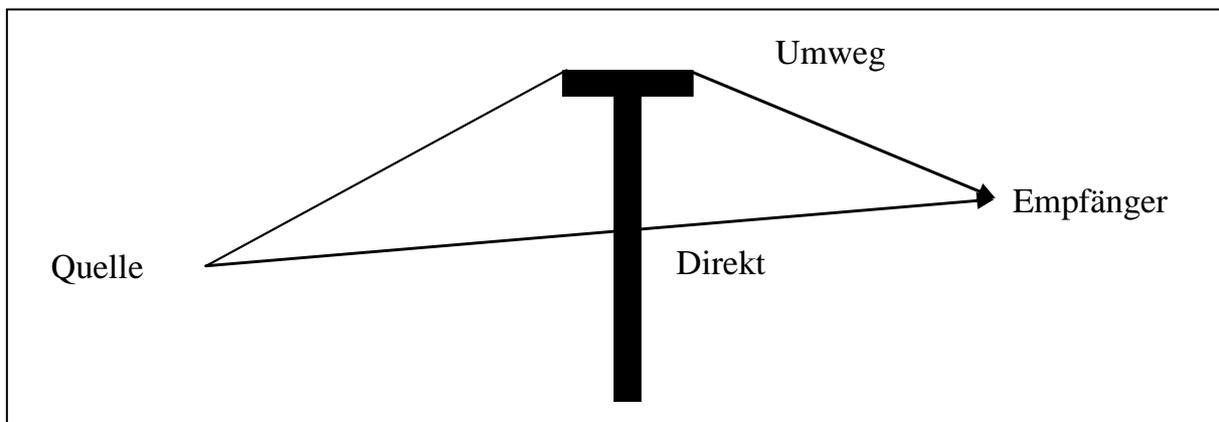


Entwicklung eines vereinfachten Rechenverfahrens für Lärmschutzwände mit komplexer Geometrie RELSKG

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011
(VIF2011)

Dezember 2013



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Renngasse 5
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Institut für Schallforschung
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Wohllebengasse 12-14
1040 Wien



TAS Sachverständigenbüro für Technische Akustik SV-GmbH
Emil-Rathenau-Str. 1
A-4030 Linz



Braunstein + Berndt GmbH
Etzwiesenberg 15
D-71522 Backnang

**Programmmanagement:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Entwicklung eines vereinfachten Rechenverfahrens für Lärmschutzwände mit komplexer Geometrie RELSKG

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2011)

AutorInnen:

Dr. Holger WAUBKE

Dr. Christian KASESS

DI Heinz HOISLBAUER

Ing. Gerhard STROHMAYER

Dipl. Phys. Dieter Zollitsch

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften

TAS Sachverständigenbüro für Technische Akustik SV-GmbH

Braunstein + Berndt GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
TABELLENVERZEICHNIS	12
1 KURZFASSUNG	13
2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	15
2.1 Validierung des Rechenmodells im Maßstab 1:4.....	15
2.2 Vergleich Messung in Situ und Simulation	16
2.3 Simulation komplexer Geometrien	19
2.4 Simulation komplexer Geometrien, Bahnquerschnitt.....	21
2.5 Korrekturfaktoren	21
3 VALIDIERUNG DES RECHENMODELLS IM MAßSTAB 1:4.....	23
3.1 Methoden.....	23
3.2 Ergebnisse.....	27
3.3 Zusammenfassung	50
4 VERGLEICH MESSUNG IN SITU UND SIMULATION	52
4.1 Beschreibung der Wandquerschnitte	52
4.2 Messung	54
4.3 Ergebnisse.....	57
4.4 Zusammenfassung	65
5 SIMULATION KOMPLEXER GEOMETRIEN.....	67
5.1 Beschreibung der Wandquerschnitte	67
5.2 Messpunkte	68
5.3 Analyse.....	68
5.4 T-Profil	70
5.5 Gekrümmte Wand.....	78
5.6 45 °Knick.....	83
5.7 90 °Knick.....	87
5.8 Direkter Vergleich aller Profile.....	91
5.9 Zusammenfassung	100
6 SIMULATION KOMPLEXER GEOMETRIEN, BAHNQUERSCHNITT	101
6.2 Gerade Wand	104
6.3 T-Profil	106
6.4 Gekrümmte LSW	114
6.5 45 Grad geknickte Wand.....	120

