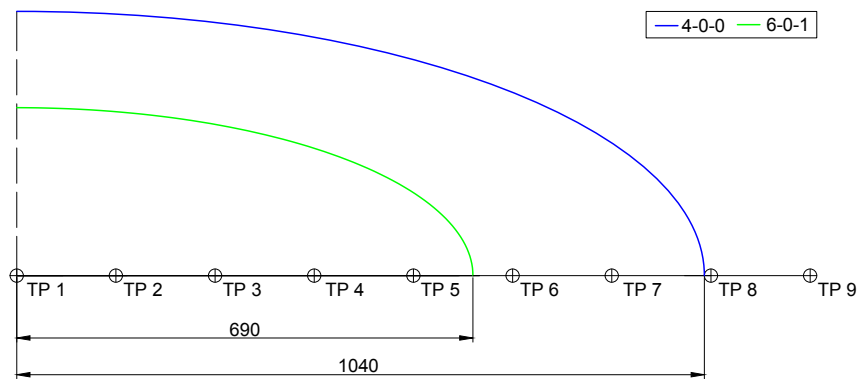


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung einer Viertelwelle des Schalldruckbetrages der Raummoden 4-0-0 und 6-0-1 (Maße in mm)

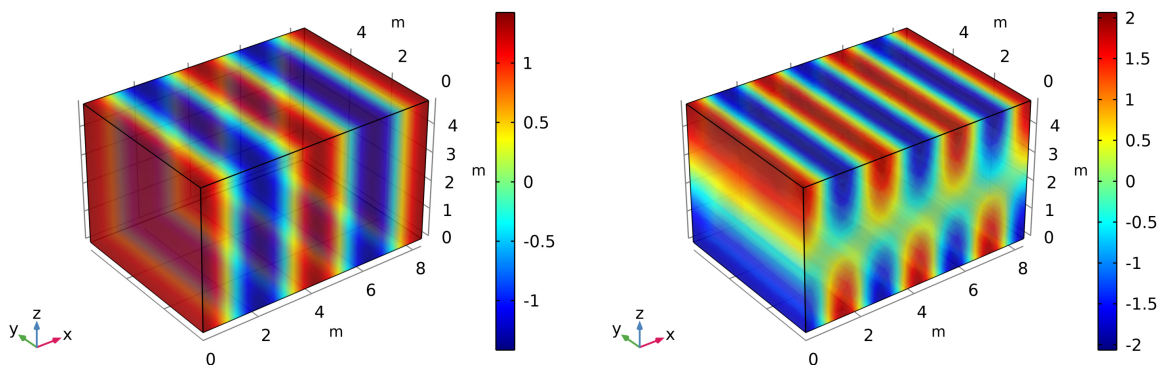


Abbildung 3.12: Schalldruckverteilung der Raummoden 4-0-0 (links) und 6-0-1 (rechts)

Positionen entlang einer Trajektorie (MP)

Durch die MP entlang einer Trajektorie, soll ein IM abgetastet werden. Für ein vollständiges IM, muss mindestens ein $\langle v^2 \rangle$ -Maximum $\langle v^2 \rangle_{max}$ erfasst werden. Der Verlauf von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ wird in der Publikation von Waterhouse durch sphärische Besselfunktionen n-ter Ordnung berechnet [10]. Die Lage des ersten $\langle v^2 \rangle$ -Maximums $r(\langle v^2 \rangle_{max})$ kann durch ein Modell, ähnlich der $\frac{\lambda}{4}$ -Regel, angenähert werden, welches von der Frequenz des Anregungssignals f , der Schallgeschwindigkeit c und dem Parameter a abhängig ist. (siehe Gleichung 3.3, vgl. Steffek [5, S.15 - 16]).

$$\mathbf{r}' = \frac{1}{a} \frac{c}{\mathbf{f}(\langle \mathbf{v}^2 \rangle_{max})} \quad (3.3)$$

Um den Verlauf von $\mathbf{r}'$ an $\mathbf{r}(\langle \mathbf{v}^2 \rangle_{max})$ anzunähern, wird ein Curve-Fitting für den Parameter a durchgeführt, wobei durch die Minimierung des Fehlers e_r , a_{opt} berechnet wird (siehe Gleichung 3.4).

$$a_{opt} = \min_a (e_r) = \min_a \left(\left\| \frac{1}{a} \frac{c}{\mathbf{f}(\langle \mathbf{v}^2 \rangle_{max})} - \mathbf{r}(\langle \mathbf{v}^2 \rangle_{max}) \right\|_2^2 \right) \quad (3.4)$$

Für den Frequenzbereich von $20 \text{ Hz} \leq f \leq 2000 \text{ Hz}$ und einen maximalen Wandabstand von $r = 1,6 \text{ m}$ konnte $a_{opt} = 3,2$ ermittelt werden. Zur Durchführung der Berechnung wurde eine MATLAB-App verwendet (siehe Abbildung 3.13). Die Entfernung der Lage des ersten $\langle v^2 \rangle$ -Maximums der niedrigsten Raummodenfrequenz ($f_1 = 82,3 \text{ Hz}$ (siehe Tabelle 3.2)) zur Raumkante wird in Gleichung 3.5 berechnet.

$$r(f_1) = \frac{c}{a \cdot f_1} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,2 \cdot 82,3 \text{ Hz}} = 1,3 \text{ m} \quad (3.5)$$

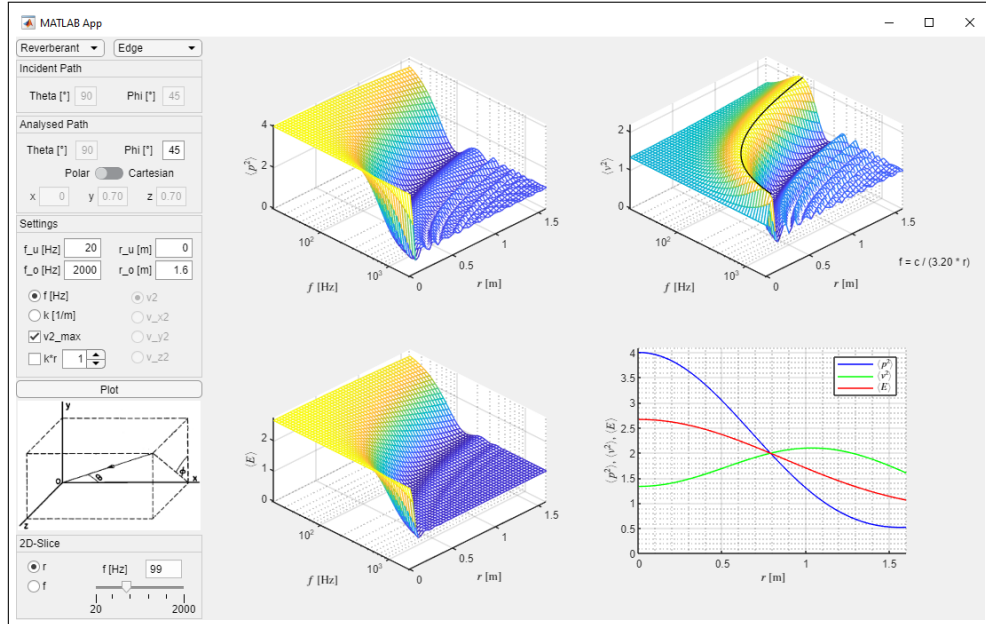


Abbildung 3.13: Ausschnitt aus der MATLAB-App. Berechnung von Interferenzmustern in einer Raumkante für den allseitigen Einfall unendlich vieler ebener Schallwellen entlang der 45° -Trajektorie

Der Abstand zwischen den MP entlang der Trajektorie von $r = 0,2 \text{ m}$ wird aus der Arbeit von Steffek [5, S.26] übernommen. Um $r(f_1)$ noch erfassen zu können, sind also 8 MP erforderlich, was zugleich auch der örtlichen Auflösung von Raumkante bis $\langle v^2 \rangle_{max}$ bei f_1 entspricht. Aus der Arbeit von Steffek ist zu entnehmen, dass bei tiefen Frequenzen eine relativ geringe Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten IM hinsichtlich Lage des ersten $\langle v^2 \rangle$ -Maximums vorliegt (siehe Steffek [5, S.62]). Um bei etwaigen Ungenauigkeiten dennoch das erste $\langle v^2 \rangle$ -Maximum erfassen zu können, wird eine zusätzliche MP definiert (MP 9). Somit ergibt sich eine Trajektorienlänge von 1,6 m (siehe Abbildung 3.14).

Analog zu Gleichung 3.5 wird auch für die höchste verwendete Raummodenfrequenz ($f_8 = 128,3 \text{ Hz}$) die örtliche Auflösung von Raumkante bis $\langle v^2 \rangle_{max}$ ermittelt (siehe Gleichung 3.6). Daraus folgt, dass 5 MP erforderlich sind, um bei f_8 das erste $\langle v^2 \rangle$ -Maximum abtasten zu können.

$$r(f_8) = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,2 \cdot 128,3 \text{ Hz}} = 0,84 \text{ m} \quad (3.6)$$

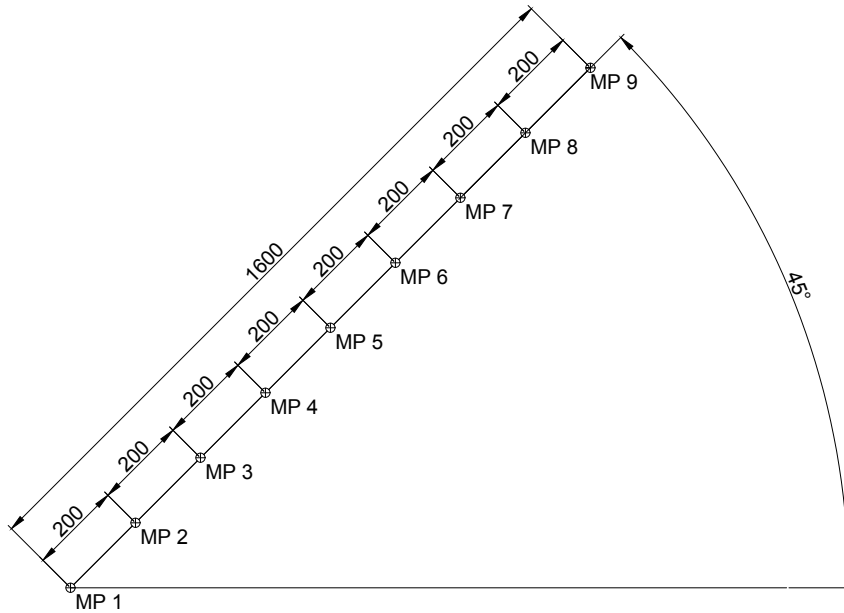


Abbildung 3.14: Mikrofonpositionen MP 1 bis MP 9 entlang der 45°-Trajektorie (Maße in mm)

Messpunktraster

Das Schallfeld an der Raumkante wird mithilfe eines Messrasters, bestehend aus 81 Messpunkten abgetastet, welches sich aus den gewählten 9 TP und 9 MP ergibt. Für den Fall der Messungen mit KA wird die Anzahl der MP, durch den eingebrachten KA, von 9 auf 6 reduziert, wodurch die Anzahl der Messpunkte auf dem Messraster auf 54 verringert wird. Abbildung 3.15 zeigt eine Draufsicht des Hallraumes, sowie eine Detailansicht aller Messpunkte am Beispiel der Messung ohne KA. Eine tabellarische Auflistung der Messpunkte in kartesischen Koordinaten ist in Anhang B zu finden. Koordinatenursprung ist dabei die untere Raumecke auf der gegenüberliegenden Seite der Eingangstür.

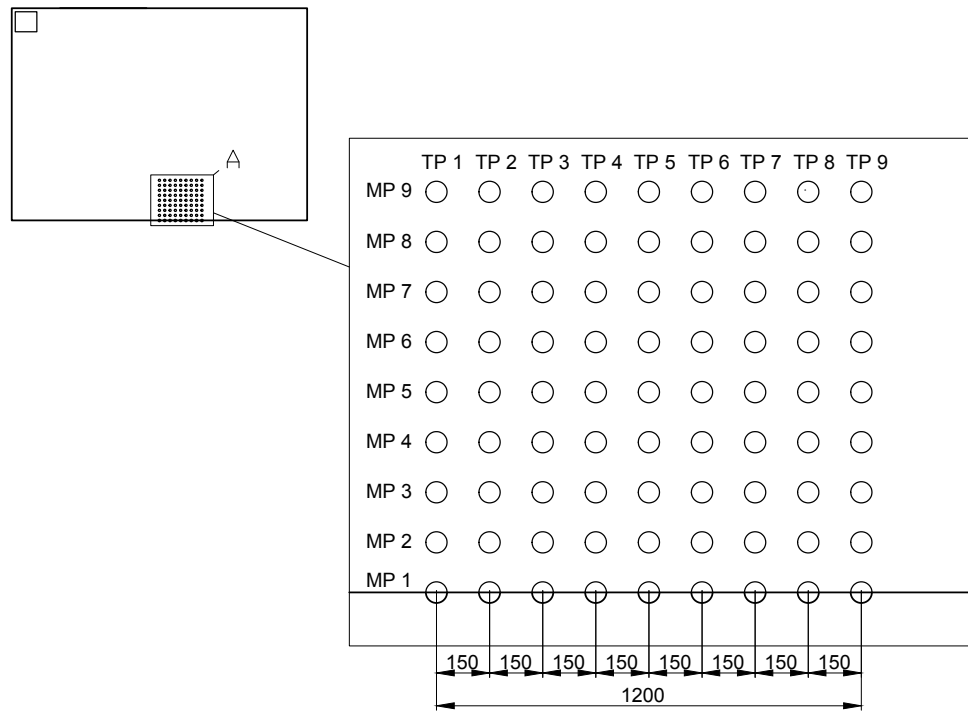


Abbildung 3.15: Draufsicht des Hallraums, sowie die Detailansicht aller Mikrofon- und Trajektorienpositionen für die Messungen ohne KA (Maße in mm)

In Tabelle 3.4 werden für $\langle p^2 \rangle$ die TP aller Frequenzen aufgelistet, an denen sich ein $\langle p^2 \rangle$ -Maximum bzw. -Minimum des modalen Schallfeldes befindet. Da sich an jedem $\langle p^2 \rangle$ -Maximum ein $\langle v^2 \rangle$ -Minimum bzw. an jedem $\langle p^2 \rangle$ -Minimum ein $\langle v^2 \rangle$ -Maximum befindet, kann die Tabelle auch für die Bestimmung der $\langle v^2 \rangle$ -Minima und -Maxima verwendet werden.

Tabelle 3.4: Nächstgelegene TP der $\langle p^2 \rangle$ -Maxima und -Minima des modalen Schallfeldes der gewählten Raummodenfrequenzen

Nr.	f in Hz	Ordnungszahlen			$\frac{\lambda_x}{4}$ in m	Max.-TP		Min.-TP	
		n_x	n_y	n_z		TP Nr.	x in m	TP Nr.	x in m
1	82,3	4	0	0					
2	87,1	4	1	0	1,04	1	0,00	8	1,05
3	89,4	4	0	1					
4	93,9	4	1	1					
5	102,8	5	0	0	0,83	6/7	0,75/0,90	1	0,00
6	112,3	5	1	1					
7	123,4	6	0	0	0,69	1	0,00	5/6	0,60/0,75
8	128,3	6	0	1					

Steffek [5] konnte bei der Auswertung der Messdaten feststellen, dass Messungen „innerhalb“ des KA nicht sinnvoll sind (siehe folgendes Zitat), weshalb diese Messpunkte im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden. Dadurch wird für MK 1, MK 2, MK 3² eine Reduktion der MP von 9 auf 6 MP erreicht. Die in Abbildung 3.14 und 3.15 gezeigten MP sind somit nur für MK 4 gültig.

² Details zu den Messkonfigurationen in Abschnitt 3.4.4

„Da die Auswertung zeigt, dass sich die unmittelbare Nähe der pv-Sonde zum Absorptionsmaterial im Schlitz mehr als erwartet auf die in diesem Bereich ermittelten Messwerte auswirkt, werden die Messpunkte 1-3 (dies entspricht dem Bereich 0 m bis 0,4 m) der Vollständigkeit halber zwar abgebildet, in den Betrachtungen jedoch nicht berücksichtigt.“ (Steffek [5, S.76])

Ausrichtung des Schallschnellesensors

Bei der Schallschnelle v handelt es sich um eine vektorielle Feldgröße, wodurch nicht nur der Betrag, sondern auch die Richtung erfasst werden muss. Da der Schallschnellesensor der pv-Sonde [19] nur die Schallschnelle einer Raumdimension erfassen kann (Achtercharakteristik), sind für die Messung der x-, y- und z-Komponente der vektoriellen Größe drei Messungen erforderlich. Steffek [5] hat im Rahmen seiner Arbeit festgestellt, dass direkt an der Raumkante (MP 1) zwischen der Tangential- und den Normalkomponenten (v_x und v_y bzw. v_z) eine Pegeldifferenz von $\Delta v \approx 20$ dB vorhanden ist, wodurch bei dieser Position nur v_x relevant für die Auswertung ist.

3.4.3 Positionierung der Schallquelle

Für die gleichmäßige Anregung aller Raummodenfrequenzen, wird die Schallquelle in der Raumecke positioniert (siehe Abbildung 3.16).

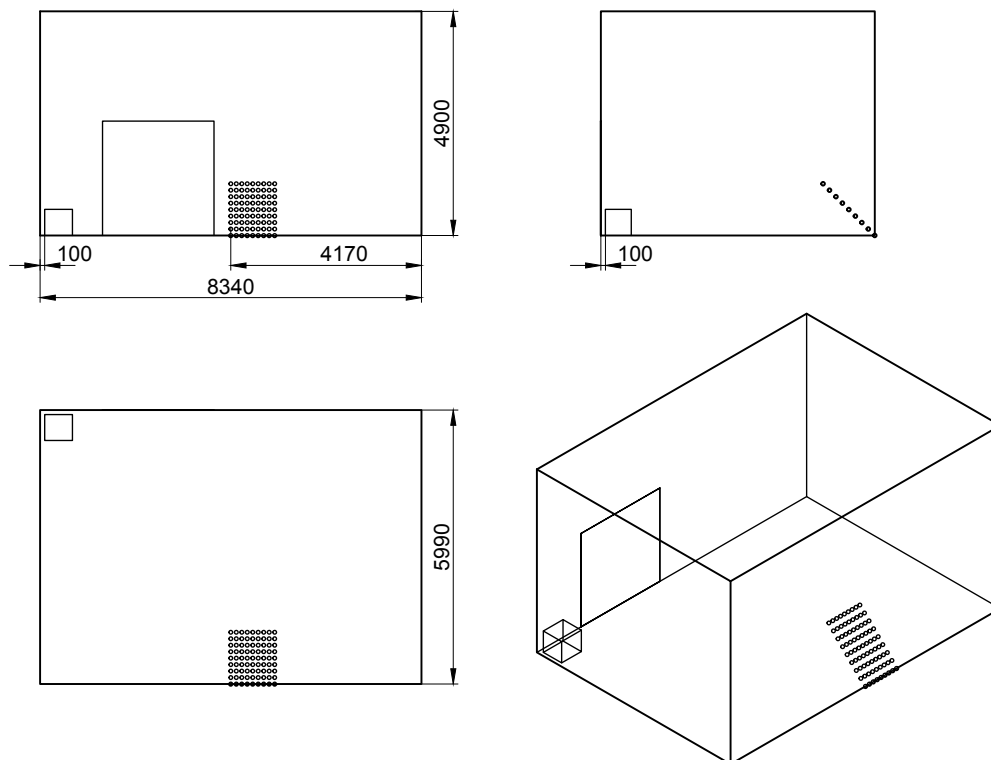


Abbildung 3.16: Positionierung des Lautsprechers und der pv-Sonde im Hallraum (Maße in mm)

3.4.4 Messkonfigurationen

Um den Einfluss des KA auf das Schallfeld zu beschreiben, sollen Messungen bei verschiedenen Messkonfigurationen (MK) durchgeführt werden. Die MK 1 bis 4 sind in Abbildung 3.17 veranschaulicht:

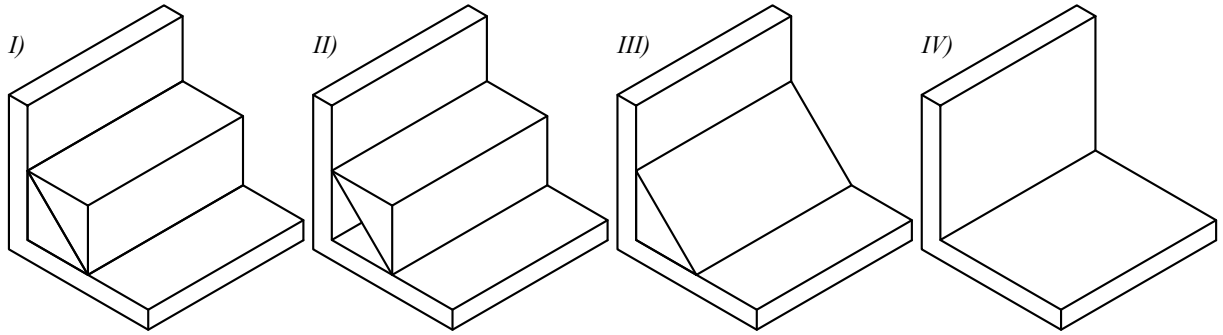


Abbildung 3.17: Darstellung der MK 1 bis 4. I) MK 1: doppelt; II) MK 2: einfach; III) MK 3: einfach invertiert; IV) MK 4: Kante ohne KA

Bei den Messungen mit KA (MK 1, MK 2, MK 3), werden, je nach MK, mehrere dreiseitige, gleichschenklige Absorberelemente mit einer Schenkellänge von $l_S = 420$ mm und einer Mantellänge von $l_M = 1100$ mm (siehe Abbildung 3.18), an der Längskante des Hallraums positioniert. Diese Position wurde aus der Arbeit von Steffek [5] übernommen. Durch die Arbeit von Santer [7], welcher den Einfluss der Positionierung des KA an verschiedenen Kanten untersucht hat, ist bekannt, dass die höchste Absorption des KA im tieffrequenten Bereich, durch die Positionierung des KA in der längsten Raumkante erreicht wird. Das Absorbermodul besteht aus Basotect[®], einem Melaminharzschaum mit einem längenspezifischen Strömungswiderstand von $\Xi = 13 \frac{\text{kPa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ und einer Materialdichte von $\rho = 9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [21]. Die Längskante des Hallraums ($l = 8,34$ m) bietet Platz für ca. 7,5 hintereinander positionierte KA-Elemente. Abbildung 3.19 (links) zeigt die Kantenbelegung durch die KA am Beispiel von MK 3. Der Messaufbau im Hallraum für MK 1 ist in Abbildung 3.20 dargestellt.

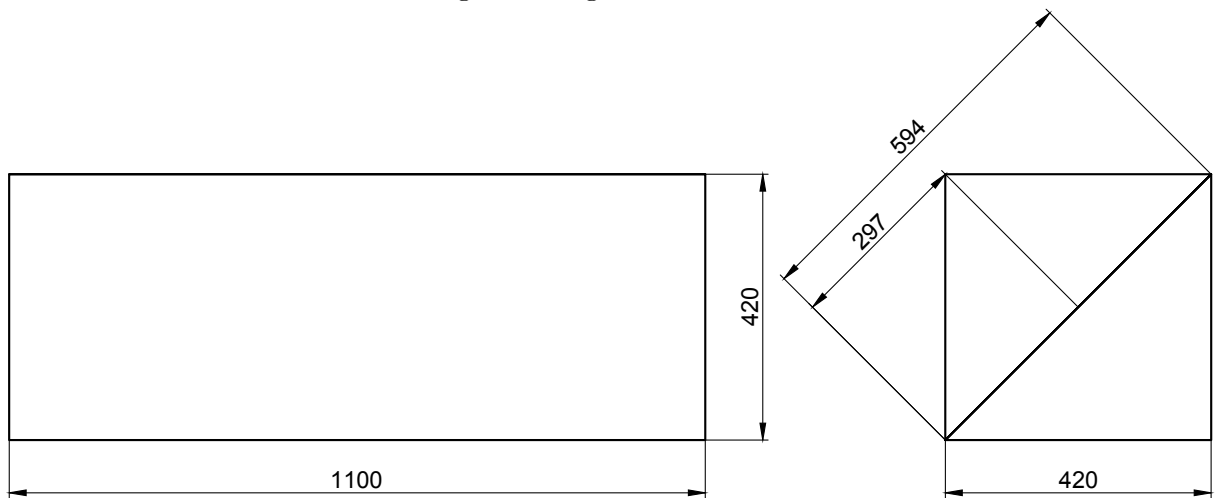


Abbildung 3.18: Draufsicht und Seitenansicht eines KA-Elementes mit Bemaßung (Maße in mm)

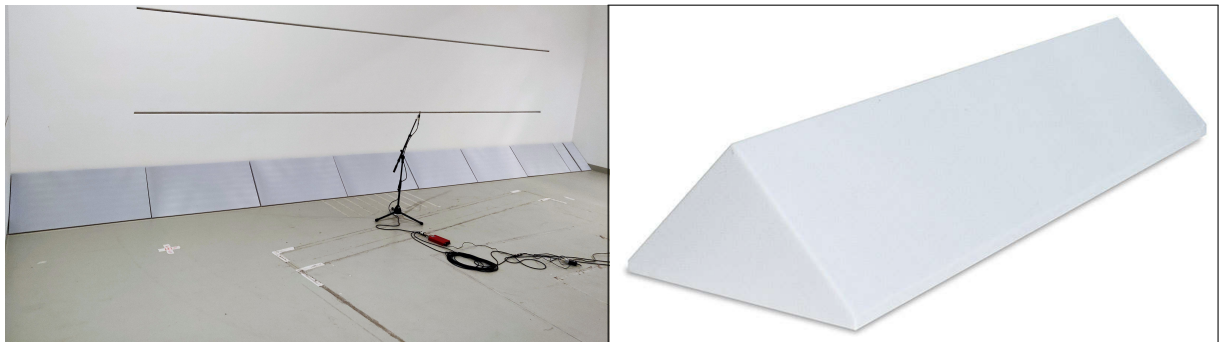


Abbildung 3.19: Ansicht der KA-Elemente im eingebauten Zustand am Beispiel von MK 3 (links) sowie die Darstellung eines KA-Elementes [21]

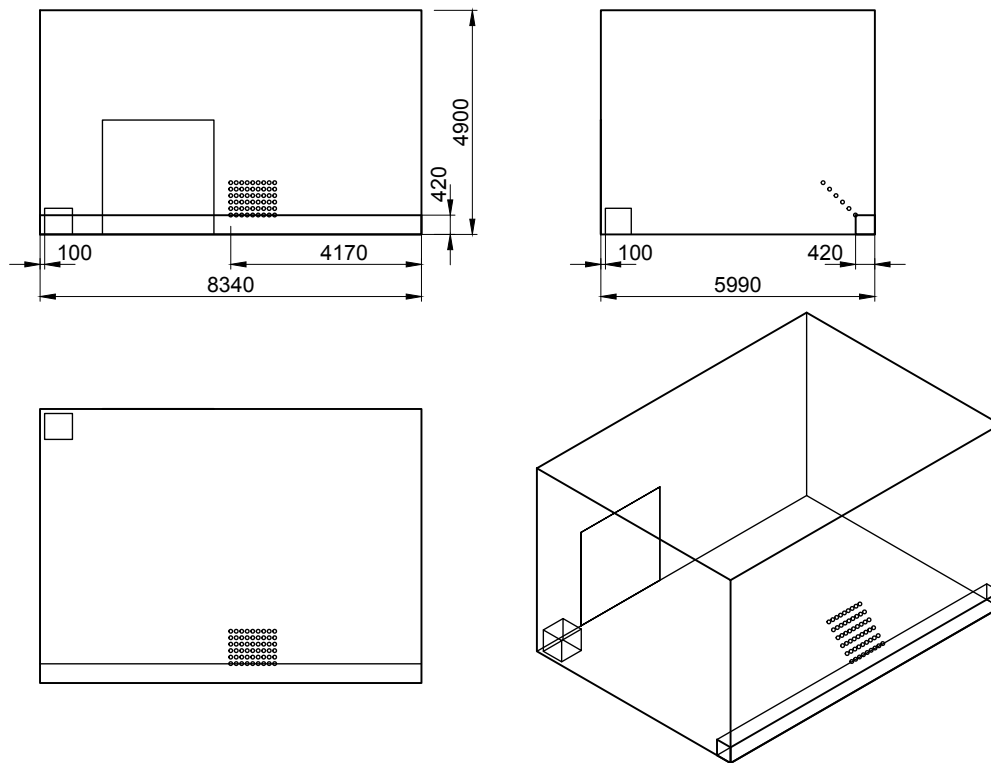


Abbildung 3.20: Ansicht des Hallraums am Beispiel von MK 1 (Maße in mm)

3.4.5 Signalfluss

Abbildung 3.21 zeigt das Signalflussdiagramm des Messaufbaus. Das Thermohygrometer ist nicht mit dem restlichen Messaufbau verbunden, weshalb die Temperaturdaten händisch für jede Messung in die Messroutine übertragen werden.

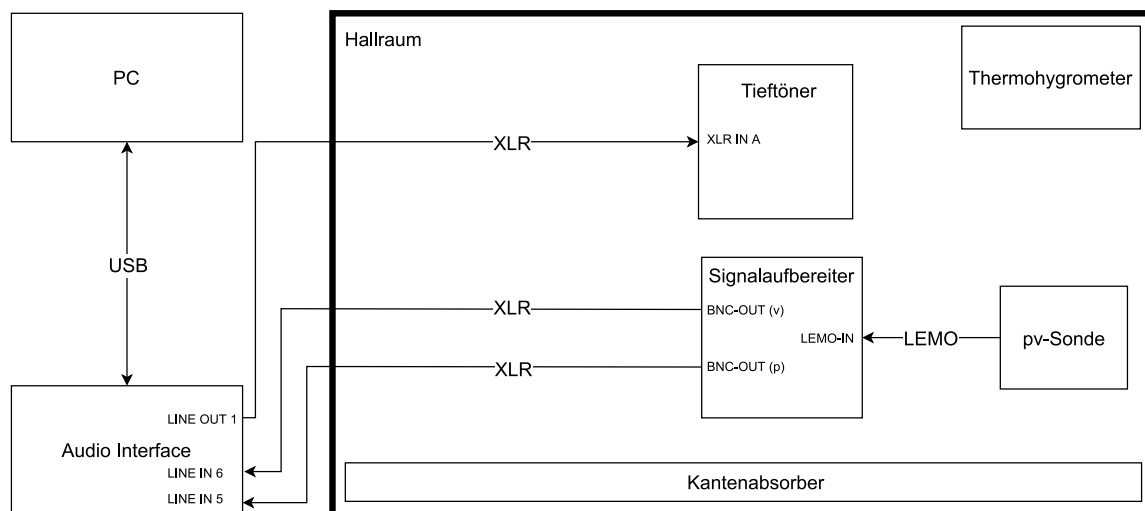


Abbildung 3.21: Signalflussdiagramm des Messaufbaus

Um die Messungen nicht zu verfälschen, dürfen sich keine Personen während einer Messung im Hallraum aufhalten. Der Laptop sowie das Audio-Interface werden deshalb außerhalb des Messraumes positioniert. Innerhalb befinden sich der Subwoofer, das Thermohygrometer, die pv-Sonde sowie deren Signalaufbereiter und natürlich die entsprechende Absorberkonfiguration.

3.5 Messdurchführung

3.5.1 Zeitlicher Messablauf

Messroutine

Die Messungen werden mithilfe der ITA-Toolbox, einer Open-Source-MATLAB-Toolbox der RWTH Aachen durchgeführt [22]. Die Kalibrierung der Messkette sowie die Struktur der Messroutine wird aus der Arbeit von Steffek [5] übernommen. Die Modifikationen im Messaufbau (Anregungssignal, Anzahl der Quellpositionen, Anzahl der Trajektorienwinkel, Anzahl der Messpositionen) werden durch die Änderung der Parameter im Messkript angepasst.

Um den Messablauf zeiteffizient zu gestalten, werden in der Messroutine alle Raummodenfrequenzen nacheinander abgespielt. Die schematische Darstellung eines Messzyklusabschnittes wird in Abbildung 3.22 gezeigt. In Abbildung C.1 (siehe Anhang C) ist die gesamte Messroutine in Form eines Flussdiagrammes dargestellt.

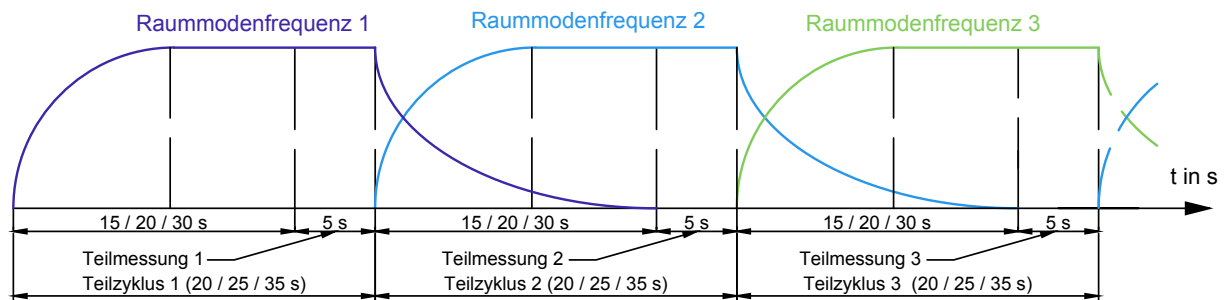


Abbildung 3.22: Zeitlicher Ablauf der Messung. Darstellung eines Messzyklusabschnittes (3 von 8 Raummodenfrequenzen) in Abhängigkeit der MK (MK 1 / MK 2 bzw. MK 3 / MK 4)

Um eine Überlagerung der modalen Schallfelder verschiedener Raummodenfrequenzen zu vermeiden, darf mit einer nachfolgenden Teilmessung (Messsignal der pv-Sonde wird aufgenommen) erst begonnen werden, sobald das modale Schallfeld der vorherigen Raummodenfrequenz vollständig abgeklungen ist. Die Zeit, die dafür notwendig ist, wird durch die Nachhallzeit abgeschätzt. Durch das Einbringen von schallabsorbierenden Komponenten in Form der KA-Elemente, verkürzt sich die Nachhallzeit im Messraum. Es wird angenommen, dass die Nachhallzeit für MK 1 um die Hälfte und für MK 2 und MK 3 um ein Drittel, im Vergleich zur Nachhallzeit im leeren Raum, sinkt. Je nach MK muss also eine Zeit von $t = 15$ s (MK 1), $t = 20$ s (MK 2, MK 3) oder $t = 30$ s (MK 4, vgl. Abschnitt 3.2.3) zwischen zwei Teilmessungen abgewartet werden. Die Länge einer Teilmessung wird aus den Erkenntnissen der Arbeit von Steffek [5] bestimmt, welcher eine Zeit von $t = 10$ s je Teilmessung verwendet hat. Bei der Auswertung konnte festgestellt werden, dass bei einer Verkürzung des gemessenen Zeitsignals um 50%, die Unterschiede der Ergebnisse vernachlässigbar klein sind. Daher wird in der vorliegenden Arbeit eine Messzeit von $t = 5$ s für eine Teilmessung verwendet. Der Zeitaufwand je Raummodenfrequenz ergibt sich somit aus der Summe von Nachhallzeit und Messzeit einer Teilmessung. Diese Zeit wird im Folgenden auch als Teilzyklus bezeichnet und beträgt je nach MK, 20 s, 25 s oder 35 s (siehe Abbildung 3.22). Die 8 hintereinander abgespielten Raummodenfrequenzen bilden zusammen einen Messzyklus. Für die verschiedenen MK ergeben sich die in Tabelle 3.5 aufgelisteten Messzeiten.

Tabelle 3.5: Zeitlicher Messaufwand eines Messzyklus bei unterschiedlichen MK

MK	Nachhallzeit in s	Zeit pro Teilmessung in s	Zeit pro Teilzyklus in s	Zeit pro Messzyklus in s	Zeit pro Messzyklus in m:ss
1	15	5	20	160	2:40
2	20	5	25	200	3:20
3	20	5	25	200	3:20
4	30	5	35	280	4:40

Messkampagne

Für die praktische Durchführung der Messung wird die von Steffek [5] entworfene Messschablone modifiziert, indem die 45°-Trajektorie mithilfe eines Stück Kartons verlängert wird (siehe Abbildung 3.23). Zur Positionierung der Schablone werden im Vorfeld der Messungen Bodenmarkierungen angebracht. Nach jeder pv-Sonden-Positionierung bzw. vor dem Start der Messroutine wird die Schablone aus dem Hallraum entfernt, um eine Beeinflussung des modalen Schallfeldes zu vermeiden. Der Messablauf in Form eines Flussdiagrammes ist in Anhang C zu finden (siehe Abbildung C.2).



Abbildung 3.23: Ansicht der Messschablone sowie der pv-Sonde am Beispiel von MP 7 bei den Messungen ohne KA (MK 4)

3.5.2 Zeitlicher Messaufwand

Der in Abschnitt 3.5.1 beschriebene Messzyklus muss nach jeder Variation eines Messparameters (MP, TP, Schallschnellesensorausrichtung oder MK) wiederholt werden (siehe Abbildung C.2 in Anhang C). Zur Abschätzung des zeitlichen Messaufwandes ist in Tabelle 3.6 die Anzahl der Messparameter, in Abhängigkeit der MK, aufgelistet.

Tabelle 3.6: Messparameter in Abhängigkeit der MK

Messparameter	MK 1	MK 2	MK 3	MK 4
Raummodenfrequenzen	8	8	8	8
Ausrichtung des Schallschnellesensors	3	3	3	3(1)
Mikrofonpositionen	6	6	6	9
Trajektorienpositionen	9	9	9	9

Aus dem Produkt der Messparameter ergibt sich für jede MK die Anzahl der Teilzyklen (siehe Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Anzahl der Teilzyklen in Abhängigkeit der MK

	MK 1	MK 2	MK 3	MK 4
Teilzyklenanzahl	1296	1296	1296	1800

Durch die Multiplikation der Teilzyklenanzahl (siehe Tabelle 3.7) mit der dazugehörigen Zeit je Teilzyklus (siehe Tabelle 3.5), ergibt sich der zeitliche Aufwand der Messungen für jede MK. Bei der Teilzyklenanzahl von MK 4 wird dabei berücksichtigt, dass bei MP 1 lediglich $\langle v_x^2 \rangle$ gemessen werden muss (siehe Abschnitt 3.4.2). Der Auf- und Abbau des Messaufbaus, die Ausrichtung des Schallschnellesensors, sowie die Positionierung von Absorberelementen und pv-Sonde wird berücksichtigt, indem der berechnete Zeitaufwand mit dem Faktor 1,6 multipliziert wird.

Tabelle 3.8: Zeitaufwand in Abhängigkeit der MK

Zeitaufwand	MK 1	MK 2	MK 3	MK 4
in s	25920	32400	32400	63000
in h	7	9	9	18
mit Aufschlag in h	12	14	14	28

Somit ergibt sich ein zeitlicher Aufwand für die Messkampagne von ca. 68 h (für alle MK), was bei einem Arbeitstag zu je 8 h einer Dauer von ca. 9 Arbeitstagen entspricht.

3.6 Verarbeitung der Messdaten

Bevor die Messdaten in Abschnitt 4 graphisch veranschaulicht werden, ist die Bearbeitung der Rohdaten erforderlich. Der Ablauf der verschiedenen Verarbeitungsschritte ist in Abbildung 3.24 in Form eines Flussdiagrammes dargestellt. Eine kurze Beschreibung der einzelnen Blöcke wird im Folgenden durchgeführt. Je nach MK und MP unterscheiden sich die Verarbeitungsschritte untereinander. Für die MP 1, wo die Messung der Schallschnelle in y- und z-Richtung nicht durchgeführt wurde, entfällt die zeitliche arithmetische Mittelung der Schalldruckmesswerte. Die resultierende kinetische Energie $\langle v^2 \rangle$ entspricht in diesem Fall jener der kinetischen Energie in x-Richtung ($\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle$).

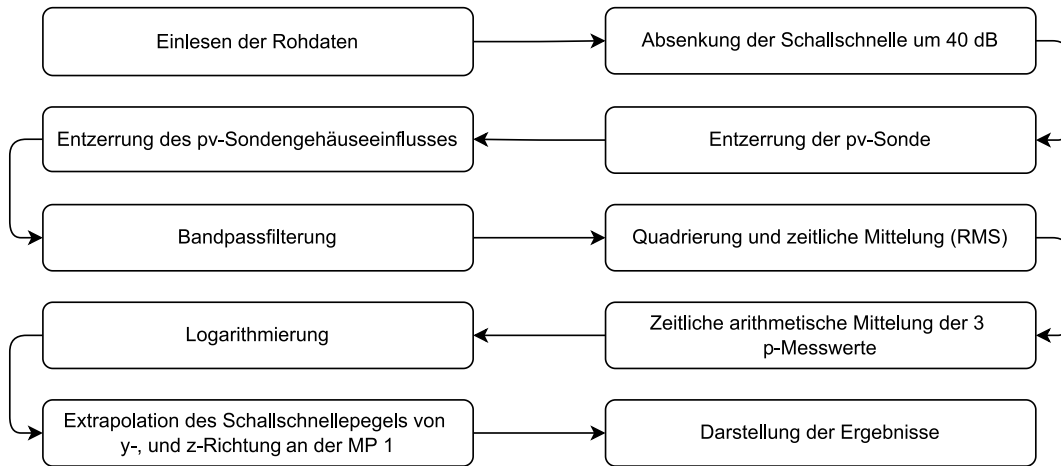


Abbildung 3.24: Schematische Darstellung der schrittweise durchgeführten Messsignalverarbeitung

3.6.1 Entzerrung der pv-Sonde

In diesem Schritt werden die Eigenschaften der pv-Sonde, sowie deren Gehäuse und Signalaufbereiter berücksichtigt. Da die Verstärkung (Gain) beim Signalaufbereiter zum Zeitpunkt der Messung auf „High“ eingestellt war, muss die Schallschnelle von $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ um 40 dB abgesenkt werden (Reduktion um den Faktor 100). Die Nichtlinearität der Empfindlichkeit, sowie der Einfluss des Gehäuses der pv-Sonde, wird durch eine Entzerrung der aufgenommenen Messdaten mit den invertierten Betrags- und Phasenfrequenzgängen im Frequenzbereich kompensiert. Die Frequenz- und Phasengänge der Empfindlichkeit von pv-Sonde sowie deren Gehäuse sind in den Abbildungen 3.8 und 3.9 dargestellt.

3.6.2 Bandpassfilterung

Da für die Auswertung nicht der gesamte von der pv-Sonde aufgenommene Frequenzbereich, sondern nur die ausgewählten Raummodenfrequenzen von Interesse sind, werden die Pegel aller Frequenzbereiche abseits der Raummodenfrequenzen durch eine Bandpassfilterung abgesenkt. Dadurch wird auch der Einfluss von harmonischen Verzerrungen, welche durch die pv-Sonde erzeugt werden, reduziert. Die Filterung wird in MATLAB mithilfe einer standardmäßig implementierten Bandpass-Funktion durchgeführt. Da in jedem Mess-File die Temperatur gespeichert wurde (siehe Abbildung C.2 in Anhang C), kann bei der Filterung die temperaturabhängige Raummodenfrequenz rekonstruiert werden. Als Bandbreite des Bandpassfilters wird $B = 2$ Hz gewählt.

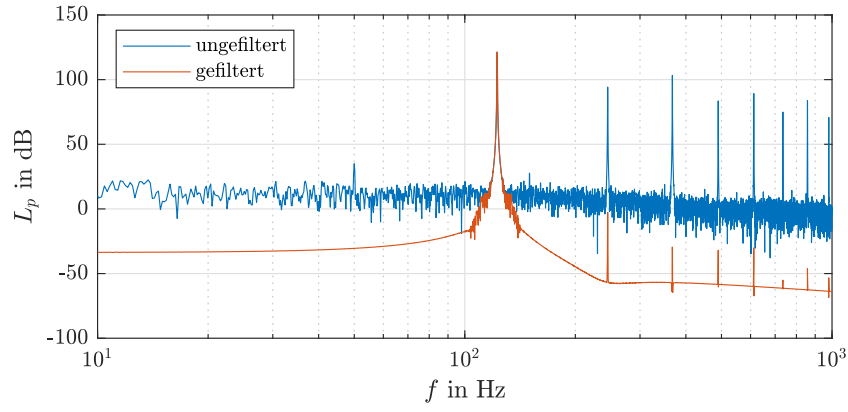


Abbildung 3.25: Vergleich des ungefilterten und bandpassgefilterten Schalldruckpegels L_p in Abhängigkeit der Frequenz f am Beispiel von Raummode 6-0-1 ($f = 128,3$ Hz)

3.6.3 Quadrierung und Mittelwertbildung

Für die spätere Darstellung der Messergebnisse wird eine zeitlich unabhängige Messgröße benötigt. Diese berechnet sich aus der Quadrierung und zeitlichen Mittelung ($t = 5$ s) von $p(t)$ (für die Berechnung von $\langle p^2 \rangle$) sowie von $v_x(t)$, $v_y(t)$ und $v_z(t)$ (für die Berechnung von $\langle v^2 \rangle$) gemäß Gleichung 3.7 und 3.8 (vgl. Kurz [23]).

$$\langle p^2 \rangle = \frac{1}{5 \text{ s}} \int_{t=0 \text{ s}}^{5 \text{ s}} p^2(t) dt \quad (3.7)$$

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{5 \text{ s}} \int_{t=0 \text{ s}}^{5 \text{ s}} \left(v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t) \right) dt \quad (3.8)$$

Der Schalldrucksensor der pv-Sonde besitzt eine Kugelcharakteristik, wodurch die Sensitivität unabhängig von der Ausrichtung ist. Durch die Messung von v_x , v_y und v_z werden an jedem Messpunkt (mit Ausnahme des MP 1) drei Schalldruckwerte aufgenommen von denen für die spätere Auswertung das zeitliche arithmetische Mittel gebildet wird.

3.6.4 Logarithmierung und Extrapolation

Im nächsten Schritt werden die Messdaten logarithmiert, wobei $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa als Referenzschalldruck und $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ als Referenzschallschnelle verwendet werden. Da an der MP 1 lediglich die kinetische Energie in x-Richtung $\langle v_x^2 \rangle$ messtechnisch erhoben wird, werden die Pegel für $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ für die MP 1 aller TP durch eine Extrapolation berechnet. Dabei werden die extrapolierten Werte aus den logarithmierten Messdaten berechnet. Wegen der reduzierten MP-Anzahl bei MK 1, MK 2 und MK 3 (MP 1 bis MP 3 nicht berücksichtigt, siehe Abschnitt 3.4.4), muss die Extrapolation lediglich für die Messergebnisse von MK 4 durchgeführt werden.

4

Messergebnisse

4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die gemäß Abschnitt 3 gemessenen und verarbeiteten Messdaten in diversen Abbildungen gezeigt. Für die Darstellung der Messergebnisse wird das Koordinatensystem so gewählt, dass die TP 1 auf der linken Seite liegt (siehe Abbildung 4.1).

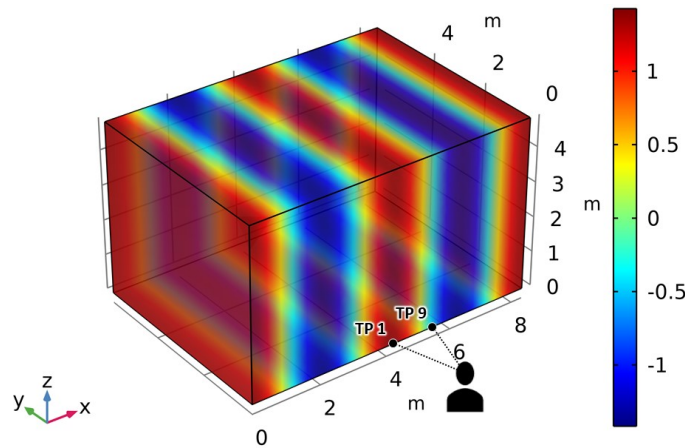


Abbildung 4.1: Festlegung des Koordinatensystems zur Darstellung der Messergebnisse am Beispiel der Raummode 4-0-0

Durch die verwendeten 5 Messparameter (MK, Frequenz, Messgröße, TP, MP) wird ein relativ großer Datensatz generiert. Um diesen Datensatz übersichtlich darzustellen, werden im ersten Schritt nur die Messergebnisse ohne KA (MK 4) betrachtet (siehe Abschnitt 4.2). Die Ergebnisse der MK 1, MK 2, MK 3 werden in Abschnitt 4.3 analysiert. Zudem werden die Vergleiche in Kapitel 4.2 nur am Beispiel ausgewählter Raummoden durchgeführt (siehe Abbildung 4.1 und 4.2). Für alle 8 Raummodenfrequenzen sind in Anhang D.1.1 und D.1.2 die Pegelverteilungen und in Anhang A die 3D-Darstellungen des modalen Schallfeldes zu finden.

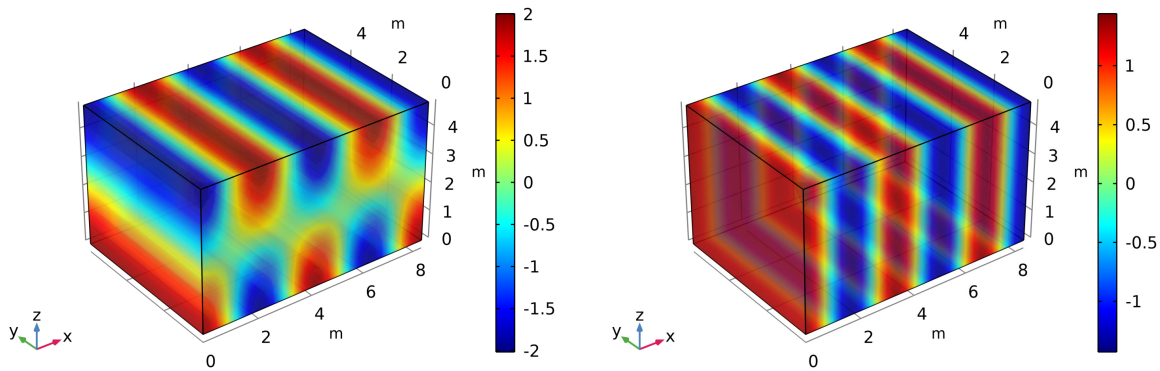


Abbildung 4.2: Schalldruckverteilung der Raummoden 4-0-1 (links) und 5-0-0 (rechts)

4.2 Messergebnisse ohne KA (MK 4)

4.2.1 Pegelverteilung

Zur Visualisierung der Pegelverteilungen (Pegel an den 81 Messpositionen (9 TP · 9 MP), siehe Abbildung 3.15), wird eine 3D-Flächendarstellung verwendet, wobei auf der Abszisse und Ordinate die Messposition im Hallraum und auf der Applikate der Pegel der jeweiligen Messgröße ($\langle p^2 \rangle$, $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, $\langle v^2 \rangle$) aufgetragen ist. x beschreibt dabei den Abstand zur TP 1 entlang der Raumkante und $r = \sqrt{y^2 + z^2}$ den Abstand zur MP 1 normal zur Raumkante. Zusätzlich wird zur Visualisierung aller Punkte auf dem Raster eine 2D-Flächendarstellung gezeigt.

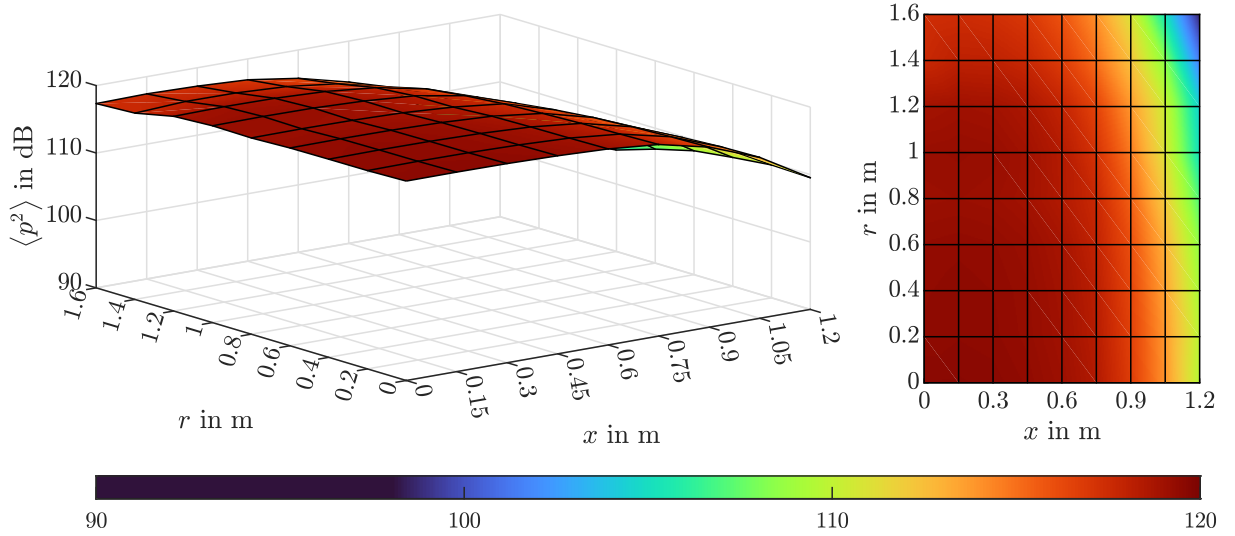


Abbildung 4.3: $\langle p^2 \rangle$ von Raummode 4-0-0 in Abhängigkeit der Position im Raum ohne KA (MK 4)

In der Darstellung der Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$ für die Raummode 4-0-0 ist erkennbar, dass im Koordinatenursprung von r und x das Pegelmaximum erreicht wird (siehe Abbildung 4.3). Entlang der x -Achse nimmt der Pegel ab und erreicht bei $x = 1,2$ m (TP 9) den kleinsten Wert.

In Abbildung 4.4 werden die Pegelverläufe von $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ für Raummode 4-0-0 in Abhängigkeit der Position als 3D- und 2D-Abbildung gezeigt. Beim Vergleich der Schallschnellekomponenten ist erkennbar, dass $\langle v_x^2 \rangle$ erhöhte Pegel gegenüber $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ aufweist. $\langle v^2 \rangle$, welches aus der euklidischen Norm der gemessenen Schallschnellekomponenten $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ berechnet wird, ist somit überwiegend von $\langle v_x^2 \rangle$ abhängig. Aufgrund des geringen Einflusses der y - und z -Komponente auf $\langle v^2 \rangle$ wird in der weiteren Auswertung auf die Analyse der Einzelkomponenten weitgehend verzichtet.