6.6	90 Grad geknickte Wand.....	126
6.7	Direkter Vergleich aller Profile.....	132
6.8	Zusammenfassung	136
7	ERMITTLUNG DER KORREKTURFAKTOREN UND IMPLEMEN-TIERUNG IN SOUNDPLAN.....	137
7.1	Implementierung	140
7.2	Zusammenfassung	142
8	TESTBERECHNUNG MIT KORREKTURFAKTOREN.....	143
9	REFERENZEN	145
10	ANHANG A: MESSBERICHT „MESSUNGEN IM MODELL“	146
11	ANHANG B: MESSBERICHT „MESSUNGEN AN EINER VERKEHRS-STRECKE“.....	147

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vergleich Messung und Simulation des Unterschieds zwischen 2 Lärmschutzwandgeometrien mit (rot gestrichelt) und ohne (schwarz gestrichelt) Graslandmodell.....	17
Abbildung 2: Übersicht über die verschiedenen simulierten Lärmschutzwandquerschnitte...	19
Abbildung 3: Vergleich der Wirkung straßenseitig absorbierender Profile im Vergleich zu einer gleich hohen geraden Wand.....	20
Abbildung 4: Geometrische Basis für die Herleitung und Verwendung der Korrekturfunktionen.....	22
Abbildung 5: Die verschiedenen Geometrien zur Validierung der Berechnungssoftware Messung und Simulation erfolgte im Maßstab 1:4.....	23
Abbildung 6: Richtcharakteristik des Lautsprechers in Abhängigkeit der Frequenz.....	24
Abbildung 7: Absorptionskoeffizient des Bodenmodells in Abhängigkeit der Frequenz.....	26
Abbildung 8: Unterschied zwischen gerader und einfach nach innen geknickter Wand für LP1.....	27
Abbildung 9: Vergleich des Unterschieds zwischen nach innen geknickter und gerader Wand zwischen 2D und 3D Rechnung als Terzbandspektren für LP1.....	28
Abbildung 10: Unterschied zwischen gerader und einfach nach innen geknickter Wand für LP2.....	30
Abbildung 11: Unterschied zwischen gerader und einfach nach außen geknickter Wand für LP1.....	31
Abbildung 12: Vergleich des Unterschieds zwischen nach außen geknickter und gerader Wand zwischen 2D und 3D Rechnung als Terzbandspektren.....	32
Abbildung 13: Unterschied zwischen gerader und einfach nach außen geknickter Wand für LP2.....	33
Abbildung 14: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach innen geknickter Wand für LP1.....	34
Abbildung 15: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach innen geknickter Wand für LP2.....	35
Abbildung 16: Doppelt nach innen geknickte Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.....	36
Abbildung 17: Doppelt nach innen geknickte Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.....	37
Abbildung 18: Vergleich zwischen doppelt nach innen geknickter Wand mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2.....	38

Abbildung 19: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach außen geknickter Wand für LP1.....	39
Abbildung 20: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach außen geknickter Wand für LP2.....	40
Abbildung 21: Doppelt nach außen geknickter Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.....	41
Abbildung 22: Doppelt nach außen geknickter Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.....	42
Abbildung 23: Vergleich zwischen doppelt nach außen geknickter Wand mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2	43
Abbildung 24: Unterschied zwischen gerader Wand und Wand mit T-Aufsatz für LP1.....	44
Abbildung 25: Unterschied zwischen gerader Wand und Wand mit T-Aufsatz für LP2.....	45
Abbildung 26: T-Profil mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.	46
Abbildung 27: Vergleich zwischen T-Profil mit und ohne reflektierender Oberkante für LP1 .	47
Abbildung 28: T-Profil mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.	48
Abbildung 29: Vergleich zwischen T-Profil mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2 .	49
Abbildung 30: Hohes LSW-Profil (Profil 1).....	53
Abbildung 31: Niedriges LSW-Profil (Profil 2)	53
Abbildung 32: Gemessene Absorptionskurve im Hallraum für die Messstelle Mannswörth, ÖNORM-Bezugskurve und extrapolierte Kurve für die Berechnung der Korrekturfaktoren ...	54
Abbildung 33: Schematischer Verlauf des Geländes	56
Abbildung 34: Vergleich Messung und Simulationen des Unterschieds zwischen Profil 2 und Profil 1. MF...Mittelflächen, G...Gelände.....	58
Abbildung 35: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Einzahlwerte	59
Abbildung 36: Einfluss der Quellentfernung in 2 und 10 m Höhe.....	59
Abbildung 37: Einfluss von Absorption auf der Oberkante	60
Abbildung 38: Effekt des Graslandmodells hinter der Wand auf den A-bewerteten Pegel	61
Abbildung 39: Vergleich der Mittelflächensimulationen inklusive Geländeabfall (G) mit und ohne Grasland (Gr)	62
Abbildung 40: Effekt der Quellhöhe auf den A-bewerteten Pegel	63
Abbildung 41: Vergleich der Mittelflächensimulationen ohne Geländeabfall mit Quellhöhe 0,15 und 0 m	64
Abbildung 42: Geometrien für die Simulationen durchgeführt wurden	67