Wie bereits in Abschnitt 2 gezeigt, können durch Gleichung 2.1 die Raummodenfrequenzen berechnet werden. Dadurch ist aber nur die Lage der Minima und Maxima, jedoch kein vollständiger Pegelverlauf bzw. die positionsabhängigen absoluten Pegel bestimmbar. Die absoluten Pegel können über ein FEM-Simulationsmodell berechnet werden (siehe Abschnitt 4.2.4), wodurch ein Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen modalen Schallfeld durchgeführt werden kann. Um bestimmen zu können, ob eine TP in einem Minimum oder Maximum des gemessenen modalen Schallfeldes liegt, wird für jede der 9 TP der mittlere Pegel aus dem Medianwert aller MP berechnet und davon der Minimal- und Maximalwert gesucht (siehe Gleichung 4.1 und 4.2). $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$ und $\widetilde{\langle v^2 \rangle}$ entsprechen dabei dem Medianwert der 9 MP einer Trajektorie. Die TP der Maxima und Minima des modalen Schallfeldes für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ der 8 gewählten Raummodenfrequenzen sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

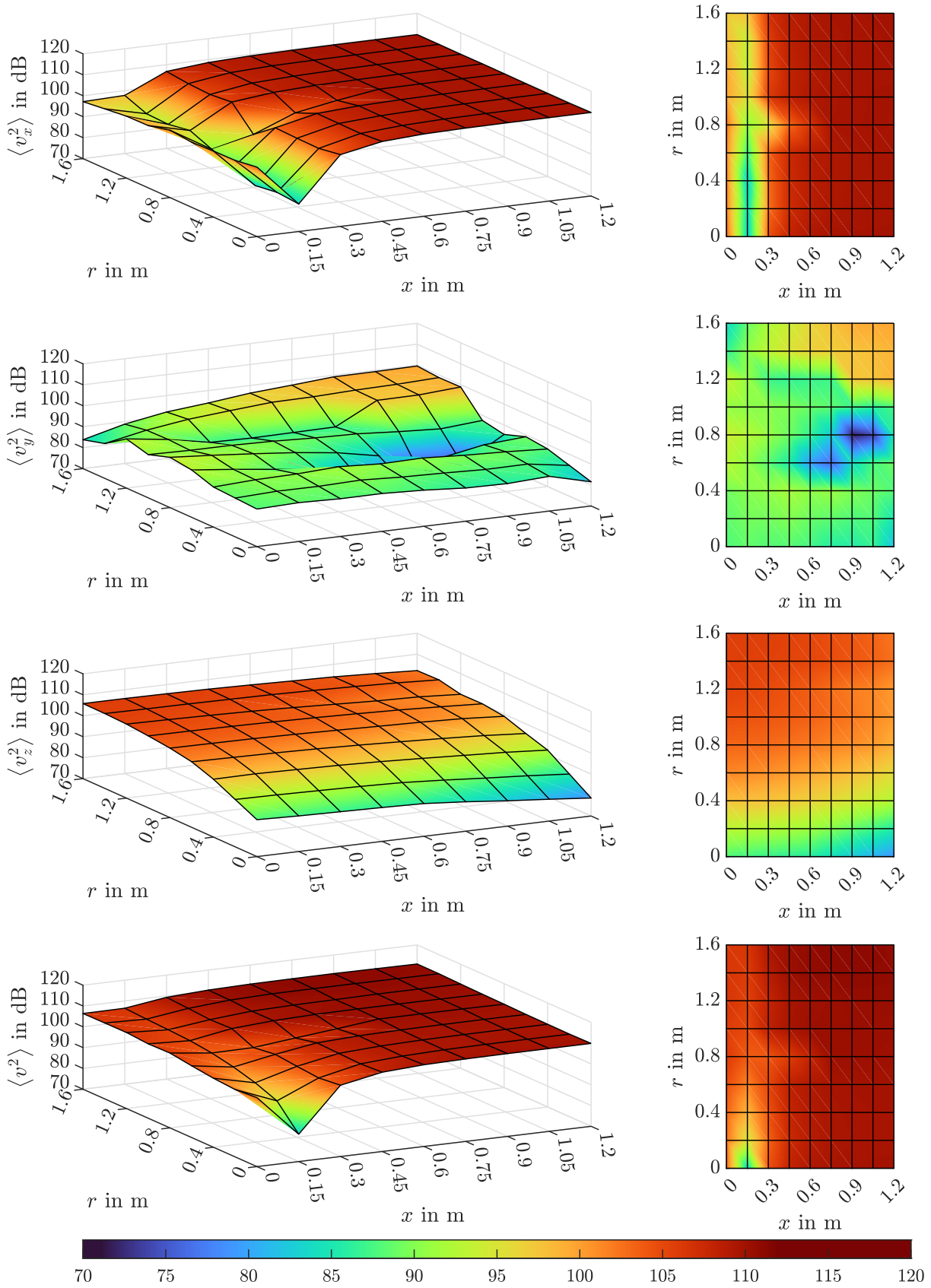


Abbildung 4.4: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ von Raummode 4-0-0 in Abhängigkeit der Position im Raum ohne KA (MK 4)

$$TP_{min}(F) = \min_{TP} \left\{ \widetilde{\langle p^2 \rangle}(F, TP) \right\} \quad (4.1)$$

$$TP_{max}(F) = \max_{TP} \left\{ \widetilde{\langle p^2 \rangle}(F, TP) \right\} \quad (4.2)$$

Gemäß den Berechnungen müsste sich für die Raummode 4-0-0 an der TP 1 für $\langle p^2 \rangle$ ein Maximum und für $\langle v^2 \rangle$ ein Minimum des modalen Schallfeldes befinden. Da das Minimum von $\langle v^2 \rangle$ an der TP 2 liegt, ist somit eine Verschiebung von $x \approx 0,15$ m vorhanden (siehe Abbildung 4.4). Das $\langle p^2 \rangle$ -Minimum und $\langle v^2 \rangle$ -Maximum, welche laut Berechnung an TP 8 liegen, sind ebenfalls leicht verschoben. Sowohl das $\langle p^2 \rangle$ -Minimum als auch das $\langle v^2 \rangle$ -Maximum wurden an der TP 9 gemessen, wobei sich das $\langle v^2 \rangle$ -Maximum nicht deutlich von den benachbarten TP abhebt.

Analog zur Raummode 4-0-0 sind in Abbildung 4.5 die Pegelverteilungen von $\langle p^2 \rangle$ (oben) und $\langle v^2 \rangle$ (unten) der Raummode 5-0-0 dargestellt.

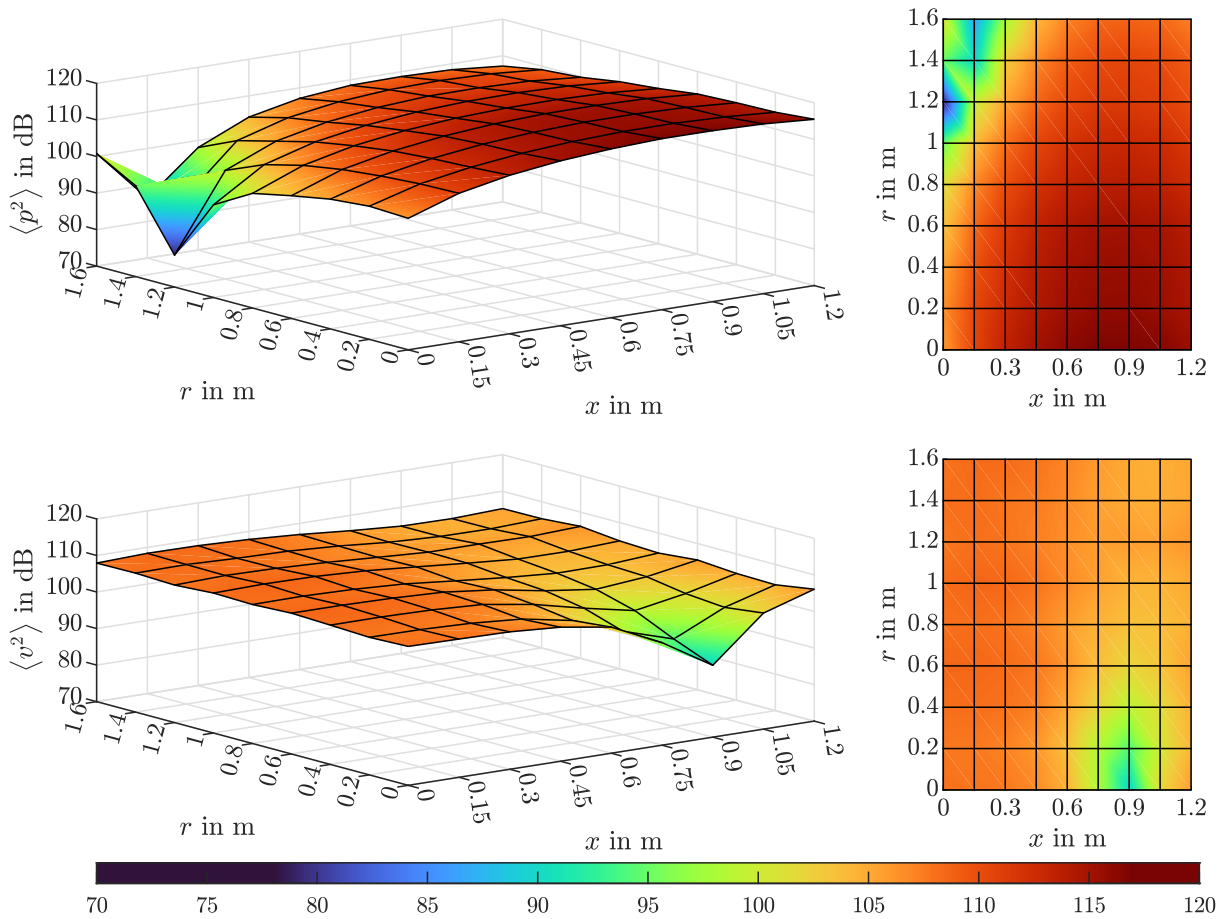


Abbildung 4.5: $\langle p^2 \rangle$ (oben) und $\langle v^2 \rangle$ (unten) für Raummode 5-0-0 ($f = 102,8$ Hz) in Abhängigkeit der Position im Raum ohne KA (MK 4)

Übereinstimmend mit den in Tabelle 3.4 berechneten Werten befindet sich das Modenminimum von $\langle p^2 \rangle$ an der TP 1 (siehe Abbildung 4.5 (oben)). Das Modenminimum von $\langle v^2 \rangle$ liegt gemäß der Berechnungen an der TP 7 (siehe Abbildung 4.5 (unten)). Bei Betrachtung der Pegelverläufe senkrecht zur Raumkante für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ für die Raummoden 4-0-0 und 5-0-0 fällt auf, dass sich die Pegelfluktuationen entlang einer Trajektorie für die verschiedenen TP abhängig vom

absoluten Pegel unterscheiden. Während bei hohen absoluten Pegeln die Pegelfluktuationen gering sind, gibt es bei geringen absoluten Pegeln relativ starke Pegelunterschiede zwischen den verschiedenen MP einer Trajektorie.

4.2.2 Pegelverlauf entlang der Raumkante

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 am Beispiel der Raummoden 4-0-0 und 5-0-0 gezeigt, stimmt die Lage der Minima und Maxima des modalen Schallfeldes von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ zwischen Berechnung und Messung bei den Raummoden 4-0-0 und 5-0-0 nicht immer überein. Im Folgenden soll für alle 8 Raummodenfrequenzen die Übereinstimmung überprüft werden. Durch die Bildung des Medianwertes über alle 9 MP je TP sollen Pegelschwankungen sowie Ausreißer ausgeglichen werden. Für eine Optimierung der Darstellung werden die Raummodenfrequenzen für ungerade und gerade n_x in getrennten Abbildungen betrachtet. Die Pegelverläufe von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit von der Entfernung zur TP 1 sind in den Abbildungen 4.6 und 4.7 dargestellt.

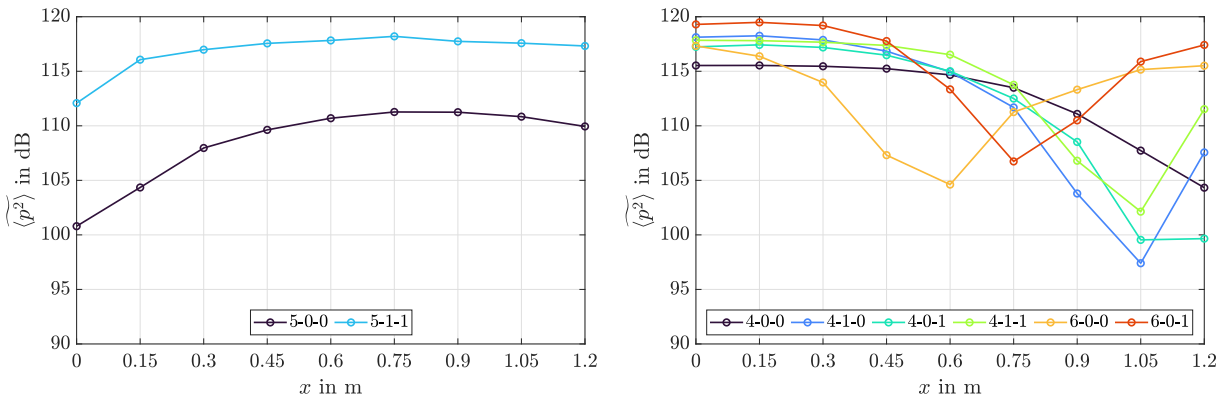


Abbildung 4.6: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit von x mit $n_x = 5$ (links) und $n_x = 4$ bzw. 6 (rechts)

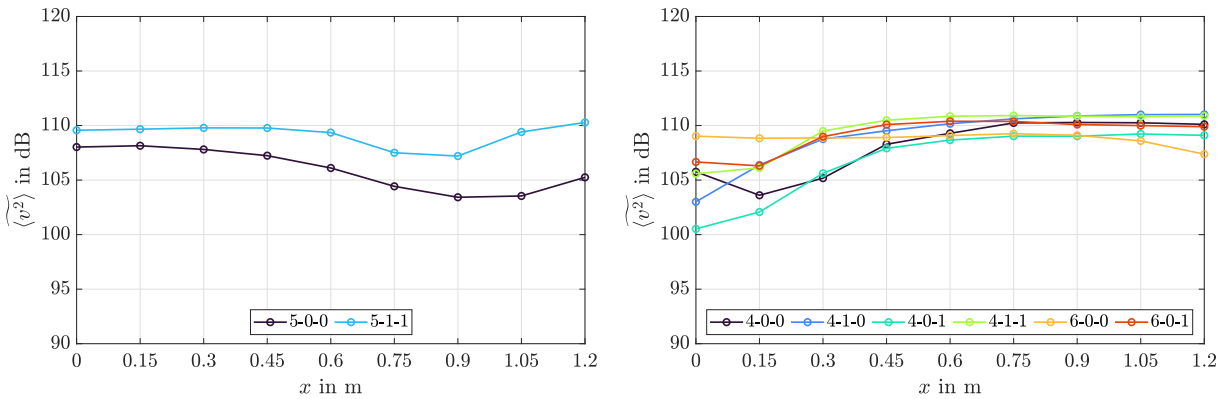


Abbildung 4.7: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit von x mit $n_x = 5$ (links) und $n_x = 4$ bzw. 6 (rechts)

Gemäß Tabelle 3.4 befindet sich an der TP 1 für $n_x = 5$ ein $\langle p^2 \rangle$ -Minimum bzw. ein $\langle v^2 \rangle$ -Maximum des modalen Schallfeldes. Für $n_x = 4$ bzw. 6 liegt an der TP 1 ein $\langle p^2 \rangle$ -Maximum bzw. ein $\langle v^2 \rangle$ -Minimum des modalen Schallfeldes. Bei Betrachtung der Lage der $\langle p^2 \rangle$ -Modenminima in Abbildung 4.6 (rechts) zeigt sich, dass bei 3 der 4 verwendeten Raummodenfrequenzen mit $n_x = 4$, eine Übereinstimmung mit der berechneten Lage gegeben ist. Bei den Raummoden 6-0-0 und 6-0-1 liegt das $\langle p^2 \rangle$ -Minimum an unterschiedlichen TP. Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen, dass für alle 8 Raummodenfrequenzen sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ ein deutlich erkennbares Minimum des modalen Schallfeldes vorhanden ist, dessen Ausprägung aber unterschiedlich stark ist. Die TP mit dem Maximalpegel hebt sich für keine der betrachteten Messgrößen und Raummodenfrequenzen von den benachbarten TP ab.

4.2.3 Pegelverlauf senkrecht zur Raumkante

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, sind die Pegelschwankungen senkrecht zur Raumkante bei hohen absoluten Pegeln relativ gering und im Modenminimum relativ hoch. In diesem Abschnitt soll für alle 8 Raummodenfrequenzen geklärt werden, ob es eine Übereinstimmung zwischen den Pegelverläufen senkrecht zur Kante und den IM nach Waterhouse gibt (siehe Abbildung 4.8 und 4.9). Zudem sollen die Pegelschwankungen in Abhängigkeit der Lage im modalen Schallfeld (Pegelschwankungen im Minimum und Maximum des modalen Schallfeldes (siehe Abbildung 4.10 und 4.11)) und in Abhängigkeit des absoluten Pegels (siehe Abbildung 4.12 und 4.13) für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ untersucht werden.

Vergleich von Berechnung und Messung bei TP 1

In diesem Abschnitt gilt es zu überprüfen, ob die gemessenen Pegelverläufe senkrecht zur Kante Ähnlichkeiten zu den IM nach Waterhouse aufweisen. Dafür wird der Pegelverlauf von $\langle p^2 \rangle$ (siehe Abbildung 4.8) und $\langle v^2 \rangle$ (siehe Abbildung 4.9) aus der Berechnung gemäß Waterhouse und der Messung entlang der beliebig gewählten TP 1 gegenübergestellt. Um den Vergleich der Pegelverläufe zu erleichtern, werden die berechneten IM entlang der y-Achse so verschoben, dass der Pegel an der MP 1 ($r = 0$ m) für jede Raummodenfrequenz mit dem gemessenen Pegel übereinstimmt. Die generierten Darstellungen werden unterteilt in $f < 100$ Hz (links) und $f > 100$ Hz (rechts).

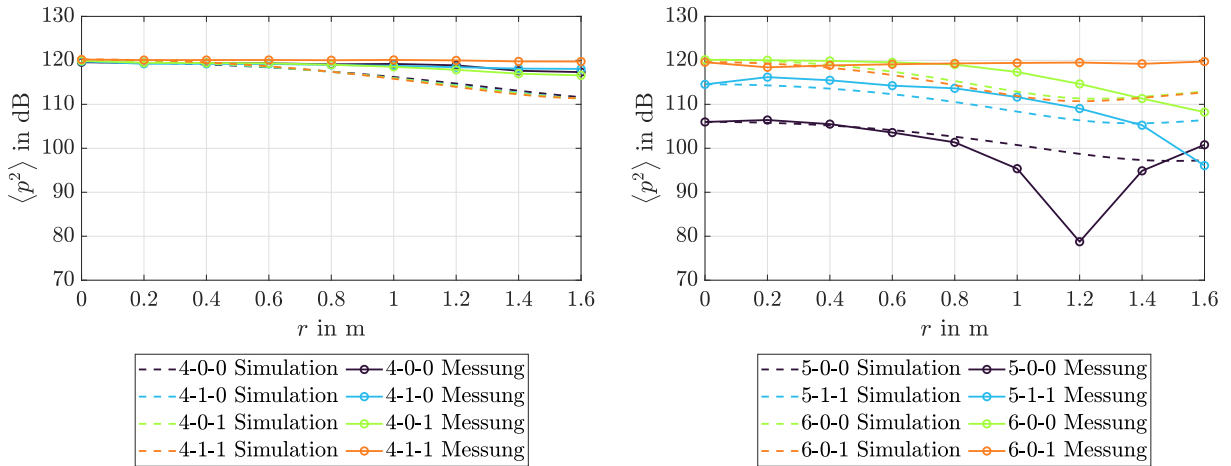


Abbildung 4.8: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit von r aus Simulation und Messung für $f < 100$ Hz (links) und $f > 100$ Hz (rechts) von TP 1 im Raum ohne KA (MK 4)

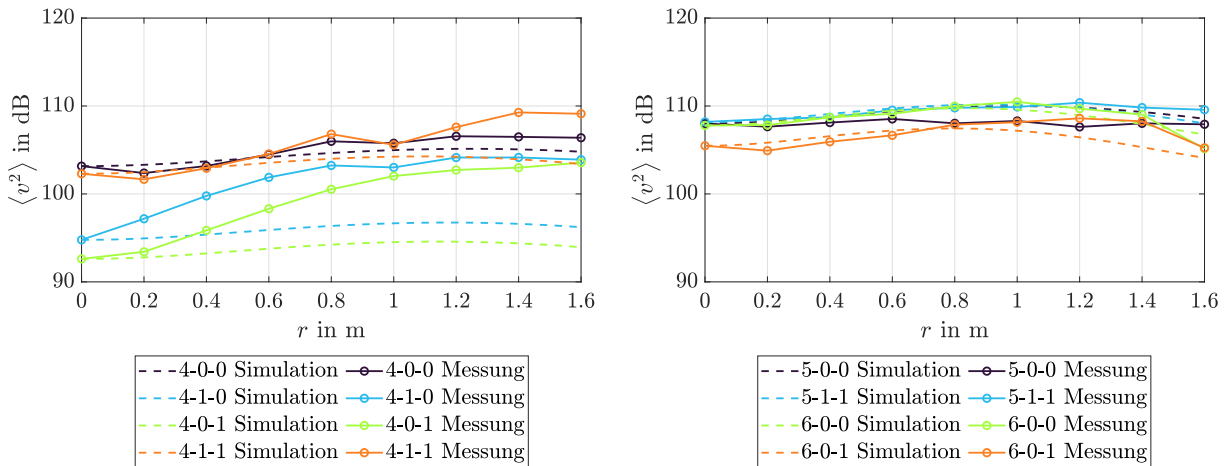


Abbildung 4.9: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit von r aus Simulation und Messung für $f < 100$ Hz (links) und $f > 100$ Hz (rechts) von TP 1 im Raum ohne KA (MK 4)

Gemäß der Theorie ist an der Raumkante für $\langle p^2 \rangle$ mit einer Pegelüberhöhung von 6 dB im Verhältnis zum asymptotischen Pegel zu rechnen. $\langle v^2 \rangle$ weist eine Überhöhung von ca. 1,2 dB direkt an der Raumkante auf und erreicht in einem Abstand von $\frac{\lambda}{3,2}$ vor der Raumkante das Maximum (siehe Abbildung 3.13), welches 3 dB höher als der asymptotische Pegel ist.

In den Abbildungen 4.8 und 4.9 ist erkennbar, dass sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ die Korrelation zwischen den berechneten und gemessenen Pegelverläufen, unabhängig von der Raummodenfrequenz, gering ist. Ein Zusammenhang zwischen berechneten und gemessenen Pegelverläufen senkrecht zur Kante kann somit für den gewählten Messaufbau nicht nachgewiesen werden.

Vergleich von Berechnung und Messung bei TP_{max} und TP_{min}

In den Abbildungen 4.10 und 4.11 wird für alle 8 Raummodenfrequenzen der Pegelverlauf von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ senkrecht zur Raumkante an jener TP gezeigt, bei welcher der Einfluss des modalen Schallfeldes auf die IM maximal (TP_{max}) bzw. minimal (TP_{min}) ist (Berechnung siehe Gleichung 4.1 und 4.2). Die gemessenen Pegelverläufe werden zudem, analog zu Abbildung 4.8 und 4.9, den analytisch berechneten IM gemäß Waterhouse gegenübergestellt.

Sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ ist erkennbar, dass im Maximum des modalen Schallfeldes der Pegel senkrecht zur Raumkante relativ konstant bleibt, während entlang der Trajektorien im Modenminimum, bis auf wenige Ausnahmen, höhere Pegelschwankungen erkennbar sind (siehe Abbildung 4.10 und 4.11).

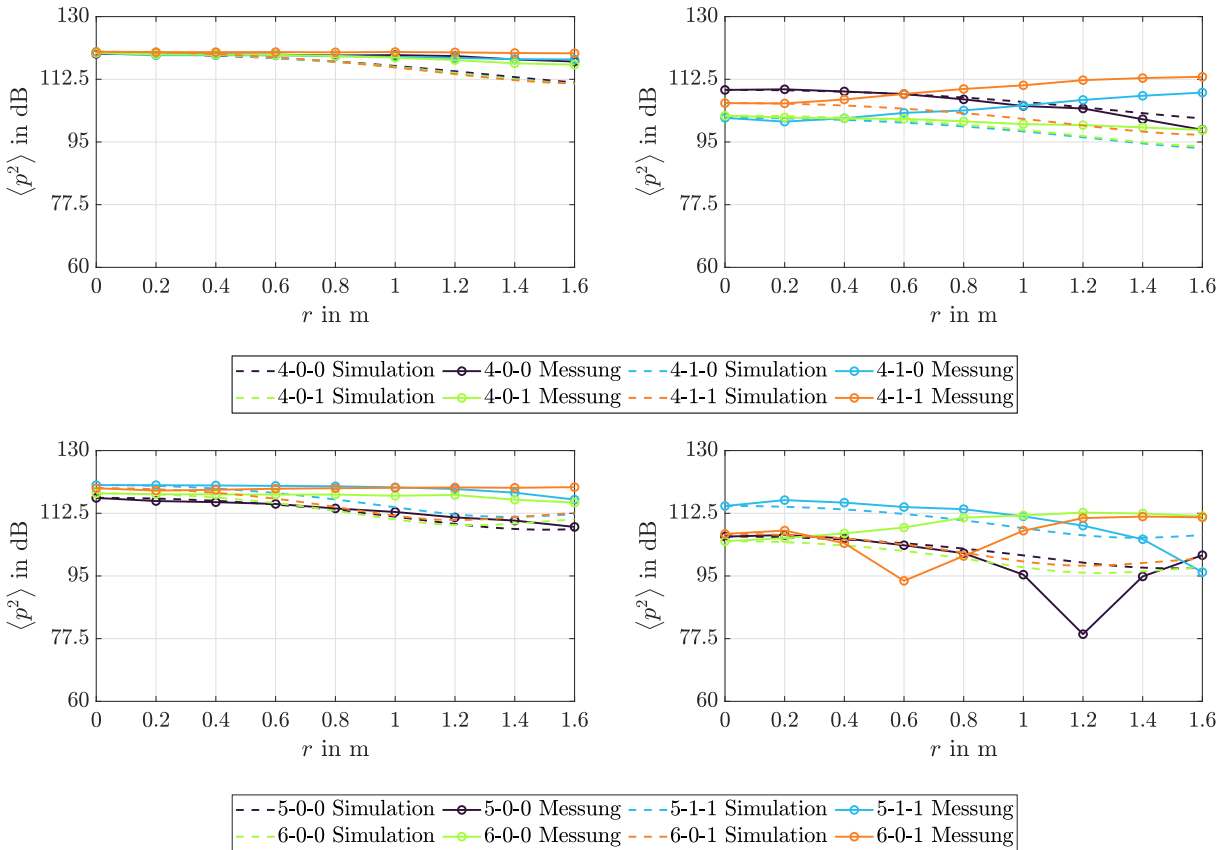


Abbildung 4.10: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit von r für $f < 100$ Hz (oben) und $f > 100$ Hz (unten) im Pegelmaximum (links) sowie im Pegelminimum des modalen Schallfeldes (rechts) im Raum ohne KA (MK 4)

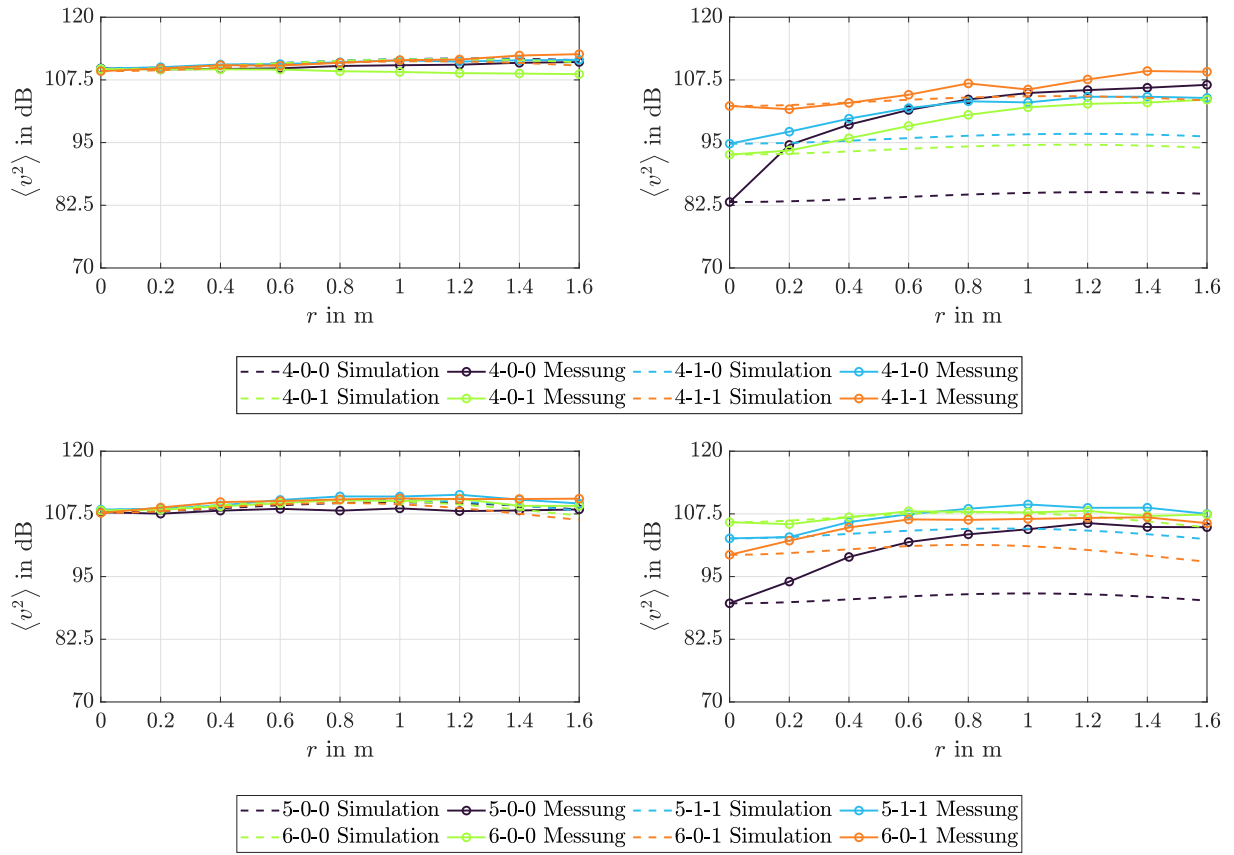


Abbildung 4.11: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit von r für $f < 100$ Hz (oben) und $f > 100$ Hz (unten) im Pegelmaximum (links) sowie im Pegelminimum des modalen Schallfeldes (rechts) im Raum ohne KA (MK 4)

Weiters liegt die Vermutung nahe, dass die Pegelschwankungen entlang einer Trajektorie nicht nur von der Lage im modalen Schallfeld, sondern auch vom absoluten Pegel abhängig sind.

Pegel-IQA in Abhängigkeit des Medianpegels

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des absoluten Pegels auf die Pegelschwankungen untersucht werden, indem für alle Raummodenfrequenzen und TP der Interquartilsabstand IQA mit dem Medianwert der MP einer Trajektorie verglichen wird. Der IQA berechnet sich aus der Differenz des 75%- und 25%-Quartils, und beschreibt somit das Intervall, in welchem sich die mittleren 50% der Messdaten befinden. Dadurch ergeben sich 72 geordnete Paare bestehend aus Median- und IQA -Werten ($9 \text{ TP} \cdot 8 \text{ Frequenzen}$) für die jeweilige Messgröße. In den folgenden Darstellungen (siehe Abbildung 4.12 und 4.13) werden für die jeweilige Messgröße die 72 IQA -Werte in Abhängigkeit des dazugehörigen Medianwertes dargestellt. Zusätzlich wird in die dadurch generierte Punktwolke eine Regressionsgerade gelegt.

In den Abbildungen 4.12 und 4.13 ist durch die eingezeichneten Regressionsgeraden erkennbar, dass für $\langle p^2 \rangle$, $\langle v^2 \rangle$ und $\langle v_x^2 \rangle$ der IQA mit steigendem Pegel deutlich sinkt. Übertragen auf die Pegelfluktuationen ist mit deren Verminderung bei hohen absoluten Pegeln, für $\langle p^2 \rangle$, $\langle v^2 \rangle$ und $\langle v_x^2 \rangle$, zu rechnen. Für $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ hingegen, ist dieser Zusammenhang weniger stark ausgeprägt (vgl. geringerer Abfall der Regressionsgeraden). Bei Vergleich der IQA -Absolutwerte der verschiedenen Messgrößen wird deutlich, dass die höchsten Pegelschwankungen, unabhängig vom absoluten Pegel, bei $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ auftreten.

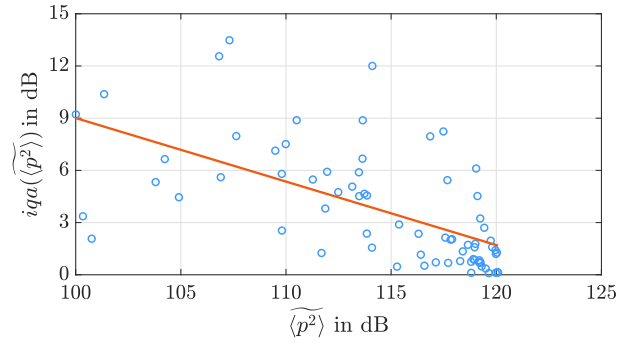


Abbildung 4.12: Interquartilsabstand IQA in Abhängigkeit des Medianwertes $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$

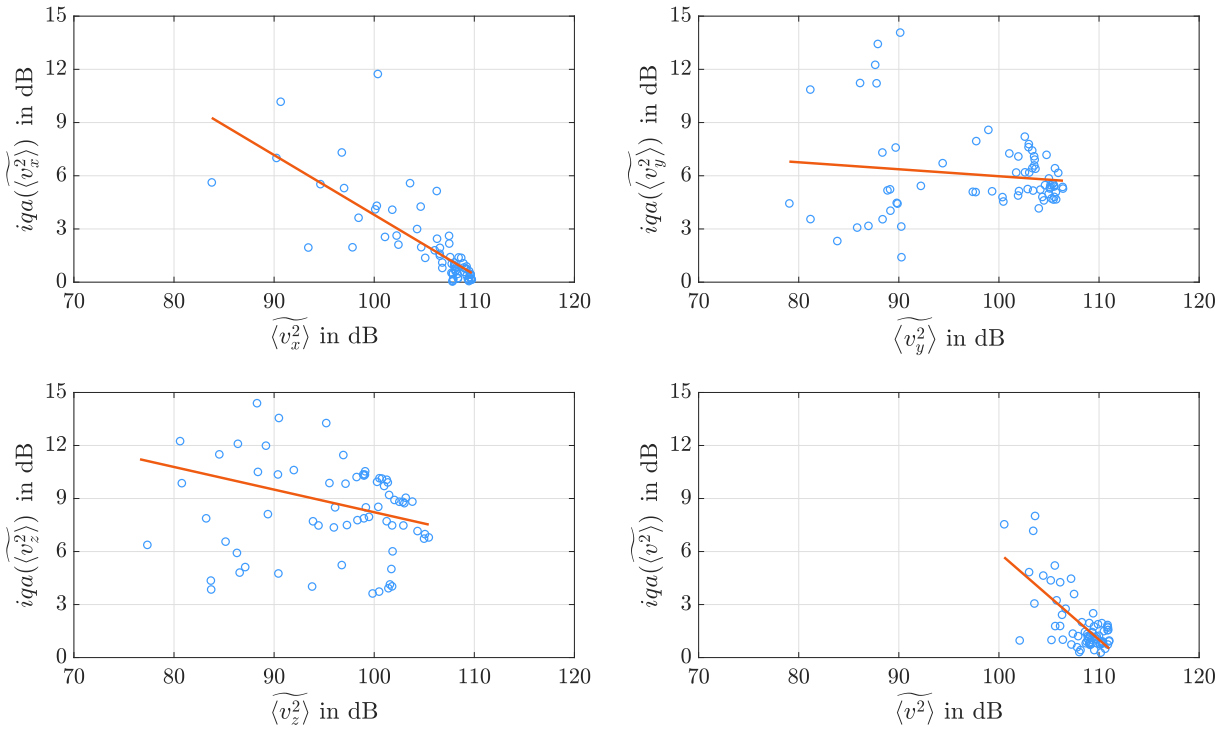


Abbildung 4.13: Interquartilsabstand IQA in Abhängigkeit des Medianwertes $\widetilde{\langle v_x^2 \rangle}$, $\widetilde{\langle v_y^2 \rangle}$, $\widetilde{\langle v_z^2 \rangle}$ und $\widetilde{\langle v^2 \rangle}$

4.2.4 Vergleich von gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen

Die Evaluierung der Pegelverteilungen wurde bisher allein durch die Überprüfung der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes durchgeführt. Um auch eine Aussage über die gesamten Pegelverteilungen innerhalb des Messrasters treffen zu können, wird eine Simulation in openCFS [24], basierend auf FEM, durchgeführt. Allgemeine Informationen zu FEM-Simulationen sind in [25] zu finden. Die FEM-Simulation wurde von Leon Merkel im Rahmen seines Toningenieur-Projektes „Finite Element Simulations of Edge Absorbers“, betreut von Florian Kraxberger und Stefan Schoder, erarbeitet [26]. Die exakten Raummodenfrequenzen der entsprechenden Raummoden für das Simulationsmodell ergeben sich aus einer Modalanalyse. Mit den daraus resultierenden Raummodenfrequenzen wird eine harmonische Simulation durchgeführt. Dabei werden für die 81 Messpunkte (gemäß Abbildung 3.15) alle Messgrößen bestimmt. Für die harmonische Analyse wird eine punktförmige Schallquelle durch ein Finites Element definiert. Diese erzeugt im Freifeld, in einer Entfernung von 1 m, einen Schalldruckpegel von $L_p = 70$ dB. Um einen Vergleich von FEM-Simulation und Messung durchzuführen, werden die Pegel der Simulation mithilfe eines Korrekturwertes angepasst. Die Korrekturwerte Δp_{kor}^2 bzw. Δv_{kor}^2 entsprechen dabei der Pegeldifferenz zwischen den Messergebnissen und den Berechnungsergebnissen der FEM-Simulation (Berechnung siehe Gleichung 4.3 bzw. Gleichung 4.4), wobei $\langle p^2 \rangle$ bzw. $\langle v^2 \rangle$ den Medianwert der 81 Messwerte (Anzahl der Messpunkte des Messrasters) beschreiben. Die Ergebnisse der FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle_{\text{Sim}}$ bzw. $\langle v^2 \rangle_{\text{Sim}}$ werden daraufhin mit dem berechneten Korrekturwert Δp_{kor}^2 bzw. Δv_{kor}^2 gemäß Gleichung 4.5 bzw. Gleichung 4.6 beaufschlagt, womit sich die korrigierten FEM-Simulationsergebnisse $\langle p^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ bzw. $\langle v^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ ergeben.

$$\Delta p_{\text{kor}}^2(F) = \widetilde{\langle p^2 \rangle}(F) - \widetilde{\langle p^2 \rangle}_{\text{Sim}}(F) \quad (4.3)$$

$$\Delta v_{\text{kor}}^2(F) = \widetilde{\langle v^2 \rangle}(F) - \widetilde{\langle v^2 \rangle}_{\text{Sim}}(F) \quad (4.4)$$

$$\langle p^2 \rangle'_{\text{Sim}}(F, TP, MP) = \langle p^2 \rangle_{\text{Sim}}(F, TP, MP) + \Delta p_{\text{kor}}^2(F) \quad (4.5)$$

$$\langle v^2 \rangle'_{\text{Sim}}(F, TP, MP) = \langle v^2 \rangle_{\text{Sim}}(F, TP, MP) + \Delta v_{\text{kor}}^2(F) \quad (4.6)$$

Der in diesem Abschnitt durchgeführte Vergleich zwischen FEM-Simulation und Messung beschränkt sich auf den leeren Hallraum (MK 4), sowie auf die Messgrößen $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ der Raummoden 4-0-1 und 5-0-0. Die Darstellungen für alle 8 Raummodenfrequenzen sind in Anhang D.1.3 zu finden.

Bei Betrachtung von $\langle p^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ der Raummode 4-0-1 in Abbildung 4.14 (unten) ist ein relativ stark ausgeprägtes Modenminimum entlang der TP 8 zu erkennen. Abbildung 4.15 (unten) zeigt $\langle v^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ für Raummode 4-0-1. Auffällig ist, dass der Pegel im Modenminimum an der MP 1 am geringsten ist und hin zur MP 9 relativ stark ansteigt. Erklärt werden kann dies durch die Betrachtung des modalen Schallfeldes in Abbildung 4.2 (links). Bei Raummoden deren Ordnungszahlen n_y und n_z ungleich Null sind, ist $\langle p^2 \rangle$ bzw. $\langle v^2 \rangle$ entlang einer Trajektorie, bedingt durch den gewählten Trajektorienwinkel von 45° , nicht konstant. Unklar ist jedoch, warum die Pegelverläufe entlang der Trajektorie im Modenminimum für $\langle p^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ und $\langle v^2 \rangle'_{\text{Sim}}$ unterschiedliche Tendenzen aufweisen, da gemäß der Randbedingung, für $\langle p^2 \rangle$ ein Pegelanstieg bzw. ein Pegelabfall für $\langle v^2 \rangle$ hin zur Raumkante zu erwarten ist.

Bei Vergleich der Pegelverteilungen von Messung und FEM-Simulation ist allgemein eine gute Übereinstimmung gegeben. Der wesentliche Unterschied besteht bei der Ausprägungsstärke der Modenminima. Während die Maxima von FEM-Simulation und Messung ähnliche Verläufe aufweisen, ist das Pegelminimum sowohl von $\langle p^2 \rangle$ als auch von $\langle v^2 \rangle$ der FEM-Simulation deutlich stärker ausgeprägt.

Für Raummode 5-0-0 liegt das $\langle p^2 \rangle$ -Modenminimum der FEM-Simulation an der TP 1 (siehe Abbildung 4.16 (unten)) bzw. das $\langle v^2 \rangle$ -Minimum der FEM-Simulation an der TP 7 (siehe Abbildung 4.17 (unten)) und stimmt somit sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ mit den Messungen überein. Bei Vergleich der Pegelverteilungen von Messung und FEM-Simulation ist sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ erkennbar, dass das Modenminimum bei der FEM-Simulation im Gegensatz zur Messung entlang der gesamten TP ausgeprägt ist. Warum sich das Modenminimum bei den gemessenen Pegelverteilungen auf verhältnismäßig wenig MP beschränkt ist derzeit noch unklar. Ähnlich wie bereits bei Raummode 4-0-1 ist auch bei Raummode 5-0-0 bei Vergleich von Messung und FEM-Simulation erkennbar, dass die Minima bei der FEM-Simulation deutlich stärker ausgeprägt sind.

Im Simulationsmodell von Merkel [26] werden alle Raumbegrenzungsflächen als schallharte Wände definiert. In der Praxis sind die Wände, aber besonders die Eingangstür des Hallraums, nicht schallhart. Dies macht sich unter anderem dadurch bemerkbar, dass das Anregungssignal während der Messungen auch außerhalb des Hallraums hörbar ist. Da schallharte Wände Voraussetzung für ein ideales modales Schallfeld sind, können Abweichungen zwischen gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen dadurch erklärt werden.

Zwischen den gemäß Gleichung 2.1 berechneten Raummodenfrequenzen und jenen, die mithilfe der Modalanalyse von Merkel [26] ermittelt wurden, gibt es Abweichungen, welche mit größer werdender Raummodenfrequenz ansteigen (siehe Tabelle 4.1). Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen (z.B. hinsichtlich der Lage von Modenminima und -maxima) ist dabei unabhängig von der absoluten Differenz zwischen f_{Messung} und $f_{\text{FEM-Simulation}}$.

Tabelle 4.1: Vergleich der Raummodenfrequenzen von FEM-Simulation und Berechnung gemäß Gleichung 2.1 (f_{Messung})

Nr.	Ordnungszahlen			f_{Messung} in Hz	$f_{\text{FEM-Simulation}}$ in Hz	Differenz in Hz
	n_x	n_y	n_z			
1	4	0	0	82,3	82,4288	0,1288
2	4	1	0	87,1	87,2717	0,1717
3	4	0	1	89,4	89,5700	0,1700
4	4	1	1	93,9	94,0459	0,1459
5	5	0	0	102,8	103,091	0,2910
6	5	1	1	112,3	112,596	0,2960
7	6	0	0	123,4	123,791	0,3910
8	6	0	1	128,3	128,656	0,3560

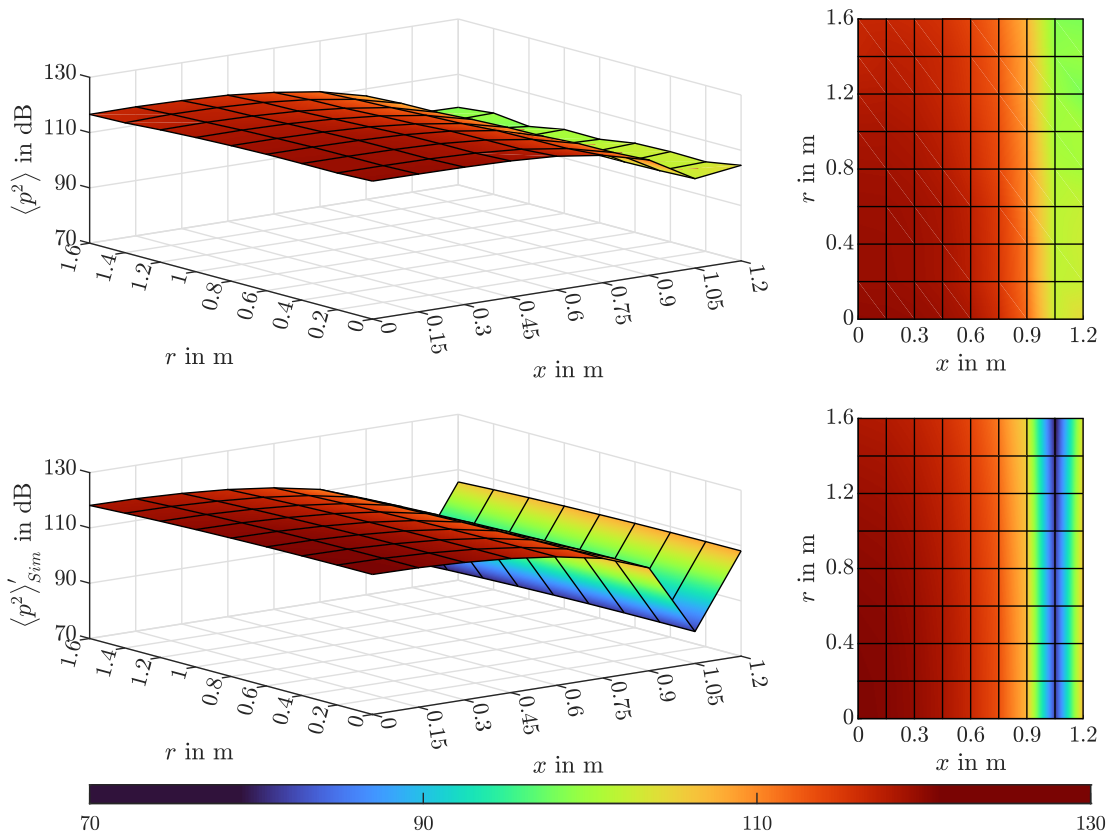


Abbildung 4.14: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

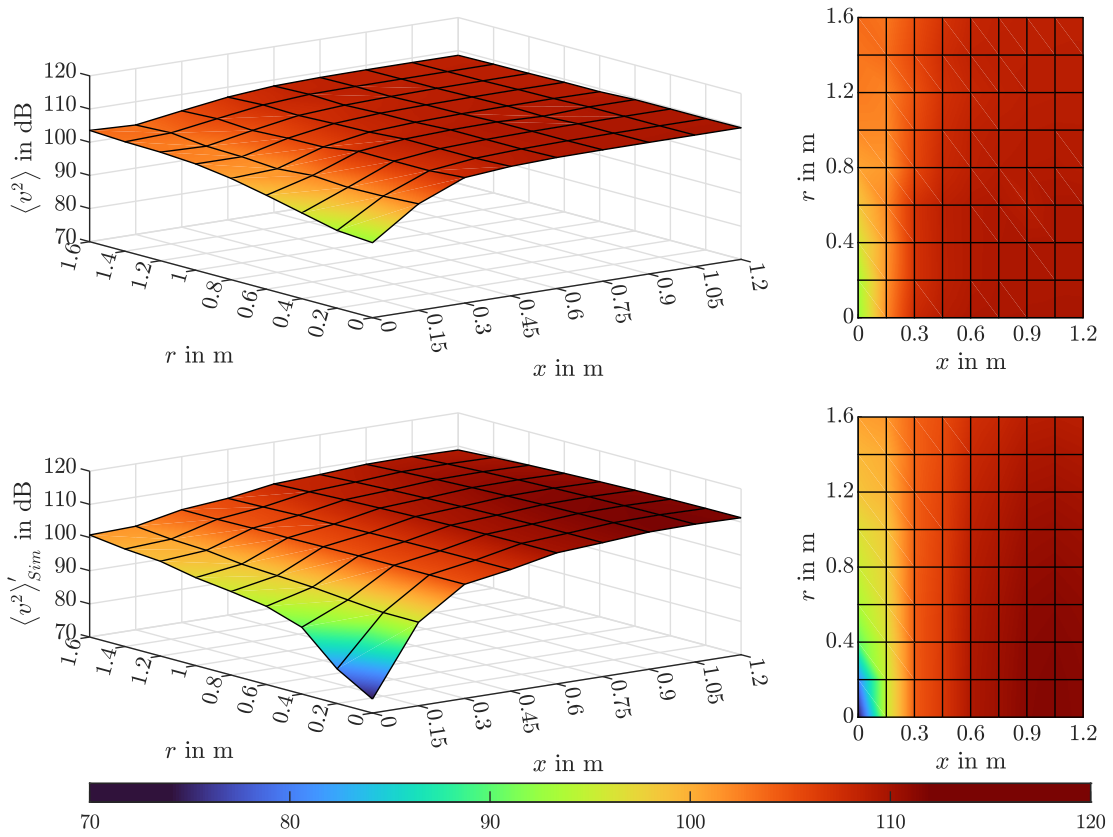


Abbildung 4.15: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

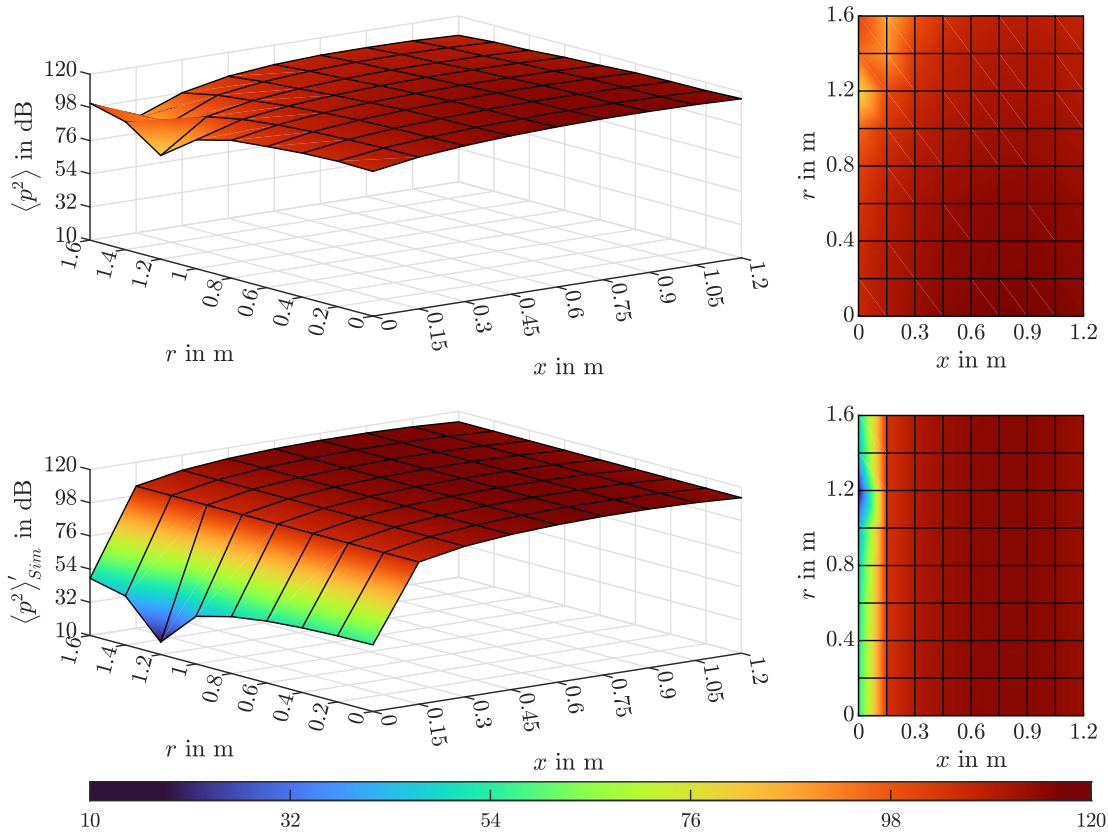


Abbildung 4.16: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

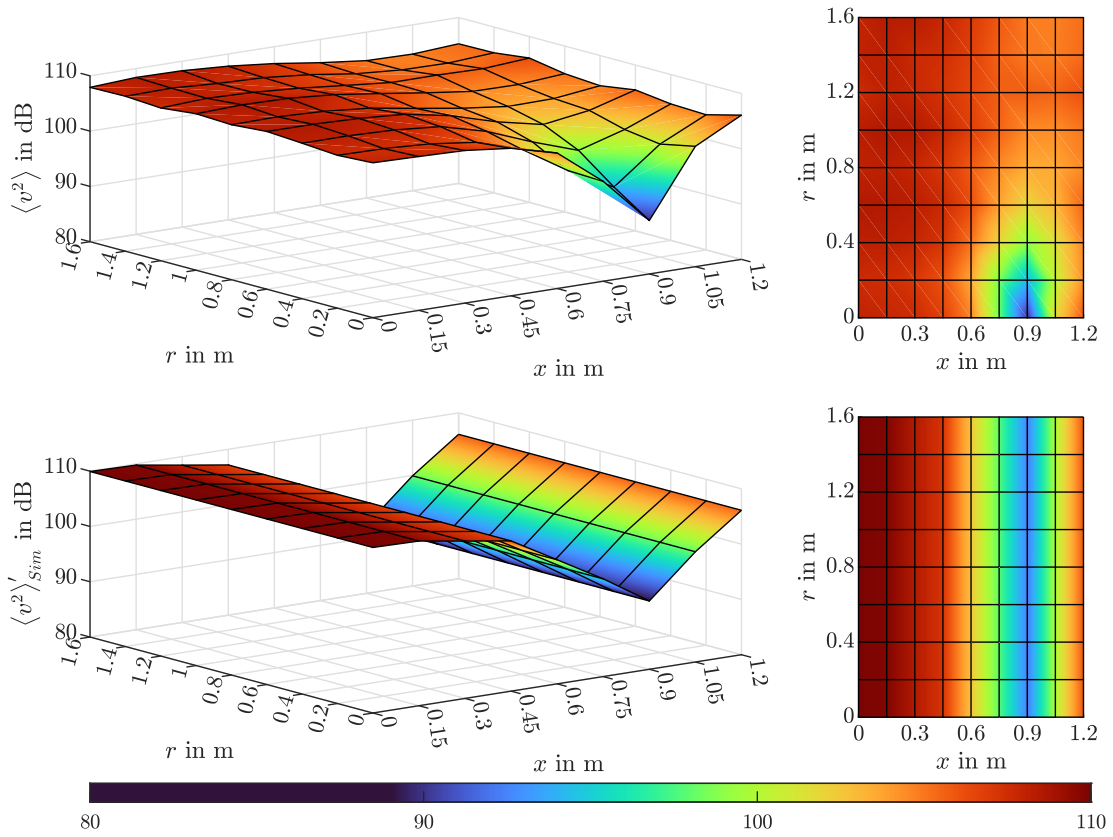


Abbildung 4.17: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

4.3 Messergebnisse mit KA (MK 1, MK 2, MK 3)

Analog zu Abschnitt 4.2 wird in diesem Abschnitt die Analyse der Messergebnisse für die Messungen mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) durchgeführt. Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, wird bei MK 1, MK 2 und MK 3 ein verkleinertes Messraster im Vergleich zu MK 4 verwendet (54 anstelle von 81 Messpunkten). Bei den Vergleichen zwischen den verwendeten MK wird in diesem Kapitel auch für MK 4 das verkleinerte Messraster verwendet.

4.3.1 Pegelverteilung in Abhängigkeit der MK

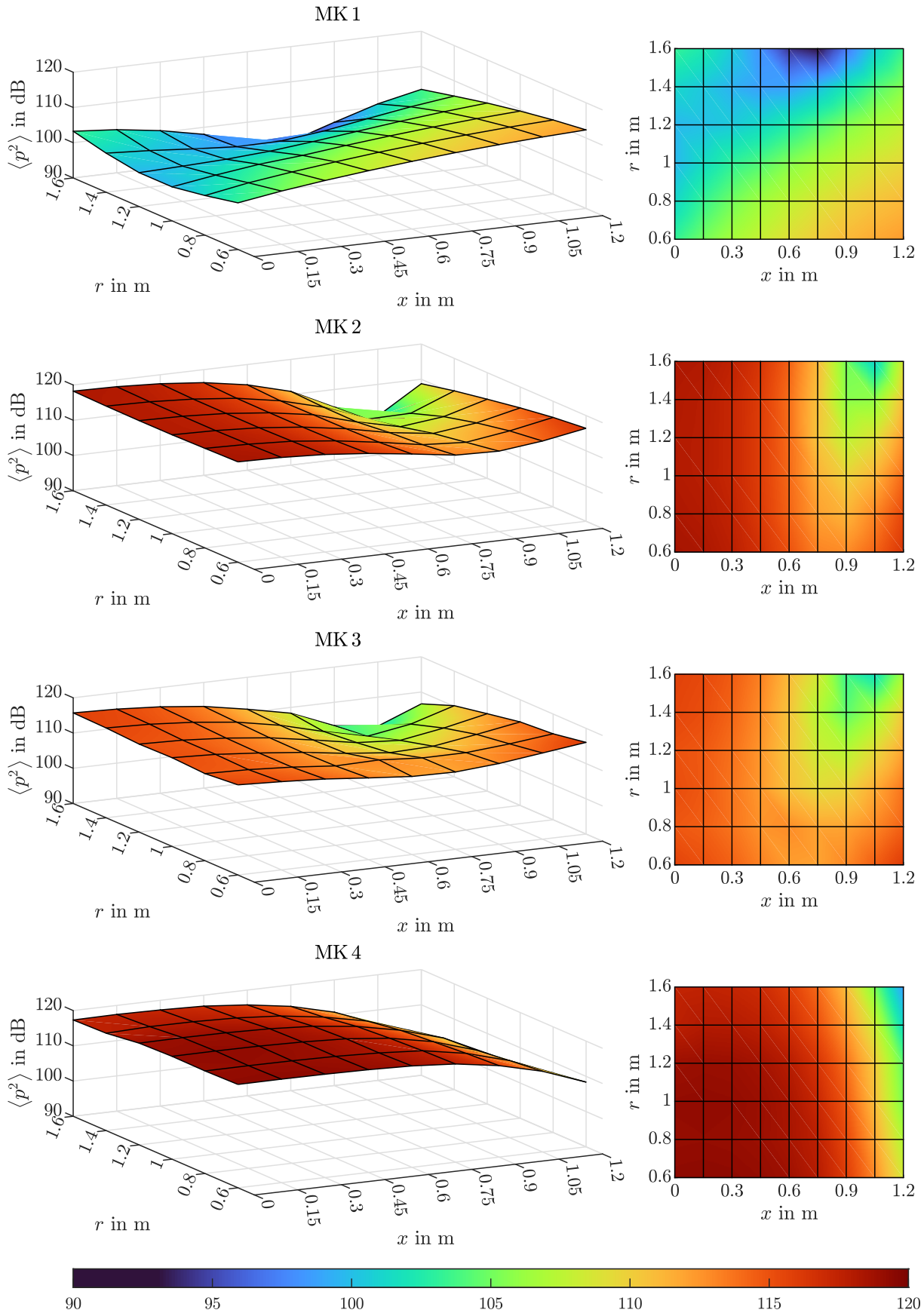
In diesem Abschnitt sollen die Pegelverteilungen der verwendeten MK für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ verglichen werden. Dadurch sollen Veränderungen des modalen Schallfeldes veranschaulicht werden, welche durch das Einbringen des KA in den Hallraum zu erwarten sind. Zudem soll durch die Gegenüberstellung der Pegelverteilungen bei den verschiedenen MK ein überblicksmäßiger Vergleich der absoluten Pegel ermöglicht werden. Die Pegelverteilungen in diesem Abschnitt werden am Beispiel der Raummoden 4-0-0 und 6-0-1 verglichen, deren modales Schallfeld in Anhang A abgebildet ist. Die Abbildungen 4.18 und 4.19 zeigen für die Raummode 4-0-0 und die Abbildungen 4.20 und 4.21 für die Raummode 6-0-1 den Vergleich der Pegelverteilungen von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ bei den verwendeten MK, jeweils veranschaulicht als 3D- und 2D-Flächendarstellung. Die Darstellungen für alle 8 Raummodenfrequenzen sind in Anhang D.2.1 zu finden.

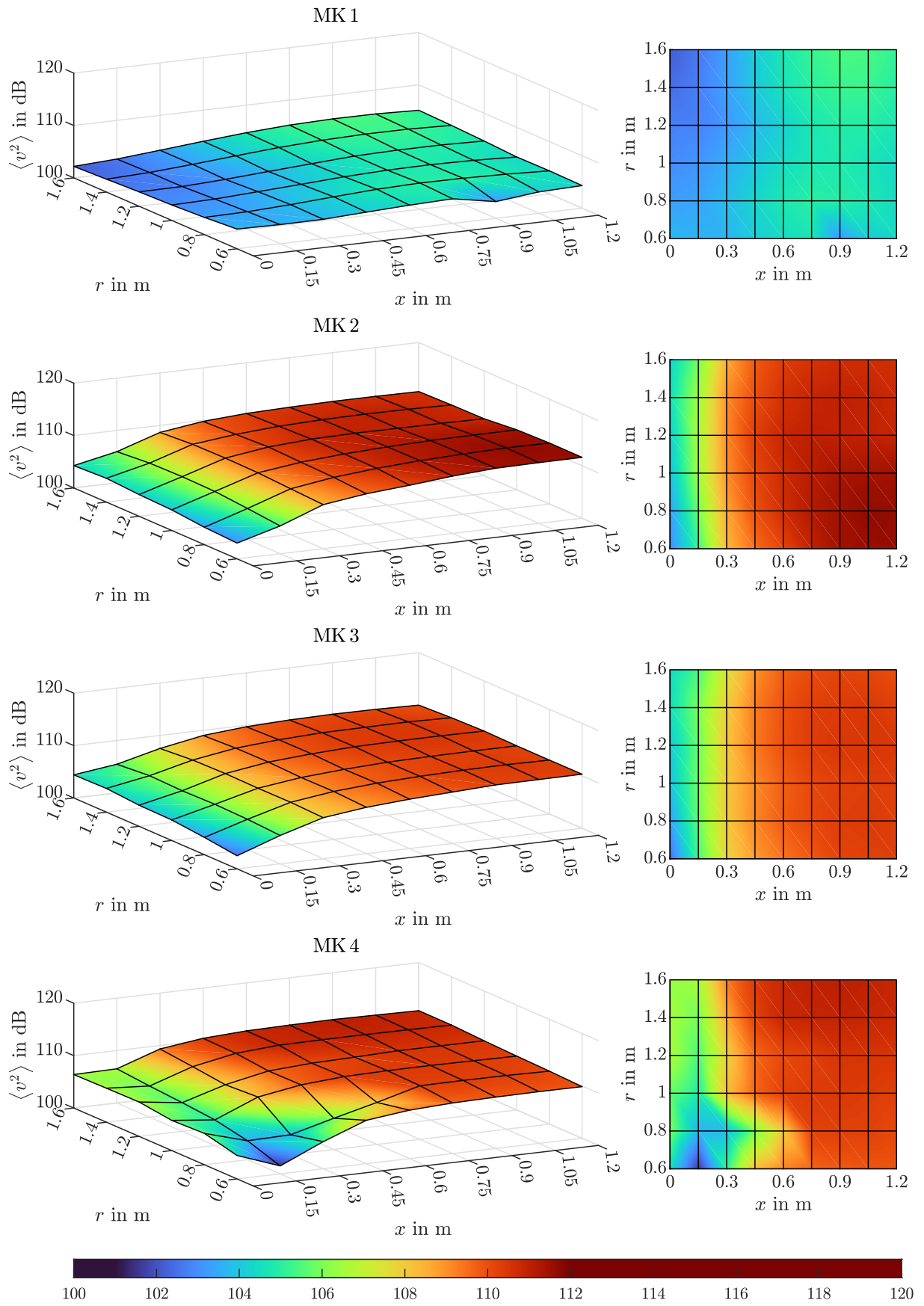
In den Abbildungen 4.18 und 4.19 ist anhand der Pegelverteilungen von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ der Raummode 4-0-0 erkennbar, dass es durch Einbringen des KA in den Hallraum, zu einer Änderung der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes, sowie zu einer Änderung der absoluten Pegel kommt.

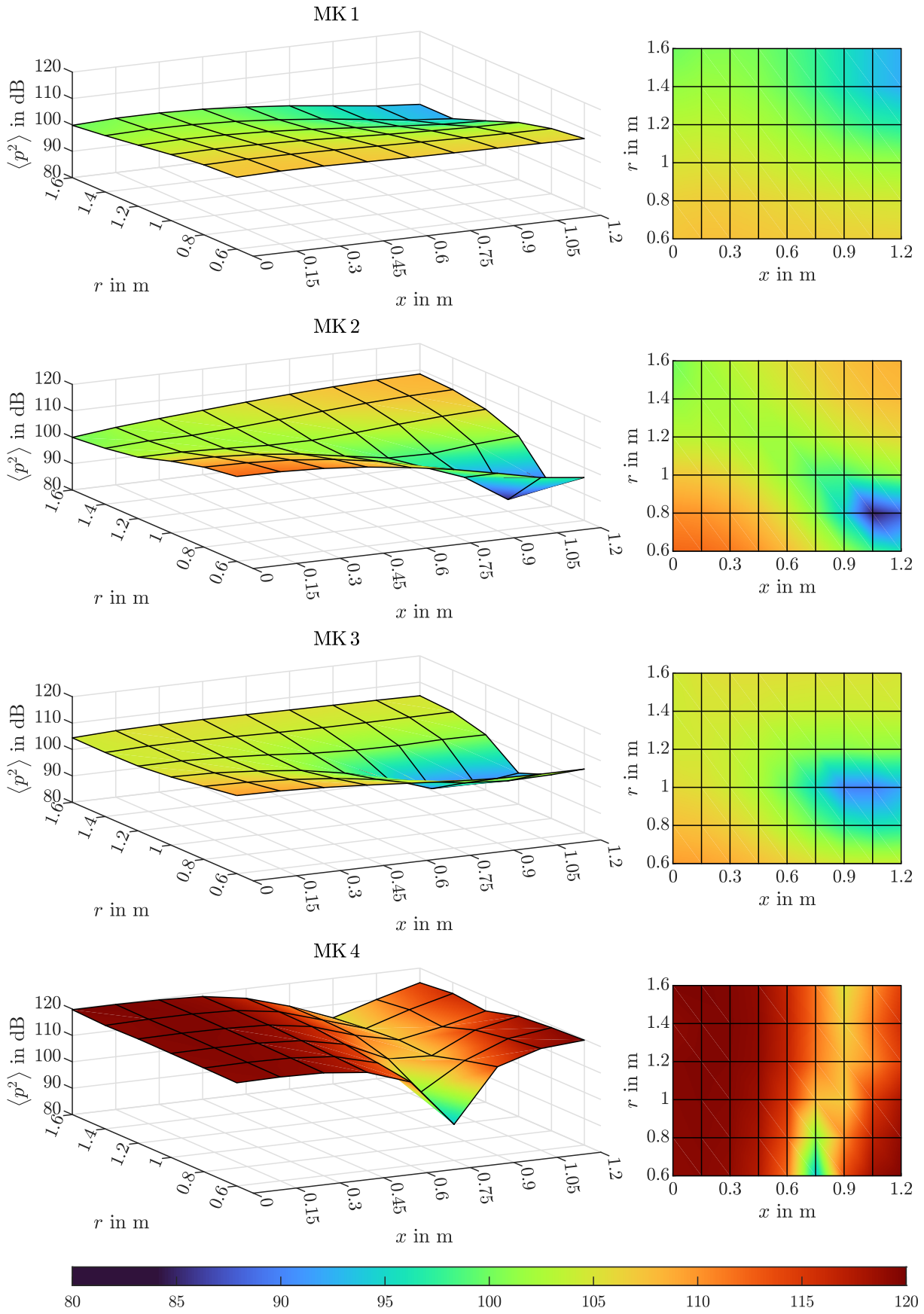
Der KA bewirkt im Fall von $\langle p^2 \rangle$ eine Lageverschiebung des Modenminimums in Richtung der TP 1. Das $\langle v^2 \rangle$ -Minimum verschiebt sich durch den KA bei MK 2 und MK 3 von TP 2 auf TP 1. Bei MK 1 ist kein ausgeprägtes Modenminimum erkennbar. Bezüglich des absoluten Pegels wird bei MK 1 im Vergleich zu MK 2, MK 3 und MK 4 eine deutliche Absenkung des Pegels, außer im Bereich des Modenminimums, erreicht.

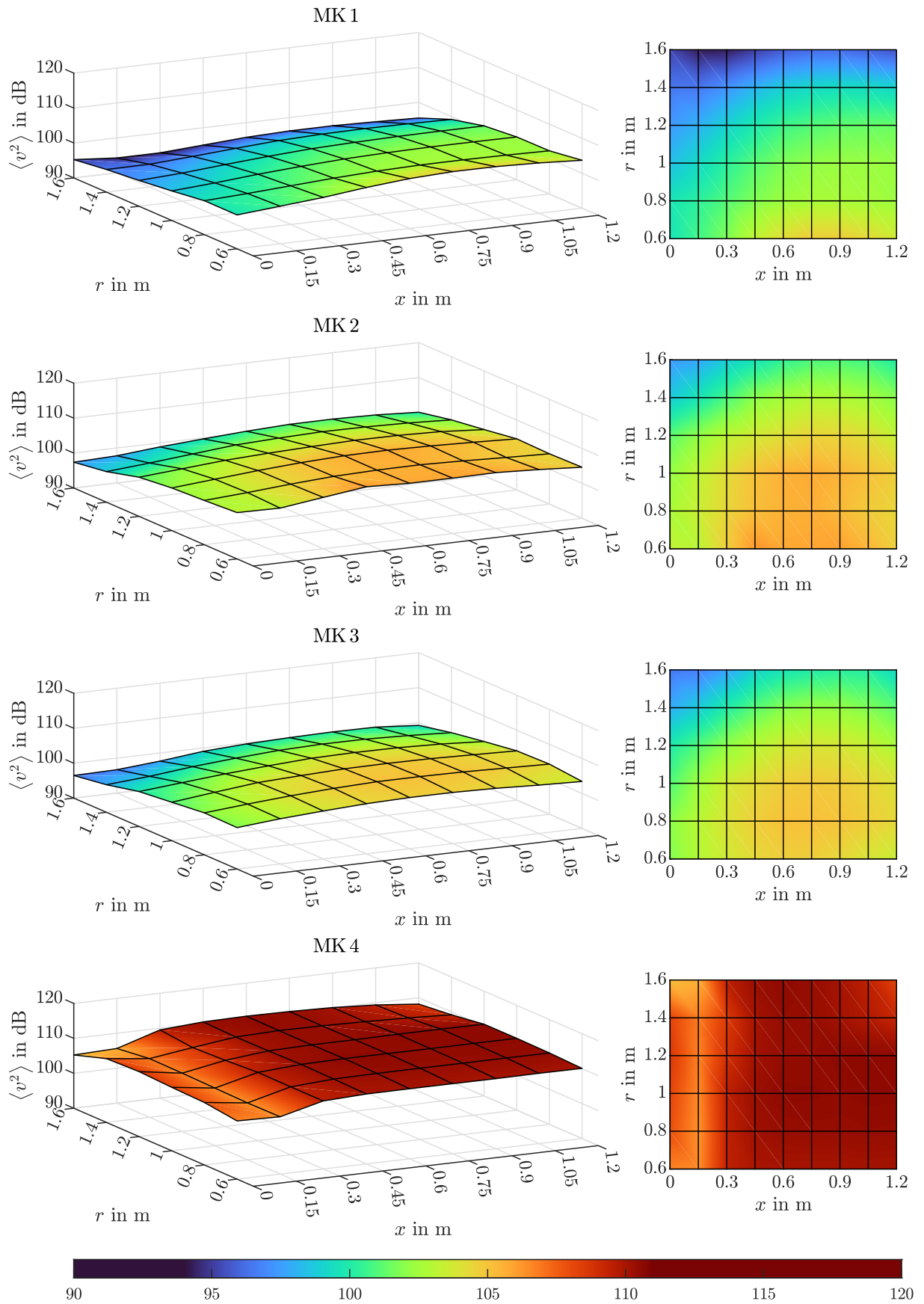
Beim Vergleich der Pegelverteilungen in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-1 ist für $\langle v^2 \rangle$ zu erkennen (siehe Abbildung 4.21), dass die Pegelverteilungen von MK 1, MK 2 und MK 3 ähnliche Tendenzen aufweisen und sich hinsichtlich der absoluten Pegel von jenen der MK 4 deutlich unterscheiden. Für den Fall von $\langle p^2 \rangle$ ist eine Übereinstimmung bei MK 1, MK 2 und MK 3 lediglich hinsichtlich der absoluten Pegel gegeben. Die Lage der Minima ändert sich (siehe Abbildung 4.20). Das Verhalten des absoluten Pegels in Abhängigkeit der verschiedenen MK wird in Abschnitt 4.3.3 genauer analysiert.

Die Änderungen der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes, welche sich durch das Einbringen des KA in den Hallraum ergeben, werden für alle 8 Raummodenfrequenzen in Abschnitt 4.3.2 genauer betrachtet.

Abbildung 4.18: Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-0

Abbildung 4.19: Pegelverteilung von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-0

Abbildung 4.20: Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-1

Abbildung 4.21: Pegelverteilung von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-1

4.3.2 Pegelverlauf entlang der Raumkante

Bereits in Abschnitt 4.3.1 wird deutlich, dass sich die Pegelverteilungen durch das Einbringen des KA verändern. In diesem Abschnitt werden analog zu Abschnitt 4.2.2 die Pegelverläufe entlang der Raumkante von MK 1 und MK 2 gezeigt. Um die Veränderung des modalen Schallfeldes durch den KA zu zeigen, wird zuzüglich zum Pegelverlauf von MK 1 und MK 2 auch jener von MK 4 als Referenzverlauf gezeigt. Da sich die Pegelverläufe entlang der Raumkante zwischen MK 2 und MK 3 kaum unterscheiden, wird in diesem Abschnitt der Vergleich zwischen MK 4 und MK 3 vernachlässigt. Als Vergleichsgröße wird je TP der Medianwert aus den MP 4 bis MP 9 von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ verwendet.

Die Abbildungen 4.22 und 4.24 zeigen $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$ und die Abbildungen 4.23 und 4.25 zeigen $\widetilde{\langle v^2 \rangle}$ in Abhängigkeit der Entfernung zu TP 1 für MK 1 bzw. MK 2 (durchgezogene Linie) im Vergleich zu MK 4 (gestrichelte Linie). Der Vergleich der Pegelverläufe entlang der Raumkante von MK 3 und MK 4 für $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$ und für $\widetilde{\langle v^2 \rangle}$ ist in Anhang D.2.2 zu finden. Für eine optimierte Darstellung werden die Pegelverläufe von $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$ bzw. $\widetilde{\langle v^2 \rangle}$ bei allen Raummodenfrequenzen mit $f < 100$ Hz in der oberen Reihe und jene mit $f > 100$ Hz in der unteren Reihe gezeigt.

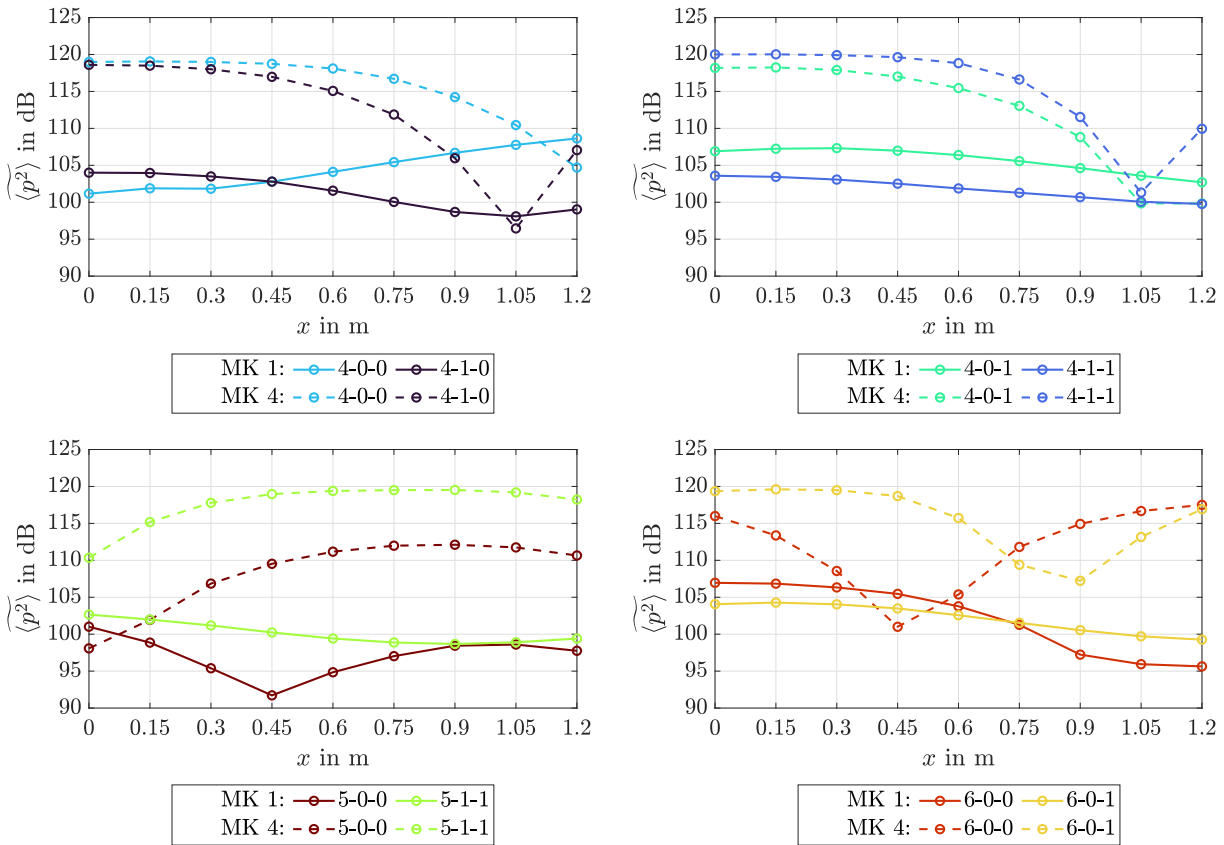


Abbildung 4.22: Pegelverlauf von $\widetilde{\langle p^2 \rangle}$ in Abhängigkeit der Position entlang der Raumkante für MK 1 (durchgezogene Linie) und MK 4 (gestrichelte Linie)

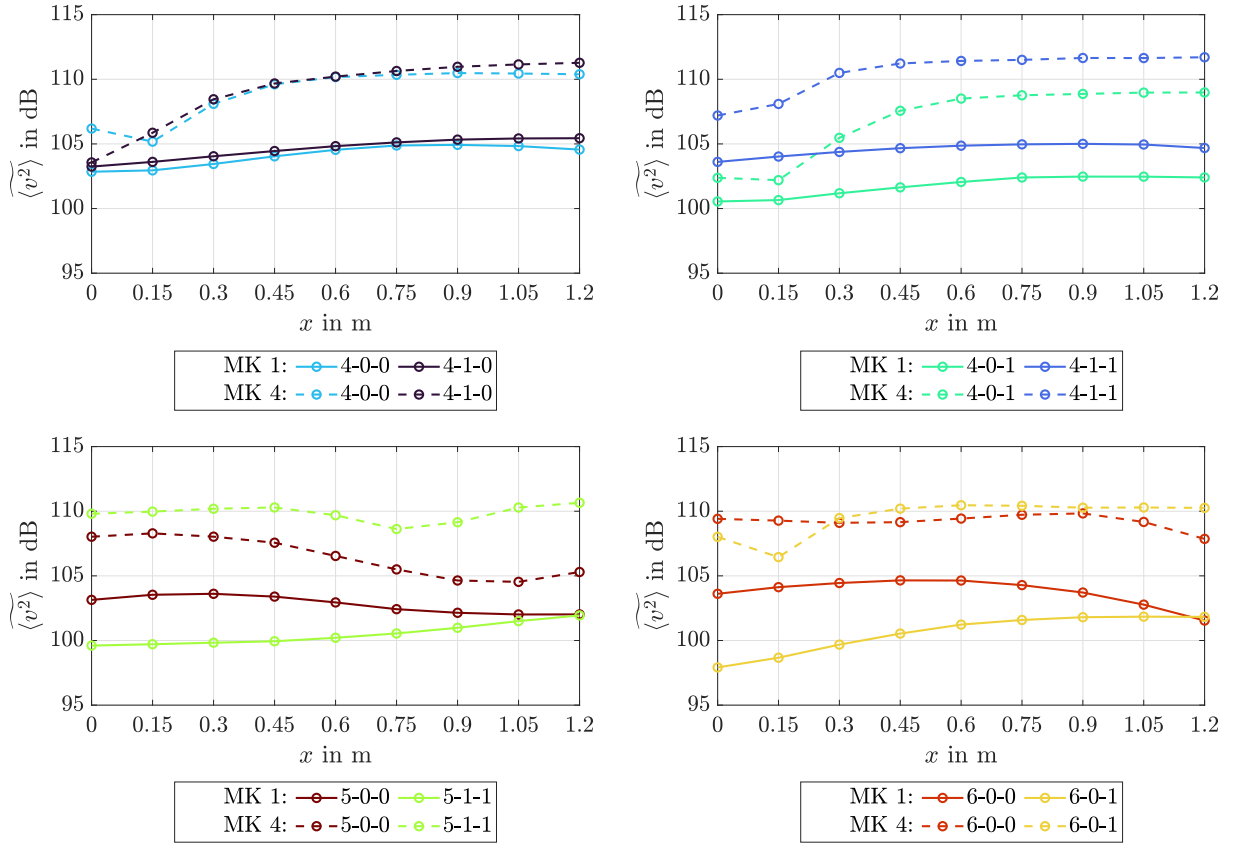


Abbildung 4.23: Pegelverlauf von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position entlang der Raumkante für MK 1 (durchgezogene Linie) und MK 4 (gestrichelte Linie)

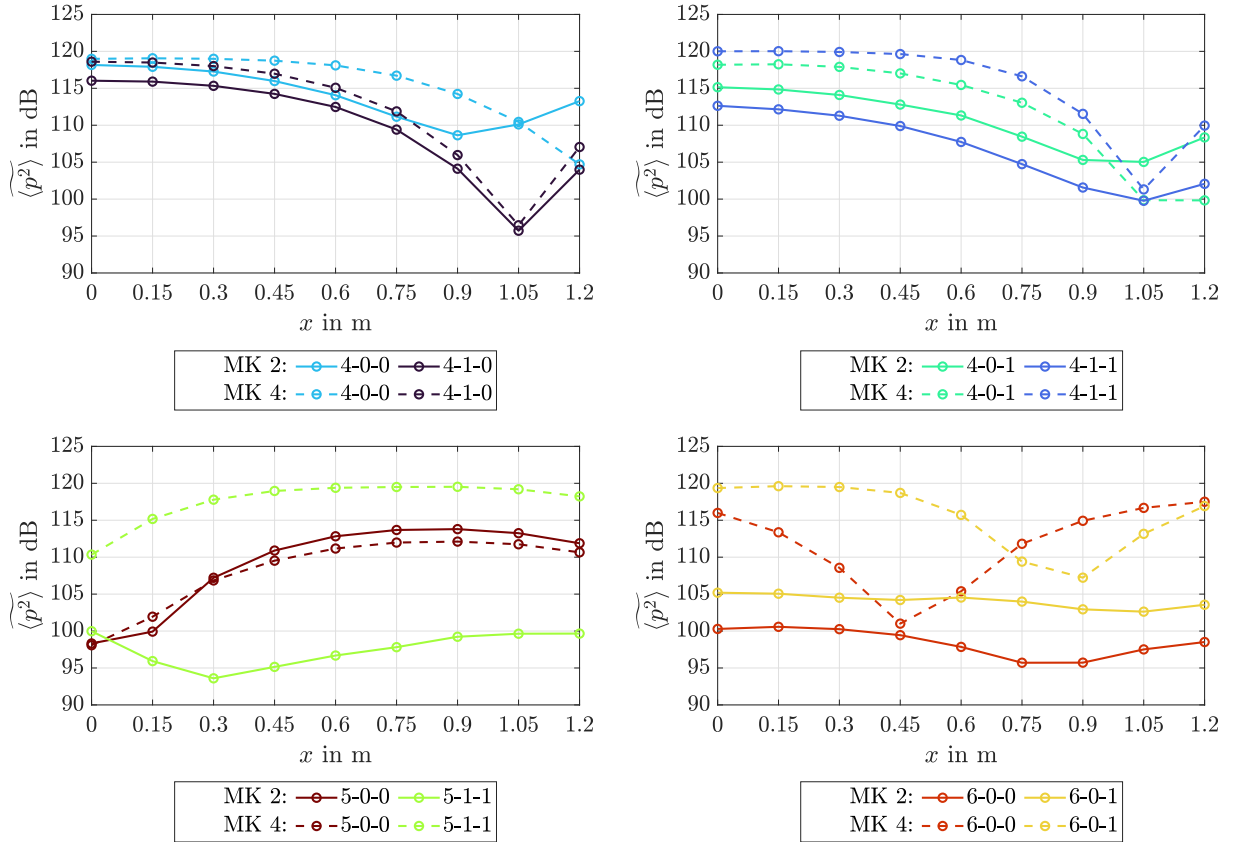


Abbildung 4.24: Pegelverlauf von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position entlang der Raumkante für MK 2 (durchgezogene Linie) und MK 4 (gestrichelte Linie)

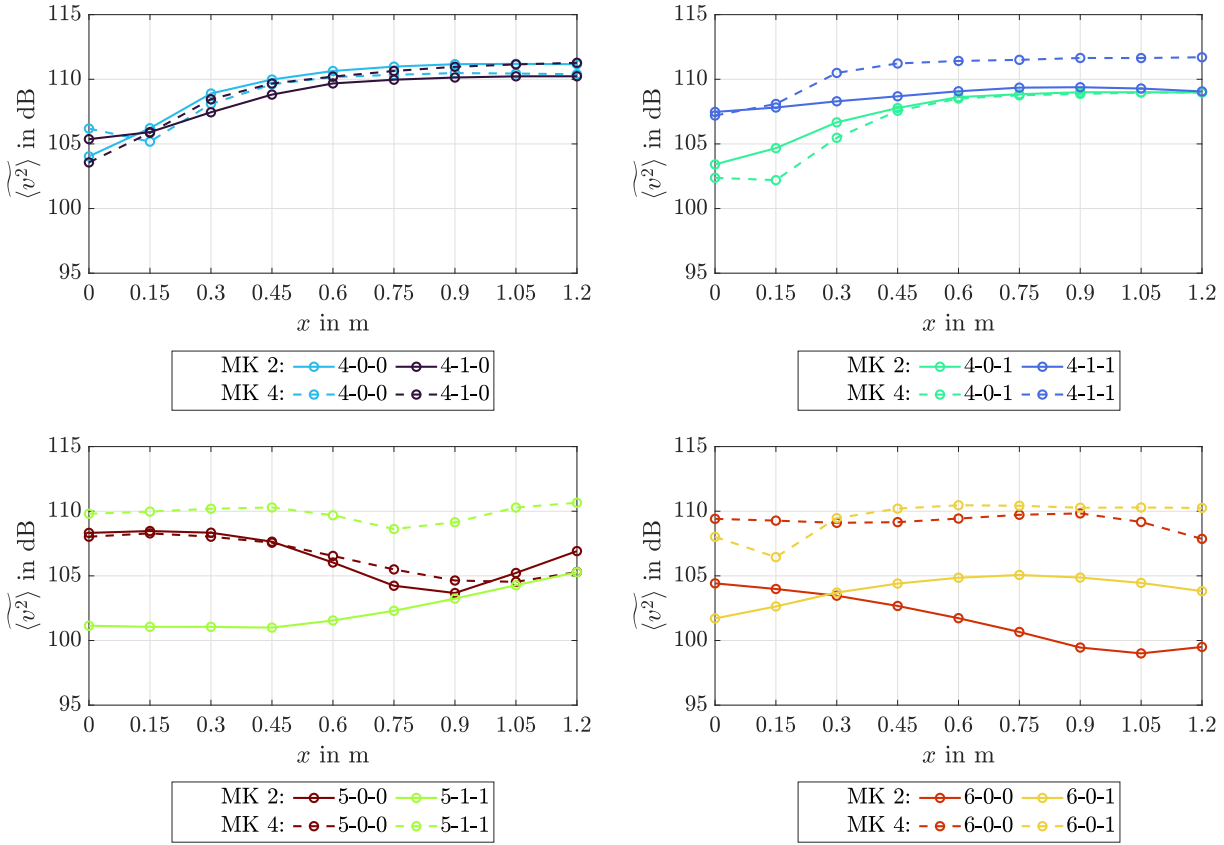


Abbildung 4.25: Pegelverlauf von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position entlang der Raumkante für MK 2 (durchgezogene Linie) und MK 4 (gestrichelte Linie)

In Abbildung 4.22 und 4.23 ist erkennbar, dass die Pegel von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ unabhängig von der Raummodenfrequenz durch den KA reduziert werden. Bei Betrachtung von Abbildung 4.24 und 4.25 fällt auf, dass es eine relativ hohe Übereinstimmung zwischen den Pegelverläufen von MK 4 und MK 2 z.B. bei Raummode 5-0-0 gibt. Der Einfluss des KA auf das modale Schallfeld bei MK 2 im Frequenzbereich von $f \leq 102,8$ Hz ist somit relativ gering.

Wird durch den KA eine Änderung der Pegelverläufe entlang der Raumkante im Vergleich zu MK 4 erreicht (MK 1, $\forall f$ bzw. MK 2, $\forall f \geq 112,3$ Hz), zeigen sich diese auf verschiedene Art und Weise. So kann es durch den KA zu einer relativ gleichmäßigen Pegelabsenkung kommen, wie am Beispiel der Raummoden 5-0-0, 6-0-0 in Abbildung 4.23 zu sehen ist. Hinsichtlich der Lage von Minima und Maxima gibt es durch den KA bei den Pegelverläufen von $\langle p^2 \rangle$ der Raummoden 5-0-0 und 6-0-0 oder 6-0-1 (siehe Abbildung 4.22) eine Verschiebung. Teilweise kommt es auch zu einer deutlichen Reduktion der Pegeldifferenzen zwischen Minimum und Maximum von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ einer Raummode (siehe z.B. 4-1-0, 4-0-1 und 4-1-1 in Abbildung 4.22 und 4.23).

4.3.3 Vergleich der absoluten Pegel

In diesem Abschnitt werden die gemessenen absoluten Pegel der verschiedenen MK in Abhängigkeit der Frequenz für jede Messgröße miteinander verglichen. Abbildung 4.26 zeigt die Box-Plots für $\langle p^2 \rangle$ (oben) und $\langle v^2 \rangle$ (unten) aller MK für jede Raummodenfrequenz. Je Box-Plot sind die Daten der gemessenen Pegel aller 54 Positionen des Messrasters (9 TP x 6 MP) enthalten. Die Darstellungen für $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ sind in Anhang D.2.3 verfügbar.

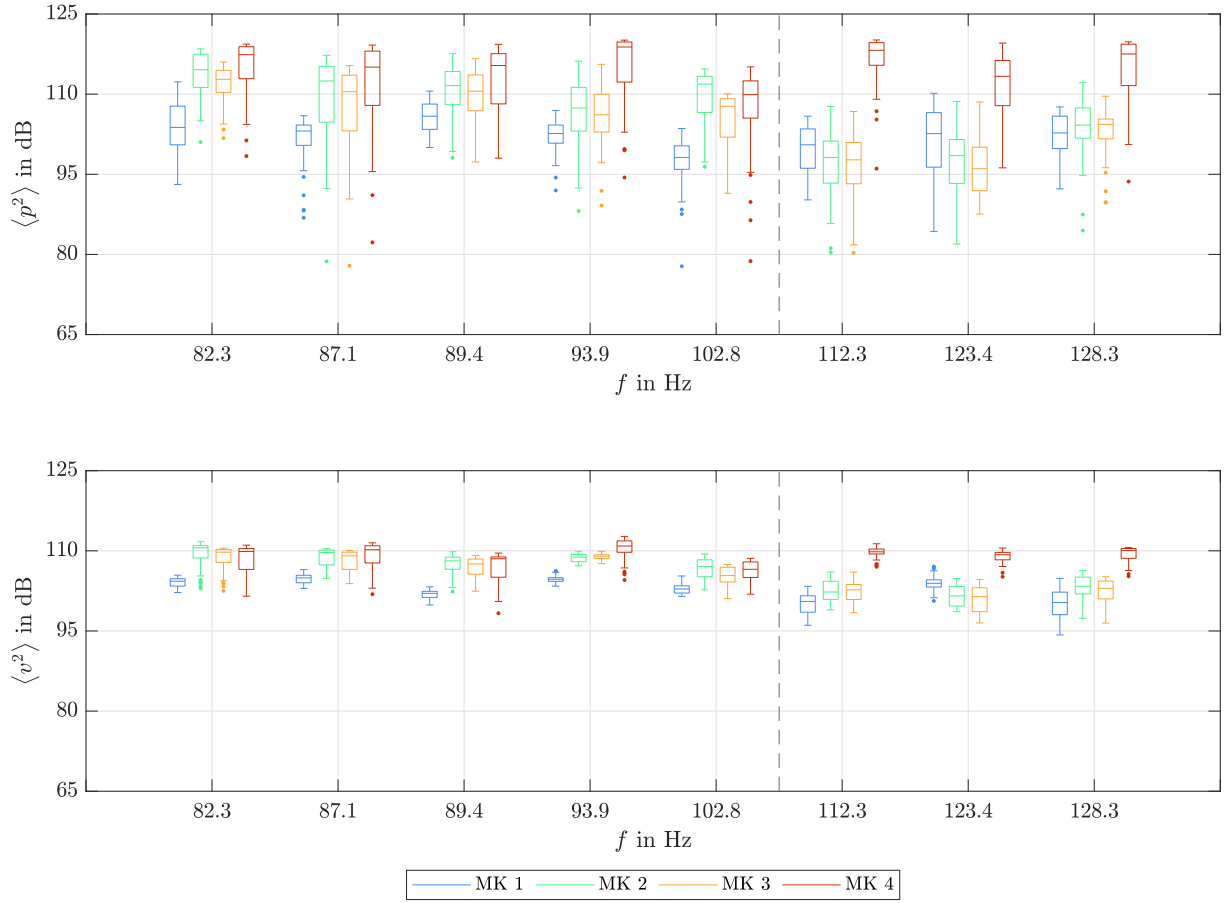


Abbildung 4.26: Box-Plots der gemessenen Pegel von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für jede Raummodenfrequenz

Bei Betrachtung der Box-Plots in Abbildung 4.26 lassen sich 2 Frequenzbereiche (FB) eingrenzen, in welchen die absoluten Pegel zwischen den verschiedenen MK ähnliche Tendenzen aufweisen. Dabei liegt FB 1 im Wertebereich von $82,3 \text{ Hz} \leq f \leq 102,8 \text{ Hz}$ und FB 2 im Wertebereich von $112,3 \text{ Hz} \leq f \leq 128,3 \text{ Hz}$. Zur besseren Veranschaulichung sind die einzelnen FB durch eine gestrichelte Linie getrennt.

Im ersten FB gibt es wiederum unterschiedliche Tendenzen für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$. Für $\langle p^2 \rangle$ gibt es einen Zusammenhang der absoluten Pegel mit der KA-Querschnittsfläche, da die höchsten Pegel bei MK 4 gemessen werden, die Pegel bei MK 2 bzw. MK 3 darunter liegen und jene bei MK 1 am geringsten sind. Bei den Box-Plots von $\langle v^2 \rangle$ ist hingegen erkennbar, dass die Medianwerte von MK 2, MK 3 und MK 4 relativ ähnliche Absolutwerte aufweisen, während jene von MK 1 deutlich darunter liegen. Es scheint, als wäre die Querschnittsfläche des KA bei MK 2 und MK 3 in diesem FB zu gering, um einen Einfluss auf die kinetische Energie zu haben.

Bei den Raummodenfrequenzen im FB 2 weisen alle MK mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ deutlich geringere Absolutwerte auf als MK 4. Die Pegelabsenkungen im FB 2 sind für MK 1 bis MK 3 relativ ähnlich, obwohl bei MK 1 die doppelte Menge an KA im Vergleich zu MK 2 und MK 3 im Raum vorhanden ist. Ein deutlicher Unterschied zwischen den absoluten Pegeln von MK 2 und MK 3 ist in keinem FB vorhanden.

Allgemein ist erkennbar, dass die Box-Plots von $\langle p^2 \rangle$ im Vergleich zu jenen von $\langle v^2 \rangle$ eine höhere Streuung der Absolutwerte aufweisen.

4.3.4 Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Anregungssignals

In diesem Abschnitt soll die Pegeldifferenz zwischen den Messwerten von MK 4 und jenen der Messungen mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) in Abhängigkeit der Frequenz und des Anregungssignals untersucht werden. Dafür wird sowohl für die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Messungen (Sinussignal als Anregungssignal), als auch für die Messergebnisse von Steffek [5] (Terzbandrauschen als Anregungssignal) die Pegeldifferenz der absoluten Pegel von MK 4 und MK 1 bzw. MK 2 bzw. MK 3 berechnet. Bedingt durch das von Steffek [5] verwendete Anregungssignal (Terzbandrauschen) wird ein Schallfeld erzeugt, dessen Pegel im Idealfall TP-unabhängig sind. Daher wurden die bei den Messungen von Steffek verwendeten Trajektorien lediglich an einer TP definiert. Wie bereits gezeigt, unterscheiden sich die Pegel der verwendeten Messgrößen in Abhängigkeit der TP bei Verwendung einer Raummodenfrequenz als Anregungssignal (siehe z.B. Abbildung 4.22 oder Abbildung 4.23). Um die Messergebnisse beider Arbeiten miteinander vergleichen zu können, ist daher die Bildung des Medianwertes über alle TP notwendig, um die Pegelschwankungen entlang einer Kante auszugleichen. In weiterer Folge werden die Messwerte, welche aus den Messungen bei Anregung des Raums mit einem Sinussignal erhalten wurden, als Sisi-Messergebnisse und jene aus der Arbeit von Steffek [5], bei welchen Terzbandrauschen als Anregungssignal verwendet wurde, als Tbr-Messergebnisse bezeichnet.

Für die Sisi-Messergebnisse werden die Pegeldifferenzen $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2_{sisi}}$ gemäß Gleichung 4.7 bzw. Gleichung 4.8 berechnet. $\langle p^2 \rangle$ bzw. $\langle v^2 \rangle$ entspricht dabei dem Medianwert der Pegeldifferenzen der 54 Messpunkte des Messrasters der entsprechenden MK und Raummodenfrequenz. Zudem werden die berechneten Pegeldifferenzen der Raummodenfrequenzen innerhalb eines Terzbandes (Frequenzbänder mit den Terzmittenfrequenzen $f_m = 80 \text{ Hz}$, 100 Hz , 125 Hz) durch die Bildung eines weiteren Medianwertes zusammengefasst.

$$\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}(FM, MK) = \text{Median} \left\{ \langle p^2 \rangle_{MK4}(F) - \langle p^2 \rangle(F, MK) \right\} \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.7)$$

$$\widetilde{\Delta v^2_{sisi}}(FM, MK) = \text{Median} \left\{ \langle v^2 \rangle_{MK4}(F) - \langle v^2 \rangle(F, MK) \right\} \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.8)$$

In Abbildung 4.27 (links) sind die in Terzbänder zusammengefassten Pegeldifferenzen $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2_{sisi}}$ in Abhängigkeit von MK und f_m dargestellt. In Abbildung 4.27 (rechts) sind die aus den Tbr-Messergebnissen berechneten Pegeldifferenzen Δp^2_{tbr} bzw. Δv^2_{tbr} dargestellt, welche gemäß Gleichung 4.9 bzw. Gleichung 4.10 berechnet werden. $\langle p^2 \rangle$ bzw. $\langle v^2 \rangle$ entsprechen dabei dem Medianwert aller Messpositionen der 45° -Trajektorie³. Die Darstellungen für $\langle v^2_x \rangle$, $\langle v^2_y \rangle$ und $\langle v^2_z \rangle$ sind in Anhang D.2.4 zu finden.

$$\Delta p^2_{tbr}(FM, MK) = \langle p^2 \rangle_{MK4}(FM) - \langle p^2 \rangle(FM, MK) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.9)$$

$$\Delta v^2_{tbr}(FM, MK) = \langle v^2 \rangle_{MK4}(FM) - \langle v^2 \rangle(FM, MK) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.10)$$

³ Informationen zur Messung mit Terzbandrauschen als Anregungssignal sind in Steffek [5] zu finden.

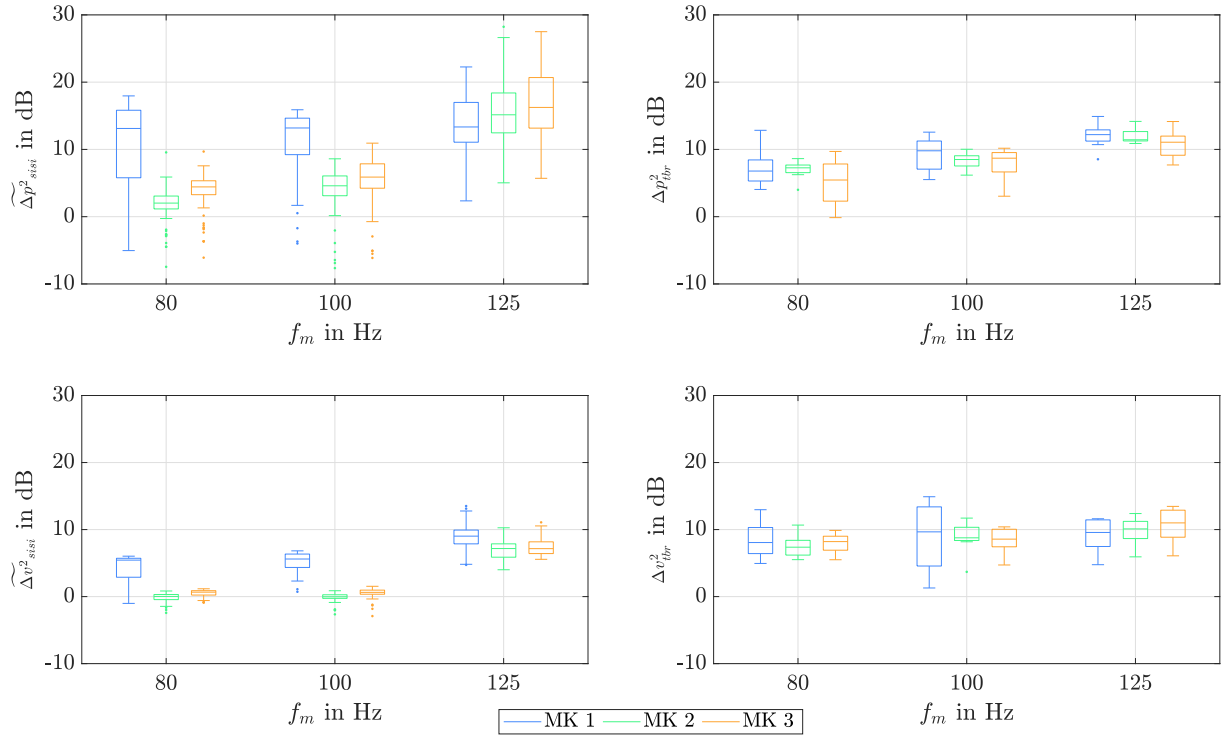


Abbildung 4.27: Vergleich der aus den Sisi- und Tbr-Messwerten berechneten Pegeldifferenzen $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}$, $\widetilde{\Delta v^2_{sisi}}$, Δp^2_{tbr} , Δv^2_{tbr} zwischen MK 4 und den MK mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) für $\langle p^2 \rangle$ (oben) und $\langle v^2 \rangle$ (unten)

Wie in Abbildung 4.27 (links oben) erkennbar, ist der Medianwert von $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}$ im Fall von MK 1 bei allen betrachteten Terzmittenfrequenzen relativ konstant. Bei MK 2 und MK 3 steigt der Medianwert von $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}}$ mit größer werdender Frequenz an, wobei ein Minimalwert von $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}} \approx 3$ dB ($f_m = 80$ Hz, MK 2) und ein Maximalwert von $\widetilde{\Delta p^2_{sisi}} \approx 18$ dB ($f_m = 125$ Hz, MK 3) berechnet wird.

Bei Betrachtung der Pegeldifferenzen von $\langle v^2 \rangle$ (siehe Abbildung 4.27 links unten) ist bei MK 1 eine Erhöhung der Medianwerte mit größer werdender Frequenz erkennbar, wobei der Minimalwert $\widetilde{\Delta v^2_{sisi}} \approx 4$ dB und der Maximalwert $\widetilde{\Delta v^2_{sisi}} \approx 9$ dB beträgt. Für MK 2 bzw. MK 3 ist keine nennenswerte Pegelreduktion unterhalb des 125 Hz-Terzbandes gegeben. Im 125 Hz-Terzband nähert sich die Pegelreduktion von MK 2 bzw. MK 3 an jene der MK 1 an.

In Abbildung 4.27 (rechts) sind die aus den Tbr-Messergebnissen berechneten Pegeldifferenzen dargestellt. Für $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ zeigt sich, dass die Medianwerte von Δp^2_{tbr} bzw. Δv^2_{tbr} bei MK 1, MK 2 und MK 3 innerhalb eines Terzbandes relativ ähnlich sind, wobei sich der Medianwert von Δp^2_{tbr} bzw. Δv^2_{tbr} mit steigender Terzmittenfrequenz erhöht. Die Medianwerte von Δp^2_{tbr} bzw. Δv^2_{tbr} liegen dabei im Wertebereich von $6 \text{ dB} \leq \Delta p^2_{tbr} \leq 12 \text{ dB}$ bzw. $8 \text{ dB} \leq \Delta v^2_{tbr} \leq 11 \text{ dB}$.

Bei Vergleich der Pegeldifferenzen von MK 1 mit MK 2 bzw. MK 3 zeigt sich, dass Sisi-Messergebnisse und Tbr-Messergebnisse, besonders in den Terzbändern mit den Mittenfrequenzen von $f_m = 80$ Hz und $f_m = 100$ Hz unterschiedliche Tendenzen aufweisen. Bei den Sisi-Messergebnissen werden sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ bei MK 1 jeweils deutlich höhere Pegeldifferenzen erreicht als bei MK 2 bzw. MK 3, während die Pegeldifferenzen zwischen MK 1, MK 2 und MK 3 bei den Tbr-Messergebnissen relativ ähnlich sind. Es scheint, als hätte die KA-Querschnittsfläche den maßgeblichen Einfluss auf die Pegelreduktionen bei den Sisi-Messergebnissen. Bei den Tbr-Messergebnissen ist die Pegelreduktion hingegen relativ unabhängig von der MK, womit weder eine Abhängigkeit von der KA-Querschnittsfläche, noch von der Positionierung gegeben ist (siehe Abbildung 4.27 (rechts)).

Das Verhalten der Tbr-Messergebnisse deckt sich nicht mit der von Steffek [5] ermittelten äquivalenten Absorptionsfläche (siehe Abbildung 3.1), welche sehr wohl eine Abhängigkeit von der MK sowie von der Positionierung aufzeigt. Eine weitere Gegenüberstellung von Pegeldifferenzen und äquivalenten Absorptionsflächen, sowie deren Analyse wird in Abschnitt 5.3.1 durchgeführt.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, wird durch das Einbringen von schallabsorbierenden Materialien in den Hallraum der mittlere Pegel von potentieller- und kinetischer Energie im Schallfeld abgesenkt. Demnach müsste mit zunehmender Menge an KA-Elementen der mittlere Pegel von potentieller und kinetischer Energie sinken. Beim Vergleich der Pegel von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK der Raummode 4-0-0 ($f = 82,3$ Hz) in Abbildung 4.26 ist aber ersichtlich, dass bei MK 2 und MK 3 höhere Pegel gemessen werden als bei MK 4, obwohl bei MK 2 und MK 3 KA-Elemente im Hallraum vorhanden sind. Neben der Reduktion von potentieller- und kinetischer Energie muss noch berücksichtigt werden, dass durch das Einbringen von KA-Elementen in den Hallraum auch die Raummodenstruktur des Schallfeldes verändert wird. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erläutert, ist eine konstante Wellenlänge Voraussetzung zur Anregung der Raummodenfrequenzen. Zudem ist bekannt, dass die Schallgeschwindigkeit nicht nur von der Raumtemperatur ϑ , sondern auch vom Medium abhängig ist. Durch die Änderung der Dichte des Mediums in der Raumkante (von Luft zu Melaminharzschäum (Absorbermaterial)) und der daraus folgenden Änderung der Schallgeschwindigkeit, wird bei konstanter Frequenz die Wellenlänge und dadurch das modale Schallfeld verändert. Inwiefern sich das modale Schallfeld verändert, kann durch den gewählten Messaufbau insofern nicht bestimmt werden, da durch das verwendete Messraster nicht das gesamte Schallfeld, sondern nur ein beschränkter Bereich an der Raumkante betrachtet wird. Eine Erhöhung des mittleren Pegels in einem örtlich begrenzten Messbereich innerhalb des Hallraums ist durchaus möglich. Die berechneten Pegeldifferenzen zwischen den verschiedenen MK sind somit sowohl von der Änderung des mittleren Pegels von potentieller und kinetischer Energie, als auch von der Änderung des modalen Schallfeldes abhängig. Welches der beiden Phänomene maßgeblich für den resultierenden Pegel ist, hängt von der MK sowie von der Frequenz f ab. Bei Betrachtung der Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von $f_m = 80$ Hz und 100 Hz (siehe Abbildung 4.27 (links unten)) ist erkennbar, dass die Pegeldifferenzen (Medianwerte) zwischen MK 4 und MK 2 bzw. MK 3 Werte annehmen, die in der Nähe von Null liegen. Im Gegensatz dazu ist die Pegeldifferenz (Medianwert) bei MK 1, unabhängig von der Terzmittenfrequenz, immer deutlich über Null.