Abbildung 43: Effekt des T-Profiles in Abhängigkeit von Wandhöhe, Quellentfernung 4 m, Absorption und Abstand von der Wand. Die Empfängerhöhe beträgt 2 m.	70
Abbildung 44: Effekt des T-Profiles in Abhängigkeit von Wandhöhe, Quellentfernung 4 m, Absorption und Abstand von der Wand. Die Empfängerhöhe beträgt 10 m.	71
Abbildung 45: T-Profil (Wandhöhe 4 m) für +/- 10° Neigung und Empfängerhöhen von 2 (links) und 10 (rechts) Metern (Quellentfernung 4 m).....	72
Abbildung 46: Effekt der Quellentfernung, Empfängerhöhe 2 m	73
Abbildung 47: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 2 m Höhe	75
Abbildung 48: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 4 m Höhe	76
Abbildung 49: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 10 m Höhe	77
Abbildung 50: Gekrümmte Wand mit einer Quellentfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m.	79
Abbildung 51: Gekrümmte Wand mit einer Quellentfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m	80
Abbildung 52: Gekrümmte Wand (2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m.....	81
Abbildung 53 Gekrümmte Wand (2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 10 m.....	82
Abbildung 54: Geknickte Wand (45°) mit einer Quelle ntfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m	83
Abbildung 55: Geknickte Wand (45°) mit einer Quelle ntfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m.....	84
Abbildung 56: Geknickte Wand (45°, 2m) mit verschie denen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m.....	85
Abbildung 57: Geknickte Wand (45°, 2m) mit verschie denen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 10 m.....	86
Abbildung 58: Geknickte Wand (90°) mit einer Quelle ntfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m	87
Abbildung 59: Geknickte Wand (90°) mit einer Quelle ntfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m.....	88
Abbildung 60: Geknickte Wand (90°, 2m) mit verschie denen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m.....	89
Abbildung 61: Geknickte Wand (90°, 2m) mit verschie denen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 10 m.....	90
Abbildung 62: Vergleich aller verwendeten Profile mit straßenseitiger Absorption, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 4 m.....	91

Abbildung 63: Vergleich aller verwendeten Profile, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 4 m	92
Abbildung 64: Vergleich aller verwendeten Profile, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 10 m.....	93
Abbildung 65: Unterschied der Profile (Typ 2) im Oktavbandspektrum in 100 Metern Entfernung, Empfängerhöhe 2 m.....	94
Abbildung 66: Unterschied der Profile (Typ 2 und 3) im Oktavbandspektrum in 100 Metern Entfernung, Empfängerhöhe 2 m.....	95
Abbildung 67: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (alle Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 2 m.....	96
Abbildung 68: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (alle Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 10 m.....	97
Abbildung 69: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (Typ 3, T-Profil Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 2 m.....	98
Abbildung 70: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (Typ 3, T-Profil Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 10 m.....	99
Abbildung 71: Simulationsquerschnitt für die Bahn.....	101
Abbildung 72: Geometrien für die Simulationen durchgeführt wurden	102
Abbildung 73: Unterschied der Wirkung gerader Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten	104
Abbildung 74: Spektraler Unterschied der Wirkung gerader Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten in 30 m Entfernung	105
Abbildung 75: Spektraler Unterschied zwischen geraden Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten in 100 m Entfernung	106
Abbildung 76: Effekt des T-Profiles ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	107
Abbildung 77: Effekt des T-Profiles mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	108
Abbildung 78: Effekt des Quellabstands bei T-Profil ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 79: Effekt des Quellabstands bei T-Profil ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	110