4.3.5 Einfluss des KA auf $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$

Wie sich die absoluten Pegel von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ im Hallraum nach Einbringen des KA verhalten, wird in Abschnitt 4.3.3 ausgeführt. In diesem Abschnitt soll hingegen der Einfluss des KA auf die einzelnen $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$ gezeigt werden. Dafür wird die Pegeldifferenz zwischen den Messwerten von MK 4 und jenen der Messungen mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) der einzelnen $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten berechnet (siehe Gleichung 4.11 bis 4.13).

$$\Delta v_x^2(F, MK) = \widetilde{\langle v_x^2 \rangle}_{MK4}(F) - \widetilde{\langle v_x^2 \rangle}(F, MK) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.11)$$

$$\Delta v_y^2(F, MK) = \widetilde{\langle v_y^2 \rangle}_{MK4}(F) - \widetilde{\langle v_y^2 \rangle}(F, MK) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.12)$$

$$\Delta v_z^2(F, MK) = \widetilde{\langle v_z^2 \rangle}_{MK4}(F) - \widetilde{\langle v_z^2 \rangle}(F, MK) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (4.13)$$

Abbildung 4.28 zeigt die Box-Plots der Pegeldifferenzen Δv_x^2 , Δv_y^2 und Δv_z^2 in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz f für die jeweilige MK. Für die Interpretation der Pegeldifferenzen werden die in Abschnitt 4.3.3 eingeführten FB, welche analog zu Abbildung 4.26 durch eine senkrechte, gestrichelte Linie abgetrennt sind, verwendet.

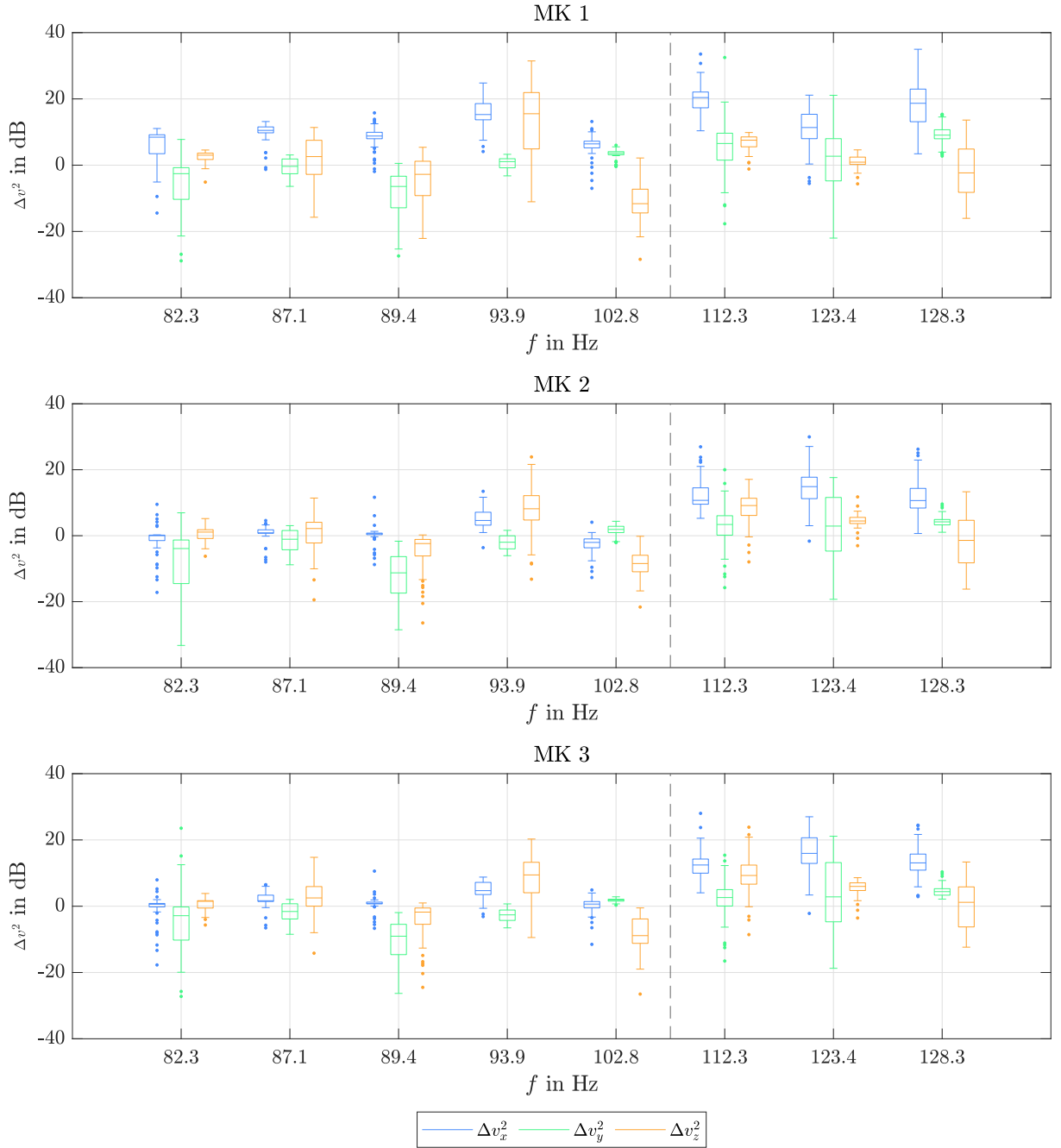


Abbildung 4.28: Box-Plots der berechneten Pegeldifferenzen Δv_x^2 , Δv_y^2 bzw. Δv_z^2 in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz f für MK 1, MK 2 und MK 3

Für den Fall von MK 1 ist erkennbar (siehe Abbildung 4.28 (oben)), dass $\langle v_x^2 \rangle$ unabhängig von f , im Vergleich zu $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$, immer die höchste Pegeldifferenz aufweist. Ein Zusammenhang zwischen f und Δv_x^2 bzw. Δv_y^2 bzw. Δv_z^2 kann nicht hergestellt werden. Deutlichere Unterschiede zwischen den beiden FB zeigen sich bei Betrachtung der Pegeldifferenzen von Δv_x^2 , Δv_y^2 und Δv_z^2 bei MK 2 (siehe Abbildung 4.28 (in der Mitte)). Im FB 2 sind im Vergleich zu FB 1, be-

sonders bei Δv_x^2 , deutlich erhöhte Pegeldifferenzen erkennbar. Zudem ist im FB 2, Δv_x^2 bei jeder Raummodenfrequenz größer als Δv_y^2 oder Δv_z^2 . Im FB 1 variiert, je nach Raummodenfrequenz, die maximal reduzierte $\langle v^2 \rangle$ -Komponente, wobei, außer bei Raummode 4-1-1 ($f = 93,9$ Hz), Δv_x^2 , Δv_y^2 und Δv_z^2 relativ gering sind. Dabei werden, vor allem bei MK 2 und MK 3, auch negative Pegeldifferenzen erreicht, welche auf die Änderung des modalen Schallfeldes durch den KA, sowie auf die Betrachtung des örtlich begrenzten Messbereichs zurückzuführen sind (vgl. Abschnitt 4.3.4). Das Verhalten der Pegeldifferenzen bei MK 3 deckt sich mit jenem der MK 2 und wird daher nicht genauer beschrieben. Beim Vergleich der Pegeldifferenzen bei den verschiedenen MK zeigt sich, dass MK 1 im Vergleich zu MK 2 bzw. MK 3 bereits im FB 1 eine Pegeldifferenz bewirkt und im FB 2 eine erhöhte Pegeldifferenz erzeugt. Somit wird das Verhalten der Pegeldifferenzen bei den verschiedenen $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten, wie bereits bei $\widetilde{\Delta p_{\text{sis}i}^2}$ bzw. $\widetilde{\Delta v_{\text{sis}i}^2}$ (siehe Abbildung 4.27 links) erkennbar, maßgeblich durch die KA-Querschnittsfläche bestimmt.

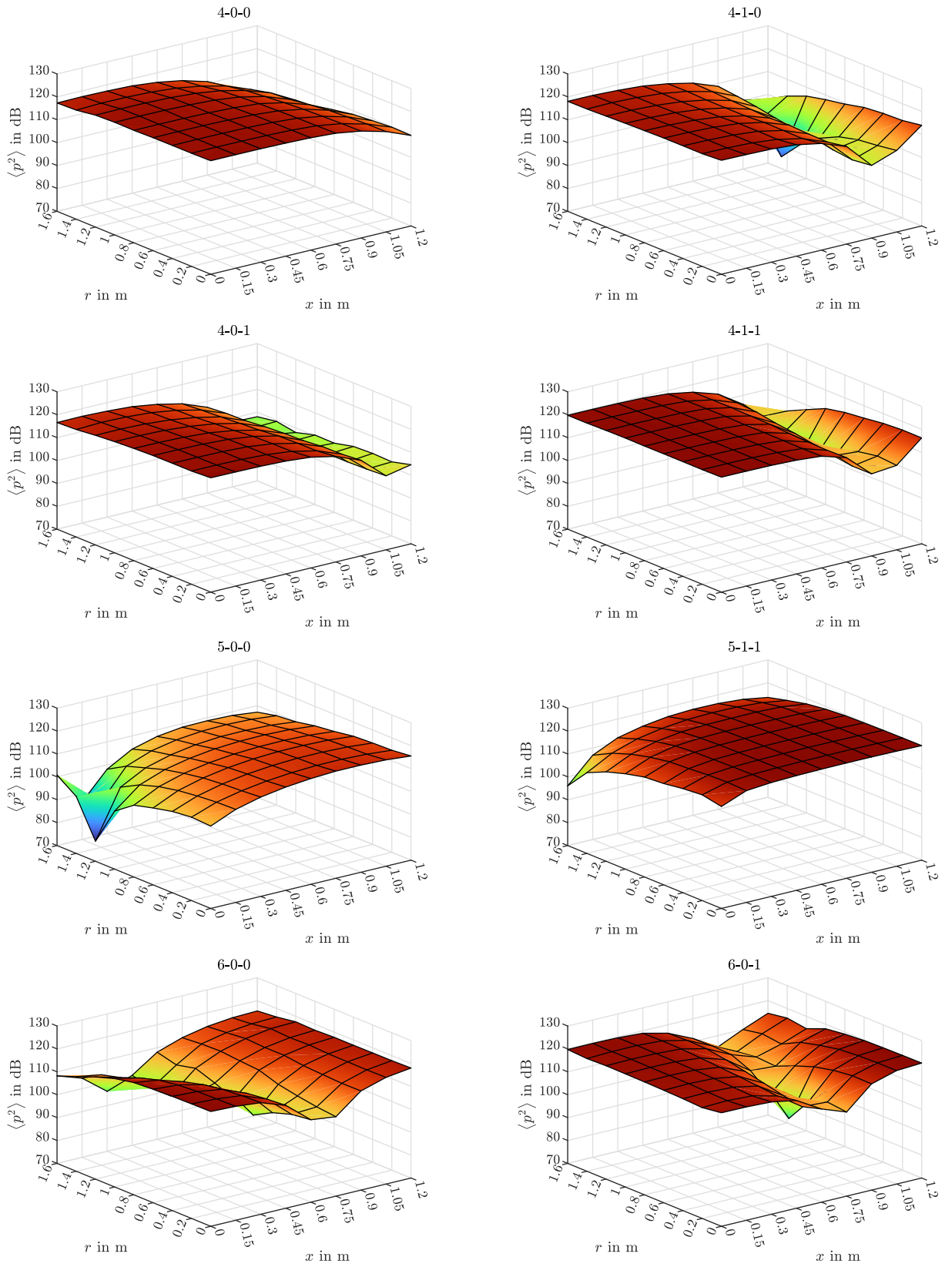
Bei der gewählten KA-Positionierung wird somit, unabhängig von der MK, $\langle v_x^2 \rangle$ im Vergleich zu $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ immer am stärksten durch den KA reduziert, wobei im Fall von MK 2 bzw. MK 3 der KA erst im FB 2 seine Wirksamkeit entfaltet. Wie bereits in der Arbeit von Steffek [5] gezeigt, sind die guten Absorptionseigenschaften des KA auf die Pegelabsenkung von $\langle v_x^2 \rangle$ zurückzuführen. Dabei wurden maximale Pegeldifferenzen von $\Delta v_x^2 \approx 9,5$ dB ermittelt (siehe Steffek [5, S.85]). Bei Betrachtung der Absolutwerte von Δv_x^2 , Δv_y^2 bzw. Δv_z^2 (siehe Abbildung 4.28) sind deutlich höhere Pegeldifferenzen erkennbar (bis zu $\Delta v_x^2 \approx 20$ dB). Daraus kann geschlossen werden, dass aufgrund der Überhöhungen von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ in der Raumkante bei Anregung des Hallraums mit einer Raummodenfrequenz, dem Schallfeld effektiver Schallenergie entzogen werden kann, als bei Verwendung von Terzbandrauschen als Anregungssignal. Daher ist auch die Bezeichnung „Modenbremse“, wie sie beispielsweise in Kurz [23] vorzufinden ist, für den KA zutreffend.

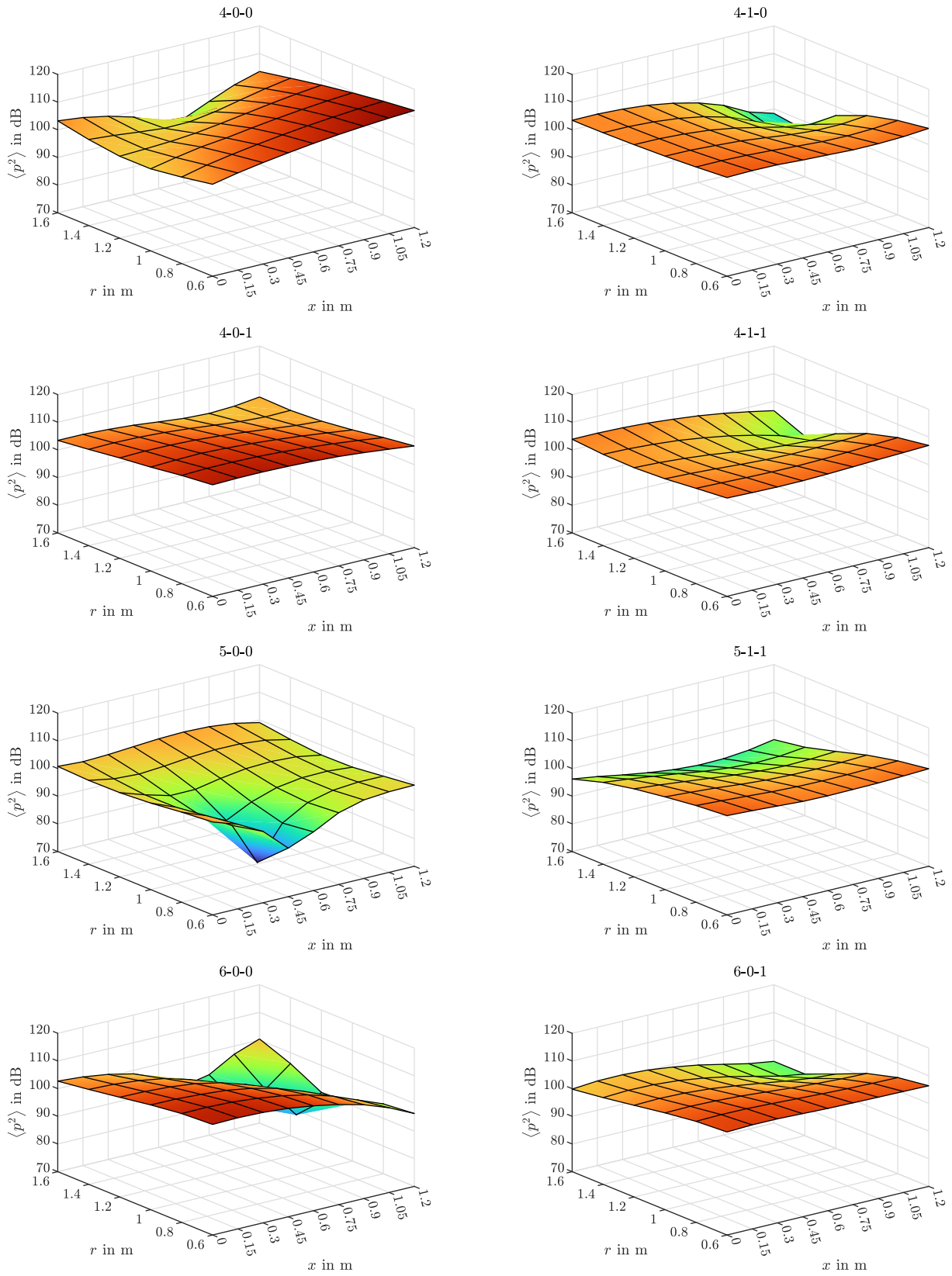
Durch die Wahl von axialen, tangentialen und schrägen Raummoden soll ja auch das Verhalten des KA auf die unterschiedlichen Raummodentypen untersucht werden (siehe Tabelle 3.2). Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Raummodentyp und der Pegeldifferenz bei den verschiedenen $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten konnte dabei nicht festgestellt werden.

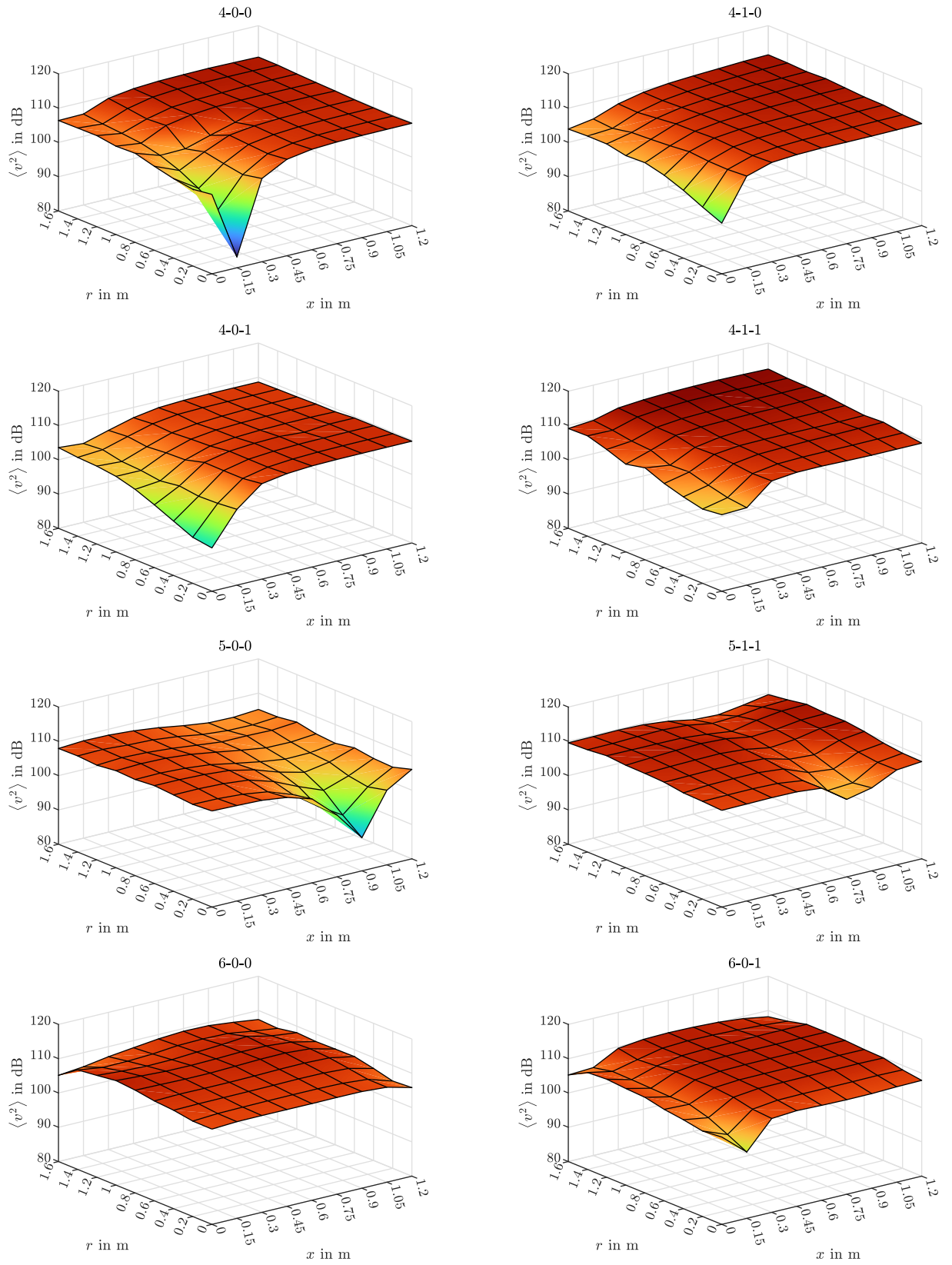
4.3.6 Pegelverteilung in Abhängigkeit der Frequenz

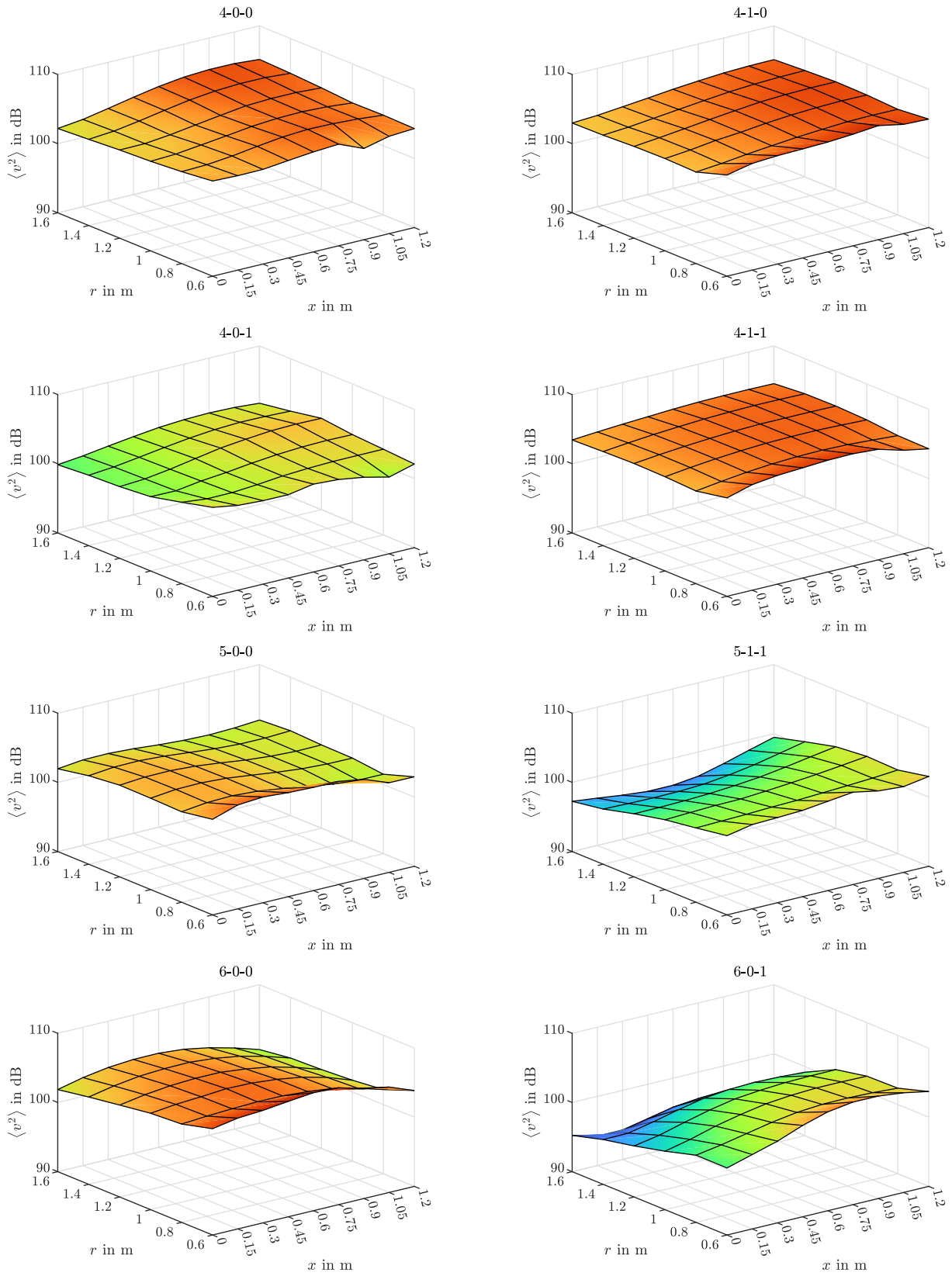
In diesem Abschnitt werden die Pegelverteilungen von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ für alle Raummodenfrequenzen am Beispiel von MK 4 und MK 1 gezeigt. Die frequenzabhängigen Pegelverteilungen von MK 2 und MK 3 sind in Anhang D.2.5 zu finden.

Beim Vergleich der Pegelverteilungen von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ aller Raummodenfrequenzen für MK 4 ist erkennbar, dass sich bei ähnlichen maximalen Absolutpegeln, die Pegelminima hinsichtlich des Absolutwertes deutlich unterscheiden. Die Pegelunterschiede bei den Modenminima können dadurch erklärt werden, dass durch den verwendeten konstanten TP-Abstand von $x = 0,15$ m nicht für jede Raummodenfrequenz genau das Minimum erfasst wird. Im Fall von $\langle v^2 \rangle$ und MK 1 ist erkennbar, dass bei keiner Raummodenfrequenz eine deutliche Ausprägung von Modenminima gegeben ist.

Abbildung 4.29: Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz für MK 4

Abbildung 4.30: Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz für MK 1

Abbildung 4.31: Pegelverteilung von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz für MK 4

Abbildung 4.32: Pegelverteilung von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Raummodenfrequenz für MK 1

5

Nachhallzeitmessung

5.1 Allgemeines

Die bislang durchgeführten Analysen beschränken sich auf die Betrachtung von absoluten Pegeln oder Pegeldifferenzen, berechnet aus den gemessenen Schalldrücken und -schnellen, welche in einem stationären Schallfeld aufgenommen werden. Bei raumakustischen Planungs- und Sanierungsprozessen, wo der KA in der Praxis zum Einsatz kommt, werden absolute Pegel bzw. Pegeldifferenzen des stationären Schallfeldes aber nur in seltenen Fällen untersucht. Vielmehr werden raumakustische Gütemaße zur Beschreibung der akustischen Beschaffenheit eines Raums verwendet bzw. wird der Einfluss von Schallabsorbern auf die Gütemaße betrachtet. Das wichtigste Gütemaß ist dabei die Nachhallzeit T_N , welche das zeitliche Abklingverhalten des Schalldruckpegels im Raum beschreibt.

Die Nachhallzeit T_{30} des Hallraums wurde bereits in mehreren Vorarbeiten gemessen. Bei Nell [14] waren dabei aber die Diffusoren an der Decke des Hallraums installiert. Bei Steffek [5] waren während der Nachhallzeitmessungen, zuzüglich zum KA (bei MK 1, MK 2 und MK 3), PR und Diffusoren im Hallraum vorhanden. Für den Hallraum ohne PR und Diffusoren liegen bislang keine Messergebnisse einer Nachhallzeitmessung vor. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher auch eine Messung der Nachhallzeit in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354 [20] durchgeführt. Die Messergebnisse der Nachhallzeitmessungen werden in diesem Abschnitt außerdem den berechneten Pegeldifferenzen aus Abschnitt 4.3.4 gegenübergestellt, um Zusammenhänge zwischen dem stationären und instationären Schallfeld in Abhängigkeit der unterschiedlichen MK zu finden.

5.2 Messequipment und Messaufbau

Für die Messung von T_{30} ist lediglich das zeitliche Verhalten des Schalldruckes $p(t)$ relevant. Die in Abschnitt 3.3.3 erwähnte pv-Sonde (und der dazugehörige Vorverstärker Microflow MFSC-2), wird daher durch ein Messmikrofon ersetzt. Verwendet wird das 1/2" Kondensator-Freifeldmikrofon NTI M2230 mit Dauerpolarisation und Kugelcharakteristik [27]. Als Anregungssignal wird ein 30-sekündiger exponentieller Sinussweep verwendet, welcher je nach Frequenz, über den Dodekaeder-Lautsprecher NOR276 [28] oder den bereits in Abschnitt 3.3.2 erwähnten Tieftöner abgespielt wird. Der Frequenzgang des Dodekaeder-Lautsprechers ist aus der Arbeit von Geigl [29] zu entnehmen. Das Anregungssignal wird an den Tieftöner gesendet. Dieser spielt alle Frequenzen bis zur Grenzfrequenz ($f_c = 120$ Hz) ab und leitet ein hochpassgefiltertes Signal an den Dodekaeder-Lautsprecher weiter. Eine schematische Darstellung des Signalflusses ist in Abbildung 5.1 ersichtlich.

Gemäß ÖNORM EN ISO 3382-2 [30] werden zwei Lautsprecherpositionen (LSP 1 & LSP 2) und 6 Mikrofonpositionen (M 1 bis M 6) gewählt, womit 12 Abklingkurven gemessen werden. Die Nachhallzeitmessung wird für jede der 4 verwendeten MK (siehe Abbildung 3.17) wiederholt. In Abbildung 5.2 ist der Hallraum, sowie die verwendeten Lautsprecher- und Mikrofonpositionen bei den Nachhallzeitmessungen am Beispiel von MK 4 dargestellt.

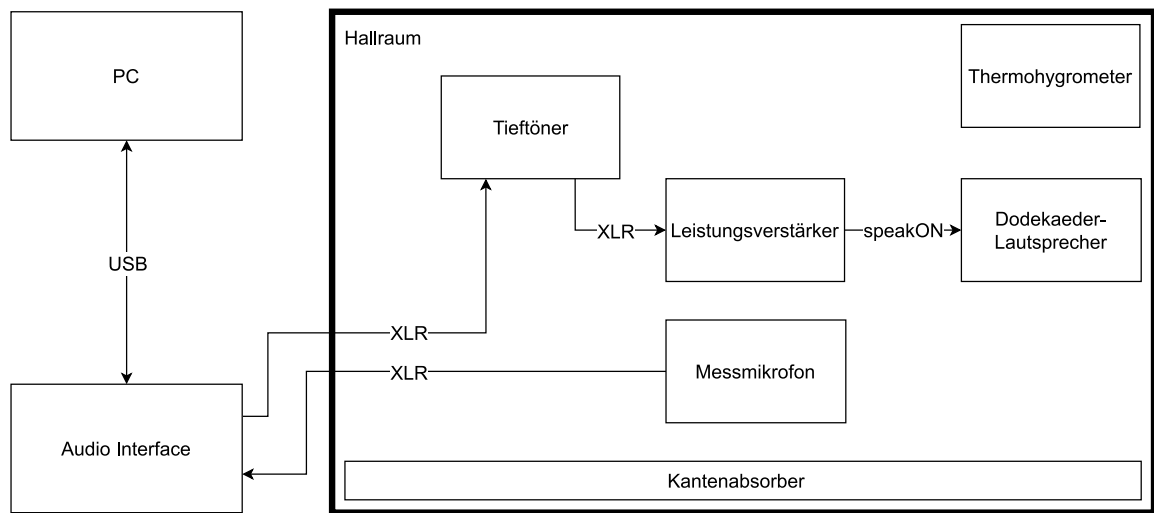


Abbildung 5.1: Signalflussdiagramm des Messaufbaus bei der Nachhallzeitmessung

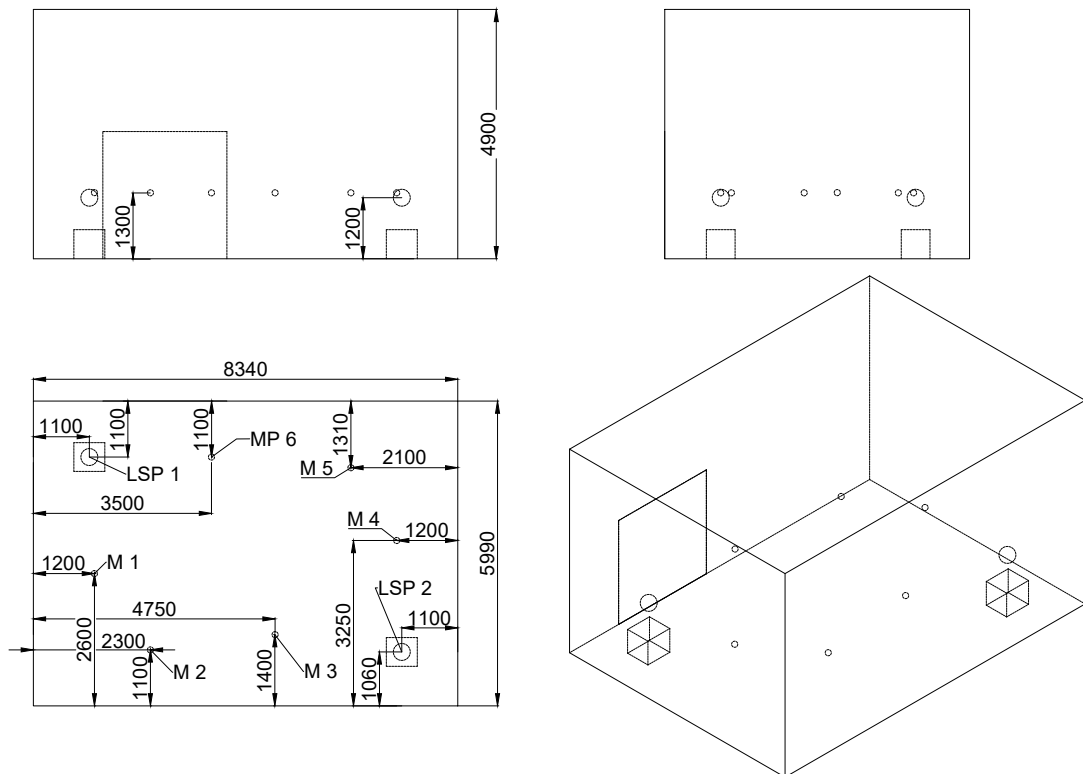


Abbildung 5.2: Ansicht des Hallraums mit Positionierung von Lautsprecher und Mikrofon am Beispiel von MK 4 (Maße in mm)

5.3 Messergebnisse

Aus den 12 aufgenommenen Sweepantworten wird mithilfe der ITA-Toolbox für jede MK die Nachhallzeit T_{30} berechnet. In Abbildung 5.3 ist T_{30} , gemittelt über alle 12 Lautsprecher-Mikrofon-Kombinationen (2 Lautsprecherpositionen $\cdot$ 6 Mikrofonpositionen) in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m im Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f_m \leq 1 \text{ kHz}$ für MK 1, MK 2, MK 3 und MK 4 dargestellt.

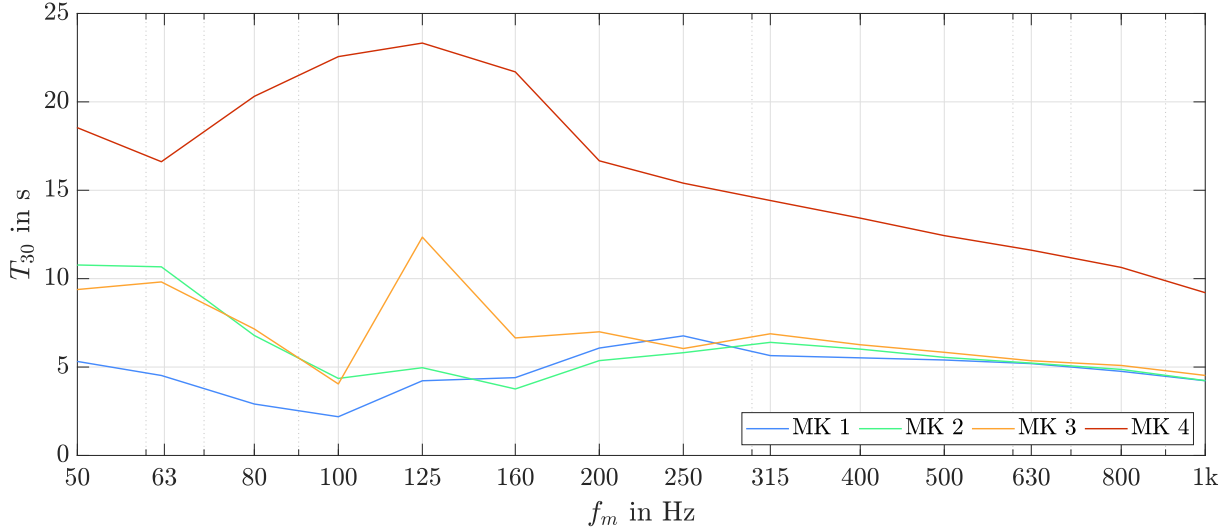


Abbildung 5.3: Nachhallzeit T_{30} , gemittelt über alle 12 Lautsprecher-Mikrofon-Kombinationen in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m für alle MK

Wie in Abbildung 5.3 ersichtlich, ist T_{30} abhängig von der MK, wobei, unabhängig von f_m für MK 4 die höchsten Werte erreicht werden. Das Maximum von T_{30} bei MK 4 liegt dabei im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_m = 125 \text{ Hz}$ ($T_{30} \approx 23 \text{ s}$), wobei T_{30} zu den benachbarten Terzbändern hin nur relativ langsam absinkt. Das lokale Minimum von T_{30} bei $f_m = 63 \text{ Hz}$ ist vermutlich auf die Absorption der Eingangstür, bedingt durch deren Wirkungsweise als PR in diesem Frequenzbereich, zurückzuführen.

Durch das Einbringen des KA in den Hallraum sinkt T_{30} besonders im Frequenzbereich von $80 \text{ Hz} \leq f_m \leq 160 \text{ Hz}$ stark ab, wobei beim Vergleich von MK 1 und MK 2 bzw. MK 3 teilweise deutliche Unterschiede erkennbar sind. Oberhalb von $f_m = 315 \text{ Hz}$ stellt sich eine Nachhallzeit von $T_{30} \approx 5 \text{ s}$ ein, welche für MK 1, MK 2 und MK 3 beinahe identisch ist. Es scheint, als würde die KA-Oberfläche in diesem Frequenzbereich das Absorptionsverhalten des KA und dadurch die Nachhallzeit bestimmen.

Allgemein wird das Absorptionsverhalten von Schallabsorbern durch die äquivalente Absorptionsfläche beschrieben, welche mithilfe von Gleichung 5.1 aus der gemessenen Nachhallzeit bestimmt wird.

$$A_{eq}(MK, FM) = 0,161 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{30}(MK, FM)} - \frac{1}{T_{30, MK4}(FM)} \right) \quad \text{für } 1 \leq MK \leq 3 \quad (5.1)$$

Wie in Fuchs [31] wird eine Normierung von A_{eq} auf die Länge des KA durchgeführt (siehe Gleichung 5.2). Dadurch ist es möglich das Absorptionsverhalten des KA unabhängig von der Anzahl an verwendeten KA-Elementen zu beschreiben. Auch in den Vorarbeiten von Steffek

[5], Reisinger [1] oder Santer [7] wurde die Beschaffenheit des KA über die Angabe von $A_{eq,l}$ beschrieben. Um die Messergebnisse der verschiedenen Arbeiten miteinander zu vergleichen, wird der Berechnungsvorgang übernommen.

$$A_{eq,l}(MK, FM) = \frac{A_{eq}(MK, FM)}{l} \quad (5.2)$$

Abbildung 5.4 zeigt die äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{eq,l}$ in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz für MK 1, MK 2 und MK 3 im Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f_m \leq 315 \text{ Hz}$.

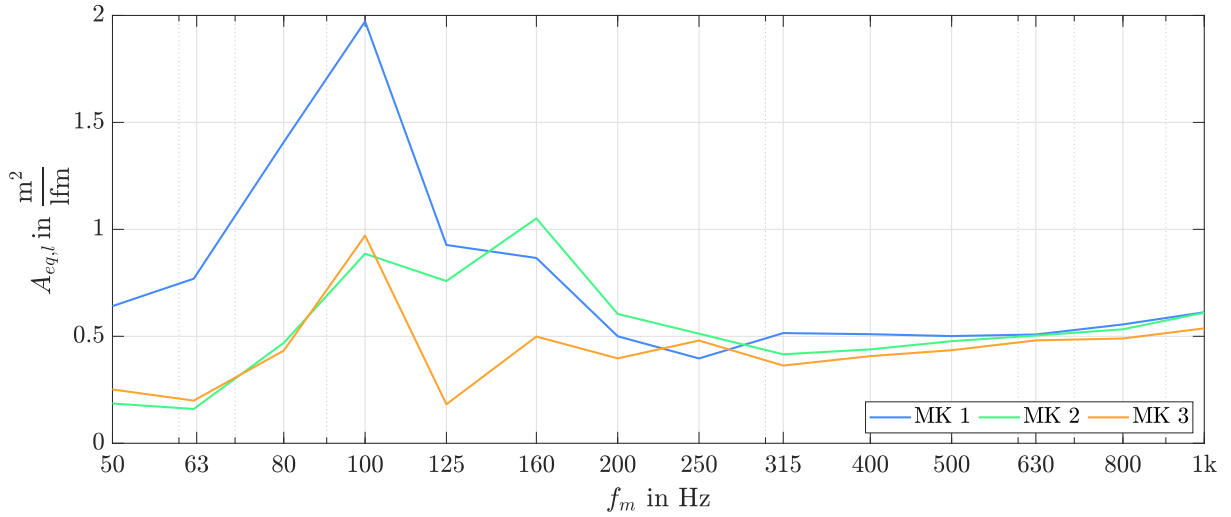


Abbildung 5.4: Äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{eq,l}$ für MK 1, MK 2 und MK 3

Wie in Abbildung 5.4 ersichtlich, unterscheiden sich die Verläufe von $A_{eq,l}$ in Abhängigkeit von f_m sowie der MK. Im Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f_m \leq 100 \text{ Hz}$ werden für MK 2 und MK 3 sehr ähnliche Werte erzielt. Im Gegensatz dazu werden bei MK 1 deutlich höhere Werte erzielt. Es kann daher angenommen werden, dass in einem modal geprägten Schallfeld die Schallabsorption durch den KA maßgeblich von der Querschnittsfläche des KA abhängig ist. Die Positionierung (MK 2 oder MK 3) spielt in diesem Frequenzbereich somit eine untergeordnete Rolle. Auch das Absorptionsmaximum ist Frequenz- und MK-abhängig. Während dieses bei MK 1 und MK 3 im 100 Hz-Terzband liegt, erreicht der KA in MK 2 sein Absorptionsmaximum im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_m = 160 \text{ Hz}$, wobei $A_{eq,l}$ im Frequenzbereich von $100 \text{ Hz} \leq f_m \leq 160 \text{ Hz}$ bei MK 2 relativ konstant ist. Im Frequenzbereich von $160 \text{ Hz} \leq f_m \leq 250 \text{ Hz}$ werden für MK 2 höhere Werte ermittelt wie für MK 1. Diese sind vermutlich auf Resonanzeffekte durch das abgeschlossene Luftvolumen zurückzuführen [5]. Oberhalb von $f = 250 \text{ Hz}$ werden, unabhängig von der MK, relativ konstante Werte ($A_{eq,l} \approx 0,5 \frac{m^2}{lfm}$) berechnet.

Die Signifikanz der KA-Querschnittsfläche wird auch in einer Publikation von Lamprecht [32] deutlich, wo die Absorptionswirkung zweier KA mit unterschiedlichem Aufbau verglichen werden. Dabei ist KA 1 ungefüllt und mit mikrogeschlitzten Metallplatten verkleidet und KA 2 mit Mineralwolle gefüllt und mit Gipskartonplatten verkleidet. Es zeigt sich, dass beim KA mit Mineralwollfüllung der Absorptionsgrad um ein vielfaches höhere Werte annimmt als jener des ungefüllten KA (siehe Lamprecht [32, S.39 - 40]). Dadurch wird die Annahme bestärkt, dass mit sinkender KA-Querschnittsfläche sich auch die Absorptionseigenschaften im tieffrequenten Bereich (Modalbereich) verschlechtern. Zur gleichen Schlussfolgerung kommt Reisinger, welcher auch Messungen mit einem KA ohne porösem Füllmaterial durchgeführt hat [1, S.81 - 83].

5.3.1 Pegeldifferenz vs. äquivalente Absorptionsfläche

Wie bereits erwähnt, soll in diesem Abschnitt überprüft werden, inwiefern sich die Auswirkungen des KA auf das stationäre und instationäre Schallfeld unterscheiden. Dafür wird gemäß Gleichung 4.7 bzw. Gleichung 4.8 die Pegeldifferenz $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ mit der äquivalenten Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{\text{eq},l}$ in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m sowie der MK verglichen. Da die Raummodenfrequenzen nur innerhalb der Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von $f_m = 80$ Hz, 100 Hz und 125 Hz gewählt wurden (siehe Tabelle 3.2), wird für $A_{\text{eq},l}$ auch nur dieser Frequenzbereich betrachtet (siehe Abbildung 5.5 (unten)).

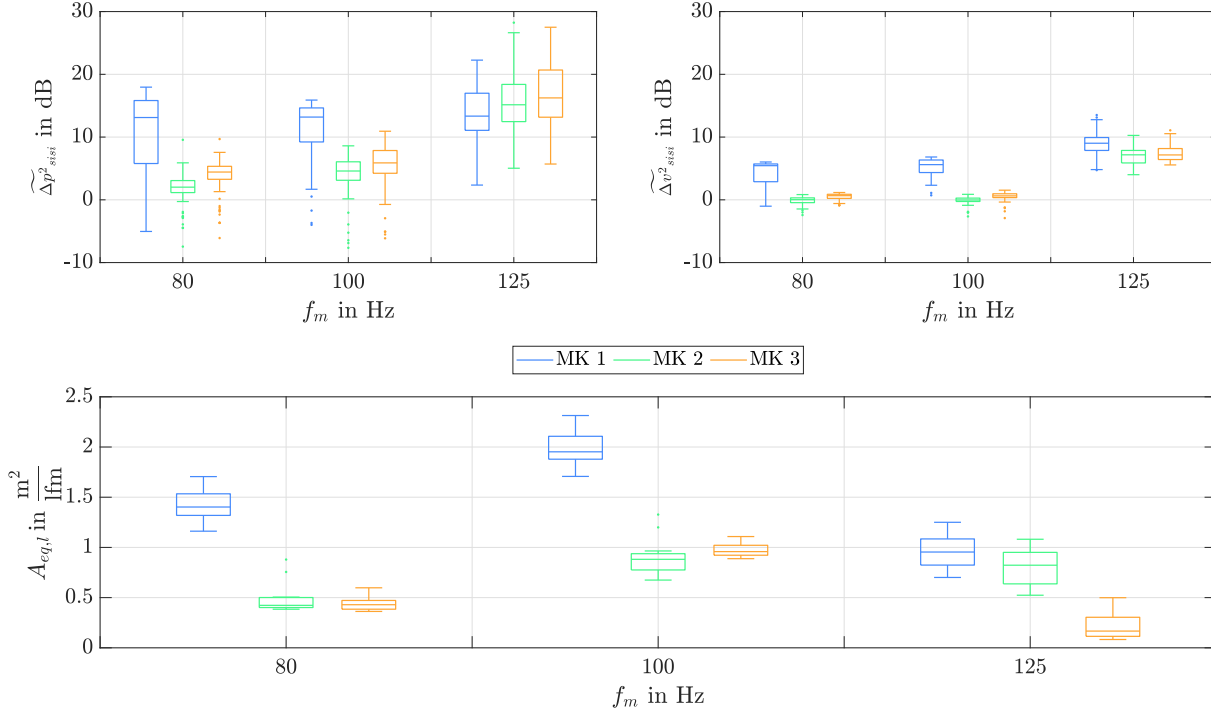


Abbildung 5.5: Pegeldifferenzen $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ und $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ (oben) sowie $A_{\text{eq},l}$ (unten) in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m im Frequenzbereich von $80 \text{ Hz} \leq f_m \leq 125 \text{ Hz}$ für MK 1, MK 2 und MK 3

In Abbildung 5.5 ist ersichtlich, dass sowohl $A_{\text{eq},l}$ als auch $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ in den Frequenzbändern $f_m = 80$ Hz und 100 Hz bei MK 1 deutlich höhere Werte aufweist als bei MK 2 bzw. MK 3. Im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_m = 125$ Hz sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen MK wesentlich geringer. Das Maximum je MK von $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ befindet sich überwiegend im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_m = 125$ Hz. Bei $A_{\text{eq},l}$ befindet sich das Maximum aller MK im Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_m = 100$ Hz. Dieses ist dabei unabhängig von der MK, wobei im Fall von MK 2, $A_{\text{eq},l}$ im 100 Hz- und 125 Hz-Terzband fast identisch ist. Somit gibt es bei den Parametern $A_{\text{eq},l}$ und $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ relativ ähnliches Verhalten in Abhängigkeit der MK, aber unterschiedliche Tendenzen beim frequenzabhängigen Maximum.

Beim Vergleich der Messgrößen muss beachtet werden, dass $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ und $A_{\text{eq},l}$ bei Anregung mit unterschiedlichen Anregungssignalen ermittelt wurden. Daher wird auch in der Arbeit von Steffek [5] die Korrelation zwischen den Messgrößen untersucht. Dabei kann festgestellt werden, dass das Absorptionsmaximum des KA sowie die Dämpfung von $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ in unterschiedlichen Terzbändern (Vergleich von Abbildung 7.4 und Abbildung 6.14 bzw. Abbildung 6.15 in Steffek [5]) liegen. Die fehlende Übereinstimmung des frequenzabhängigen Maximums von $A_{\text{eq},l}$ und $\widetilde{\Delta p^2}_{\text{sis}}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}_{\text{sis}}$ ist somit unabhängig vom Anregungssignal.

5.3.2 Einfluss der Raumausstattung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von PR und Diffusoren auf die Nachhallzeit T_{30} des Hallraums, sowie auf die daraus berechnete äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{eq,l}$ des KA beschrieben, indem die Messergebnisse aus Abschnitt 5.3 mit jenen der Nachhallzeitmessung von Steffek [5] verglichen werden. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich beide Nachhallzeitmessungen hinsichtlich der Raumausstattung (RA). Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Hallraum ohne PR und Diffusoren als RA 1 und jener mit PR und Diffusoren als RA 2 bezeichnet.

Die Nachhallzeit T_{30} in Abhängigkeit von f_m sowie der MK für RA 1 und RA 2 ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Auch die berechnete äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{eq,l}$ wird jener aus den Messungen von Steffek [5] gegenübergestellt (siehe Abbildung 5.7). Abbildung 5.6 zeigt, dass der Einfluss von PR und Diffusoren auf die Nachhallzeit T_{30} beträchtlich ist. Im Vergleich zu RA 2 werden bei RA 1 teilweise deutlich erhöhte Werte erreicht. Bei beiden RA sinkt T_{30} , unabhängig von der MK, ab einer Frequenz von $f_m = 200$ Hz gleichmäßig ab. Im Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f_m \leq 200 \text{ Hz}$ ergeben sich aber unterschiedliche Verläufe. Neben der Absenkung bewirken PR und Diffusoren auch eine Frequenzverschiebung des Maximums von T_{30} .

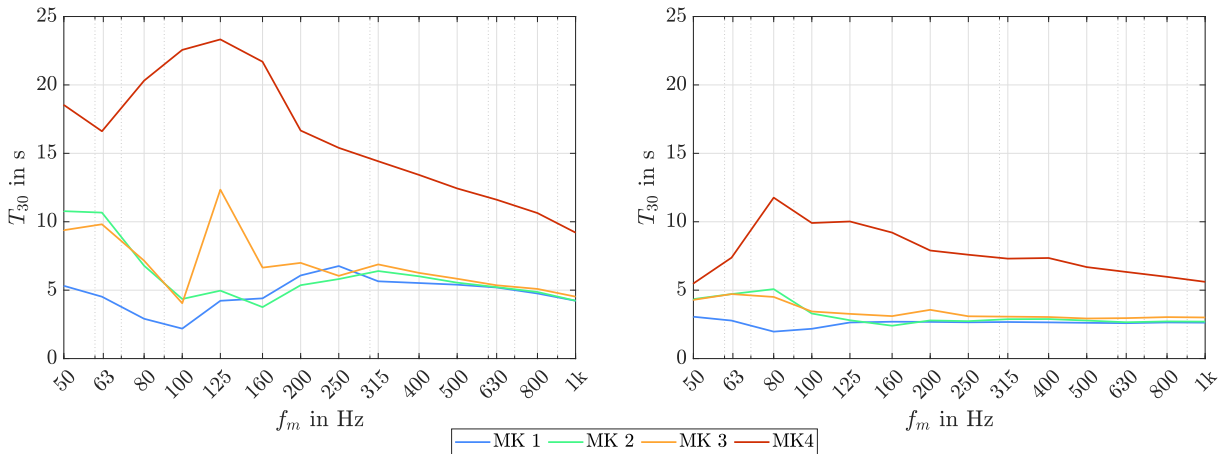


Abbildung 5.6: Nachhallzeit T_{30} in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m und MK für RA 1 (links) sowie für RA 2 (rechts)

Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich, erreicht der KA bei MK 1 ein Maximum von $A_{eq,l} \approx 2 \frac{\text{m}^2}{\text{lfm}}$, welches aber je nach RA in unterschiedlichen Terzbändern liegt. Mit Ausnahme des Terzbandes mit der Mittenfrequenz von $f_m = 100$ Hz ergeben sich für RA 2 im Vergleich zu RA 1 immer höhere Werte. Bei MK 2 und MK 3 ist die Übereinstimmung der $A_{eq,l}$ -Verläufe von RA 1 und RA 2 frequenzabhängig. Im Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} \leq f_m \leq 100 \text{ Hz}$ sind die Abweichungen zwischen den $A_{eq,l}$ -Verläufen von RA 1 und RA 2 relativ gering. Oberhalb von $f_m = 100$ Hz werden bei RA 2 deutlich höhere $A_{eq,l}$ -Werte ermittelt als bei RA 1. Die verbesserten Absorptionseigenschaften des KA bei RA 2 im Frequenzbereich von $f > 100$ Hz sind vermutlich auf die erhöhte Isotropie des in die Raumkante einfallenden Schalls zurückzuführen, welche wiederum eine stärkere Ausprägung der IM bewirkt.

Die Abweichung zwischen $A_{eq,l}$ bei RA 1 und RA 2 kann auch auf die Berechnung mit der Nachhallzeitformel nach Sabine zurückgeführt werden. Diese setzt ein örtlich konstantes Schallfeld (Homogenität) voraus, was im Regelfall in einem Hallraum nicht gegeben ist [33]. Durch das Entfernen der Diffusoren im Hallraum wird die Homogenität des Schallfeldes zusätzlich verringert. Zudem wird für Materialien mit hohem Absorptionsgrad die Berechnung von A_{eq} über die Nachhallzeitformel von Sabine nicht empfohlen, da damit die Absorptionseigenschaften des Schallabsorbers überschätzt werden [34].

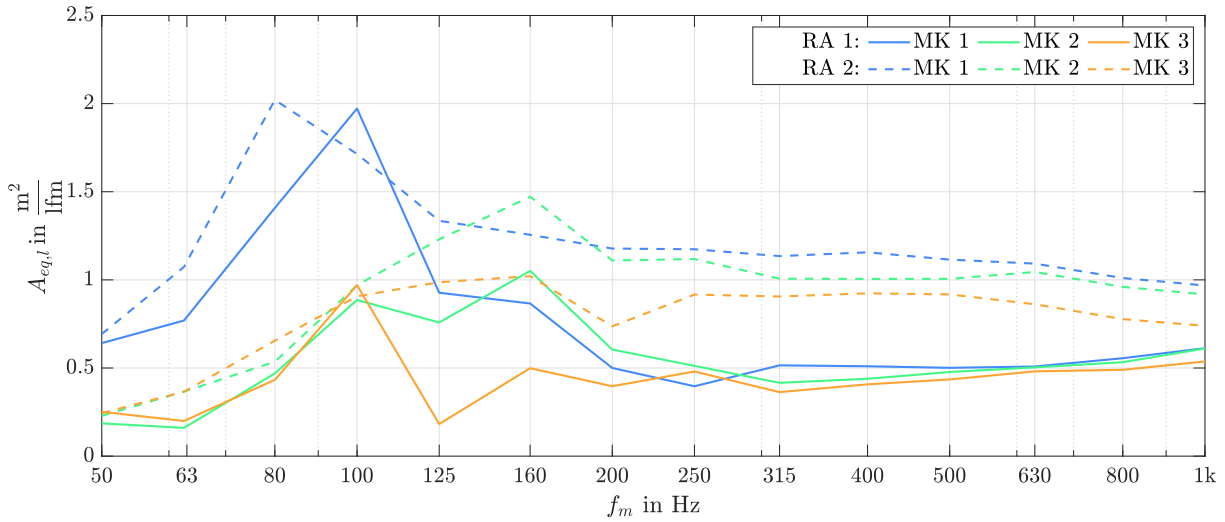


Abbildung 5.7: Äquivalente Absorptionsfläche je Laufmeter $A_{eq,l}$ in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz f_m sowie der RA

Die $A_{eq,l}$ -Verläufe von RA 1 und RA 2 erinnern in gewisser Hinsicht an den Vergleich von Schallabsorptionsgrad α (gemessen im Impedanzrohr gemäß ÖNORM EN ISO 10534-2 [35]) und α_S (gemessen im Hallraum gemäß ÖNORM EN ISO 354 [20]). Bedingt durch den unterschiedlichen Schalleinfall bei den verschiedenen Messverfahren (senkrecht einfallende Schallwellen bei ÖNORM EN ISO 10534-2 und allseitig einfallende Schallwellen bei ÖNORM EN ISO 354) auf das Prüfobjekt, ergeben sich erfahrungsgemäß höhere Werte für α_S als für α . Wie bereits erwähnt, haben auch die unterschiedlichen RA einen Einfluss auf die Isotropie und somit den Einfall der Schallwellen auf den Schallabsorber. Bei RA 1, wo eine geringere Isotropie des Schallfeldes vorhanden ist, werden daher auch geringere Werte für $A_{eq,l}$ im Vergleich zur RA 2 erreicht.

6

Fazit

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss des KA auf das modale Schallfeld in der Raumkante untersucht. Dafür wird zunächst das Konzept für die Durchführung der Messungen behandelt. Dieses beinhaltet die Überlegungen für die messtechnische Untersuchung des modalen Schallfeldes unter dem Einfluss unterschiedlicher MK im Bereich der Raumkante des Hallraums der TU Graz. Es folgt die Analyse der Messdaten, wobei vorerst nur das modale Schallfeld des Hallraums der TU Graz ohne den Einfluss des KA betrachtet wird. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf den Vergleich von berechneter und gemessener Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes, sowie auf den Verlauf der absoluten Pegel senkrecht zur Raumkante gelegt. Ein weiterer Abschnitt beschäftigt sich mit der Analyse der Messergebnisse, welche im Hallraum mit unterschiedlichen Konfigurationen des KA ermittelt werden, wobei diese auch den Messergebnissen aus dem leeren Hallraum gegenübergestellt werden. Der Einfluss des KA auf das modale Schallfeld wird hinsichtlich der Pegeländerungen der betrachteten Messgrößen, sowie auf die Änderung der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes untersucht. Zudem wird durch die Messung der Nachhallzeit in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354 der Einfluss des KA auf Messgrößen des instationären Schallfeldes ermittelt und in weiterer Folge jenen des stationären Schallfeldes gegenübergestellt. Darüber hinaus wird die Wirkungsweise des KA in Abhängigkeit von Isotropie und Homogenität des Schallfeldes gezeigt.

Messergebnisse ohne KA

Wie aus dem Vergleich von gemessenen und berechneten Schallpegelverteilungen hervorgeht, ist eine Übereinstimmung hinsichtlich der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes nicht bei allen Raummodenfrequenzen gegeben. Die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung sind auf die Wände, aber vor allem auf die Eingangstür zurückzuführen, welche im entsprechenden Frequenzbereich nicht als ideal schallharte Begrenzungsflächen anzunehmen sind.

Durch die Gegenüberstellung von simulierten und gemessenen Pegelverläufen senkrecht zur Raumkante kann gezeigt werden, dass eine relativ hohe Diskrepanz zwischen den Pegelverläufen vorhanden ist. Die Abweichungen sind auf die Schallfeldeigenschaften hinsichtlich Isotropie zurückzuführen. Während die analytisch berechneten Pegelverläufe von einem isotropen Schalleinfall ausgehen, werden die Messungen im modalen Schallfeld durchgeführt. Somit können keine IM im modalen Schallfeld nachgewiesen werden. Die Pegelverläufe senkrecht zur Raumkante im Minimum und Maximum des modalen Schallfeldes unterscheiden sich hinsichtlich der Pegelfluktuationen entlang einer Trajektorie. Während die Pegel in Abhängigkeit von r im Modenmaximum relativ konstant bleiben, gibt es erhöhte Pegelschwankungen entlang einer Trajektorie im Modenminimum (siehe Abbildung 4.10 und 4.11). Zudem zeigt sich, dass die erwähnten Pegelschwankungen vom absoluten Pegel abhängig sind, wobei mit steigendem Pegel die aus den Messpunkten entlang einer Trajektorie berechneten Pegelfluktuationen sinken (siehe Abbildung 4.12 und 4.13).

Messergebnisse mit KA

Durch die Gegenüberstellung der Messergebnisse bei den unterschiedlichen MK kann festgestellt werden, dass der KA einen Einfluss auf die absoluten Pegel, sowie auf die Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes hat. Der KA wirkt sich je nach Raummodenfrequenz und MK unterschiedlich auf die betrachteten Messgrößen ($\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$) aus. Allgemein lässt sich der Einfluss des KA auf das modale Schallfeld in 2 FB einteilen, in welchen der Einfluss der unterschiedlichen MK auf die betrachteten Messgrößen ähnliche Tendenzen aufweist. Für $\langle p^2 \rangle$ gibt es im FB 1 einen Zusammenhang zwischen dem absoluten Pegel und der KA-Querschnittsfläche, wobei mit steigender Querschnittsfläche der mittlere absolute Pegel im Bereich der Raumkante sinkt. Bei $\langle v^2 \rangle$ ist dieser Zusammenhang weniger ausgeprägt, da lediglich bei MK 1 deutlich geringere absolute Pegel im Vergleich zu MK 4 ermittelt werden. Im FB 2 sind sowohl für $\langle p^2 \rangle$ als auch für $\langle v^2 \rangle$ die absoluten Pegel von MK 1 bis MK 3 deutlich geringer als jene bei MK 4. Zudem sind die absoluten Pegel bei den MK mit KA relativ ähnlich, obwohl bei MK 1 die doppelte Menge an KA im Vergleich zu MK 2 und MK 3 im Hallraum vorhanden ist (siehe Abbildung 4.26).

Die KA-Querschnittsfläche ist somit der maßgebliche Parameter für die Bestimmung der Absorptionseigenschaften des KA im Modalbereich. Dabei erreicht der KA mit steigender KA-Querschnittsfläche eine erhöhte Pegelreduktion. Außerdem sinkt mit größer werdender KA-Querschnittsfläche die Frequenz, ab welcher der KA den absoluten Pegel, sowie die Lage des Modenminimums und -maximums signifikant beeinflusst.

Die Abhängigkeit von Raummodenfrequenz und MK spiegelt sich auch in den absoluten Pegeln bzw. in der Pegeldifferenz zwischen MK 4 und den MK mit KA der $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten wider (siehe Abbildung 4.28). Für MK 1 zeigt sich, dass Δv_x^2 überwiegend am höchsten ist. Bei MK 2 und MK 3 kann das Absorptionsverhalten des KA analog zu $\langle p^2 \rangle$ und $\langle v^2 \rangle$ in 2 FB unterteilt werden. Dabei wird keine der $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten im FB 1 durch den KA beeinflusst bzw. werden auch negative Pegeldifferenzen ermittelt, welche auf die Änderung des modalen Schallfeldes durch den KA, sowie auf die Betrachtung des örtlich begrenzten Messbereichs zurückzuführen sind. Im FB 2 ist eine deutliche Überhöhung von Δv_x^2 im Vergleich zu Δv_y^2 bzw. Δv_z^2 erkennbar.

Aus dem Vergleich der Messergebnisse dieser Arbeit mit jenen von Steffek [5] geht hervor, dass der Pegel von $\langle v_x^2 \rangle$ durch den KA bei Anregung des Hallraums mit einem Sinussignal stärker abgesenkt wird als bei Anregung mit Terzbandrauschen (siehe Abschnitt 4.3.5). Die Funktion des KA als „Modenbremse“ kann somit bestätigt werden. Die höhere Pegelreduktion kann auf die Eigenschaften des modalen Schallfeldes zurückgeführt werden. Bedingt durch die erhöhte Schallenergiedichte im Bereich der Raumkante im Vergleich zum homogenen Schallfeld, kann dem Schallfeld effektiver Schallenergie entzogen werden.

Wie durch die Analyse der Pegelverläufe entlang der Raumkante bei den unterschiedlichen MK bestätigt wird, bewirkt der KA neben der Pegelabsenkung auch eine Änderung der Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes (siehe Abbildung 4.22 bis 4.25).

Nachhallzeitmessungen

Durch den Vergleich von $A_{eq,l}$ mit den Pegeldifferenzen von potentieller und kinetischer Energie (Δp^2 bzw. Δv^2) kann gezeigt werden, dass sich die Maximalwerte der jeweiligen Parameter in unterschiedlichen Terzbändern befinden (siehe Abbildung 5.5). Die Nachhallzeitmessungen aus der vorliegenden Arbeit werden mit jenen aus der Arbeit von Steffek verglichen, da die Messungen bei unterschiedlichen RA des Hallraums der TU Graz durchgeführt wurden (siehe Abbildung 5.6). Dabei kann festgestellt werden, dass sich die Veränderung der RA auf die Ab-

sorptionseigenschaften des KA auswirkt (siehe Abbildung 5.7). Die Unterschiede können auf die Absenkung der Isotropie des Schallfeldes zurückgeführt werden, welche aus dem Entfernen von PR und Diffusoren aus dem Hallraum resultiert.

6.2 Ausblick

Durch die Analysen in der vorliegenden Arbeit wird die Wirkungsweise des KA auf das modale Schallfeld aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Dennoch konnte wegen des beschränkten Zeitkontingents nicht jeder Fragestellung nachgegangen werden. Deshalb werden an dieser Stelle Anregungen für zukünftige Arbeiten zu dieser Thematik, welche das Verständnis der Funktionsweise des KA zusätzlich verbessern könnten, aufgelistet.

Aus der Analyse der Pegelverläufe entlang der Raumkante geht hervor, dass es bei einigen Raummodenfrequenzen Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten Lage von Minima und Maxima des modalen Schallfeldes gibt (siehe Abschnitt 4.2.1). Zudem wird beim frequenzabhängigen Nachhallzeitverlauf im Fall von MK 4 ein Einbruch von T_{30} im 63 Hz-Terzband registriert (siehe Abbildung 5.3). Als Ursache gilt in beiden Fällen die Eingangstür, welche im entsprechenden Frequenzbereich nicht als ideal schallharte Raumbegrenzungsfläche, sondern als Plattenschwinger angenommen werden kann. Um die Absorptionswirkung der Eingangstür für zukünftige Messungen besser abschätzen zu können, wäre die Kenntnis deren Schwingungsverhalten notwendig. Dieses könnte beispielsweise mithilfe von Beschleunigungssensoren aufgenommen werden.

Bei konstanter Raummodenfrequenz verändert sich das modale Schallfeld durch das Einbringen des KA in den Hallraum, was aus dem Vergleich der Pegelverläufe entlang der Kante in Abhängigkeit der MK hervorgeht (siehe Abbildung 4.22 bis 4.25). Die Veränderungen des modalen Schallfeldes haben zur Folge, dass bei der Berechnung der mittleren absoluten Pegel, trotz des Einbringens von KA-Elementen in das Schallfeld, der mittlere absolute Pegel im Vergleich zum leeren Hallraum ansteigen kann (siehe Abbildung 4.26). Zur Vermeidung der „negativen Pegelreduktionen“ müsste die Verschiebung der Raummodenfrequenz bei der jeweiligen Raummode durch das Einbringen von KA-Elementen in den Hallraum miteinbezogen werden. Dafür müsste jedoch bekannt sein, inwiefern sich die Raummodenfrequenz einer Raummode durch das Einbringen des KA in das Schallfeld verändert. Die Bestimmung der Frequenzverschiebung durch den KA könnte mittels eines messtechnischen Ansatzes erfolgen, indem eine zusätzliche Schallempfängerposition in einer der nicht von der Schallquelle besetzten Raumecken positioniert wird (vgl. Nell [14, S.16]). Da jede Raummode ein Schalldruckmaximum in der Raumecke aufweist, könnten durch die Aufnahme einer Sweepantwort die Raummodenfrequenzen der entsprechenden Raummoden in Abhängigkeit der MK ermittelt werden. Neben der Bestimmung von Pegeldifferenzen zwischen den unterschiedlichen MK, könnte dadurch auch ein Zusammenhang zwischen den physischen Eigenschaften des KA und der Verschiebung der Raummodenfrequenz einer entsprechenden Raummode hergestellt werden.

Bei der Analyse der absoluten Pegel lassen sich 2 FB eingrenzen, in welchen die absoluten Pegel zwischen den verschiedenen MK ähnliche Tendenzen aufweisen (siehe Abbildung 4.26). Dabei liegt die Grenze der beiden FB zwischen den Raummodenfrequenzen 5 und 6. Bislang konnte jedoch nicht festgestellt werden, durch welche Parameter diese Frequenzgrenze maßgeblich beeinflusst wird. Zudem konnte ein direkter Zusammenhang zwischen KA-Querschnittsfläche und absolutem Pegel für den FB 1 hergestellt werden. Derzeit ist noch unklar, warum dieser Zusammenhang nicht auch auf den FB 2 zutrifft.

In Abschnitt 4.2.4 wird der Vergleich zwischen gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen durchgeführt, wobei sich die Analyse auf MK 4 beschränkt. Da in der Arbeit von Merkel [26] nicht nur das modale Schallfeld des leeren Hallraums, sondern auch die akustischen Eigenschaften des KA bestimmt werden, könnten analog zu MK 4 auch die Vergleiche für die MK mit KA durchgeführt werden.

Wegen der großen Menge an generierten Daten beschränken sich die Analysen der Pegelverteilungen auf die Betrachtung einzelner Raummodenfrequenzen. Um eine allgemeine Aussage über die Ergebnisse treffen zu können, müssten auch die Pegelverteilungen weiterer Raummodenfrequenzen im Detail behandelt werden.

Aus dem Vergleich von äquivalenten Absorptionsflächen und berechneten Pegeldifferenzen ($\widetilde{\Delta p^2}$ bzw. $\widetilde{\Delta v^2}$) kann geschlossen werden, dass eine Änderung der Homogenität des Schallfeldes, die Wirkungsweise des KA beeinflusst. In weiterführenden Arbeiten könnte ein detaillierter Zusammenhang zwischen den akustischen Eigenschaften des KA und der Homogenität des Schallfeldes durch weitere Messungen hergestellt werden. Die Beschreibung des Schallfeldes kann dabei über unterschiedliche Diffusitätsmaße (SIRR, COMEDIE) erfolgen (siehe Ziesemer [36]).

Es kann gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Pegelreduktion und der Querschnittsfläche des KA besteht. Im Rahmen der Arbeit werden lediglich zwei unterschiedliche Querschnittsflächen des KA verwendet. Die Abhängigkeit der absoluten Pegel von der KA-Querschnittsfläche könnte durch Messungen mit zusätzlichen Konfigurationen des KA genauer analysiert werden.

Für die Durchführung der Messungen wurden ca. 9 Arbeitstage benötigt. Abhilfe für ein beschleunigtes Messverfahren würde eine 3D-pv-Sonde schaffen, weil dadurch die Messung an einem Punkt des Messrasters nicht für jede $\langle v^2 \rangle$ -Komponente wiederholt werden müsste. Der Arbeitsaufwand würde sich dabei auf ein Drittel verringern. Zudem könnte dadurch die Messgenauigkeit verbessert werden, da die Änderung der Ausrichtung der verwendeten pv-Sonde auch zu Ungenauigkeiten bei der Positionierung führen kann. Alternativ könnten die Messungen auch mithilfe eines B-Format-Mikrophones durchgeführt werden [37].

Literaturverzeichnis

- [1] Daniel Reisinger, *Entwicklung und Messung von Kantenabsorbern*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019.
- [2] Helmut V. Fuchs, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*. Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [3] Gerhard Graber, Werner Weselak, *Raumakustik VO-Skript*. Version 5.6, Technische Universität Graz.
- [4] Helmut V. Fuchs, Janna Lamprecht, Xuiqin Zha, *Zur Steigerung der Wirkung passiver Absorber: Schall in Raumkanten schlucken*. Gesundheits-Ingenieur (gi) - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 132 (2011) Heft 5, Oldenbourg Industrieverlag München, 2011.
- [5] Andreas Steffek, *Untersuchung und Modellierung der Funktionsweise von Kantenabsorbern*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2021.
- [6] Helmut V. Fuchs, *Schallabsorber und Schalldämpfer*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [7] Christoph Santer, *Messung und Berechnung von Kantenabsorbern: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Kantenabsorber mittels Optimierungsverfahren*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2021.
- [8] Xiaoru Zhou, Moritz Späh, Elmar Tober, Ting Zhang, *Modellierung der Absorptionserhöhung in Raumkanten und an Absorberkanten*. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Nobelstrasse 12, 70569 Stuttgart: DAGA 2022 Stuttgart, Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2022.
- [9] Eric Kurz, Gerhard Graber, Werner Weselak, *Systematische Untersuchungen zur Funktionsweise des Kantenabsorbers als „Modenbremse“*. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Heft 3: Springer Wien New York, 2021.
- [10] Richard V. Waterhouse, *Interference Patterns in Reverberant Sound Fields*. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 27, number 2, pages 247–258, 1955.
- [11] Petritsch Herbert, *FEM-Simulationen mit COMSOL Multiphysics im Anwendungsbereich der Technischen Akustik*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2011.
- [12] Comsol Multiphysics GmbH, *COMSOL Multiphysics Reference Manual*, 2019.
- [13] Stefan Plagg, Martin Pobitzer, *Eigenfrequenzen - Eigenmoden - Resonanzfrequenzen - Raummoden*. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2011.
- [14] Reinhard Nell, *Messung tieffrequenter Absorptionsgrößen im Hallraum*. Toningenieur-Projekt, Technische Universität Graz, 2019.
- [15] Mackie, *Bedienungsanleitung für SRM 1850*, https://mackie.com/sites/default/files/PRODUCT%20RESOURCES/MANUALS/Owners_Manuals/SRM1850_2850_OM.pdf (abgerufen am 28.11.21).
- [16] Maa, Dah-You, *Sound power emission in reverberation chambers*. Acoustical Society of America, volume 83, number 4, pages 1414–1419, 1988.
- [17] Richard V. Waterhouse, *Output of a Sound Source in a Reverberation Chamber and Other Reflecting Environments*. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 30, number 1, pages 4–13, 1958.
- [18] Stefan Kaiser, Mathias Wutti, *Kalibrierung von pv-Sonden*. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2013.

- [19] Hans-Elias de Bree, *The Microflow E-book*. Microflow Technologies, 2009, <https://www.microflow.com/resources/e-books/e-book-the-microflow-e-book> (abgerufen am 28.11.21).
- [20] ÖNORM EN ISO 354: *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003)*. Österreichisches Normungsinstitut, 2003.
- [21] Czerny Industrieberatung GmbH, *Akustik-Eckabsorber, lichtgrau 420*, https://www.der-schaumstoffdiscounter.de/epages/61456034.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/61456034/Products/E1100420420 (abgerufen am 21.01.2022).
- [22] Berzborn, Marco and Bomhardt, Ramona and Klein, Johannes and Richter, Jan-Gerrit and Vorländer, Michael, *ITA-Toolbox An Open Source Matlab Toolbox for Acousticians*. Proceedings of the 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel, Germany, Band 2017, Seiten 6–9, 2017.
- [23] Eric Kurz, Andreas Steffek, Werner Weselak, Gernot Kubin, *Interference Patterns in an Edge of a Cuboid Reverberation Chamber*. VEROEFFENTLICHT IN, JAHR.
- [24] Manfred Kaltenbacher, Klaus Roppert, Stefan Schoder, Clemens Freidhager, Florian Toth, Dominik Mayrhofer, Clemens Junger, Sebastian Floss, *openCFS*. Verein zur Förderung der Software openCFS, 2020, <https://opencfs.org/> (abgerufen am 29.07.2022).
- [25] Kaltenbacher Manfred, *Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators*. Springer, 2007, vol. 2.
- [26] Leon Merkel, Florian Kraxberger, Stefan Schoder, *Finite Element Simulations of Edge Absorbers*. Toningenieur-Projekt, Technische Universität Graz, noch nicht veröffentlicht (Stand: 16.07.2022).
- [27] NTi Audio AG, *Datenblatt des Messmikrofons NTI MA2230*, <https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/de/Messmikrofone-Spezifikationen.pdf> (abgerufen am 16.02.2022).
- [28] Norsonic-Tippkemper GmbH, *Datenblatt des Kugellautsprechers Nor276*, <https://norsonic.de/schallpegelmesser-detailseite/Nor276.html?file=files/01-norsonic-tippkemper/bilder-content/produkt Datenbank/produkte/Nor276/Datenblatt%20Norsonic%20Schallquellen.pdf> (abgerufen am 28.11.21).
- [29] Geigl Markus, *Messung an mikroperforierten Folien im Hallraum*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2004.
- [30] ÖNORM EN ISO 3382-2: *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008 + Cor 1:2009) (konsolidierte Fassung)*. Österreichisches Normungsinstitut, 2008.
- [31] Helmut V. Fuchs, *Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [32] Janna Lamprecht, Siegfried Radandt, *Untersuchung innovativer Schallabsorber im industriellen Umfeld, Abschlussbericht*. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., 2012.
- [33] Mathew McGrory, Daniel Castro Cirac, Olivier Gaussen, Densil Cabrera, G Engineers, *Sound absorption coefficient measurement: Re-examining the relationship between impedance tube and reverberant room methods*. Proceedings of acoustics, 2012.
- [34] Trevor J. Cox, Peter D’Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group and informa business, 2017.

- [35] ÖNORM EN ISO 10534-2: *Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998)*. Österreichisches Normungsinstitut, 1998.
- [36] Stefan Ziesemer, *High resolution sound field analysis*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2022.
- [37] Schulze-Forster Kilian Arnold, *The B-Format-Recording, Auralization, and Absorption Measurements*. Masterarbeit, Chalmers University of Technology, 2018.

Abkürzungsverzeichnis

FAB	Frequenzabstandbedingung
FB	Frequenzbereich
FBB	Frequenzbereichbedingung
FEM	Finiten-Elemente-Methode
IM	Interferenzmuster
KA	Kantenabsorber
MK	Messkonfiguration
MP	Mikrofonposition
OZB	Ordnungszahlbedingung
PR	Plattenresonator
RA	Raumausstattung
TP	Trajektorienposition

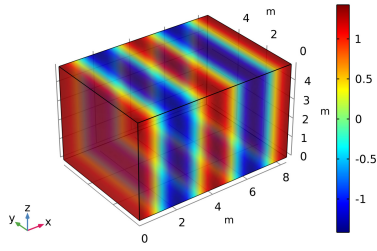


Raummoden

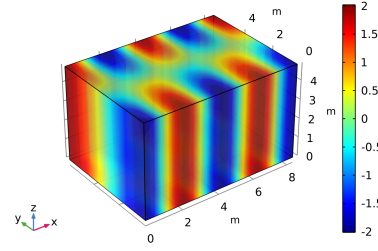
Nr.	f in Hz	Ordnungszahlen			Modentyp	Terzbandmittenfrequenz (TBM) in Hz
		n_x	n_y	n_z		
1	20,6	1	0	0	axial	20
			-			25
2	28,6	0	1	0	axial	31,5
3	35,0	0	0	1	axial	
4	35,3	1	1	0	tangential	40
5	40,6	1	0	1	tangential	
6	41,1	2	0	0	axial	
7	45,2	0	1	1	tangential	50
8	49,7	1	1	1	schräg	
9	50,1	2	1	0	tangential	
10	54,0	2	0	1	tangential	
11	57,3	0	2	0	axial	63
12	60,8	1	2	0	tangential	
13	61,1	2	1	1	schräg	
14	61,7	3	0	0	axial	
15	67,1	0	2	1	tangential	
16	68,0	3	1	0	tangential	
17	70,0	0	0	2	axial	
18	70,2	1	2	1	schräg	80
19	70,5	2	2	0	tangential	
20	70,9	3	0	1	tangential	
21	73,0	1	0	2	tangential	
22	75,6	0	1	2	tangential	
23	76,5	3	1	1	schräg	
24	78,4	1	1	2	schräg	
25	78,7	2	2	1	schräg	
26	81,2	2	0	2	tangential	
27	82,3	4	0	0	axial	
28	84,2	3	2	0	tangential	
29	85,9	0	3	0	axial	
30	86,1	2	1	2	schräg	
31	87,1	4	1	0	tangential	
32	88,3	1	3	0	tangential	

Nr.	f in Hz	Ordnungszahlen			Modentyp	TBM in Hz
		n_x	n_y	n_z		
33	89,4	4	0	1	tangential	
34	90,4	0	2	2	tangential	
35	91,2	3	2	1	schräg	
36	92,7	1	2	2	schräg	
37	92,8	0	3	1	tangential	
38	93,3	3	0	2	tangential	
39	93,9	4	1	1	schräg	
40	95,0	1	3	1	schräg	
41	95,2	2	3	0	tangential	
42	97,6	3	1	2	schräg	
43	99,3	2	2	2	schräg	
44	100,2	4	2	0	tangential	100
45	101,5	2	3	1	schräg	
46	102,8	5	0	0	axial	
47	105,0	0	0	3	axial	
48	105,8	3	3	0	tangential	
49	106,2	4	2	1	schräg	
50	106,7	5	1	0	tangential	
51	107,0	1	0	3	tangential	
52	108,0	4	0	2	tangential	
53	108,6	5	0	1	tangential	
54	108,8	0	1	3	tangential	
55	109,5	3	2	2	schräg	
56	110,8	1	1	3	schräg	
57	110,8	0	3	2	tangential	
58	111,4	3	3	1	schräg	
59	111,7	4	1	2	schräg	
60	112,3	5	1	1	schräg	
61	112,7	1	3	2	schräg	
62	112,8	2	0	3	tangential	
63	114,5	0	4	0	axial	
64	116,3	2	1	3	schräg	
65	116,4	1	4	0	tangential	125
66	117,7	5	2	0	tangential	
67	118,2	2	3	2	schräg	
68	118,9	4	3	0	tangential	
69	119,6	0	2	3	tangential	
70	119,8	0	4	1	tangential	
71	121,4	1	2	3	schräg	
72	121,5	1	4	1	schräg	
73	121,7	2	4	0	tangential	

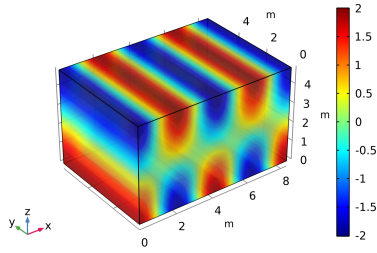
Nr.	f in Hz	Ordnungszahlen			Modentyp	TBM in Hz
		n_x	n_y	n_z		
74	121,8	3	0	3	tangential	
75	122,2	4	2	2	schräg	
76	122,8	5	2	1	schräg	
77	123,4	6	0	0	axial	
78	124,0	4	3	1	schräg	
79	124,4	5	0	2	tangential	
80	125,1	3	1	3	schräg	
81	126,5	2	2	3	schräg	
82	126,6	2	4	1	schräg	
83	126,7	6	1	0	tangential	
84	126,8	3	3	2	schräg	
85	127,6	5	1	2	schräg	
86	128,2	6	0	1	tangential	
87	130,1	3	4	0	tangential	125
88	131,4	6	1	1	schräg	
89	133,4	4	0	3	tangential	
90	134,0	5	3	0	tangential	
91	134,2	0	4	2	tangential	
92	134,6	3	2	3	schräg	
93	134,7	3	4	1	schräg	
94	135,7	0	3	3	tangential	
95	135,8	1	4	2	schräg	
96	136,0	6	2	0	tangential	
97	136,4	4	1	3	schräg	
98	136,9	5	2	2	schräg	
99	137,2	1	3	3	schräg	
100	138,0	4	3	2	schräg	
101	138,5	5	3	1	schräg	
102	140,0	0	0	4	axial	
103	140,4	2	4	2	schräg	
104	140,5	6	2	1	schräg	



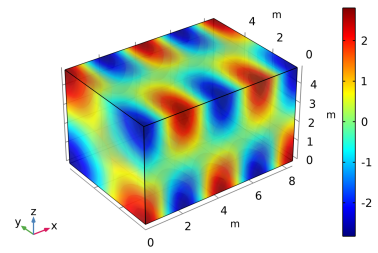
Modales Schallfeld von Raummode 4-0-0 ($f = 82,3$ Hz)



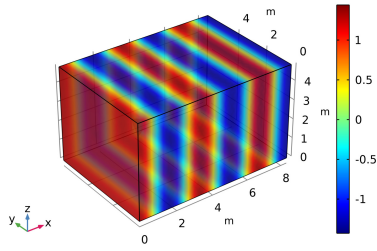
Modales Schallfeld von Raummode 4-1-0 ($f = 87,1$ Hz)



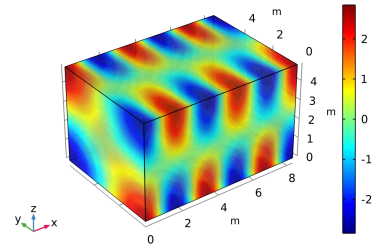
Modales Schallfeld von Raummode 4-0-1 ($f = 89,4$ Hz)



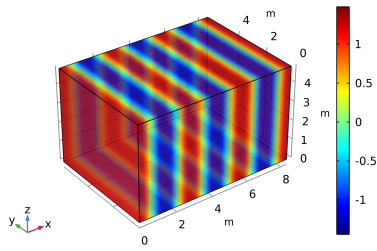
Modales Schallfeld von Raummode 4-1-1 ($f = 93,9$ Hz)



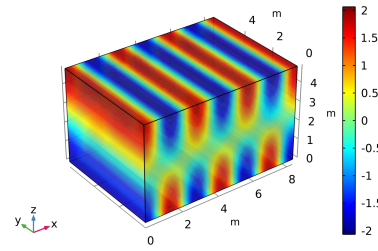
Modales Schallfeld von Raummode 5-0-0 ($f = 102,8$ Hz)



Modales Schallfeld von Raummode 5-1-1 ($f = 112,3$ Hz)



Modales Schallfeld von Raummode 6-0-0 ($f = 123,4$ Hz)



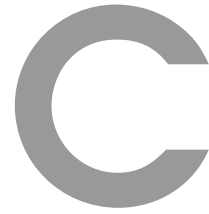
Modales Schallfeld von Raummode 6-0-1 ($f = 128,3$ Hz)

B

Messpunktkoordinaten

TP	MP	Koordinaten		
		x	y	z
1	1	4,17	0,00	0,00
	2	4,17	0,14	0,14
	3	4,17	0,28	0,28
	4	4,17	0,42	0,42
	5	4,17	0,57	0,57
	6	4,17	0,71	0,71
	7	4,17	0,85	0,85
	8	4,17	0,99	0,99
	9	4,17	1,13	1,13
2	1	4,32	0,00	0,00
	2	4,32	0,14	0,14
	3	4,32	0,28	0,28
	4	4,32	0,42	0,42
	5	4,32	0,57	0,57
	6	4,32	0,71	0,71
	7	4,32	0,85	0,85
	8	4,32	0,99	0,99
	9	4,32	1,13	1,13
3	1	4,47	0,00	0,00
	2	4,47	0,14	0,14
	3	4,47	0,28	0,28
	4	4,47	0,42	0,42
	5	4,47	0,57	0,57
	6	4,47	0,71	0,71
	7	4,47	0,85	0,85
	8	4,47	0,99	0,99
	9	4,47	1,13	1,13
4	1	4,62	0,00	0,00
	2	4,62	0,14	0,14
	3	4,62	0,28	0,28
	4	4,62	0,42	0,42
	5	4,62	0,57	0,57
	6	4,62	0,71	0,71
	7	4,62	0,85	0,85
	8	4,62	0,99	0,99
	9	4,62	1,13	1,13

TP	MP	Koordinaten		
		x	y	z
5	1	4,77	0,00	0,00
	2	4,77	0,14	0,14
	3	4,77	0,28	0,28
	4	4,77	0,42	0,42
	5	4,77	0,57	0,57
	6	4,77	0,71	0,71
	7	4,77	0,85	0,85
	8	4,77	0,99	0,99
	9	4,77	1,13	1,13
6	1	4,92	0,00	0,00
	2	4,92	0,14	0,14
	3	4,92	0,28	0,28
	4	4,92	0,42	0,42
	5	4,92	0,57	0,57
	6	4,92	0,71	0,71
	7	4,92	0,85	0,85
	8	4,92	0,99	0,99
	9	4,92	1,13	1,13
7	1	5,07	0,00	0,00
	2	5,07	0,14	0,14
	3	5,07	0,28	0,28
	4	5,07	0,42	0,42
	5	5,07	0,57	0,57
	6	5,07	0,71	0,71
	7	5,07	0,85	0,85
	8	5,07	0,99	0,99
	9	5,07	1,13	1,13
8	1	5,22	0,00	0,00
	2	5,22	0,14	0,14
	3	5,22	0,28	0,28
	4	5,22	0,42	0,42
	5	5,22	0,57	0,57
	6	5,22	0,71	0,71
	7	5,22	0,85	0,85
	8	5,22	0,99	0,99
	9	5,22	1,13	1,13
9	1	5,37	0,00	0,00
	2	5,37	0,14	0,14
	3	5,37	0,28	0,28
	4	5,37	0,42	0,42
	5	5,37	0,57	0,57
	6	5,37	0,71	0,71
	7	5,37	0,85	0,85
	8	5,37	0,99	0,99
	9	5,37	1,13	1,13



Messablauf

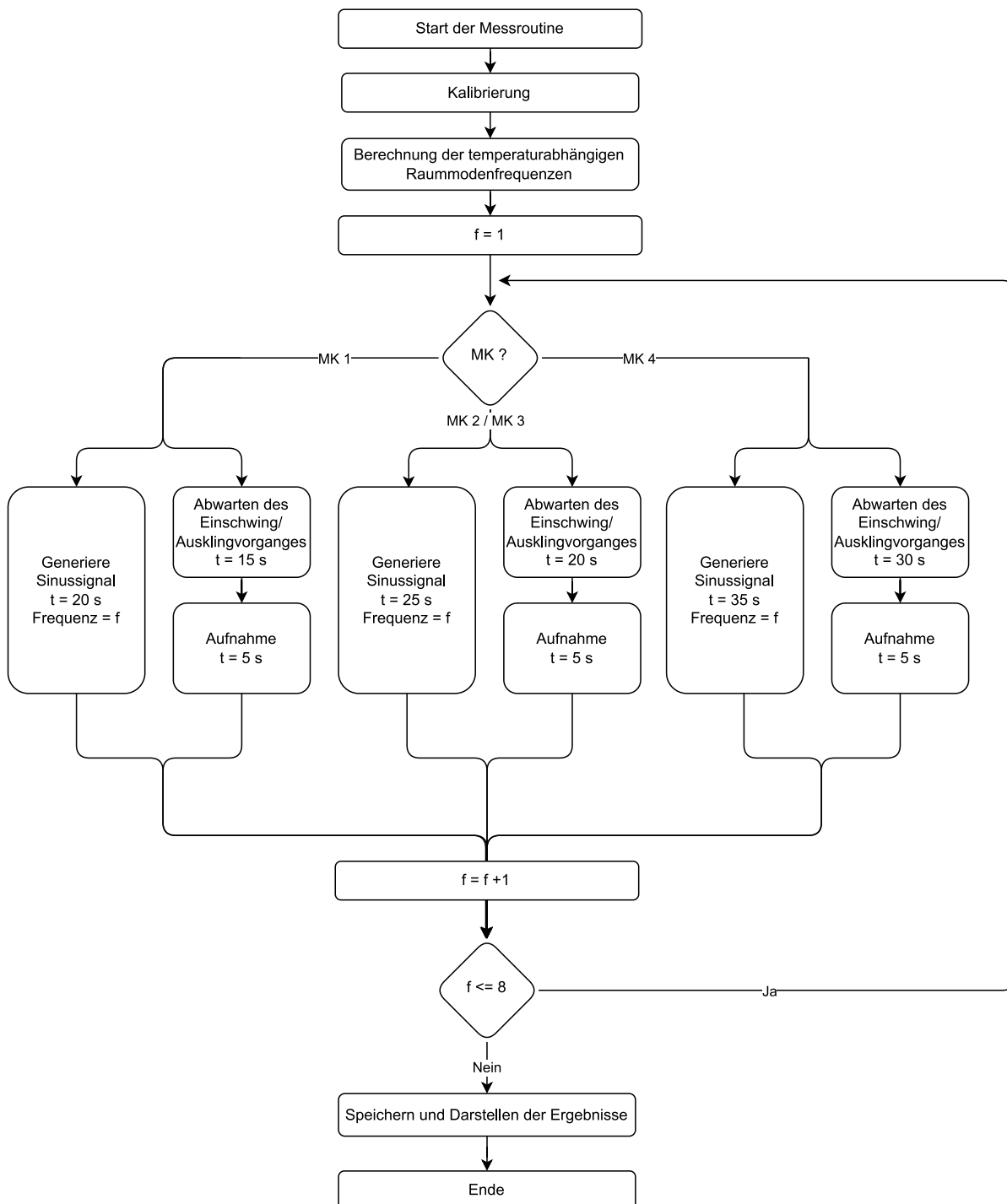


Abbildung C.1: Messroutine

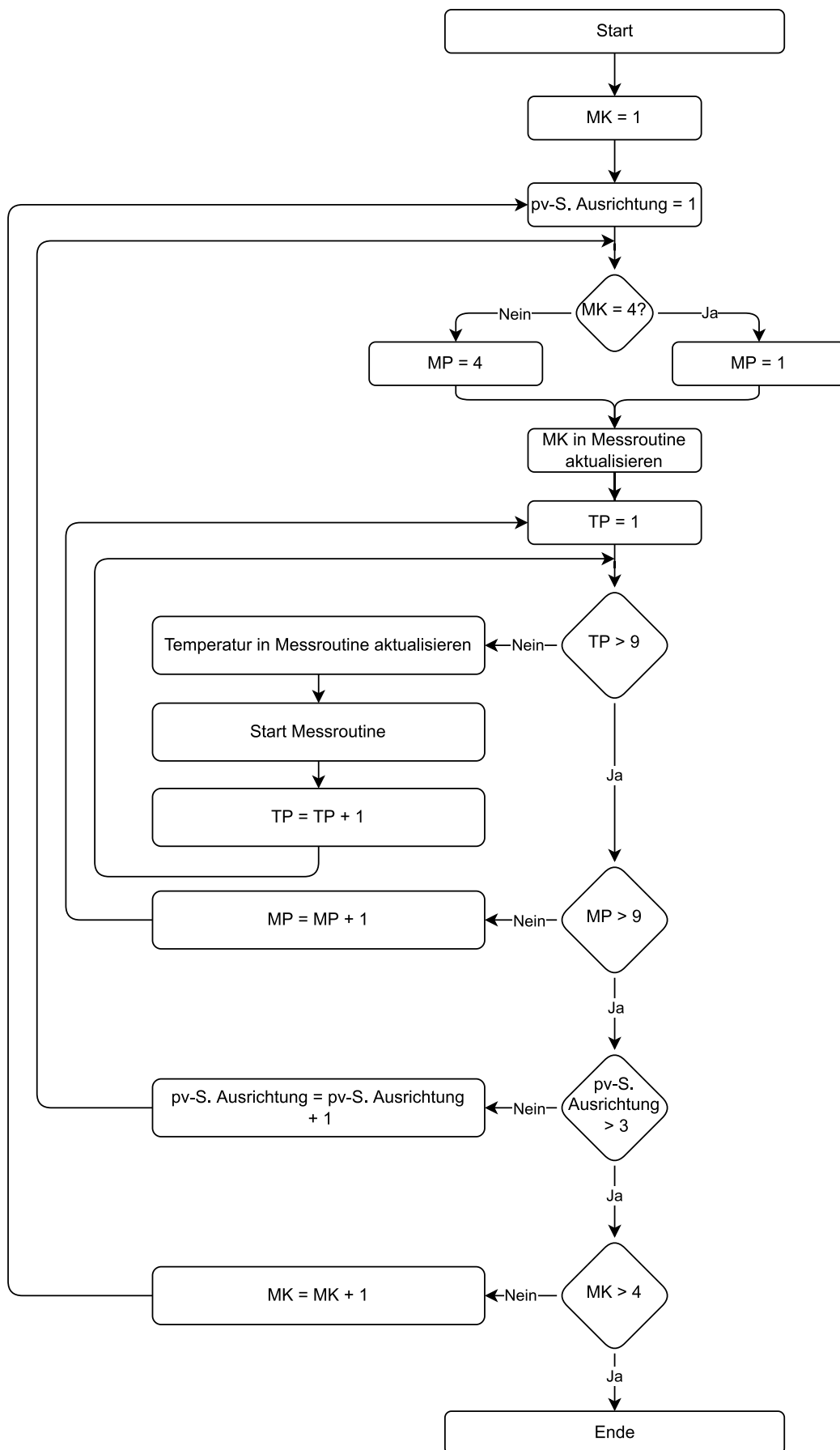


Abbildung C.2: Messkampagne



Messergebnisse

D.1 Messergebnisse ohne KA (MK 4)

D.1.1 Pegelverteilung von $\langle p^2 \rangle$

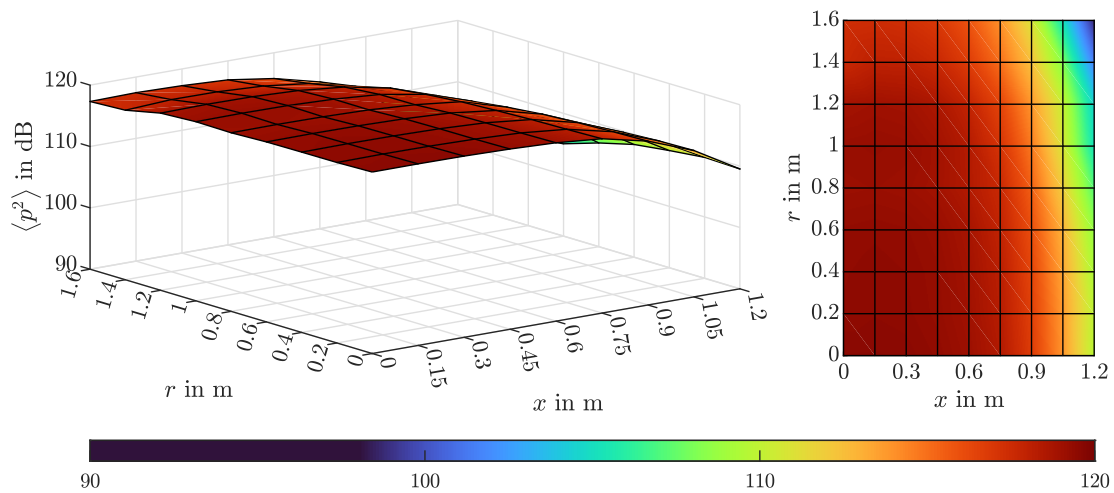


Abbildung D.1: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

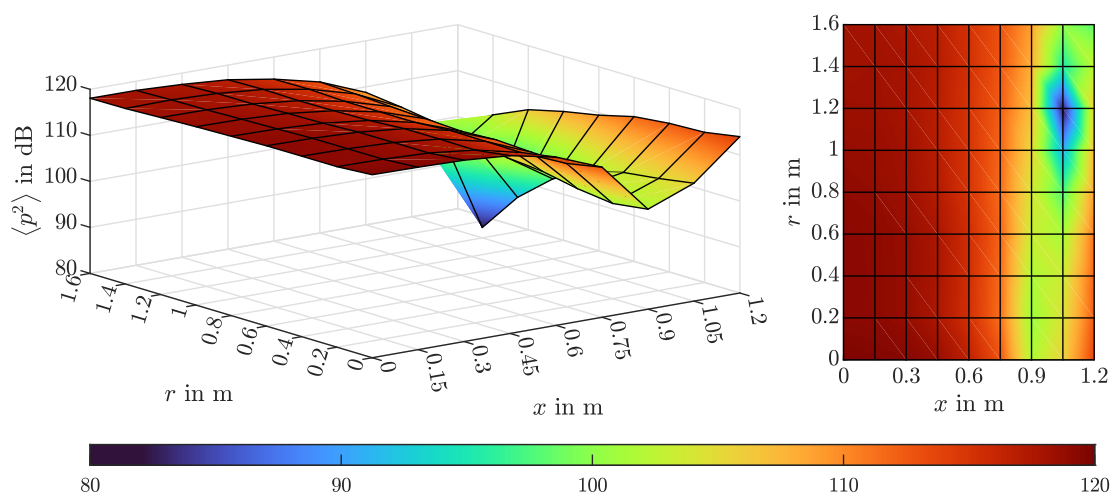


Abbildung D.2: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-1-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

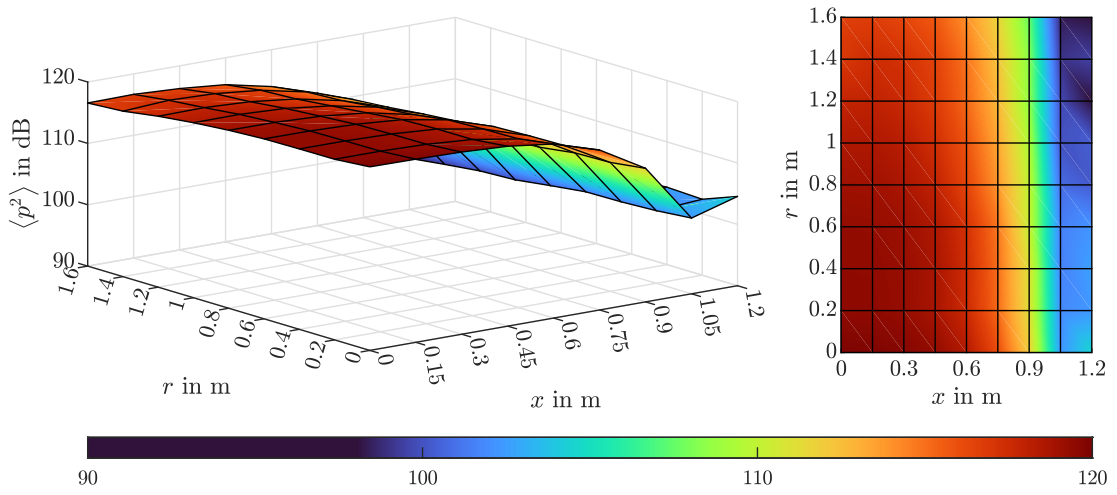


Abbildung D.3: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

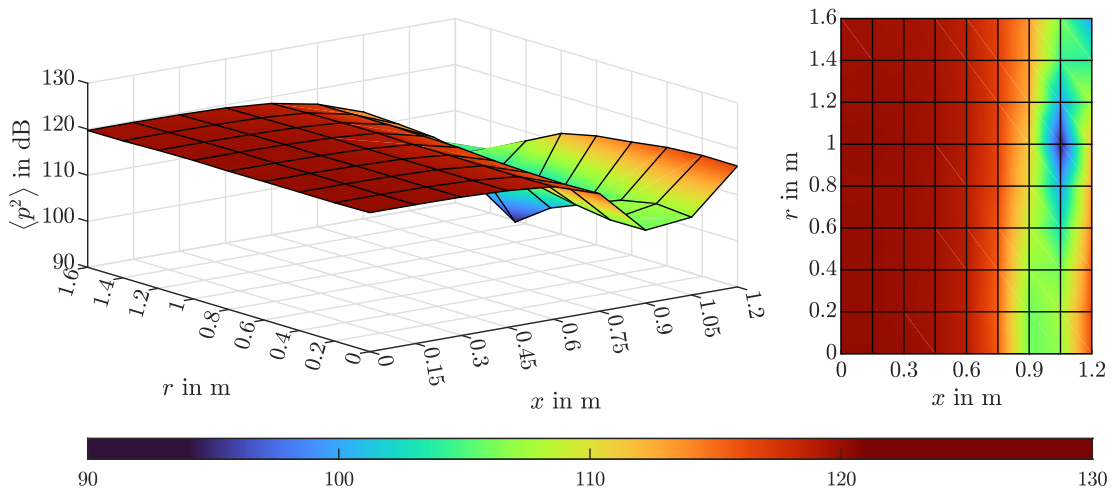


Abbildung D.4: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

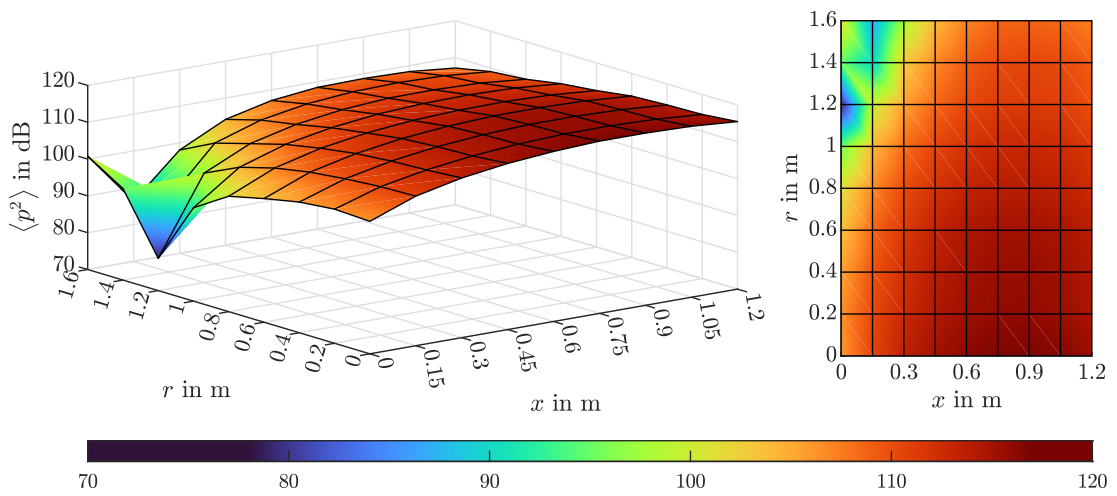
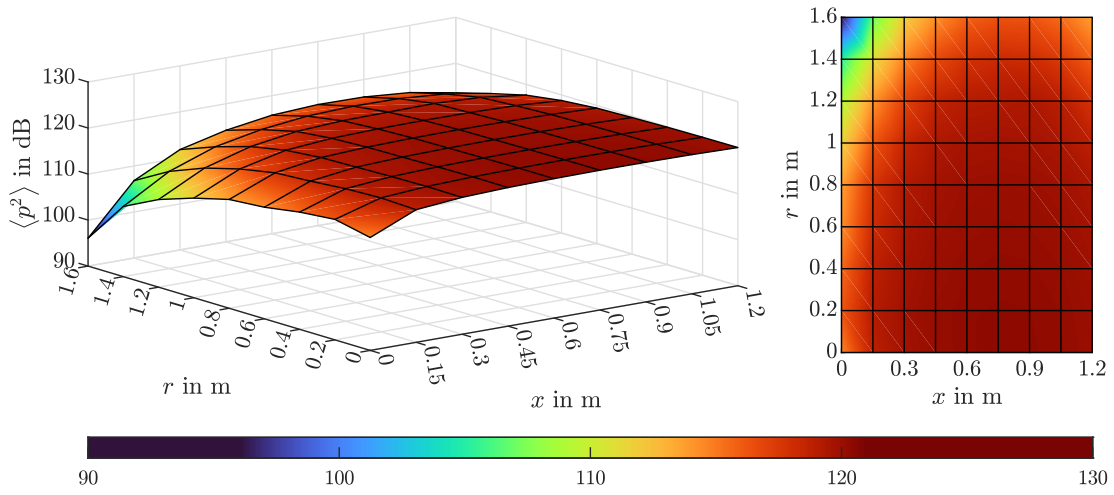
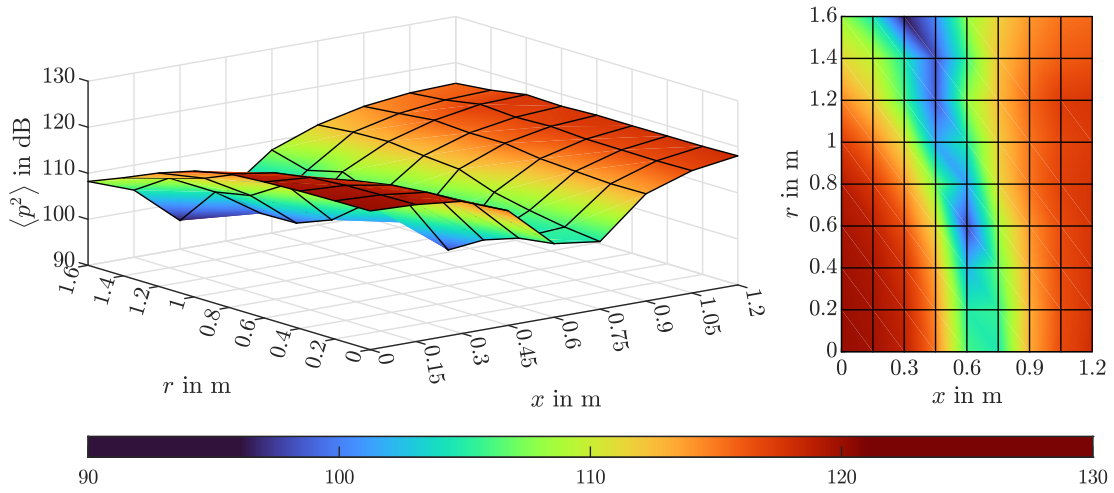
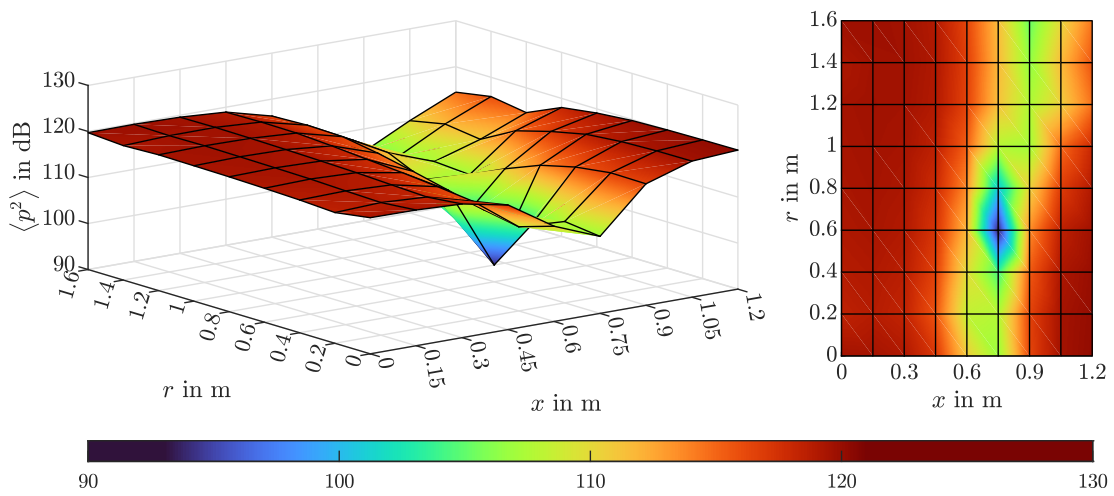