Abbildung 80: Effekt des Quellabstands bei T-Profil mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.	111
Abbildung 81: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m	112
Abbildung 82: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10 m	113
Abbildung 83: Effekt der gekrümmten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	114
Abbildung 84: Effekt der gekrümmten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	115
Abbildung 85: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	116
Abbildung 86: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	117
Abbildung 87: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m	118
Abbildung 88: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m	119
Abbildung 89: Effekt der 45° geknickten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	120
Abbildung 90: Effekt der 45° geknickten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	121
Abbildung 91: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	122
Abbildung 92: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	123
Abbildung 93: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m	124
Abbildung 94: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m	125
Abbildung 95: Effekt der gekrümmten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	126
Abbildung 96: Effekt der gekrümmten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.....	127
Abbildung 97: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	128
Abbildung 98: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.....	129
Abbildung 99: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m	130
Abbildung 100: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m	131
Abbildung 101: Vergleich verschiedener Profile ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m	132
Abbildung 102: Vergleich verschiedener Profile mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m ...	133

Abbildung 103: Vergleich verschiedener Profile ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 10 m	134
Abbildung 104: Vergleich verschiedener Profile mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 10 m	135
Abbildung 105: Definition der Zonen.....	137
Abbildung 106: Definition des Mehrwegs.....	138
Abbildung 107: Beispiel: T-Profil, Höhe 3 m, Breite 2 m, Voll absorbierend @ 500 Hz	138
Abbildung 108: Beispiel: T-Profil, Höhe 3 m, Breite 0.25 m, Voll absorbierend @ 500 Hz ..	139
Abbildung 109: Illustrierung der Berechnung des korrigierten Einfügedämmmasses.....	141
Abbildung 110: Liste der verfügbaren Wandtypen in Soundplan.....	141
Abbildung 111: Eingabefenster der Parameter der gewünschten Wandgeometrie	142
Abbildung 112: SoundPlan-Einstellungen für die Lärmschutzwände an den Messquerschnitten	143

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Simulationen.....	25
Tabelle 2: Übersicht über die simulierten LSW Profile	68
Tabelle 3: Übersicht über die simulierten LSW Profile	102
Tabelle 4: Gegenüberstellung Messung Mannswörth und Berechnung mittels Korrekturfunktionen.....	144

1 KURZFASSUNG

Eine genormte bzw. standardisierte Methode zur Berechnung der akustischen Abstrahlung basiert auf der Strahlverfolgung. In der klassischen Form, wie sie in der schalltechnischen Berechnung verwendet wird, ist diese Methode nicht in der Lage den Pegel in abgeschatteten Bereichen analytisch zu bestimmen. Deshalb wurden für klassische Formen der Abschattung Korrekturterme implementiert. Für besondere Formen der Schallschutzwand müssen solche Terme erst ermittelt werden. Hierzu eignet sich die Rand-Elemente-Methode, die eine annähernd exakte Berechnung des Schallfeldes auch bei komplexen Geometrien erlaubt (siehe z.B. [1], [2] und [3]). Allerdings ist der Rechenaufwand sehr hoch und daher ist die Methode nicht gut für den Einsatz in Noise-Mapping-Software geeignet.

Ziel des Projektes war es, das genormte Berechnungsverfahren der Strahlverfolgung für die Schirmwirkung von Lärmschutzwänden auf komplexe Geometrien (z.B. mehrere Beugungswinkel und gekrümmte Geometrien) zu erweitern. Erweist sich der gegebene Ansatz, Korrekturfunktionen für Lärmschutzwände mit komplexer Geometrie auf Basis der Rand-Elemente-Methode herzuleiten als zweckdienlich, so kann in Zukunft für neue Geometrien die Methode ohne weitere Validierung angewendet werden, so dass teure Messungen unterbleiben können und rasch neue Geometrien in die Praxis überführt werden können.