Abbildung D.5: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

Abbildung D.6: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 5-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)Abbildung D.7: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 6-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)Abbildung D.8: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 6-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

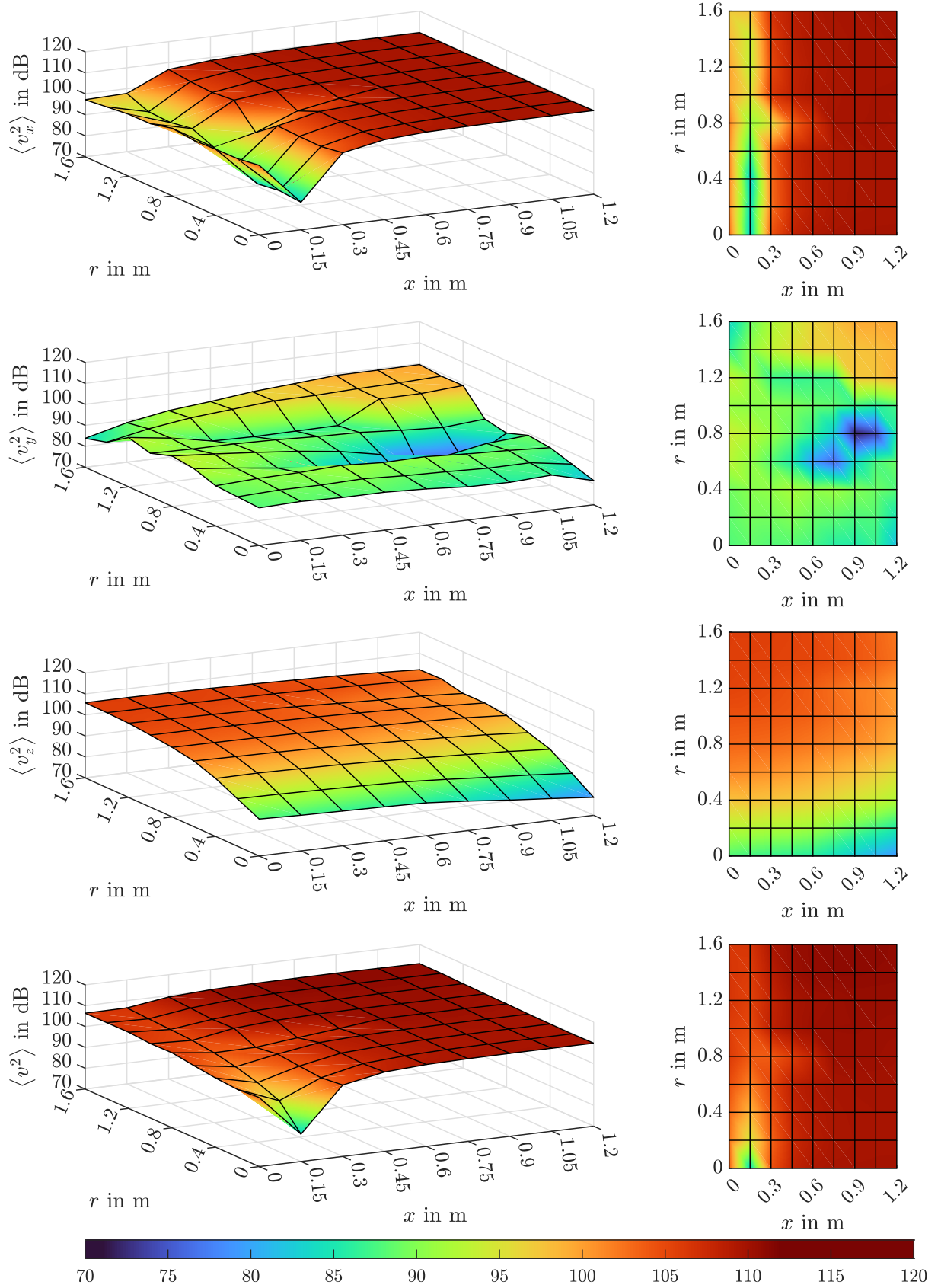
D.1.2 Pegelverteilung der $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten

Abbildung D.9: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

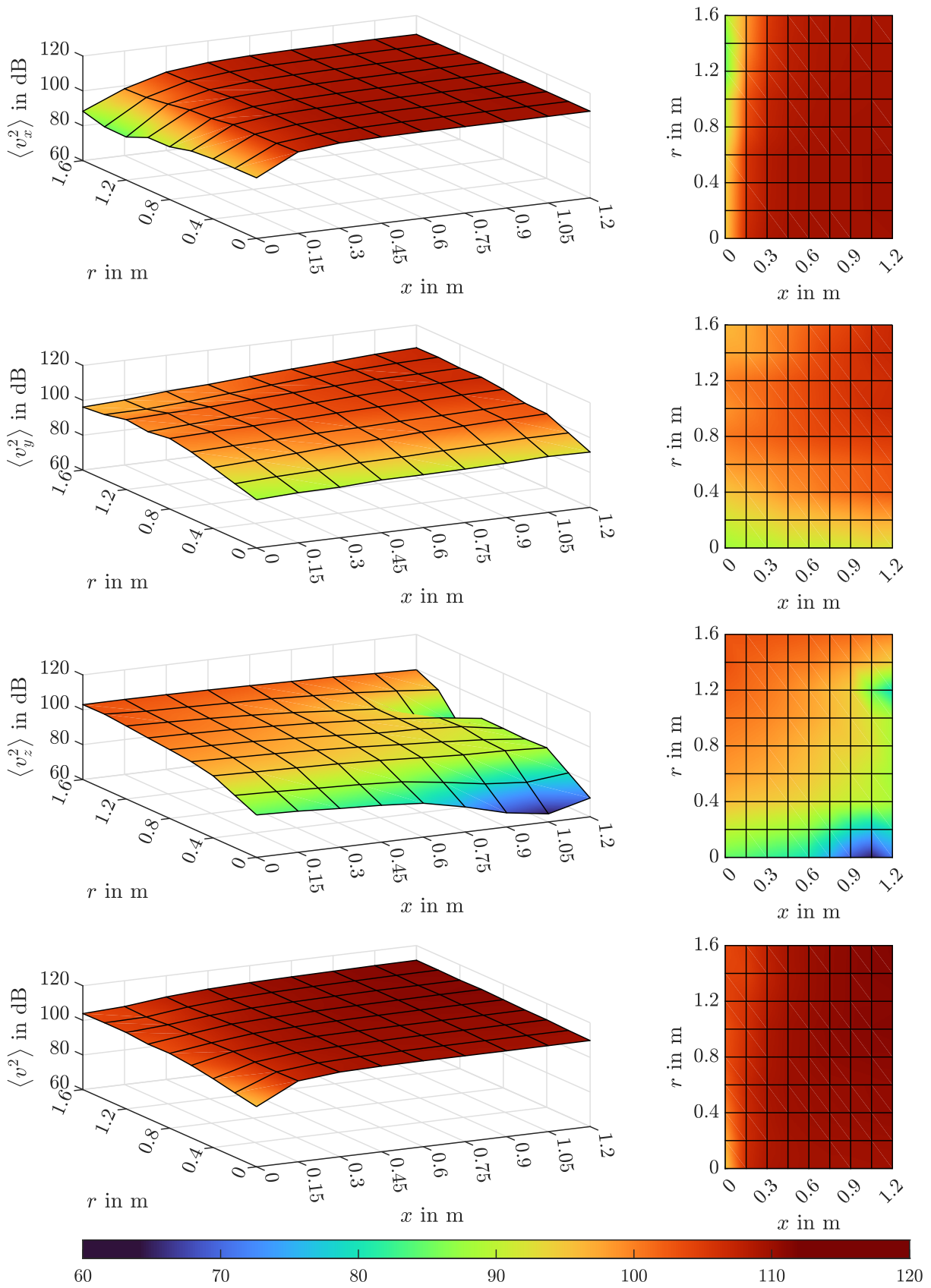


Abbildung D.10: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-1-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

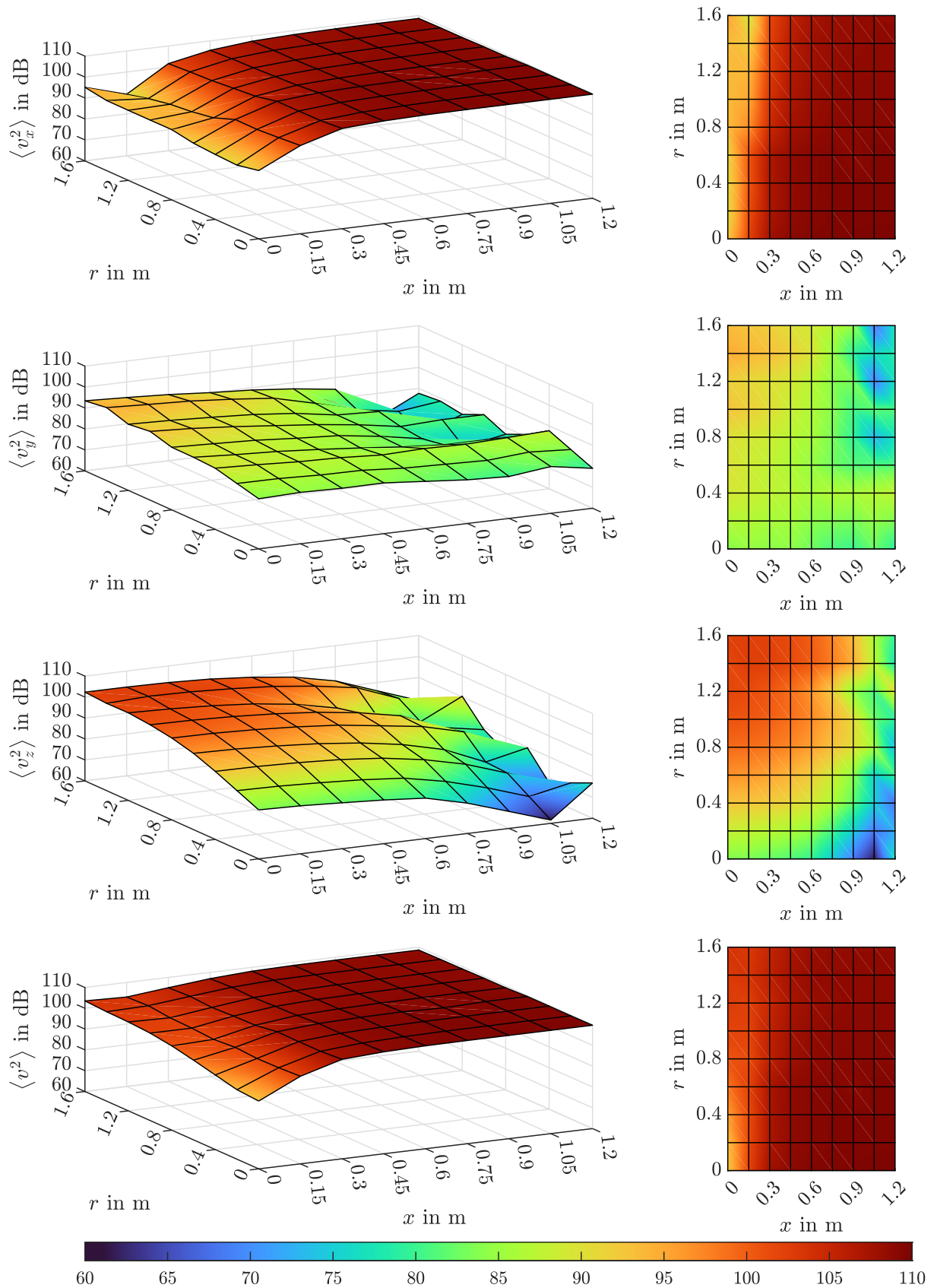


Abbildung D.11: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

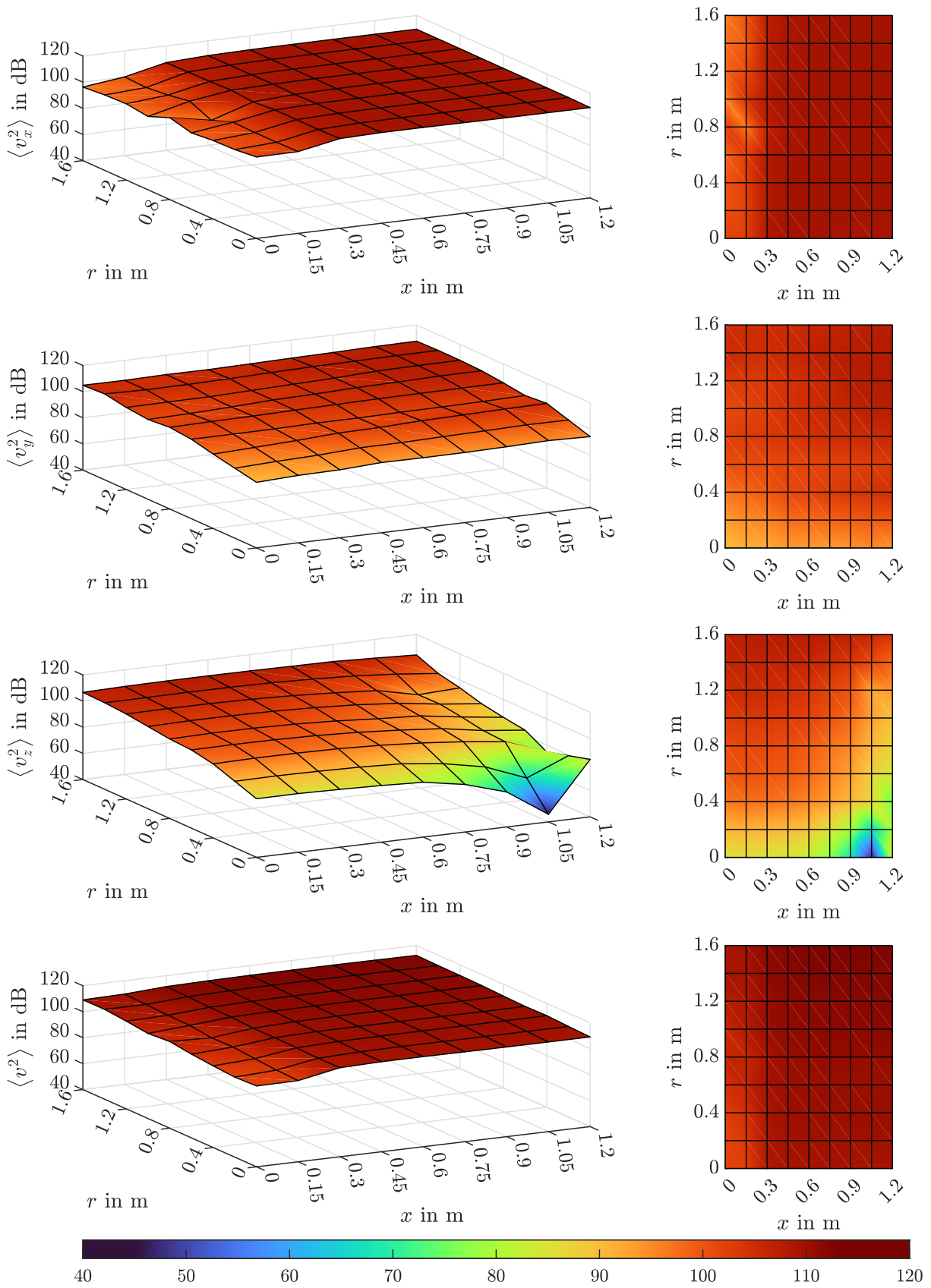


Abbildung D.12: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 4-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

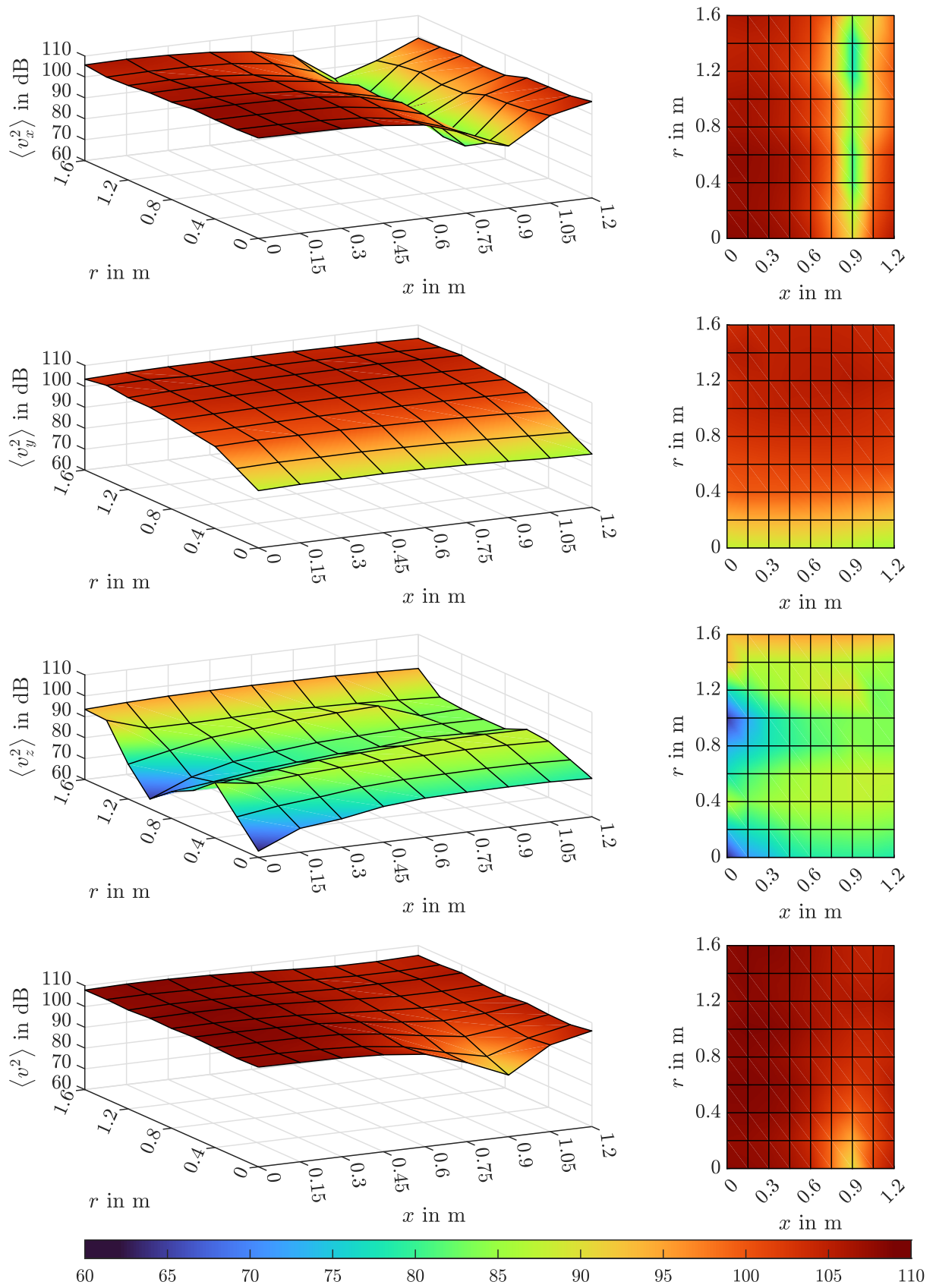


Abbildung D.13: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

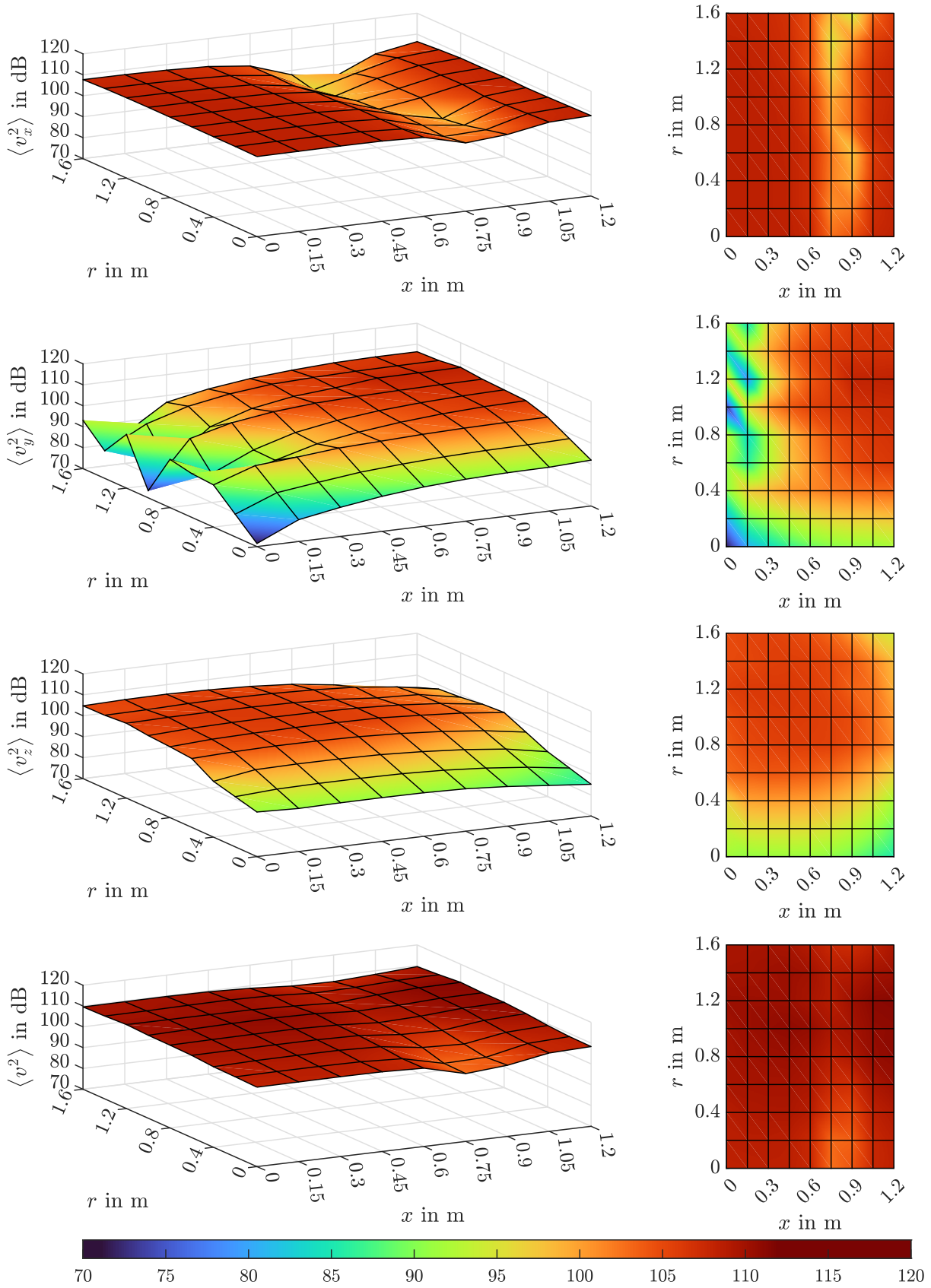


Abbildung D.14: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 5-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

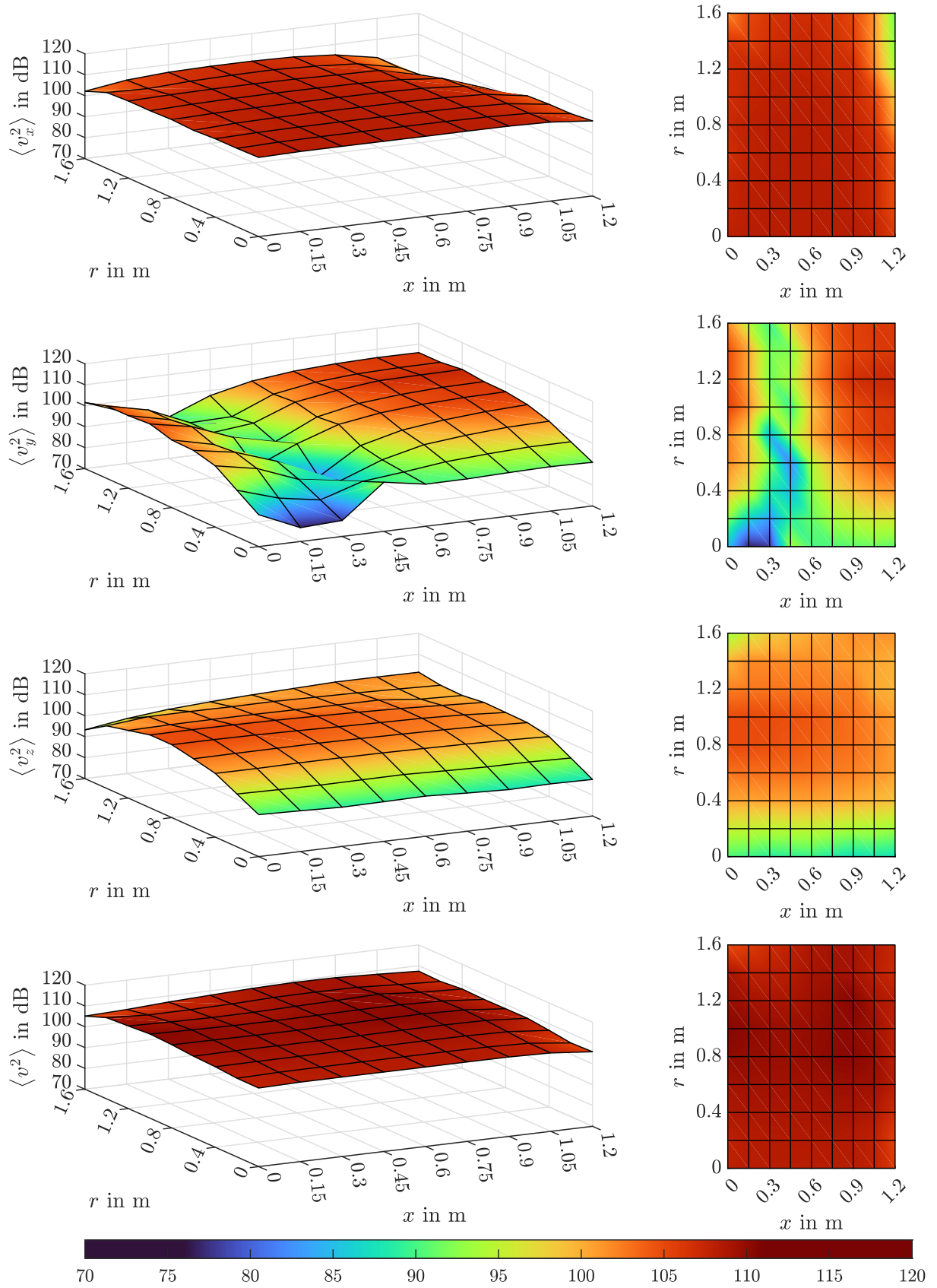


Abbildung D.15: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 6-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

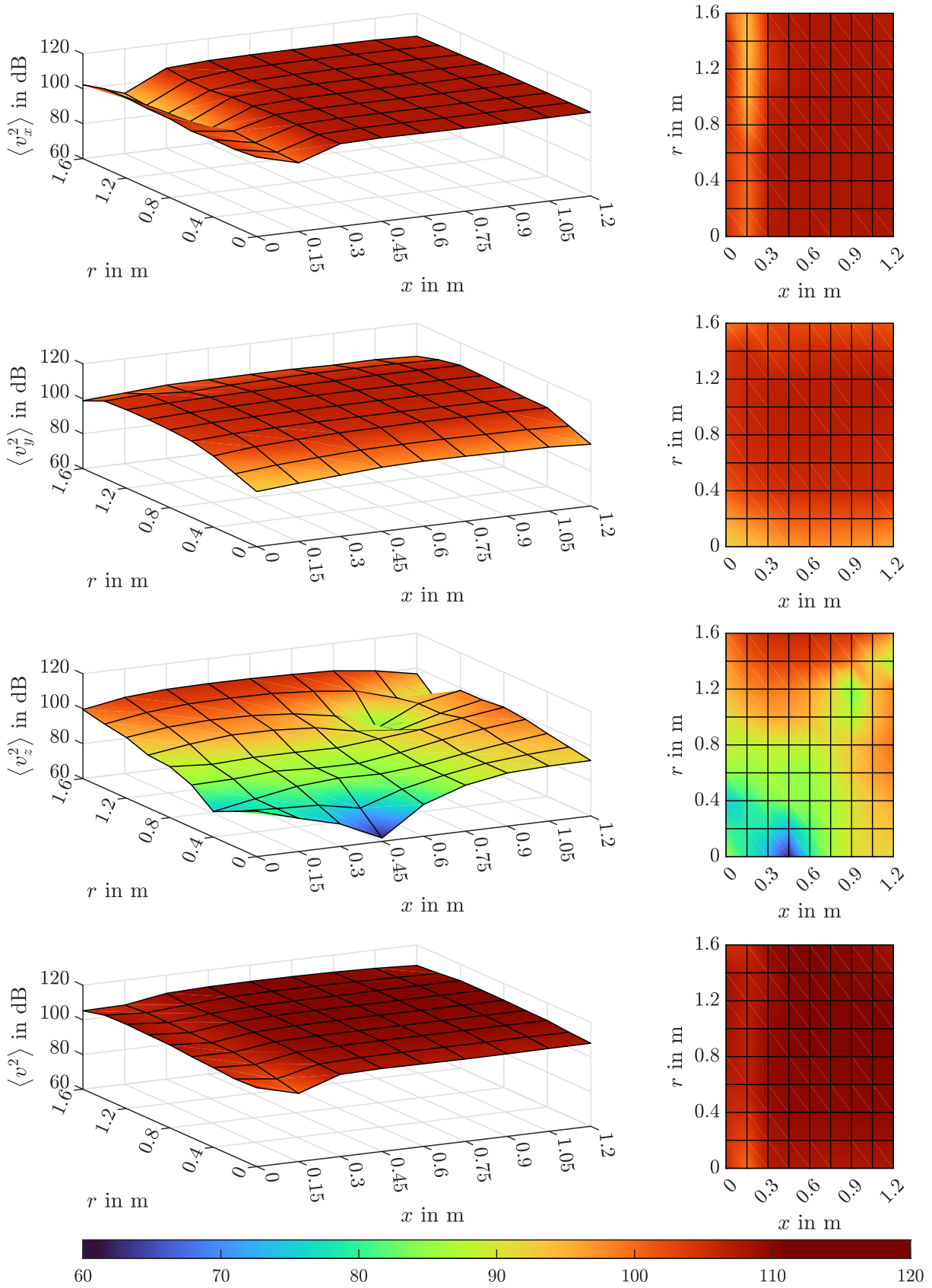


Abbildung D.16: $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$, $\langle v_z^2 \rangle$, sowie $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position für Raummode 6-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

D.1.3 Vergleich von gemessenen und FEM-simulierten Pegelverteilungen

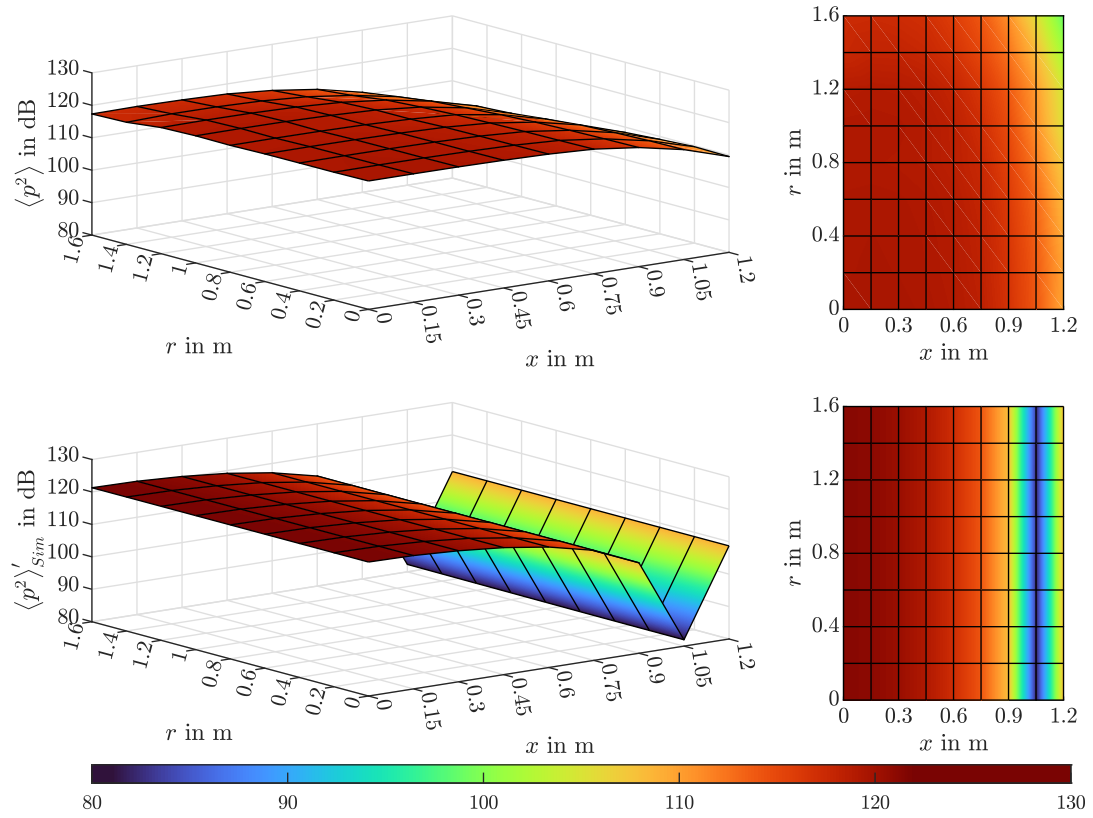


Abbildung D.17: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 4-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

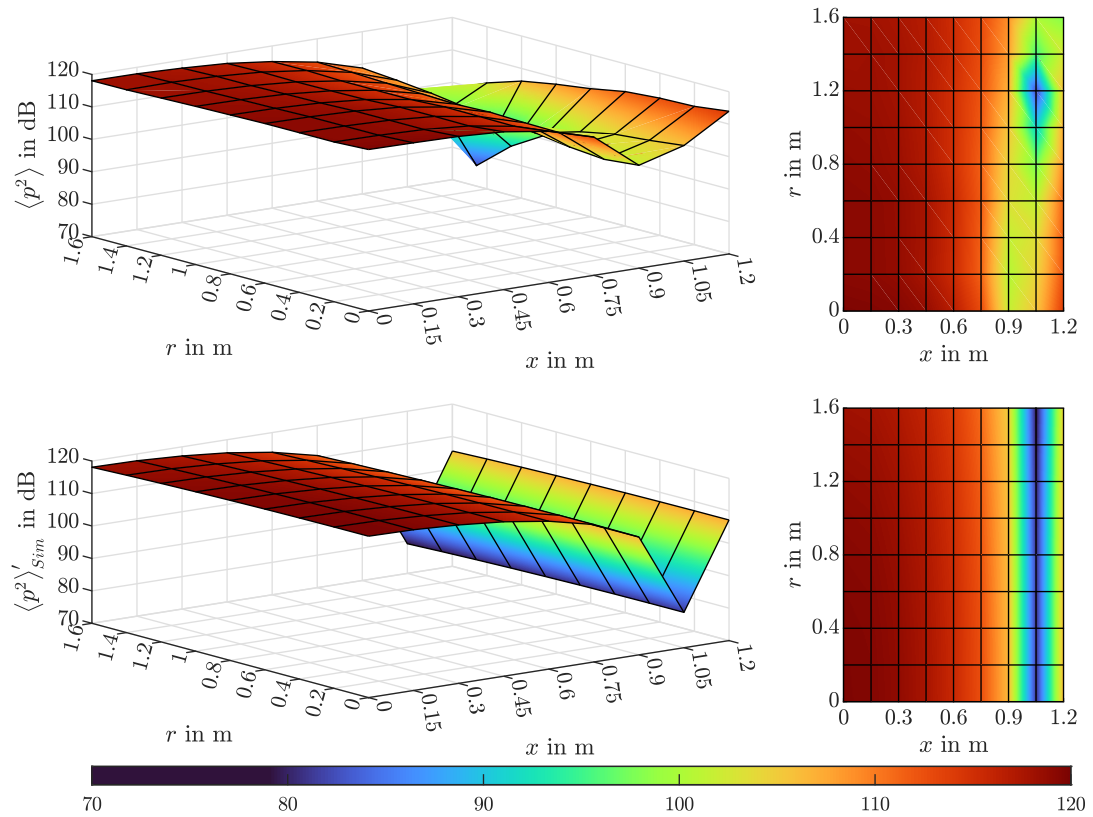


Abbildung D.18: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{sim}$ der Raummode 4-1-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

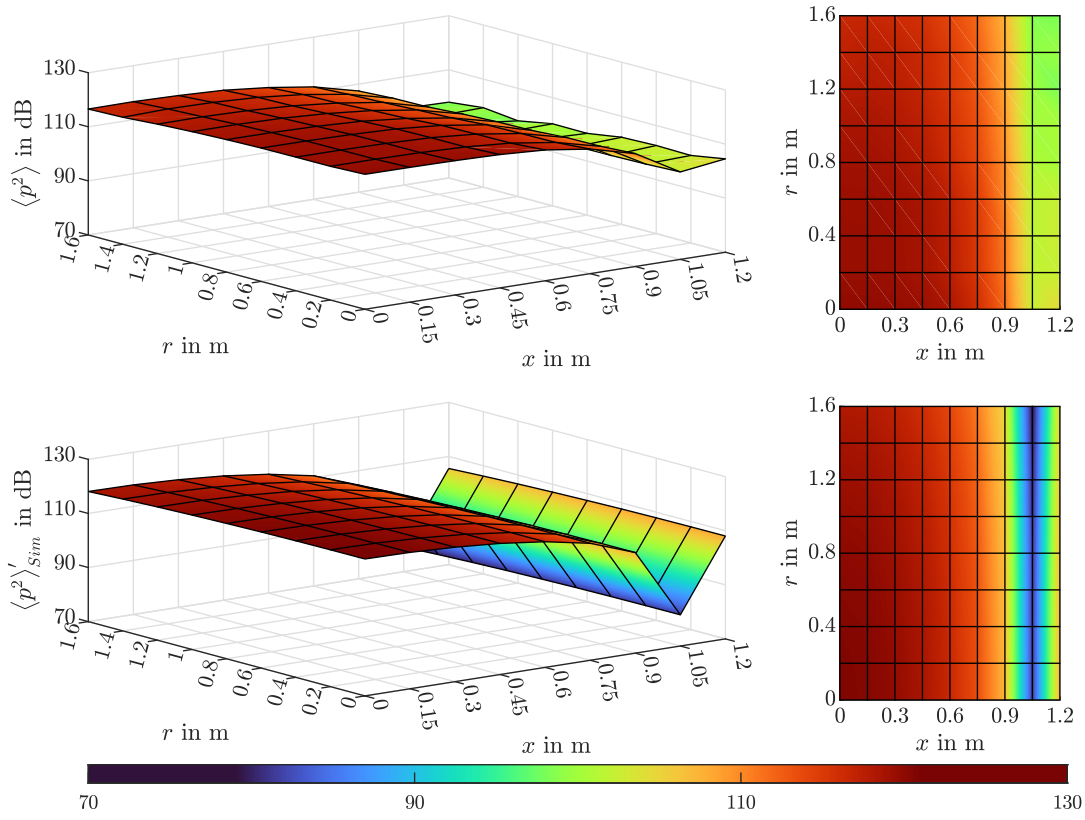


Abbildung D.19: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

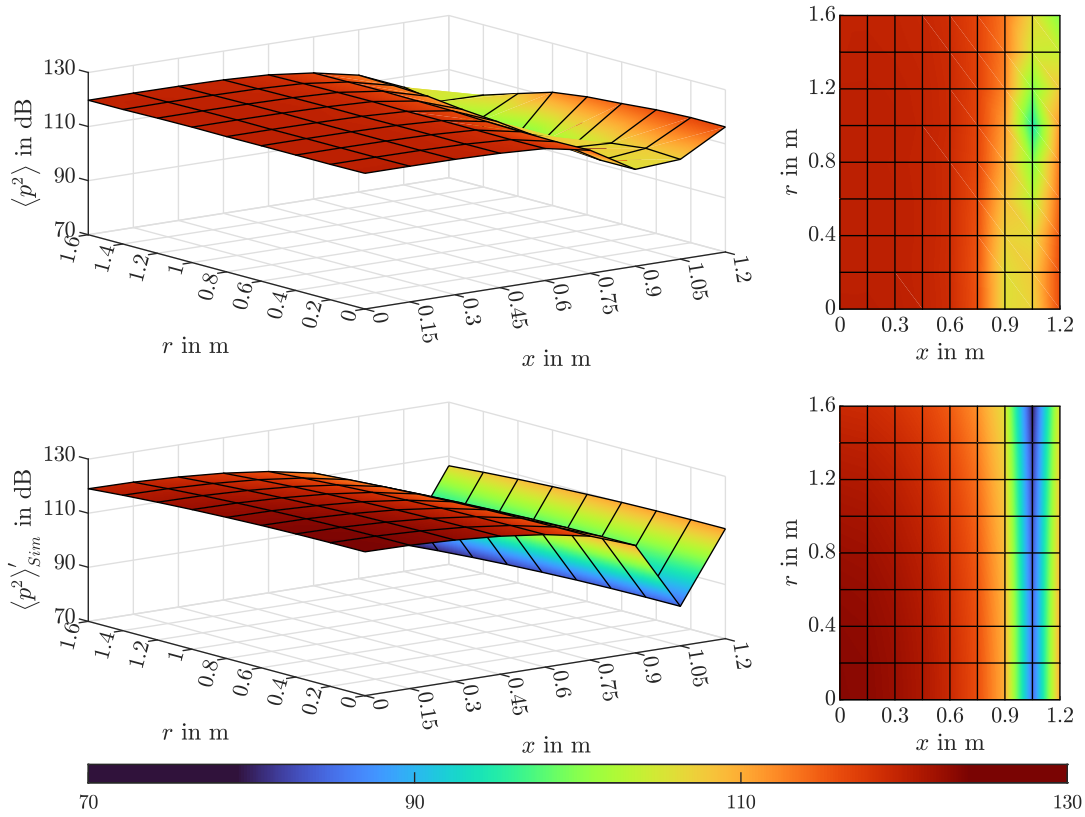


Abbildung D.20: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

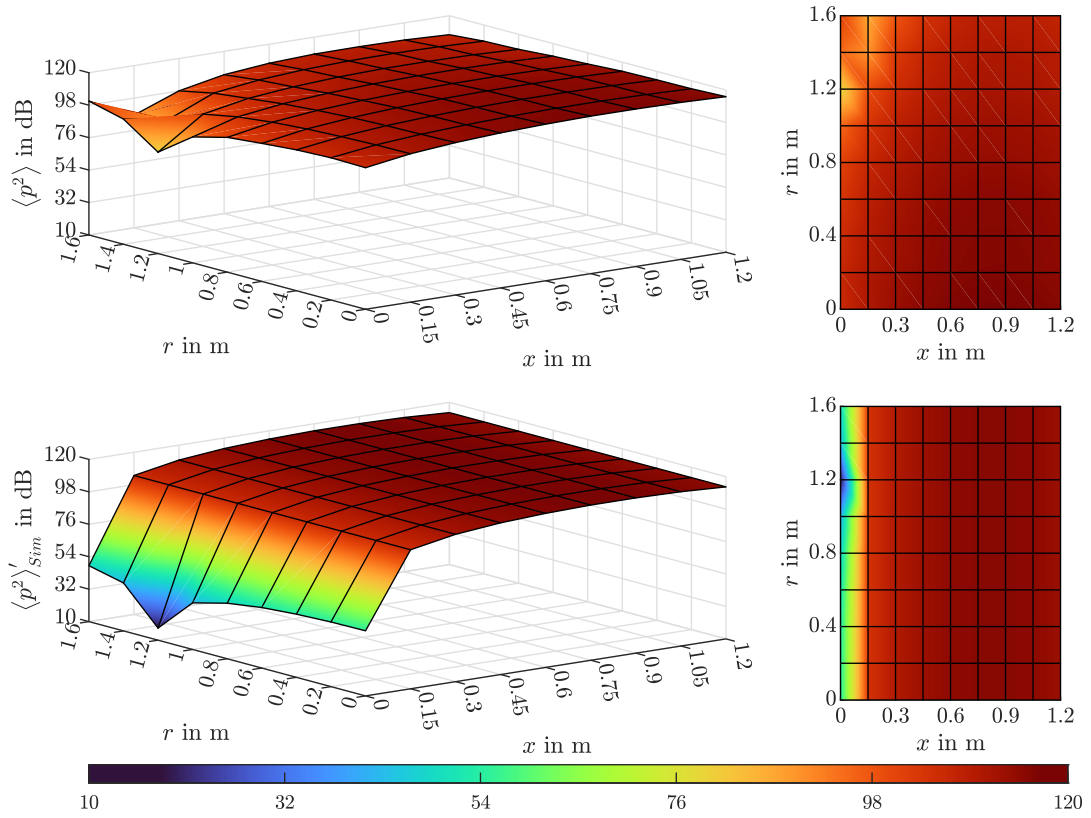


Abbildung D.21: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

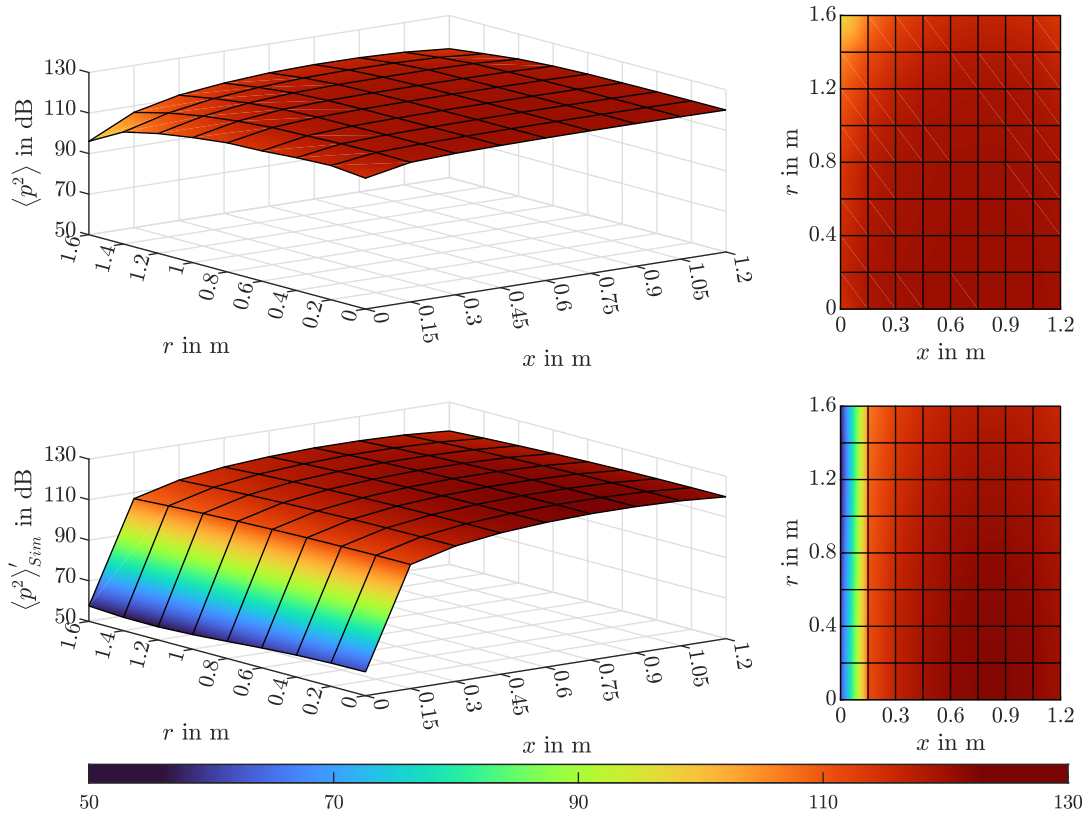


Abbildung D.22: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 5-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

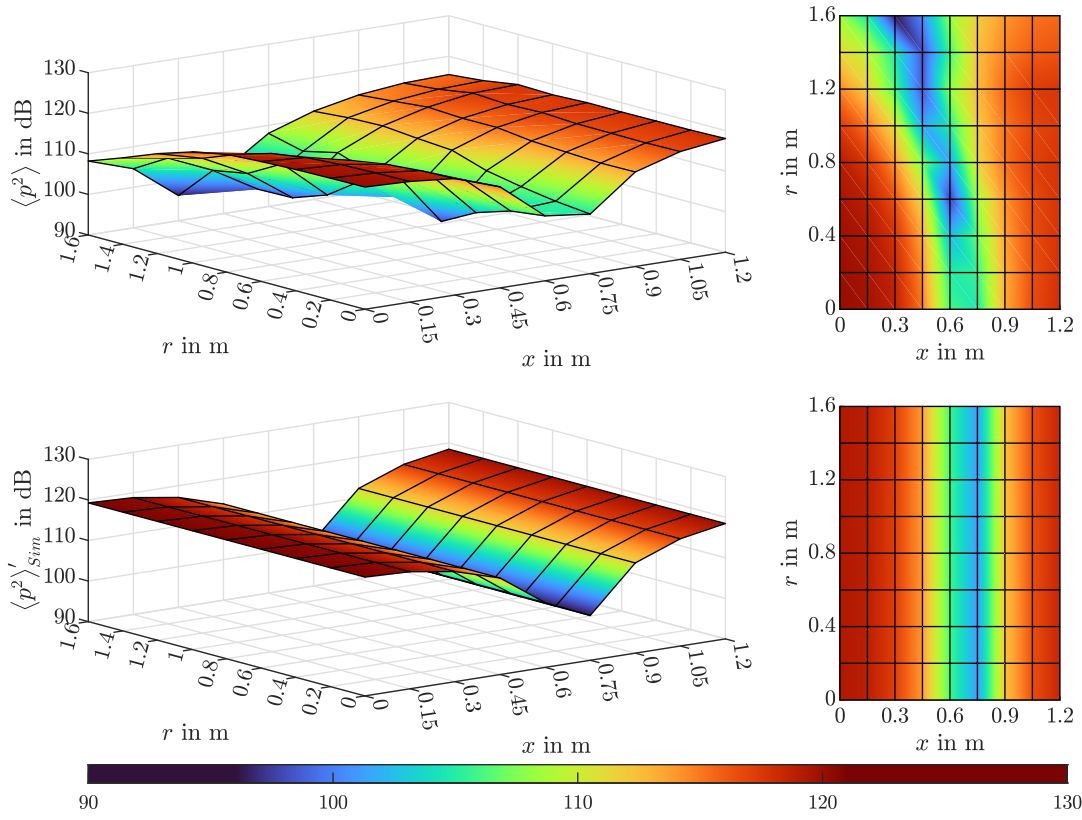


Abbildung D.23: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 6-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

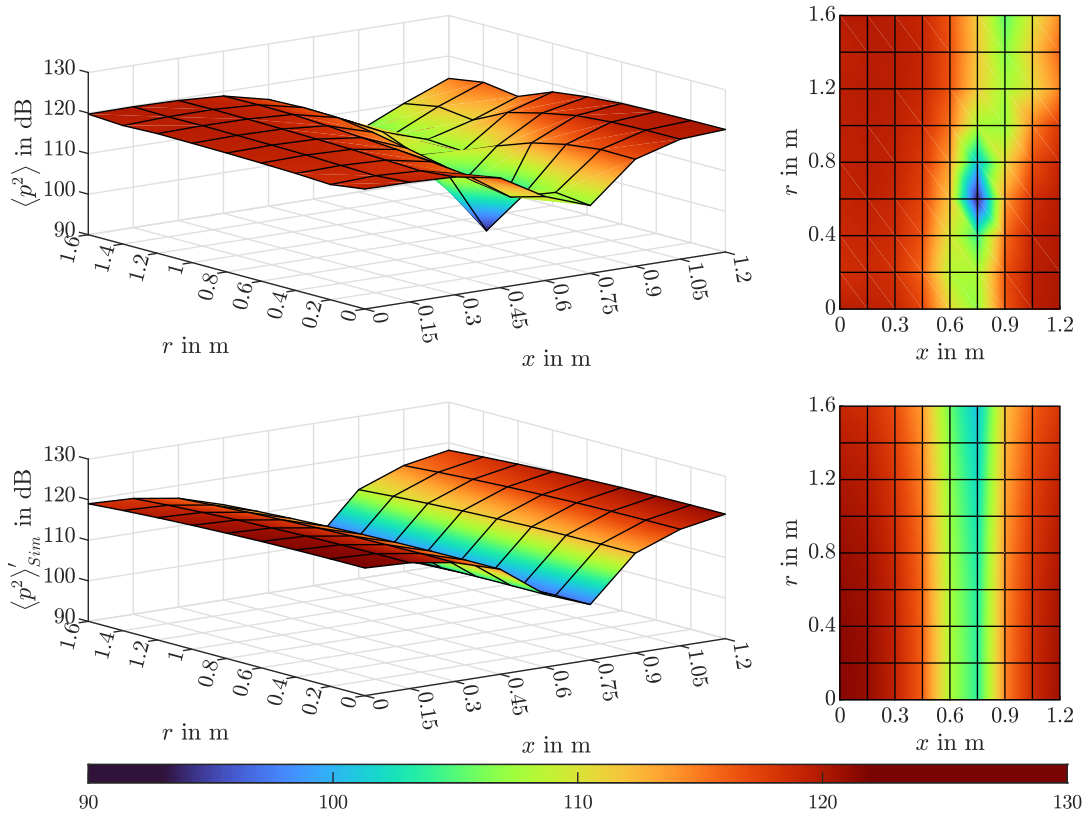


Abbildung D.24: Pegelverteilung von Messung $\langle p^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle p^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 6-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

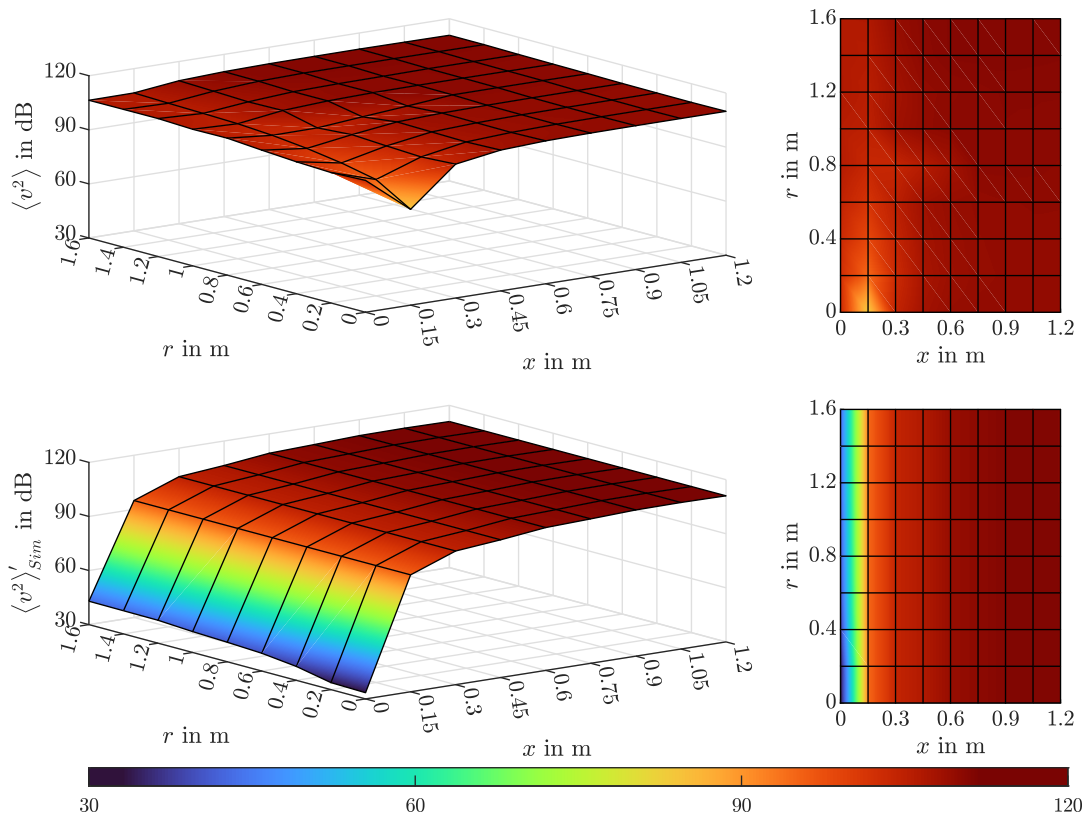


Abbildung D.25: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

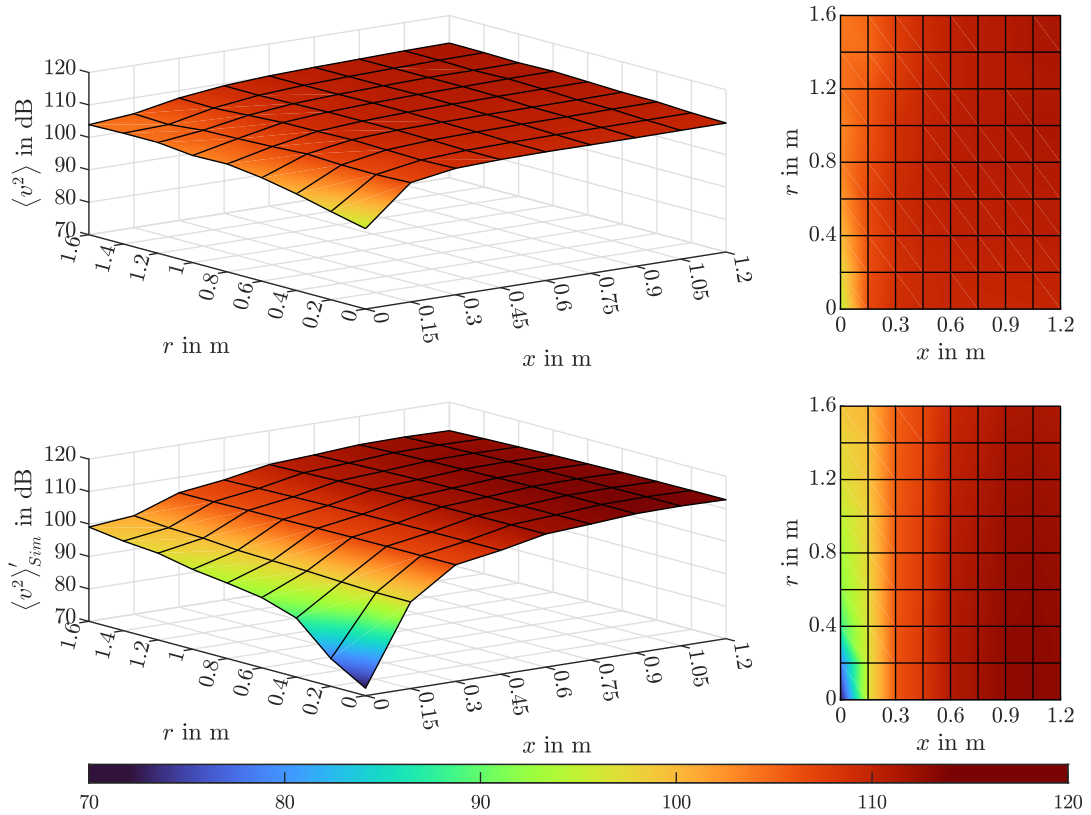


Abbildung D.26: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-1-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

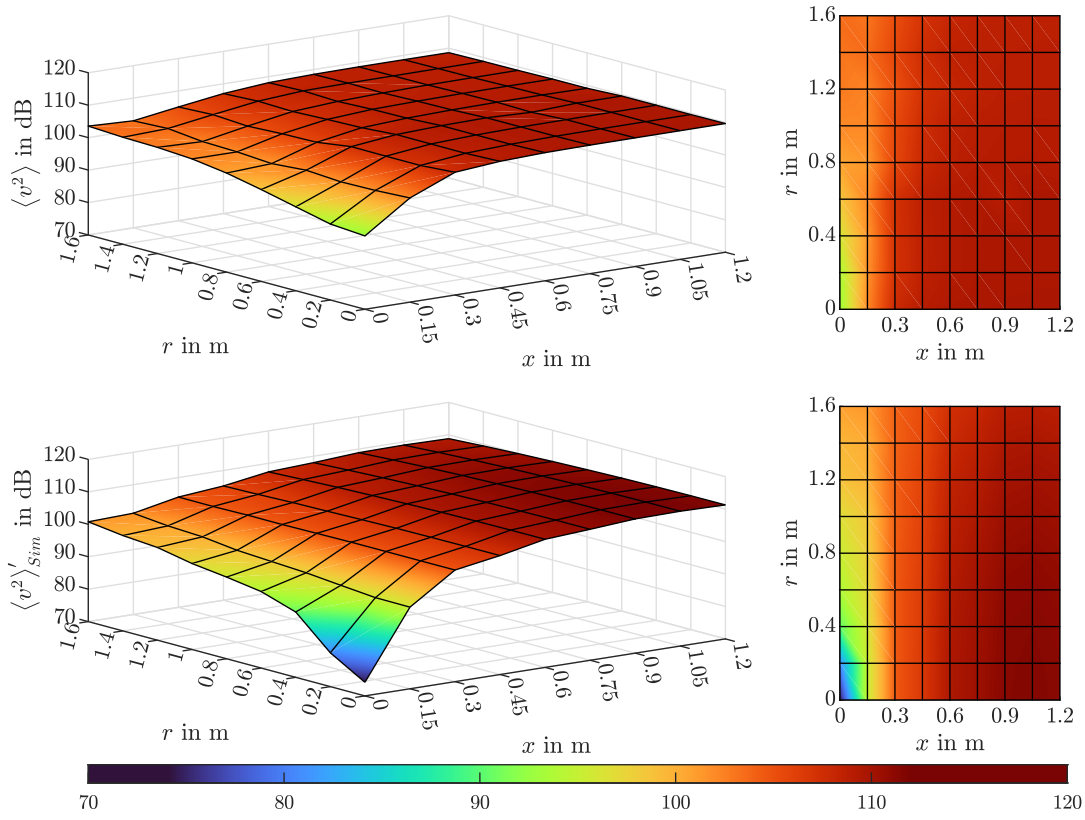


Abbildung D.27: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

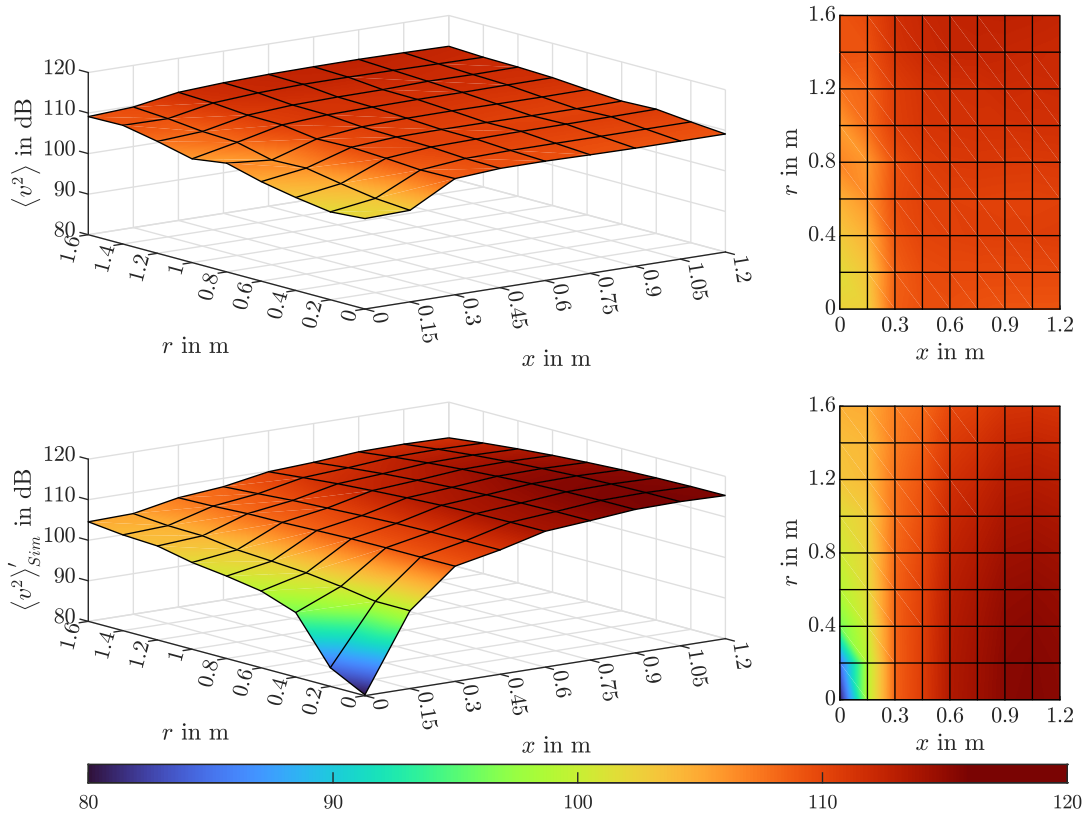


Abbildung D.28: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 4-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

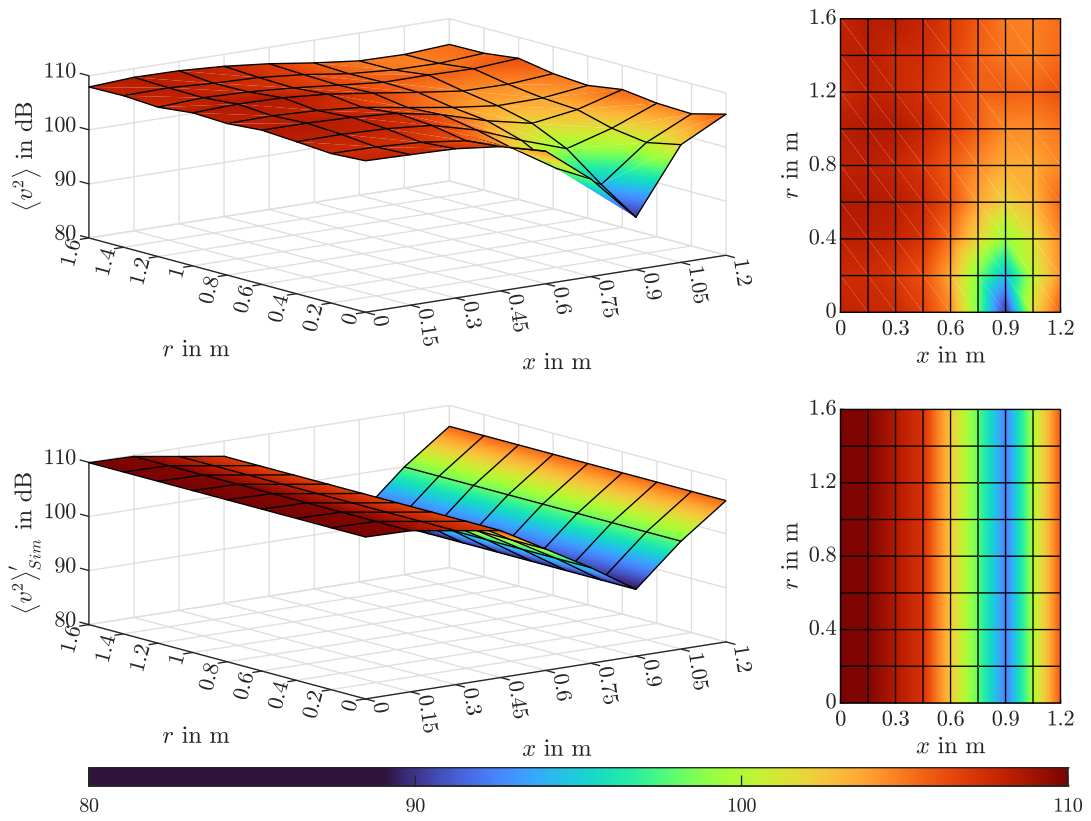


Abbildung D.29: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 5-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

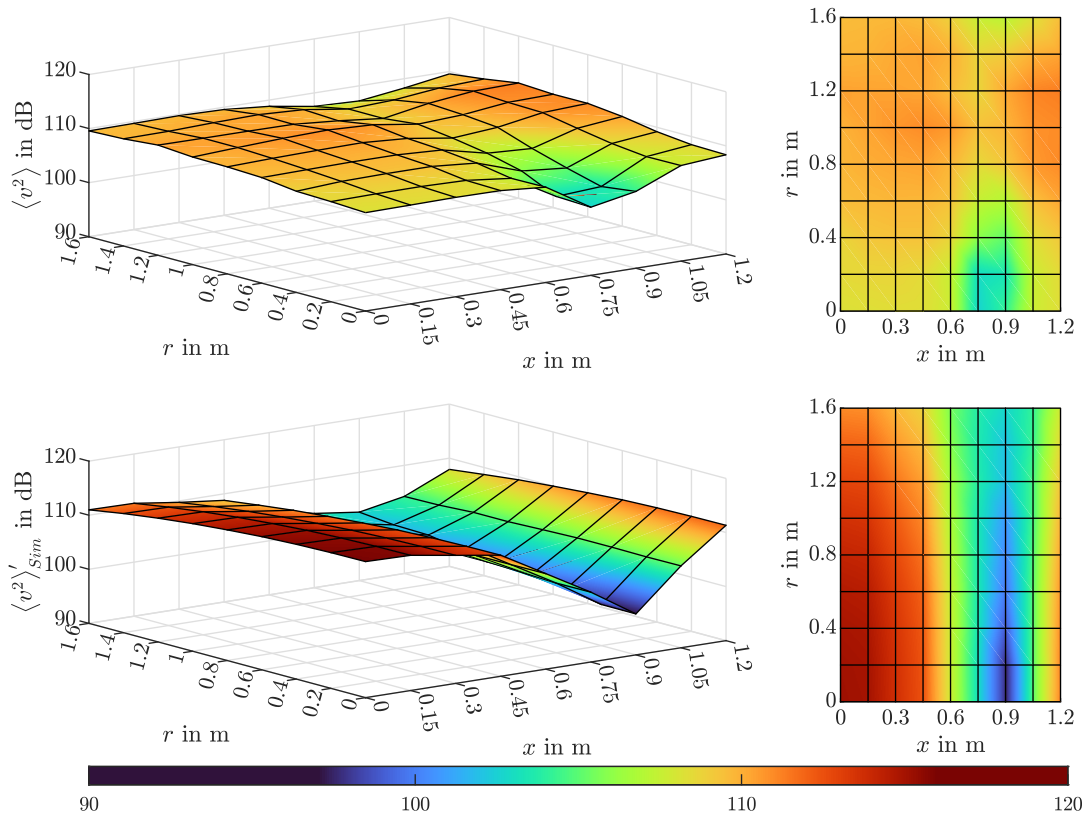


Abbildung D.30: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 5-1-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

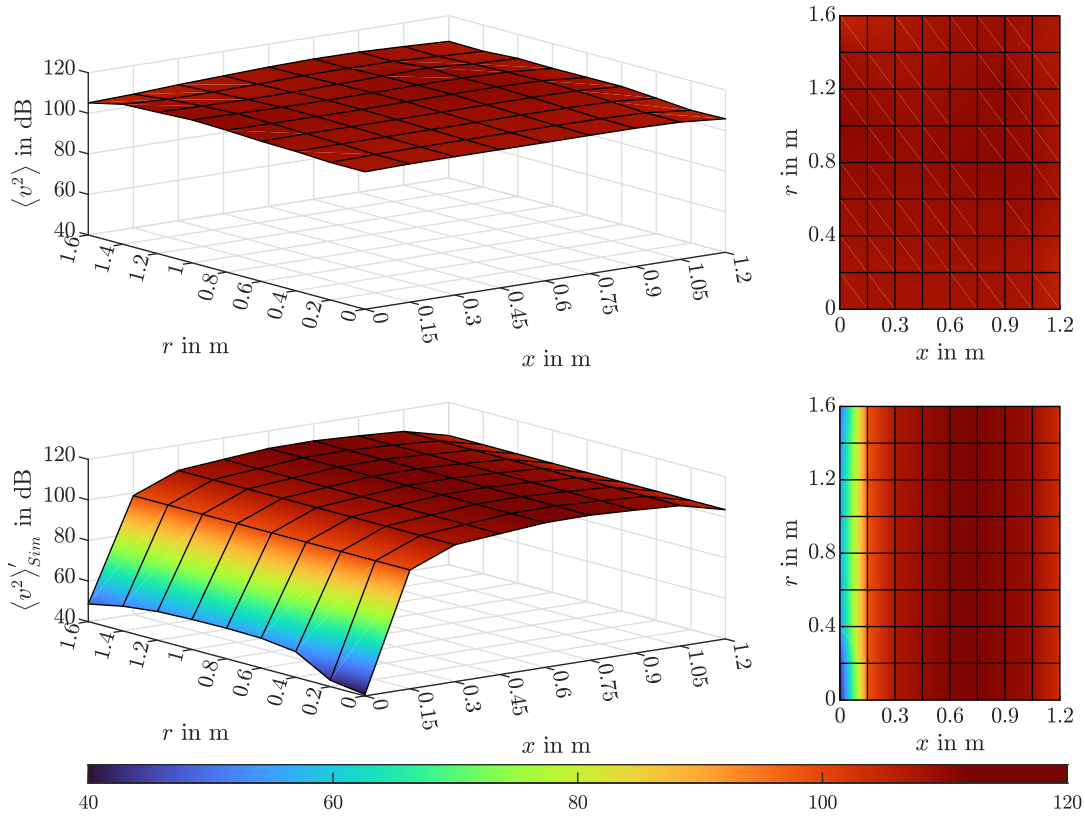


Abbildung D.31: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 6-0-0 im Hallraum ohne KA (MK 4)

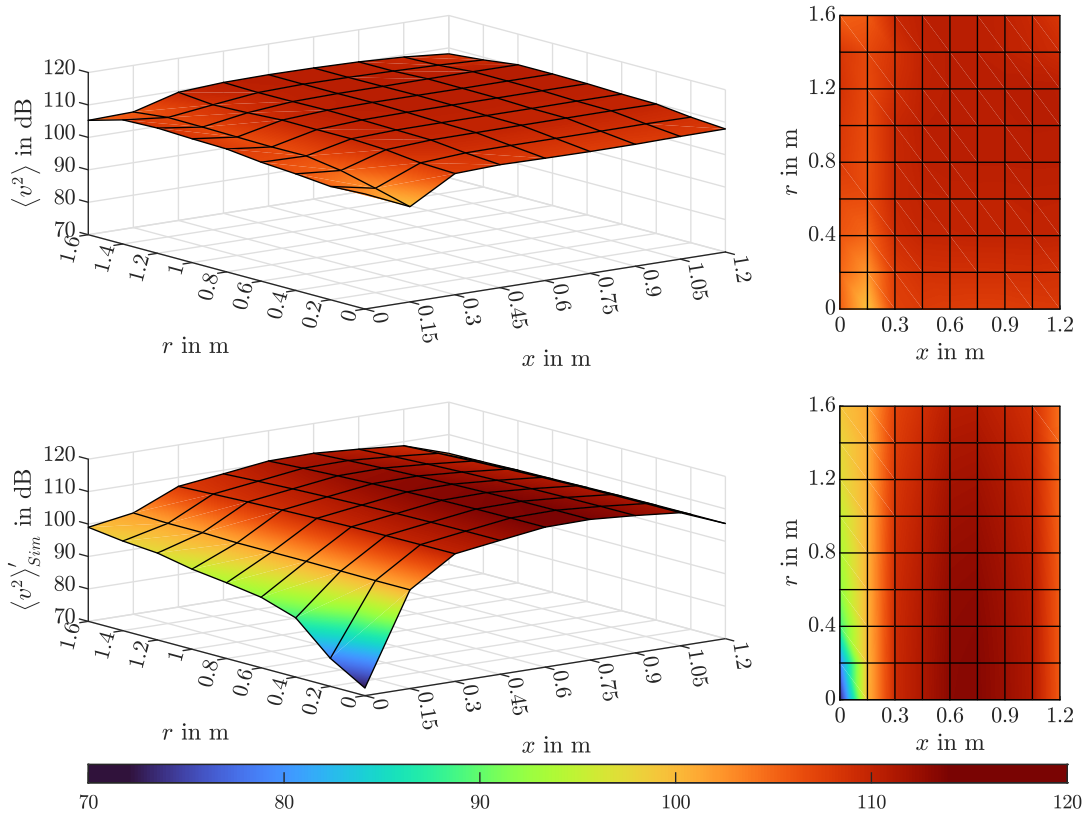


Abbildung D.32: Pegelverteilung von Messung $\langle v^2 \rangle$ und FEM-Simulation $\langle v^2 \rangle'_{Sim}$ der Raummode 6-0-1 im Hallraum ohne KA (MK 4)

D.2 Messergebnisse mit KA (MK 1, MK 2, MK 3)

D.2.1 Pegelverteilungen in Abhängigkeit der MK

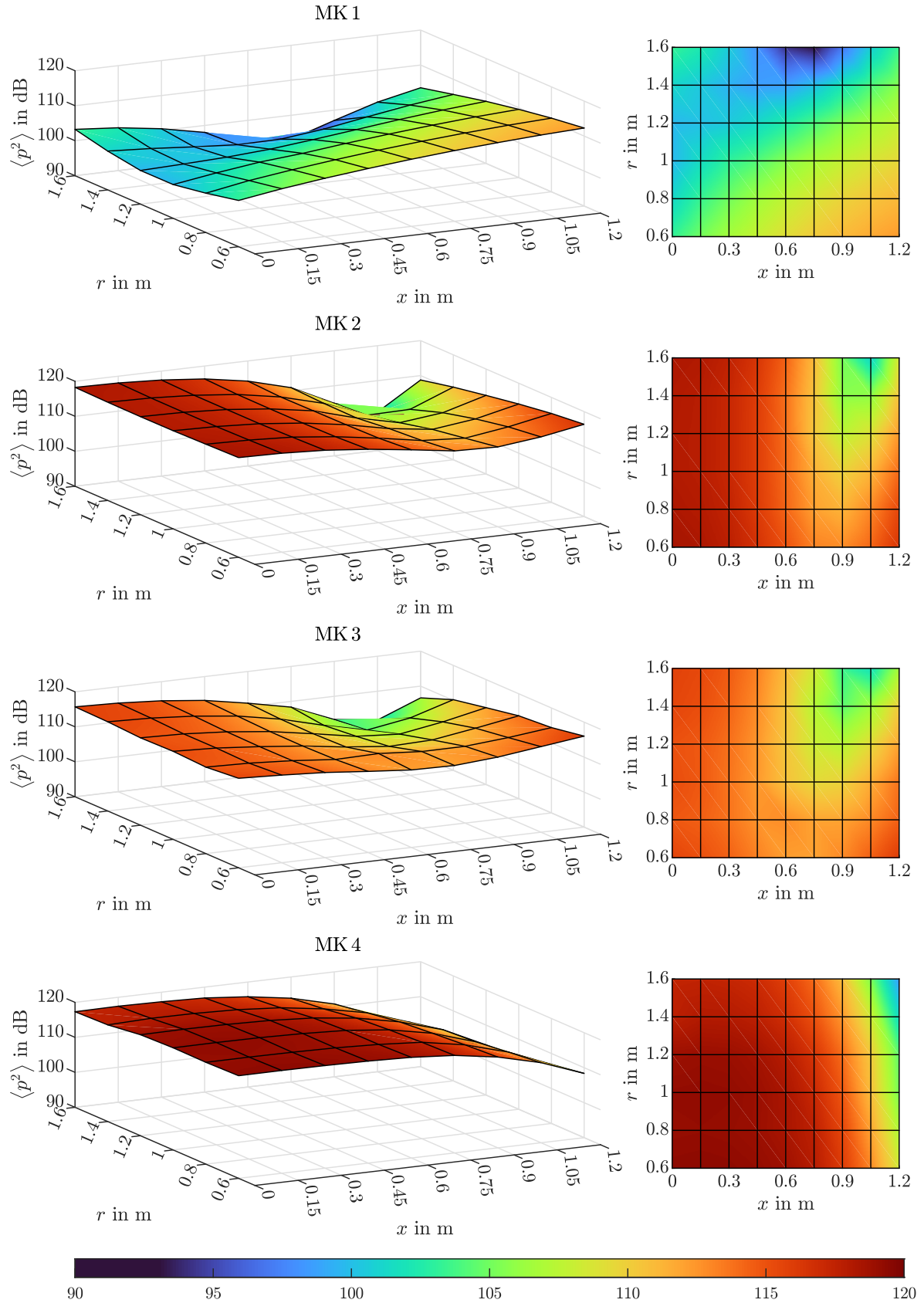
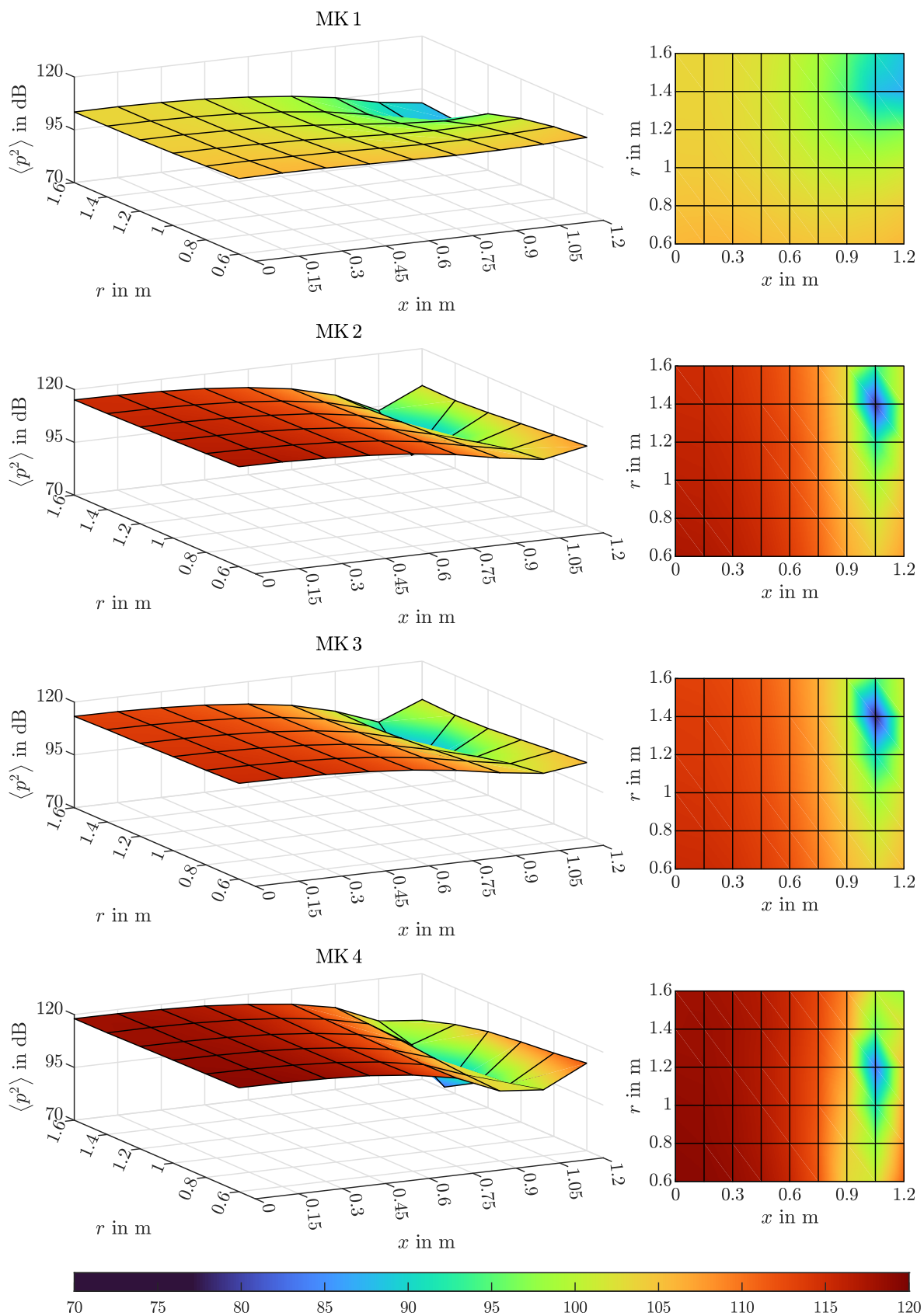
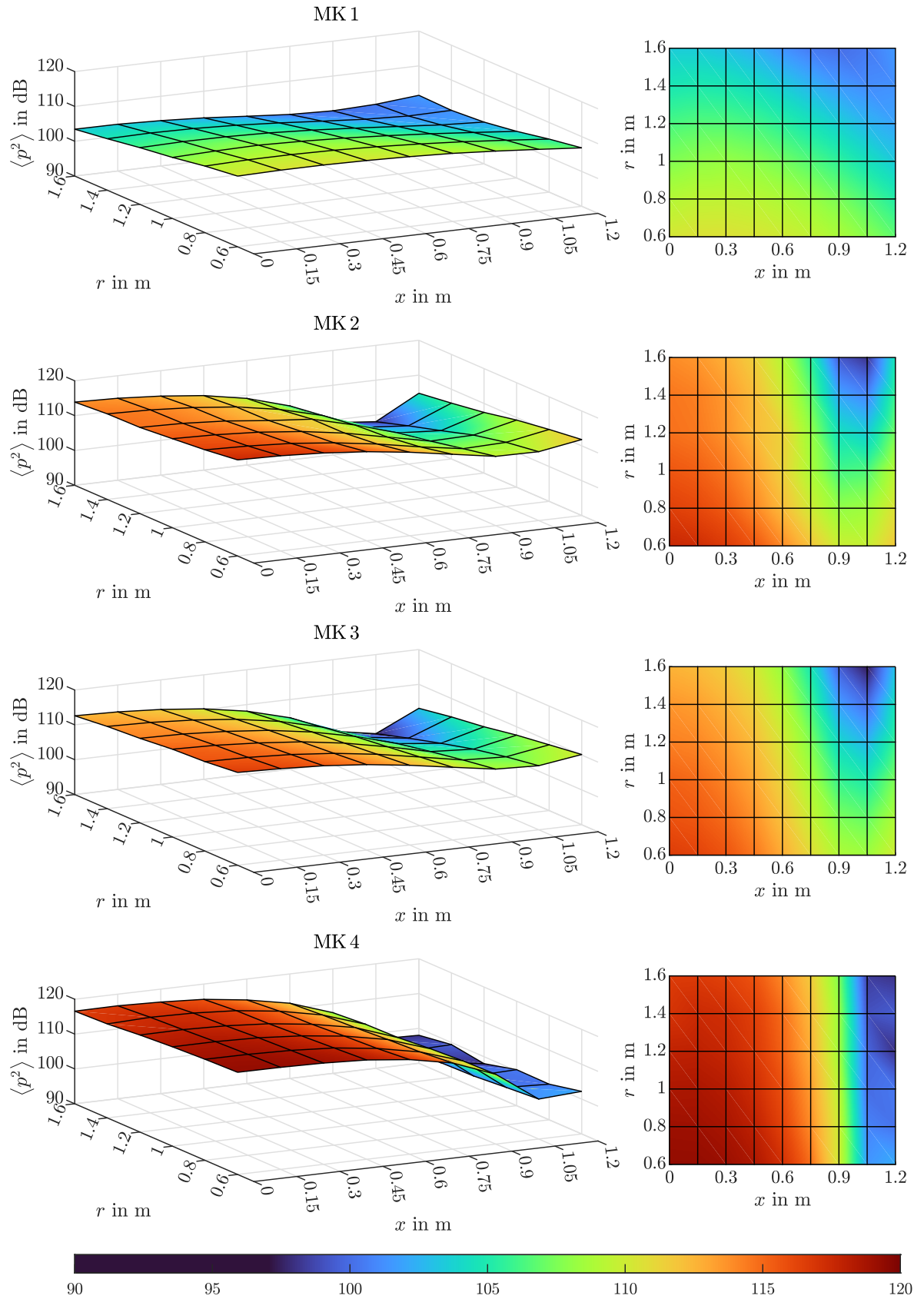
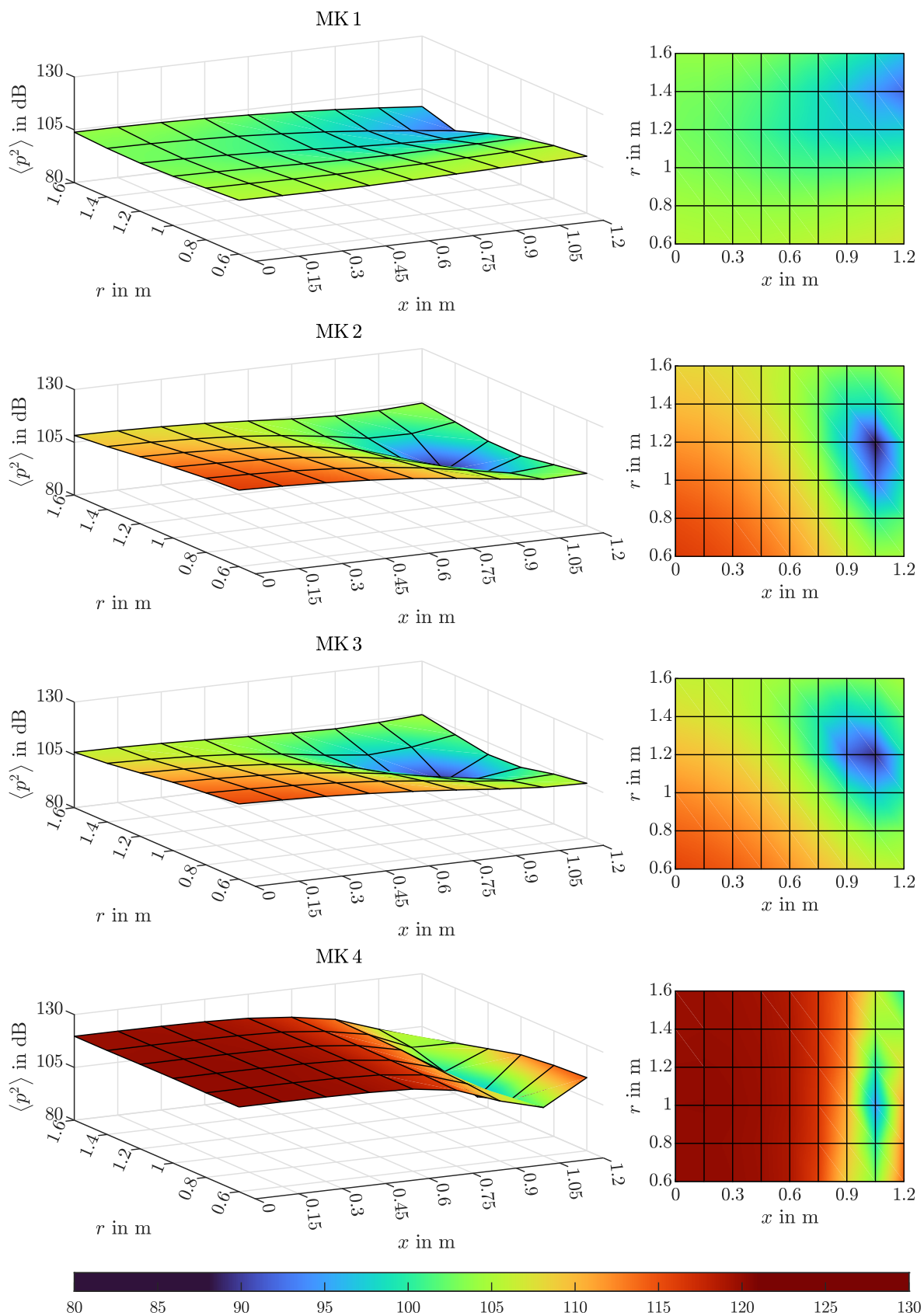
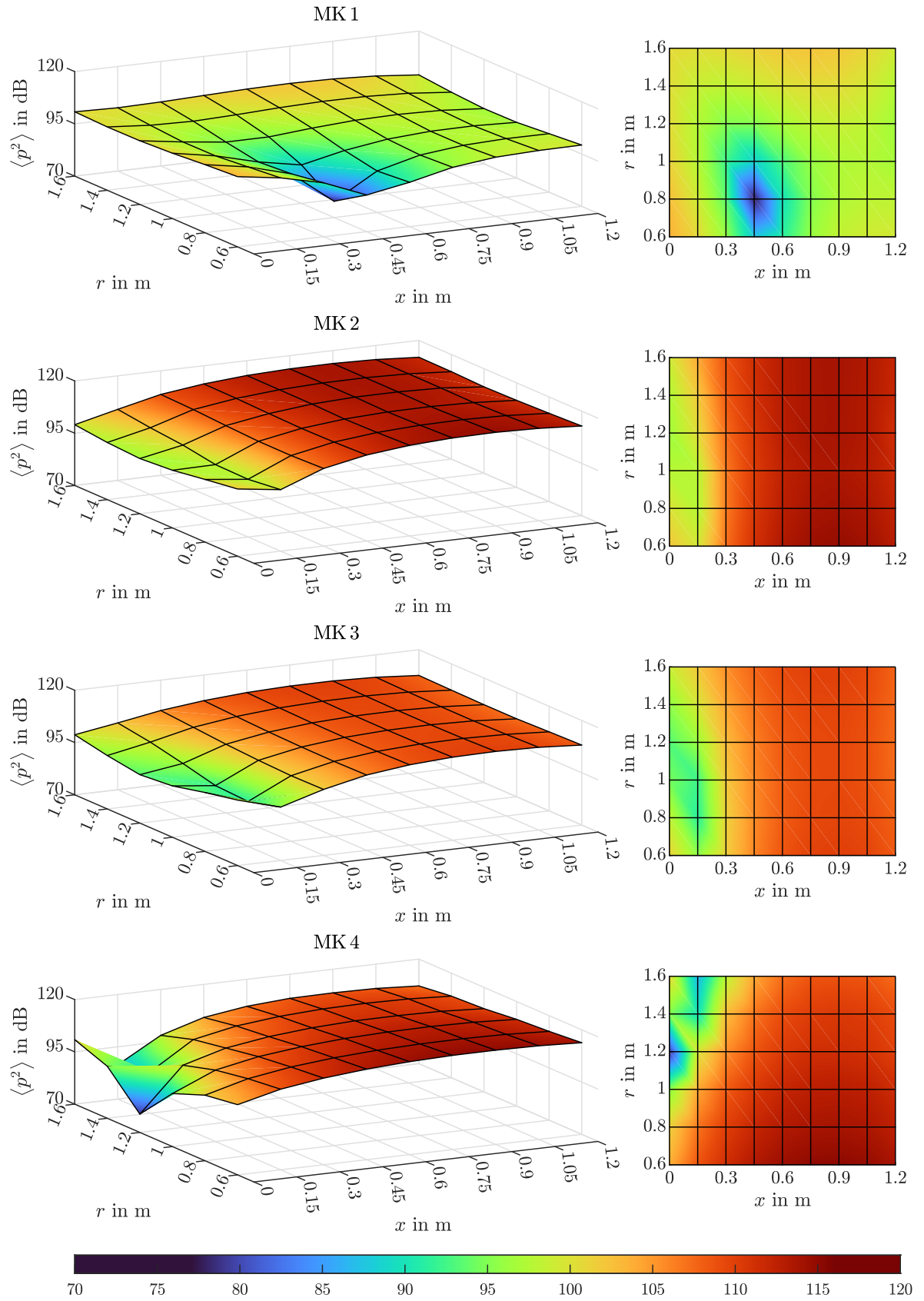


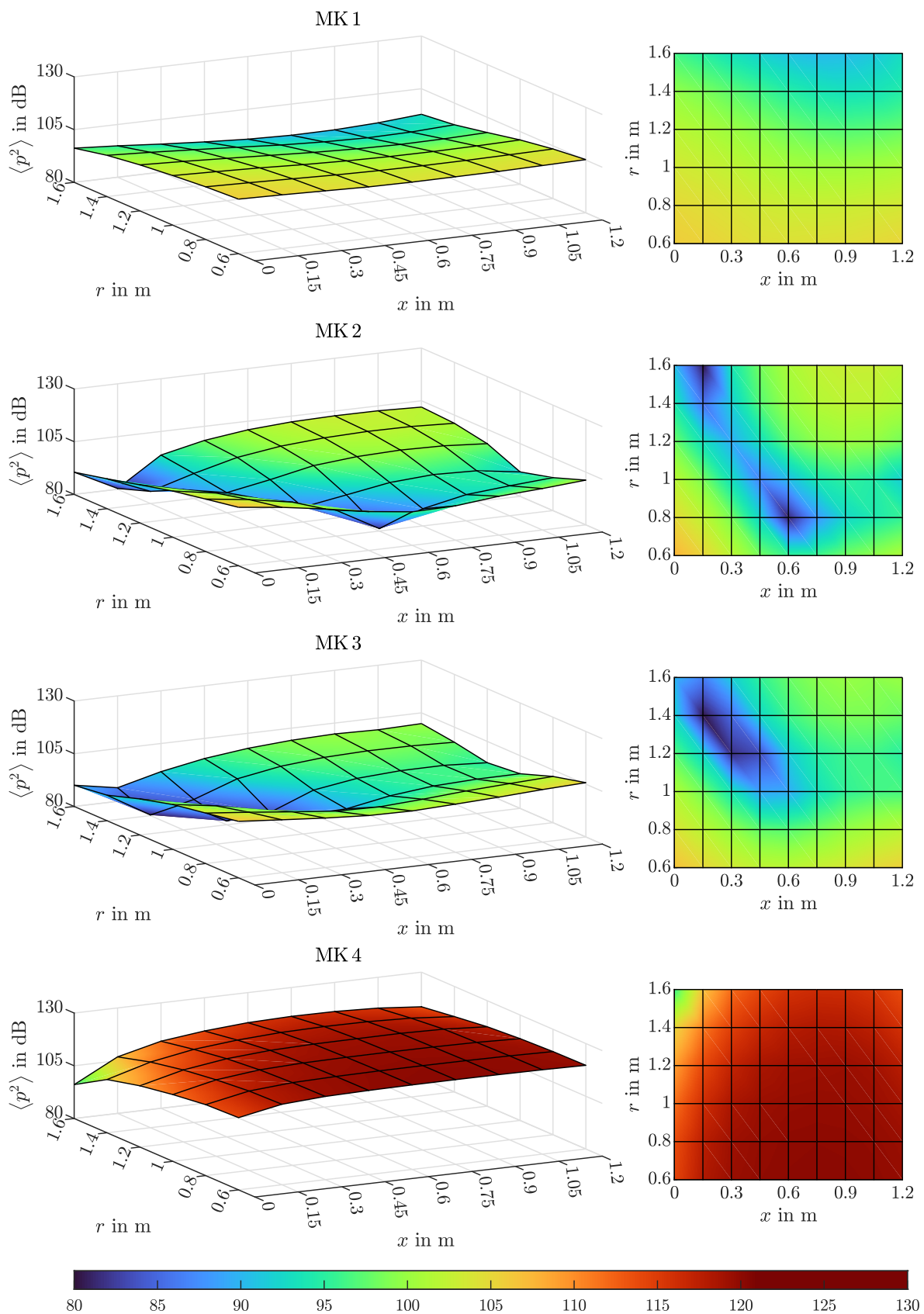
Abbildung D.33: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-0

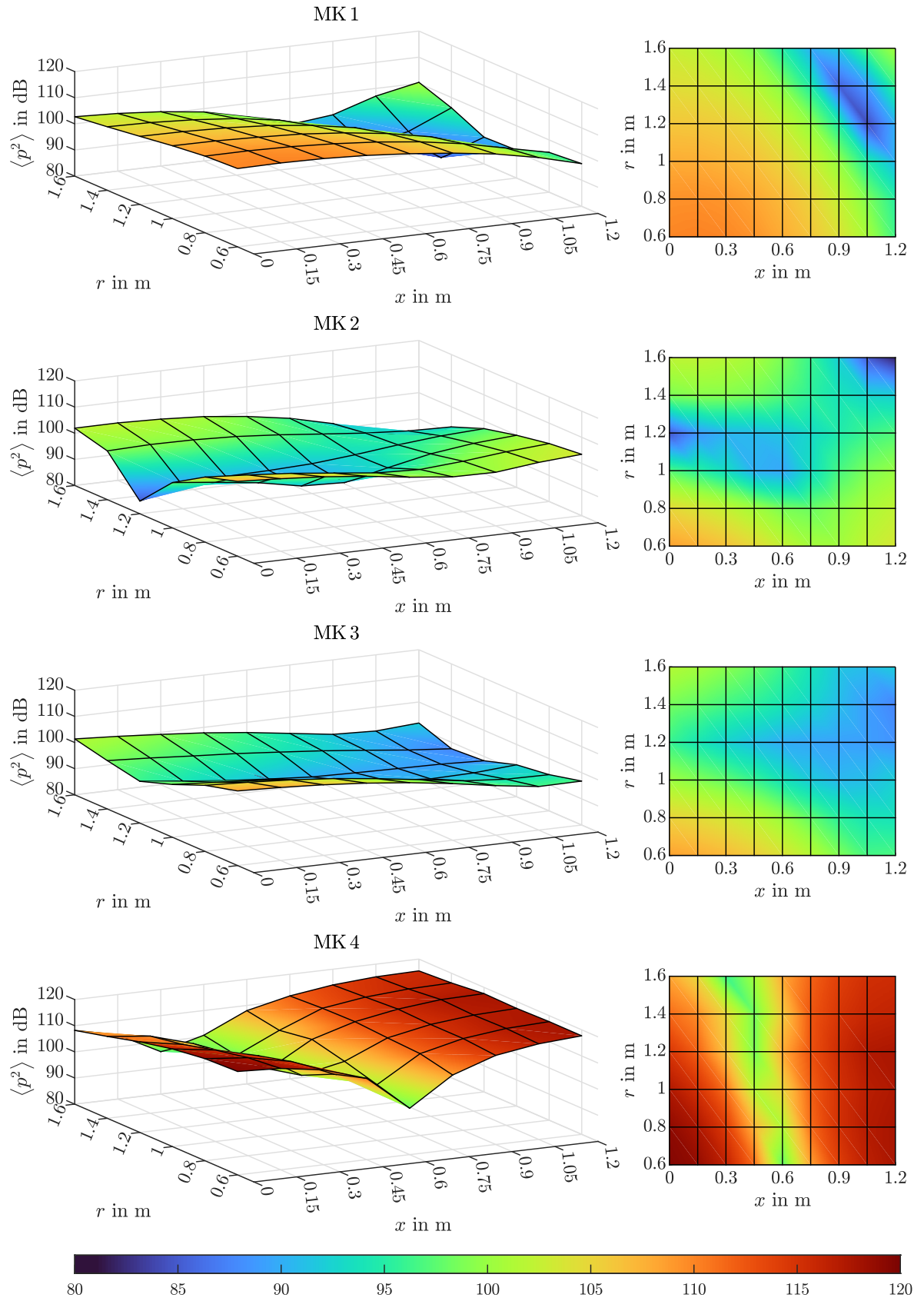

Abbildung D.34: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-1-0

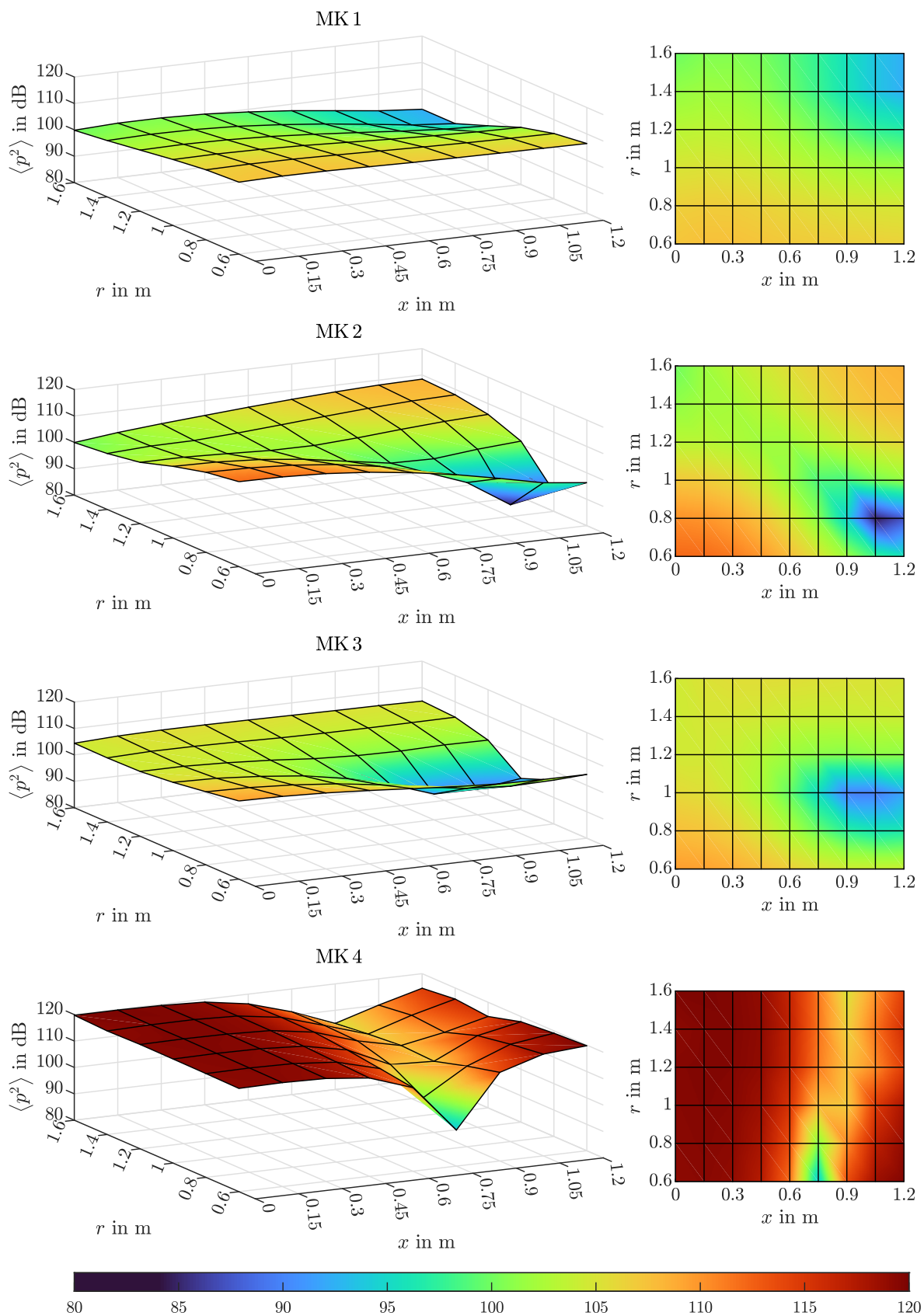
Abbildung D.35: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-1

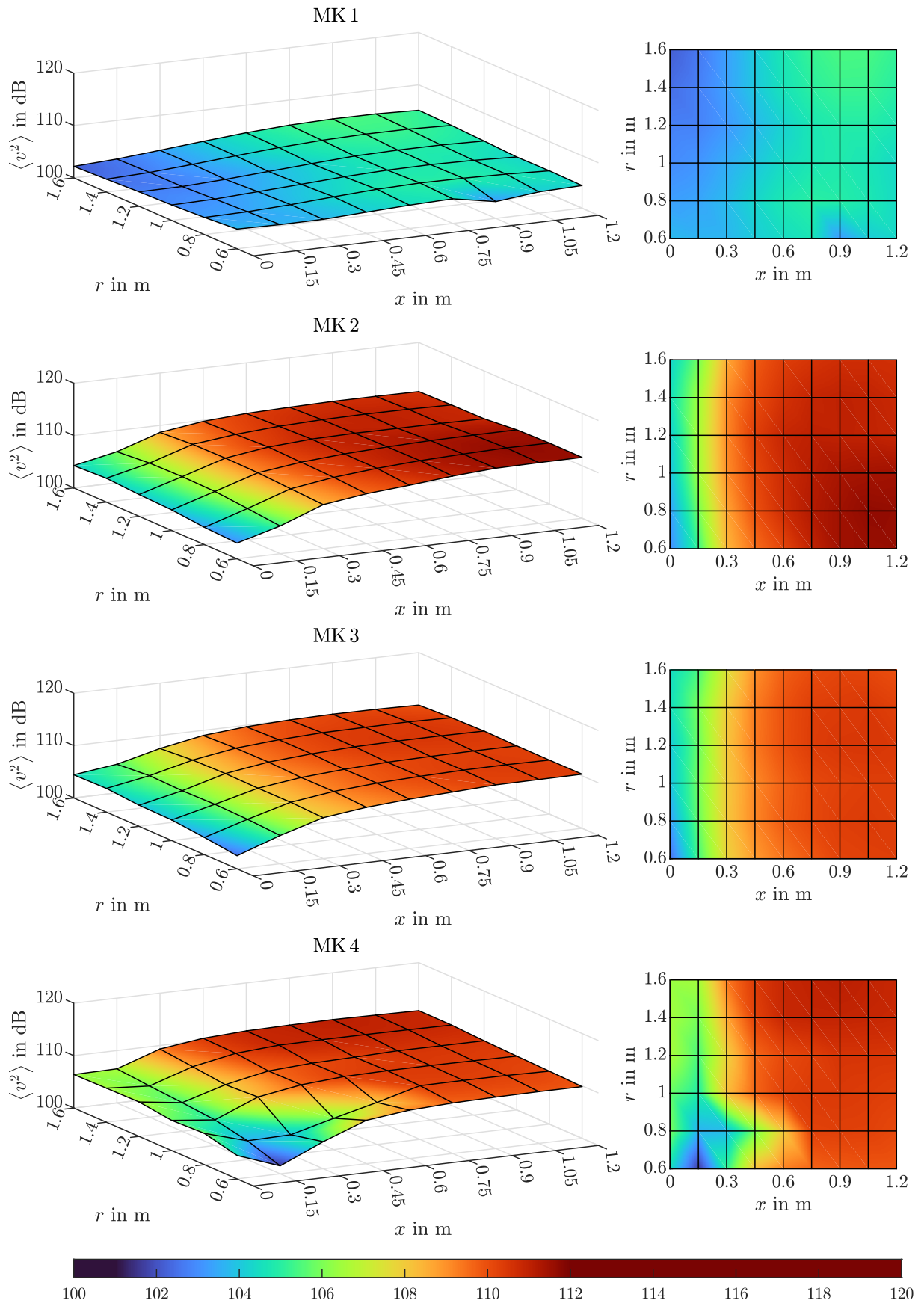
Abbildung D.36: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-1-1