Das Projekt bestand aus 3 Arbeitspaketen:

AP 1: Berechnung der Schirmwirkung von Lärmschutzwänden mit gekrümmter Geometrie und mehreren Beugungskanten mittels der Rand-Elemente-Methode

AP 2: Validierung der Berechnungsmethode durch Versuche an Modellen sowie durch immissionsseitige Messergebnisse und die zugehörige Berechnung der Modelle mit der Rand-Elemente Methode

AP 3: Ableitung von Korrekturtermen für die Methode der Strahlverfolgung, Publizierung der Ergebnisse und Implementierung in einer kommerziell verfügbaren Software

Arbeitspaket 1

Verschiedene komplexe Querschnitte wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und Auftraggebern vereinbart: nach innen und außen gekrümmte und 45° geknickte Wände, Umgekehrte L-Profile die zur oder von der Emissionsquelle weg gerichtet sind, und das T-Profil, bei dem der Auflieger symmetrisch aufgesetzt ist. Es wurden verschiedene Breiten und typische Wandhöhen berechnet. Weiters wurden verschiedene Absorptionsvarianten unterschieden. Die Simulationen wurden sowohl für einen typischen Straßenquerschnitt mit

verschiedenen Quellabständen als auch für einen Bahnquerschnitt mit und ohne Wagenkasten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen positiven Effekt bei im Schallweg aufgebrachtener Absorption. Am besten wirken hierbei sowohl das T- als auch das nach innen gerichtete L-Profil.

Arbeitspaket 2

Zur Validierung der Berechnungsmethode wurden Berechnungen und Messungen im Maßstab 1:4 verglichen. Es zeigte sich eine großteils gute Übereinstimmung wodurch das Rechenmodell validiert wurde.

Weiters erfolgte ein Vergleich einer Messung an einem Straßenabschnitt mit verschiedenen LSW-Geometrien mit Berechnungen. Auch hier zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen von meist unter 1,5 dB(A) zwischen Messung und Simulation des Unterschieds der beiden Geometrien. Es wurde auch der Einfluss des Bodenmodells hinter der Wand untersucht. Da dieser unter 1 dB(A) lag, wurden die Berechnungen in AP1 mit reflektierendem Boden durchgeführt. Insgesamt zeigte AP2 die Validität der verwendeten Methode.

Arbeitspaket 3

Es wurden anhand der Simulationen für den Straßenquerschnitt einfache Korrekturfunktionen hergeleitet, die es erlauben, die herkömmliche Berechnung nach Norm zu modifizieren. Die Korrekturfaktoren basieren auf dem Vergleich einer geraden Wand mit der gleich hohen Wand mit komplexer Geometrie. Sie wurden im Programm SoundPLAN implementiert und können dort verwendet werden.

Weiters wurde ein Programm geschrieben, das es ermöglicht, Korrekturwerte in einer bestimmten Quell- und Messpunktentfernung graphisch darzustellen.

Um die Korrekturfunktionen zu testen, wurde die in AP2 durchgeführte Messung mit Berechnungen auf Basis der Korrekturfunktionen verglichen. Der Unterschied zwischen Messung und Berechnung lag bei maximal 1 dB für alle Messpositionen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der Ansatz, Korrekturwerte auf die Normberechnung aufzusetzen, als praktikabel erwiesen hat. Der Vorteil ist, dass die Berechnung der Unterschiede zwischen den LSWs robust ist gegenüber verschiedenen Annahmen. Die aus diesem Projekt entstandenen Korrekturfunktionen werden in Form von Tabellen für die verschiedenen Geometrien und Absorptionsvarianten publiziert, die dann von jedermann einfach implementiert werden können. Weiters wird das Hilfsprogramm zur einfachen Darstellung der Wirkung der Geometrien zur Verfügung gestellt.