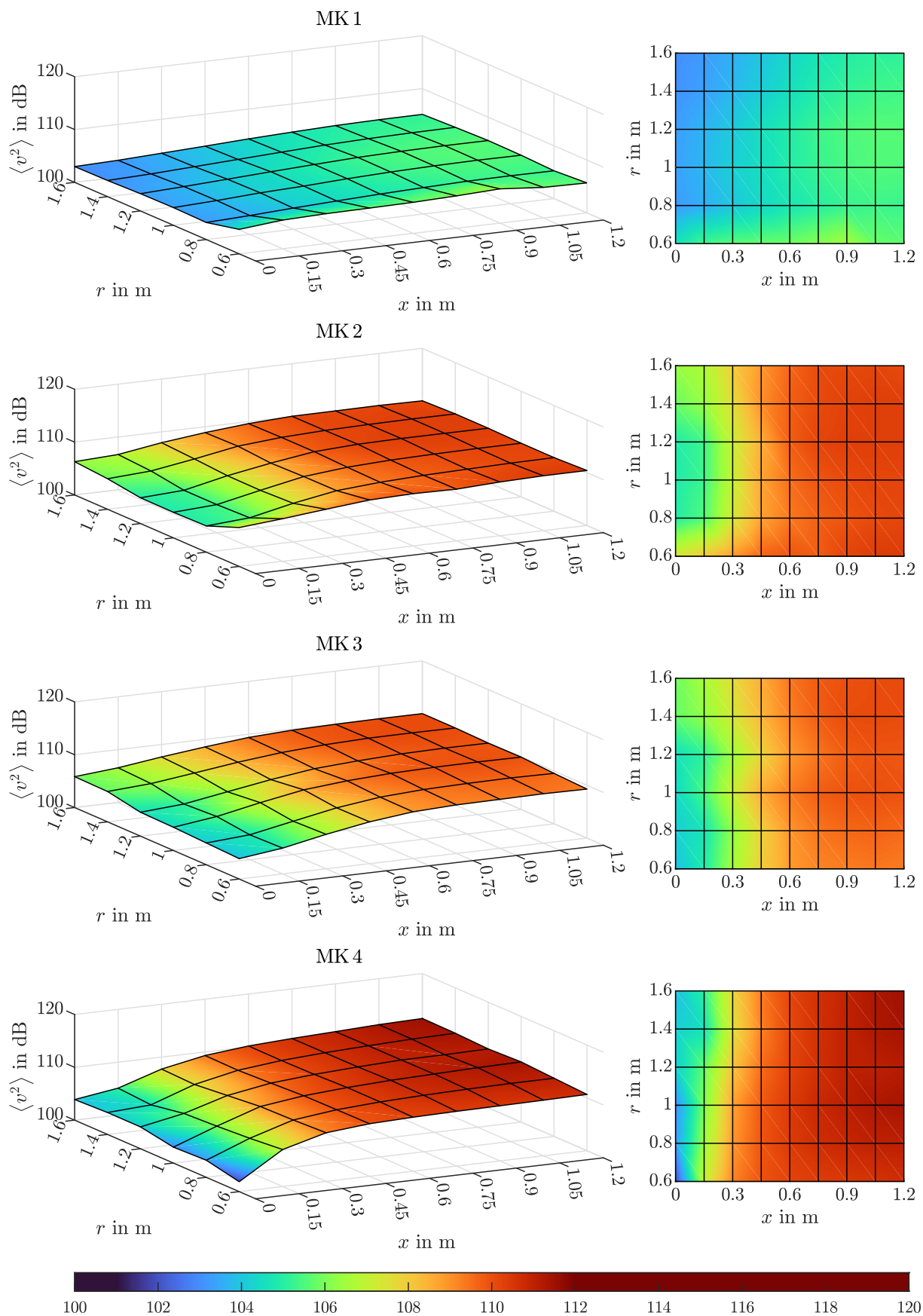
Abbildung D.37: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 5-0-0

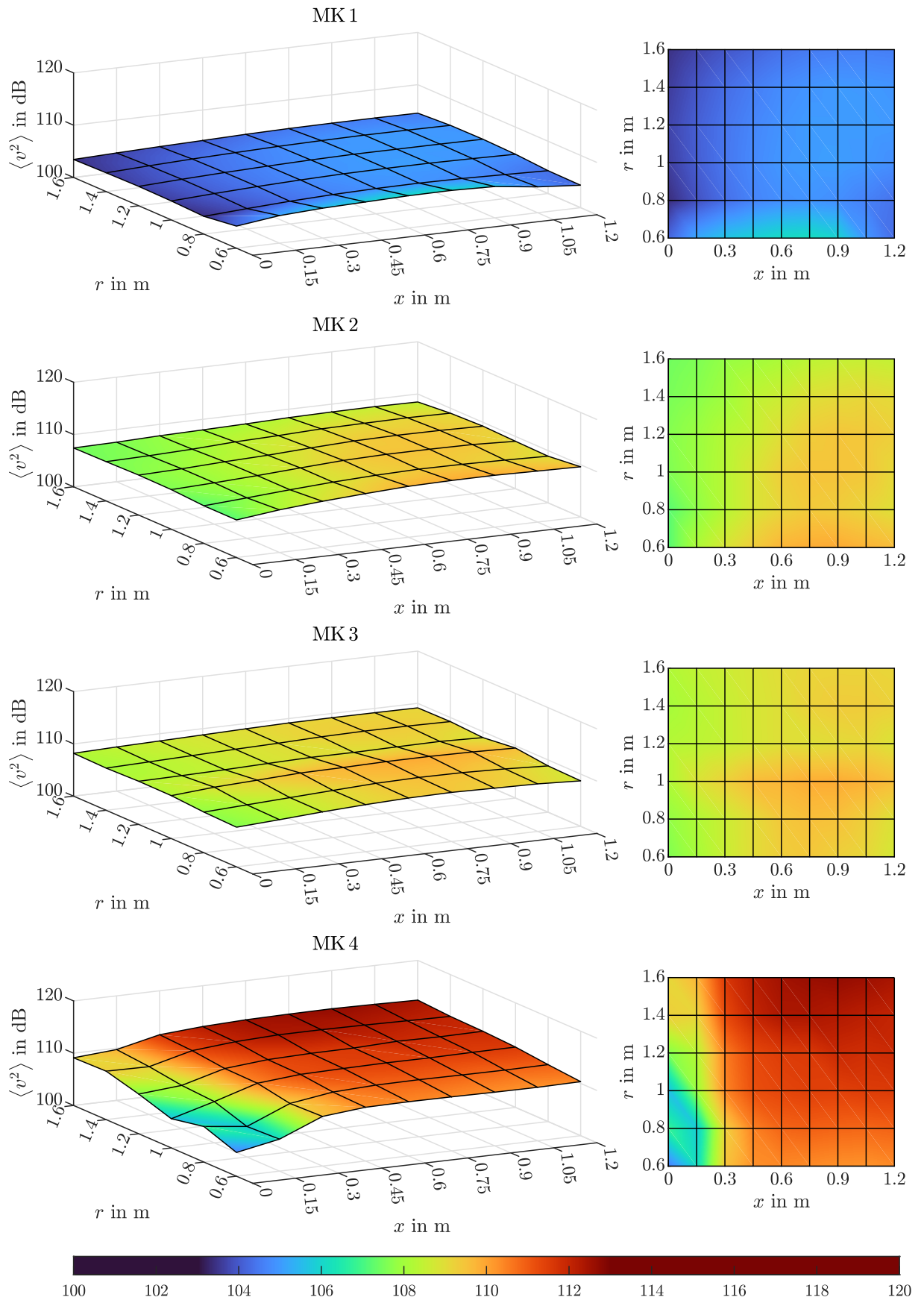
Abbildung D.38: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 5-1-1

Abbildung D.39: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-0

Abbildung D.40: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-1

Abbildung D.41: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-0

Abbildung D.42: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-1-0

Abbildung D.43: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-0-1

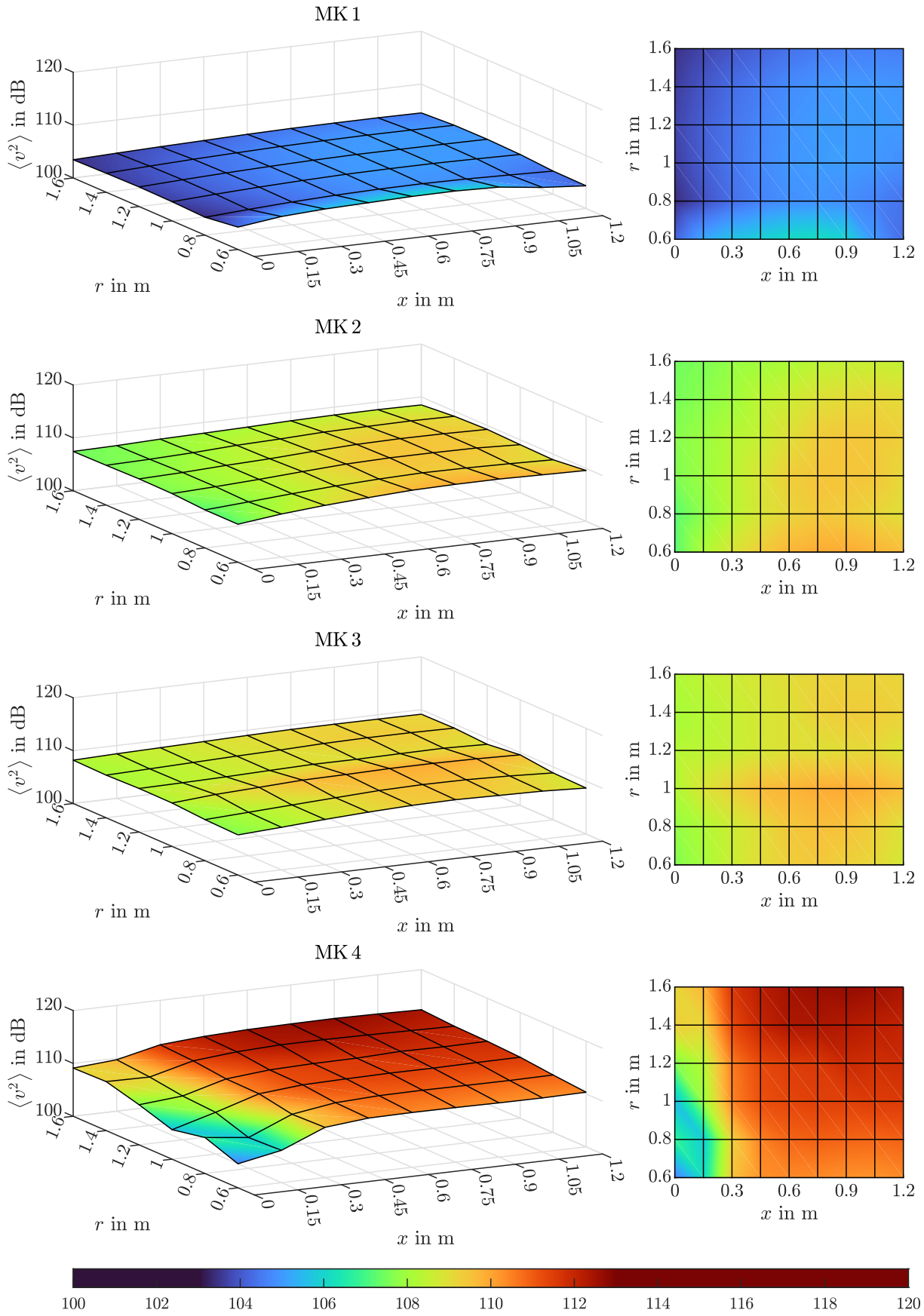
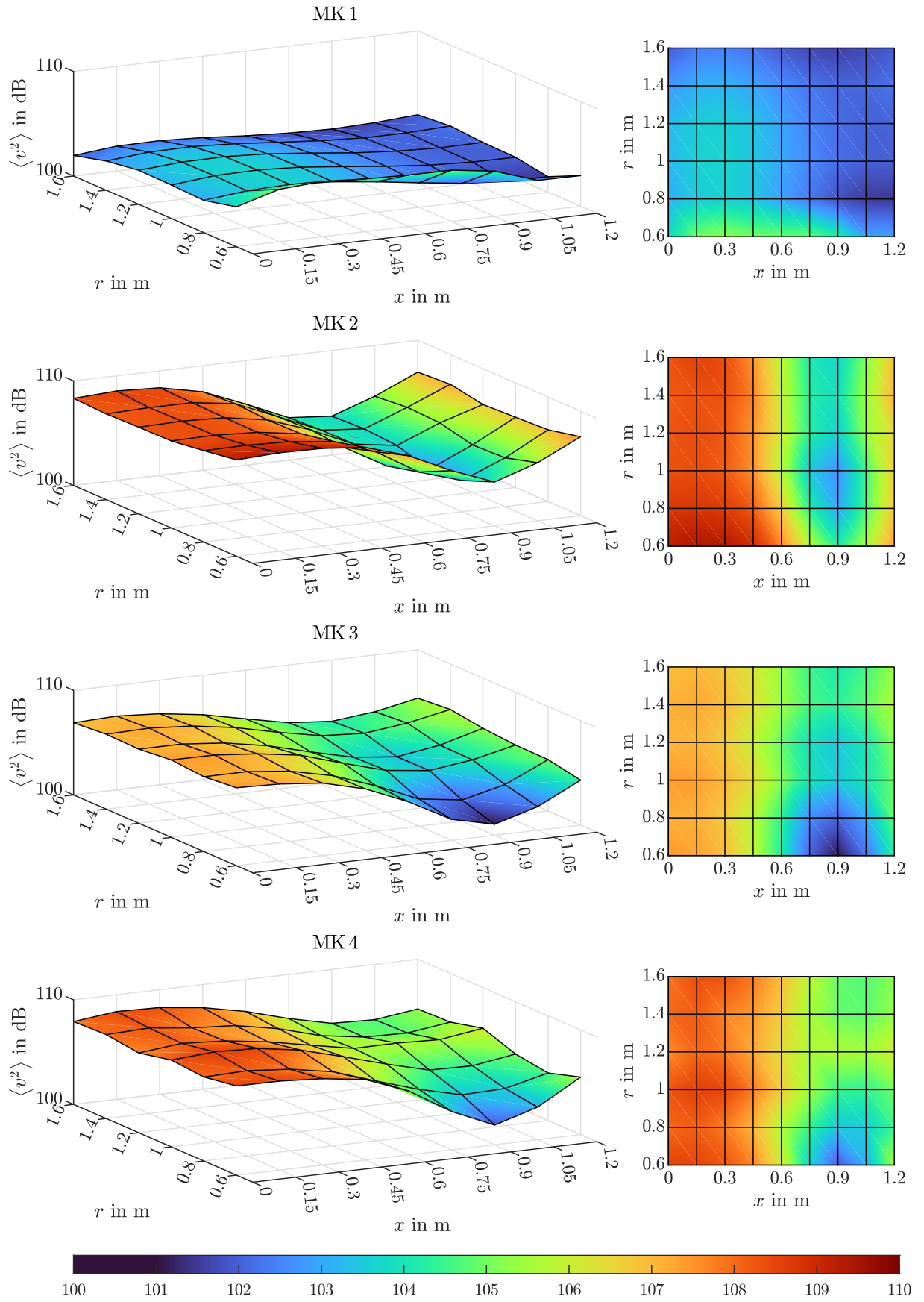
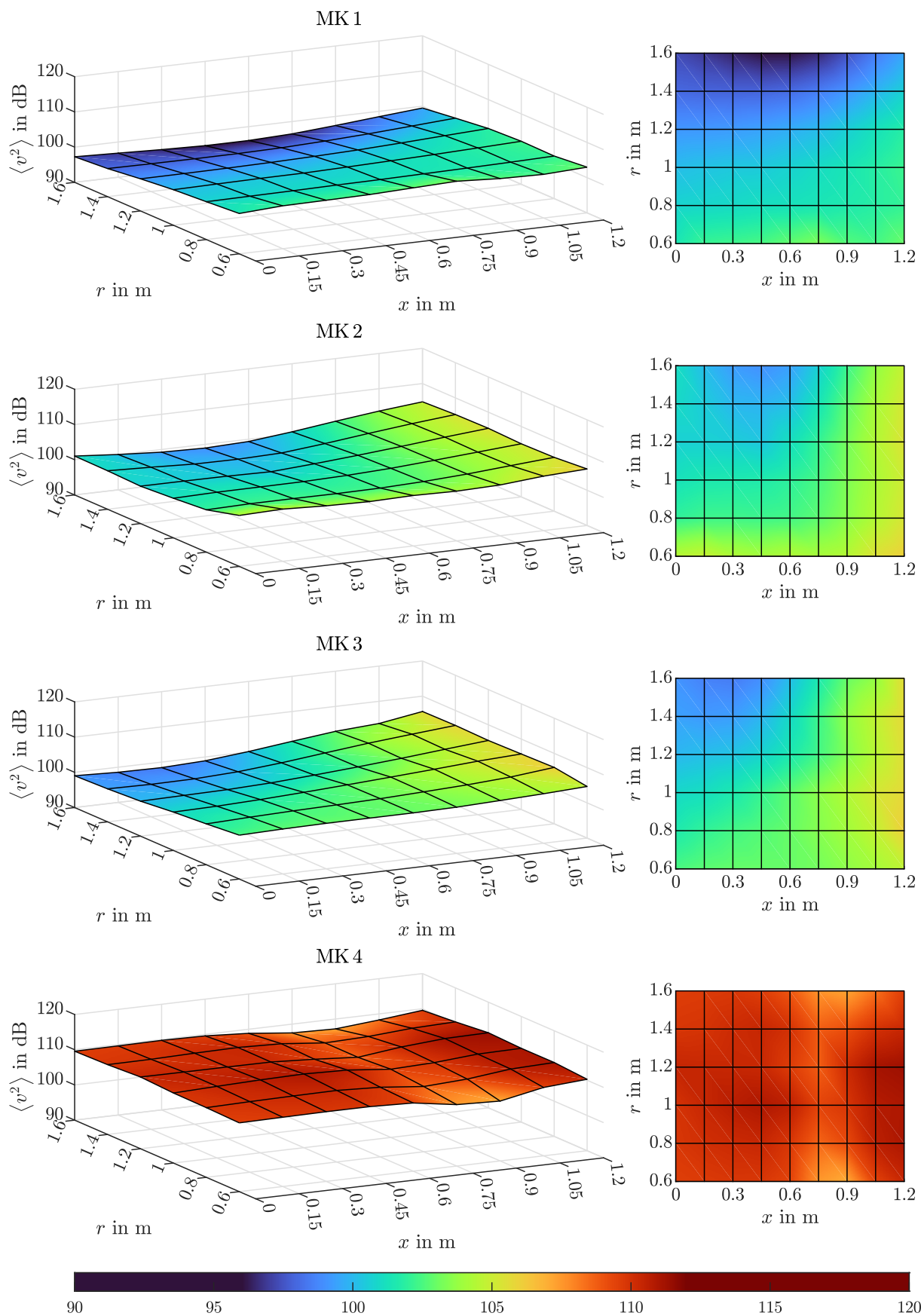
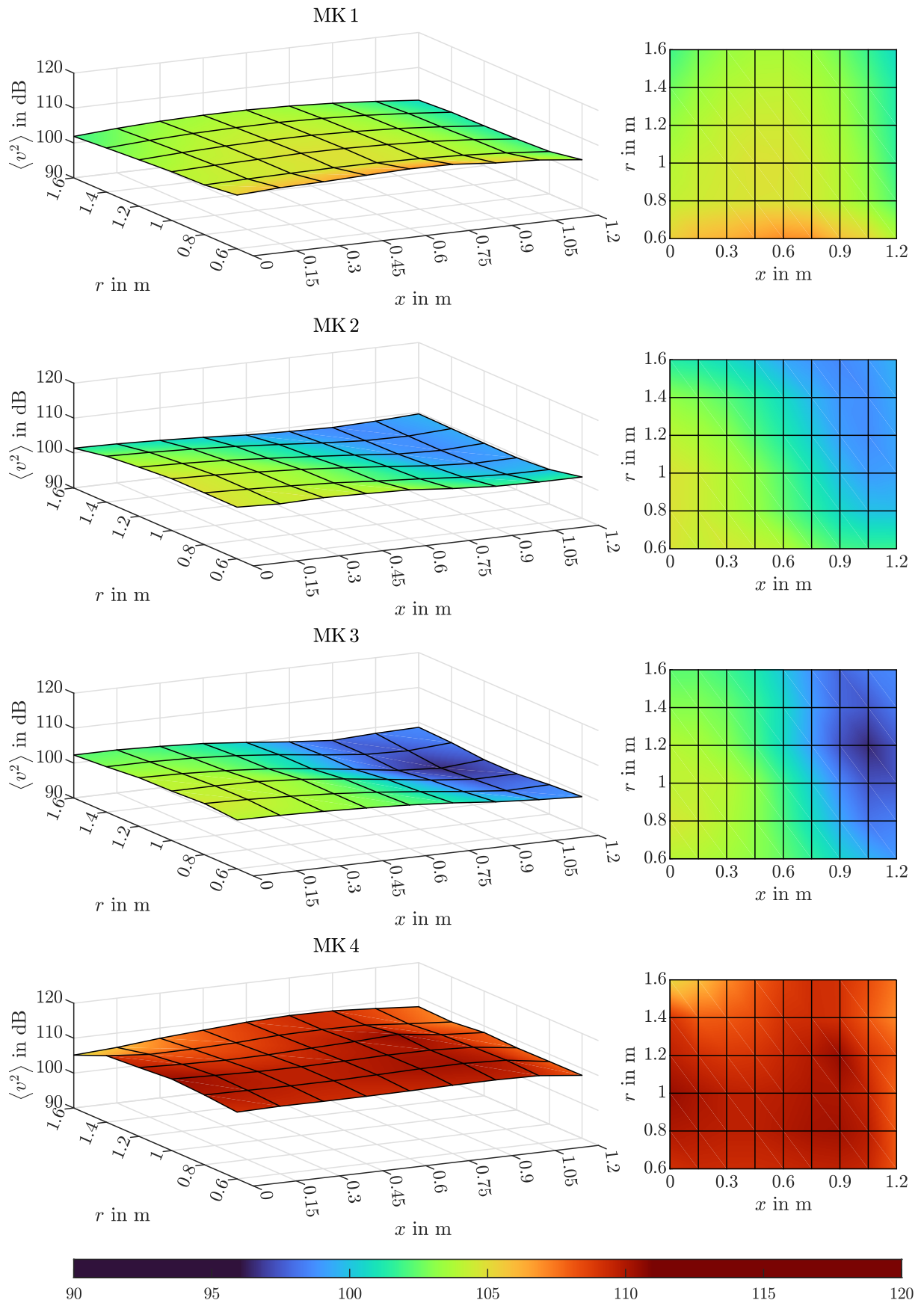
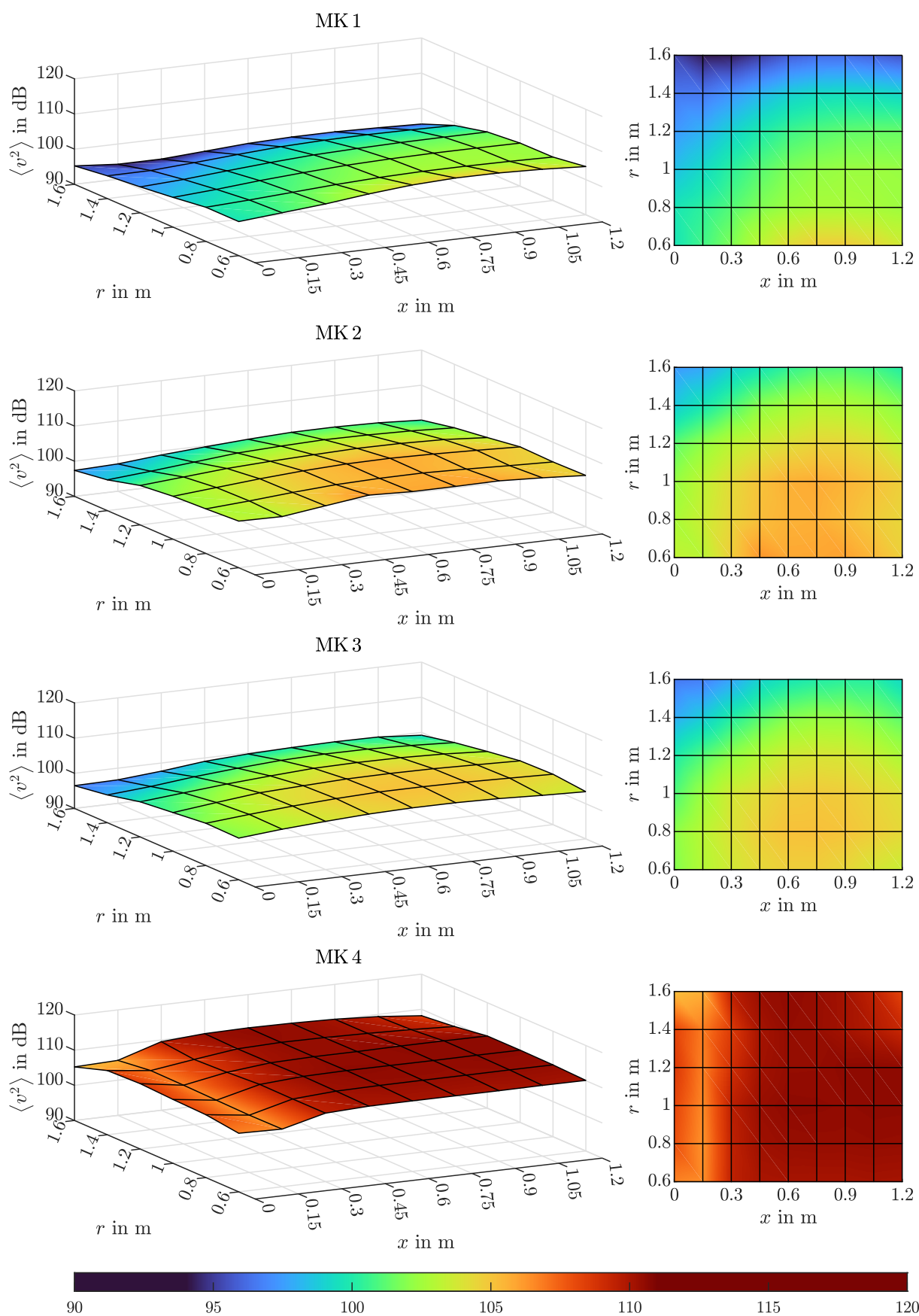


Abbildung D.44: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 4-1-1

Abbildung D.45: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 5-0-0

Abbildung D.46: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 5-1-1

Abbildung D.47: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-0

Abbildung D.48: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für die Raummode 6-0-1

D.2.2 Pegelverlauf entlang der Raumkante

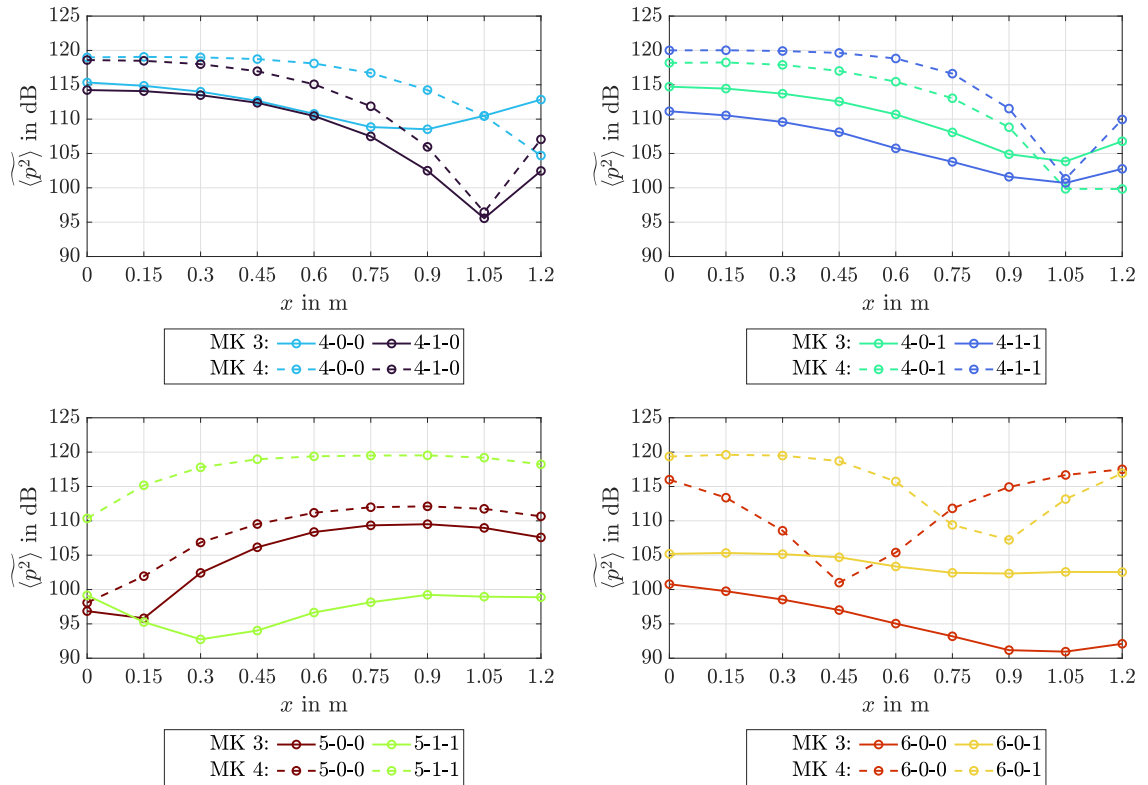


Abbildung D.49: Pegelverlauf von $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position entlang der Kante x für MK 3 (durchgezogene Linie) und MK 4 (strichlierte Linie)

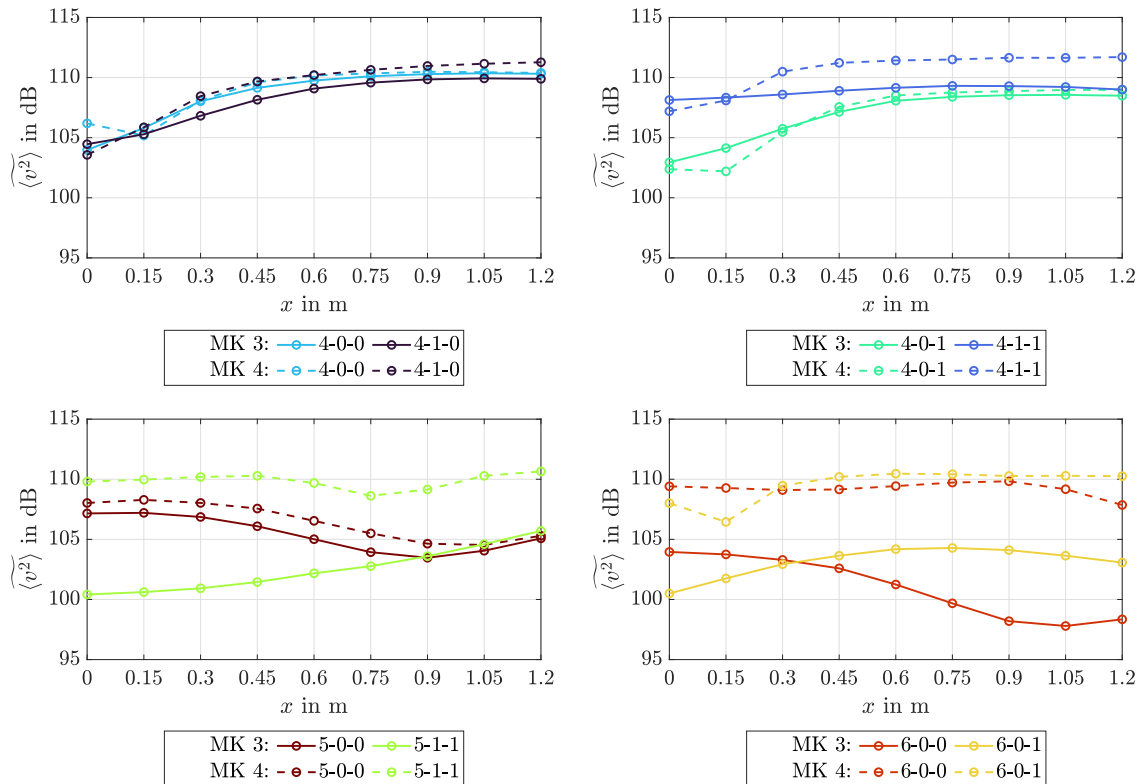


Abbildung D.50: Pegelverlauf von $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position entlang der Kante x für MK 3 (durchgezogene Linie) und MK 4 (strichlierte Linie)

D.2.3 Vergleich der absoluten Pegel

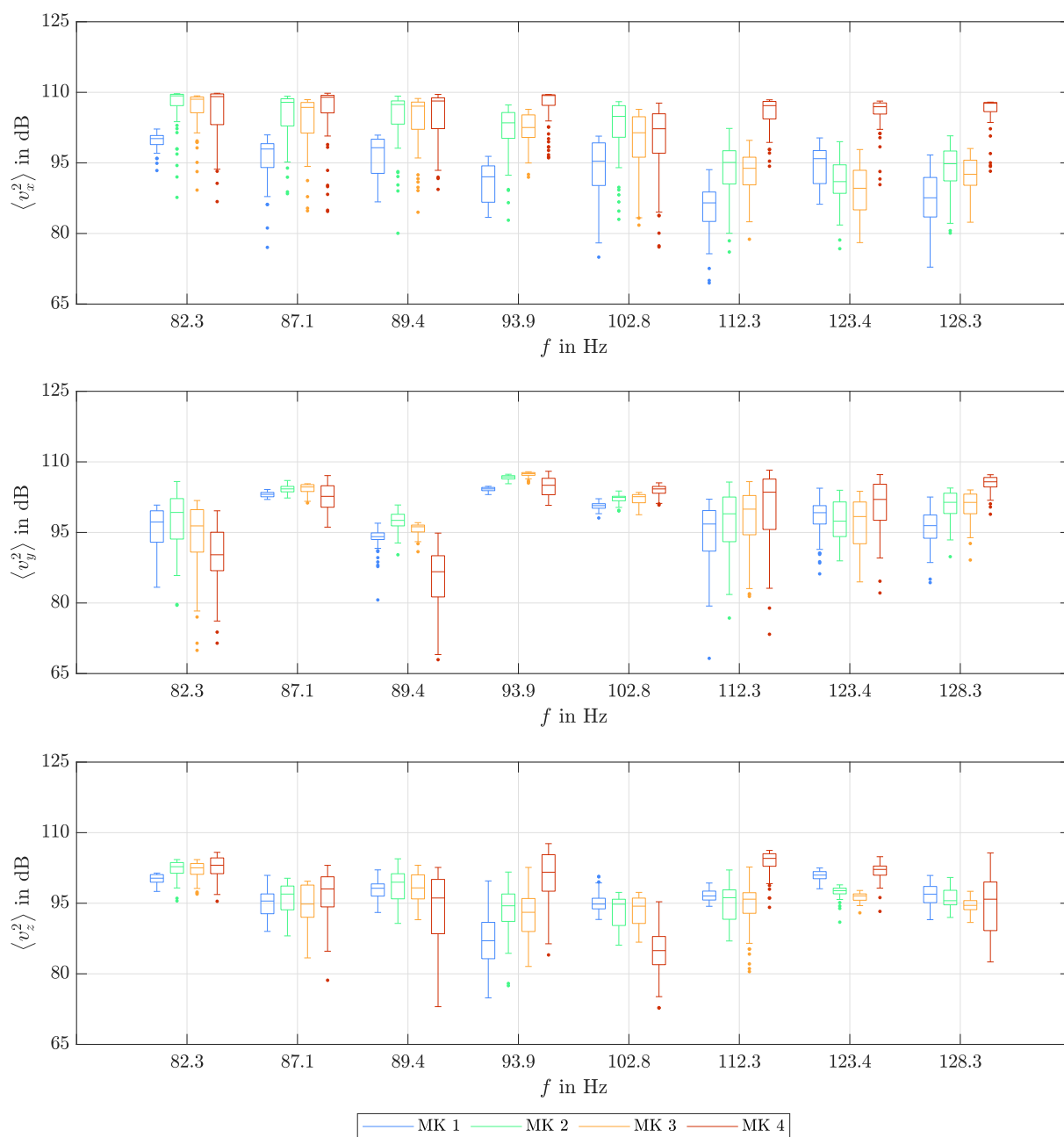


Abbildung D.51: Gemessene Pegel von $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_y^2 \rangle$ und $\langle v_z^2 \rangle$ in Abhängigkeit der MK für jede Raummodenfrequenz

D.2.4 Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Anregungssignals

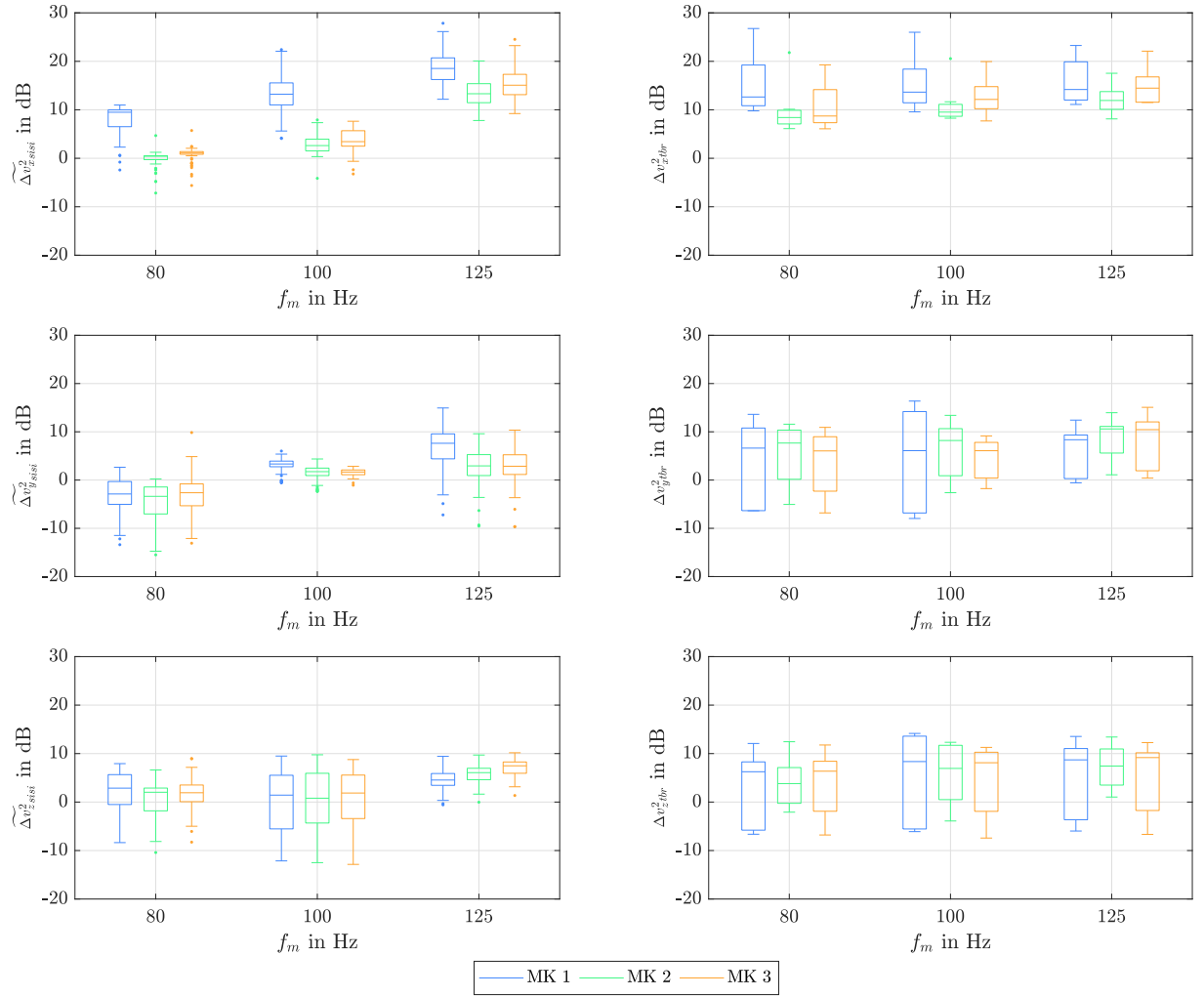
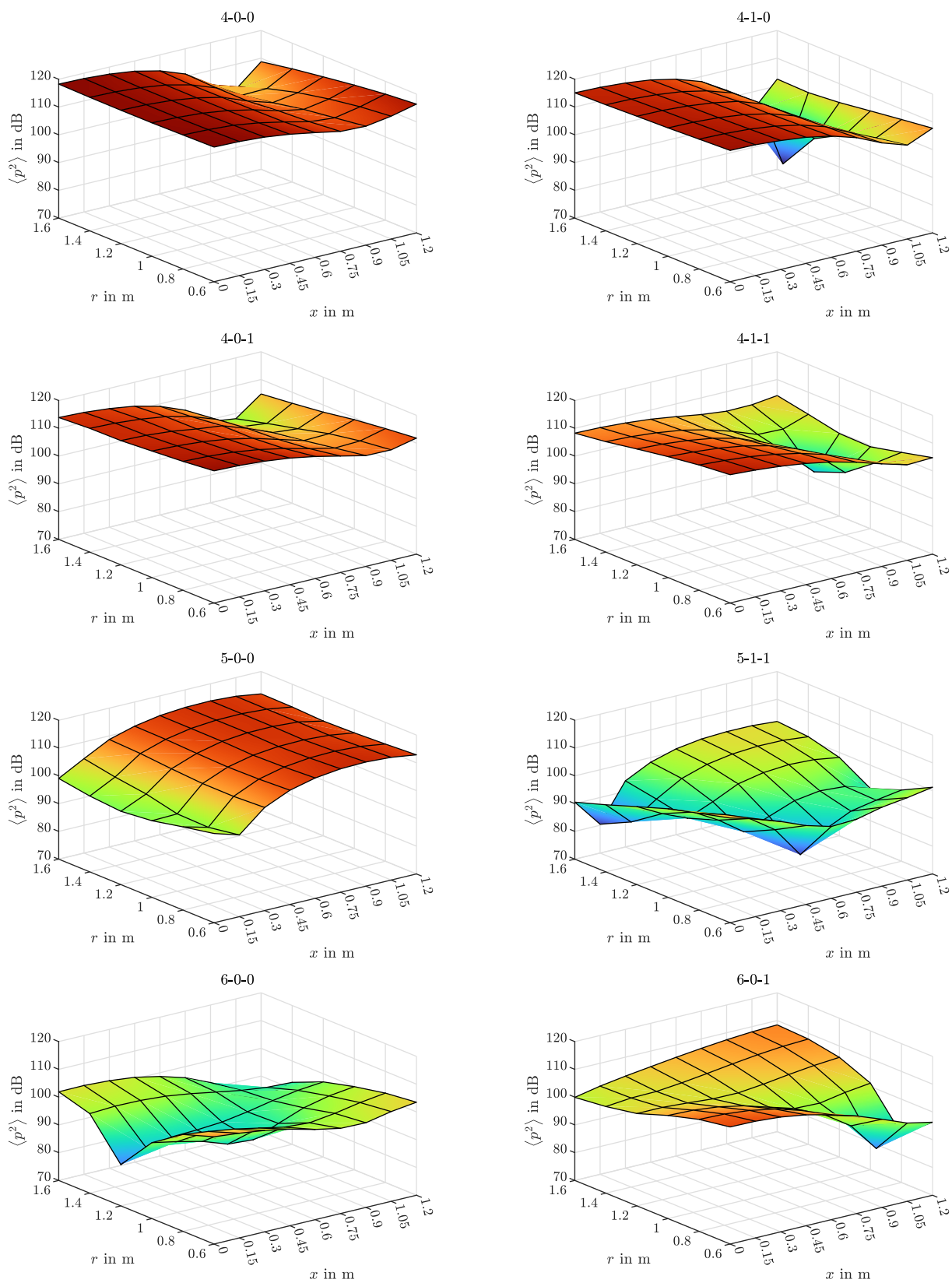
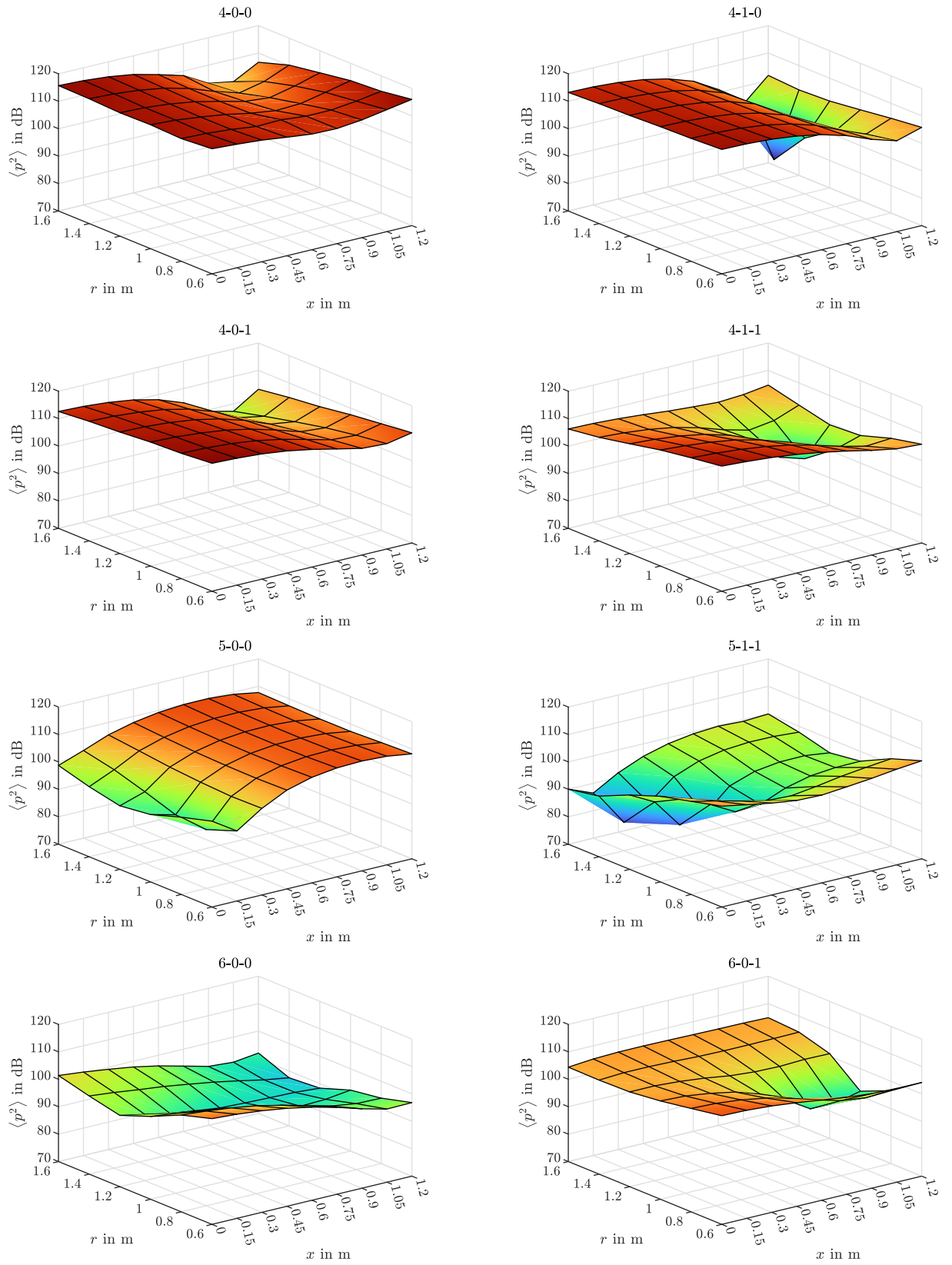
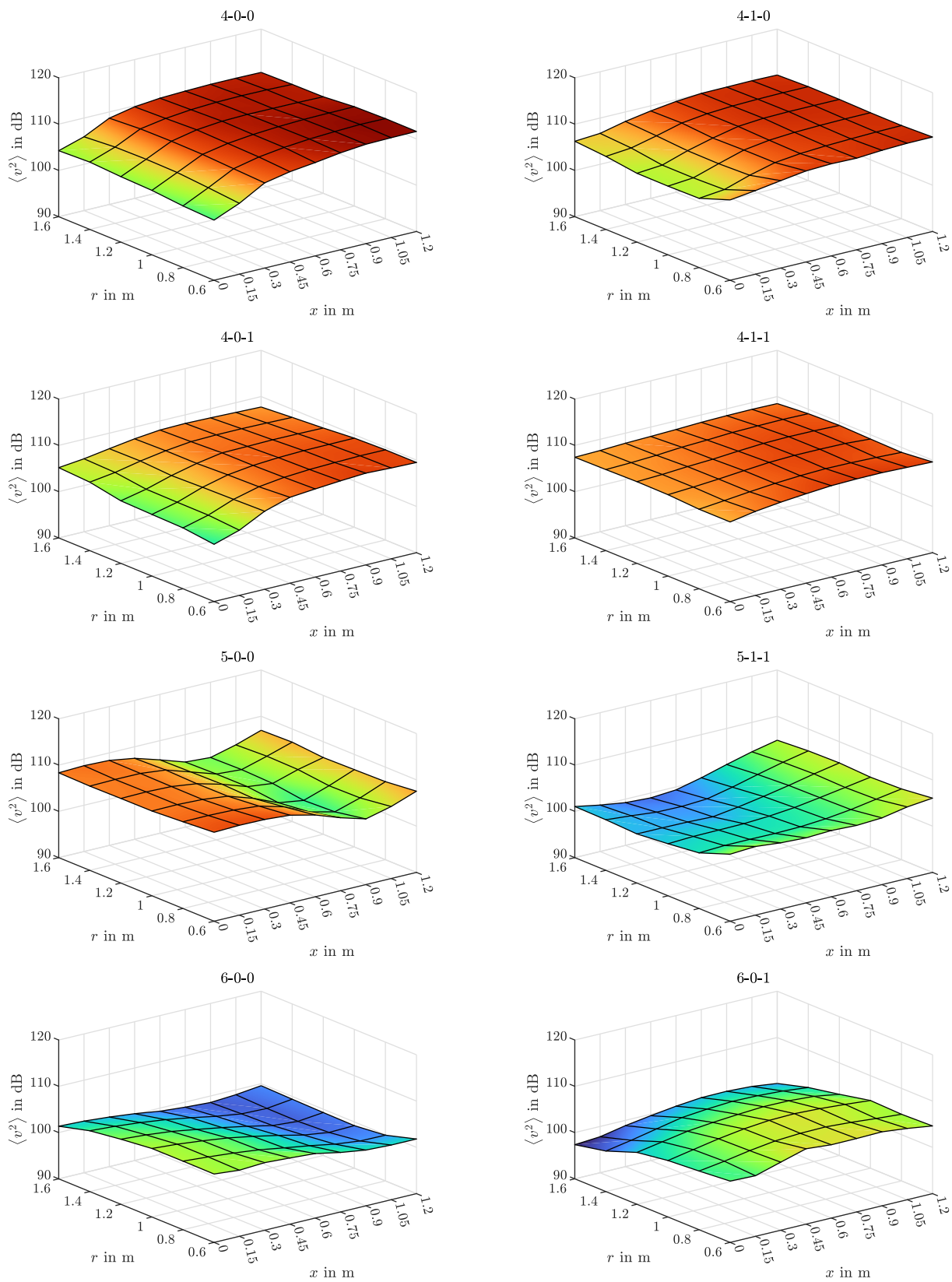


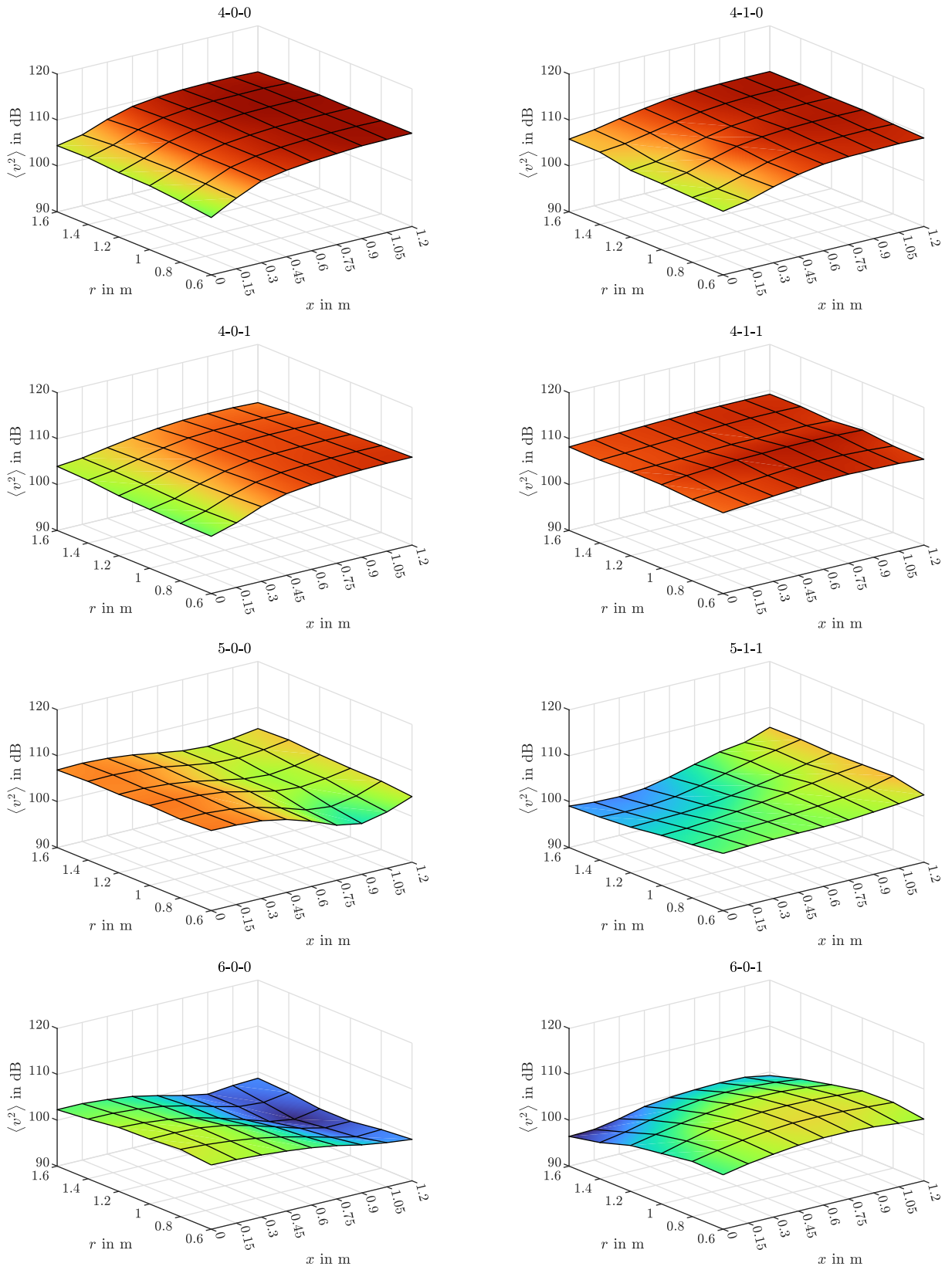
Abbildung D.52: Vergleich der aus den Sisi- und Tbr-Messwerten berechneten Pegeldifferenzen $\widetilde{\Delta v_{x\,sisi}^2}$, $\widetilde{\Delta v_{y\,sisi}^2}$, $\widetilde{\Delta v_{z\,sisi}^2}$, $\Delta v_{x\,tbr}^2$, $\Delta v_{y\,tbr}^2$, $\Delta v_{z\,tbr}^2$ zwischen MK 4 und den MK mit KA (MK 1, MK 2, MK 3) für alle $\langle v^2 \rangle$ -Komponenten

D.2.5 Pegelverteilung in Abhängigkeit der Frequenz

Abbildung D.53: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position aller Raummodenfrequenzen für MK 2

Abbildung D.54: $\langle p^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position aller Raummodenfrequenzen für MK 3

Abbildung D.55: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position aller Raummodenfrequenzen für MK 2

Abbildung D.56: $\langle v^2 \rangle$ in Abhängigkeit der Position aller Raummodenfrequenzen für MK 3