2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

2.1 Validierung des Rechenmodells im Maßstab 1:4

Zur Validierung der Modellrechnungen wurden Messungen an Lärmschutzwänden (LSW) im Maßstab 1:4 durchgeführt. Weiters wurden Randelemente-Simulationen für die verschiedenen, gemessenen Lärmschutzwandgeometrien durchgeführt. Die Simulationen zur Validierung des Rechenmodells zeigen teils sehr gute Übereinstimmung, vor allem auf der etwas weiter entfernten Lautsprecherposition LP2. Der Grad der Übereinstimmung ist auch abhängig von der verwendeten Geometrie der Lärmschutzwand. Diese Abhängigkeit ergibt sich zum Teil aus Wechselwirkungen der Geometrie und des verwendeten Messverfahrens und den Schwierigkeiten, die idealisierten Bedingungen in der Simulation in einer Modellmessung nachzubilden. Von der Messung ausgehend ist es aber genauso schwierig, die Simulation an die Gegebenheiten der Messung anzupassen.

Als die 4 wichtigsten Ursachen für die Abweichungen wurden der Quelltyp, die Richtcharakteristik des Lautsprechers, die akustische Wirkung des Asphalts und die Messung des Absorptionsmaterials im Hallraum identifiziert.

Verwendung einer kohärenten Linienquelle in der Simulation

Eine Überprüfung der geknickten Wand mittels einer dreidimensionalen Simulation hat gezeigt, dass zwar Unterschiede zu 2D vorhanden sind, diese sind aber vergleichsweise gering gemessen am Unterschied zur Messung. Dies legt nahe, dass die Verwendung der 2D-Simulation gerechtfertigt ist.

Richtcharakteristik des Lautsprechers

Die Richtcharakteristik spielt vor allem dann eine Rolle, wenn zwischen den verglichenen LSWs ein starker Unterschied zwischen den Positionen der Kante in Bezug auf die Lautsprecherachse besteht. Dieser Effekt ist am stärksten für hohe Frequenzen, da hier die Richtcharakteristik sehr stark ausgeprägt ist. Das Nachbilden der Richtcharakteristik durch mehrere Quellen ist problematisch, da es nahezu unmöglich ist, Phaseneffekte zu messen und in der Simulation zu berücksichtigen. Daher brachte ein solches Modell für den Lautsprecher keine Verbesserung.

Akustische Impedanz des Asphalts

Bezüglich der akustischen Impedanz des Bodens zeigt sich, dass die Verwendung eines Impedanzmodells einen starken Einfluss auf die Berechnung hat. Das hier verwendete

Impedanzmodell ist kein dezidiertes Modell für Asphalt, zeigt aber eine erhöhte Absorption bei für porösen Asphalt typischen Frequenzen, allerdings sind diese Absorptionsmaxima bei Asphalt deutlich schmalbandiger. Von der Verwendung eines solchen Asphaltmodells wurde hier abgesehen da selbst bei Durchführung einer entsprechenden Messung das Problem bestünde, dass Impedanzmodelle für Asphalt bei hohen Frequenzen jenseits der 3 kHz nur schlecht oder gar nicht definiert sind.

Hallraummessung des Absorptionsmaterials

Die Absorptionswerte (aus Hallraummessung) des Absorptionsmaterials weisen keine Phaseninformation bzgl. der akustischen Impedanz auf, welche bei manchen Geometrien z.B. T-Profil oder doppelt geknickter Wand einen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Ob bei Verwendung eines für dieses Material geeigneten Impedanzmodells eine deutliche Verbesserung erzielt werden kann ist aber fraglich, da auch hier wiederum das Modell und eine Impedanzmessung abgeglichen werden müssten und auch dieser Prozess mit Unsicherheiten sowohl in Messung als auch Rechnung verbunden ist.

Es zeigt sich, dass beim Vergleich zwischen Messung und Simulation bestimmte Parameter nur schwer oder gar nicht abzugleichen sind. Es wurde versucht, möglichst viele dieser Parameter zu kontrollieren, aber gewisse Unterschiede können nur schwer vermieden werden. Viele dieser Unterschiede wie zum Beispiel der Lautsprecher sind aber für den Vergleich tatsächlicher Lärmschutzwand-Geometrien nicht relevant.

Trotz der vorhandenen Unterschiede zeigt sich aber eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Vor allem im Frequenzbereich bis etwa 5 kHz konnten die Unterschiede der komplexen Geometrie zur geraden Wand teils sehr gut nachgebildet werden. Die Unterschiede, die vor allem bei hohen Frequenzen auftreten, sind für die Simulationen im Maßstab 1:1 weniger interessant. Daraus folgt, dass die Berechnungsmethode gut geeignet ist, die Korrekturfaktoren für komplexe Geometrien herzuleiten.

2.2 Vergleich Messung in Situ und Simulation

Um das Rechenmodell weiter zu validieren wurde eine Messung an 2 Messquerschnitten der Lärmschutzwand und einem Referenzquerschnitt ohne Lärmschutzwand an der A4 bei Mannswörth durchgeführt. Diese Messungen wurden dann mit Simulationen der beiden Lärmschutzwand -Querschnitte verglichen. Es wurden verschiedene Varianten gerechnet um

den Einfluss verschiedener Simulationsparameter zu untersuchen. Im Detail wurden folgende Simulationsparameter untersucht

1. Einfluss des Geländes auf die Berechnung des Unterschieds zwischen den Lärmschutzwänden
2. Einfluss der Abbildung der Querschnittsgeometrie der Lärmschutzwand in der Simulation
3. Einfluss eines Graslandmodells hinter der Lärmschutzwand

Die Ergebnisse der Simulation zeigen größtenteils eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung, sowohl im spektralen Bereich als auch für die Einzahlwerte. Im Spektrum ergaben sich Unterschiede von maximal 2 dB, meist lagen die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung darunter. In den Einzahlwerten waren die Abweichungen durchwegs im Bereich von um und unter 1,5 dB(A). Als Referenz werden hier die Simulation mit Mittelflächelementen und Geländeabfall herangezogen (schwarz gestrichelte Linie in Abbildung 1).

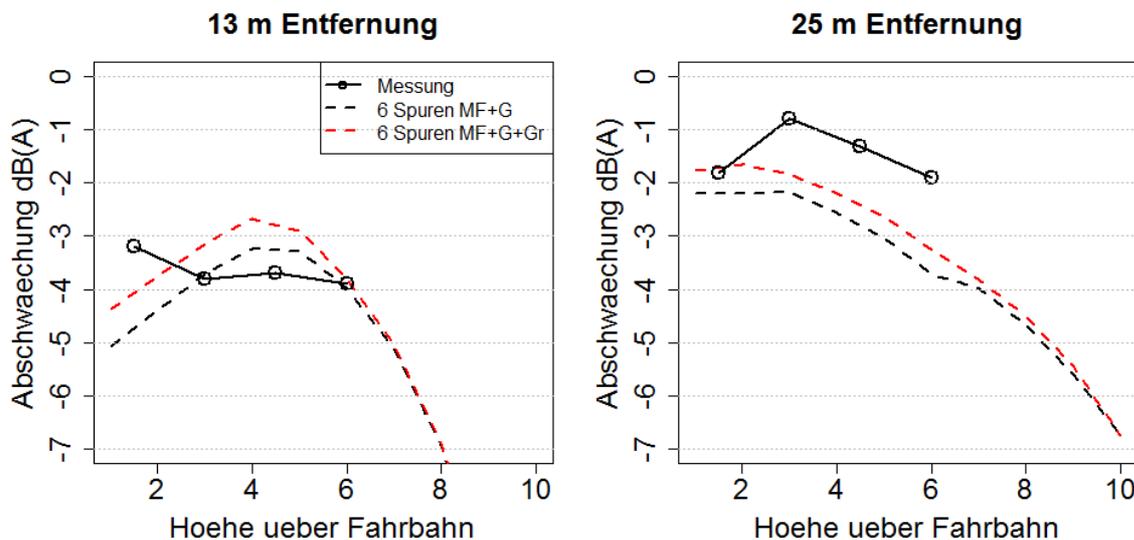


Abbildung 1: Vergleich Messung und Simulation des Unterschieds zwischen 2 Lärmschutzwandgeometrien mit (rot gestrichelt) und ohne (schwarz gestrichelt) Graslandmodell.

Die Variation der verschiedenen Geländeparameter hat außerdem noch einige interessante Punkte ergeben:

Abbildung der Lärmschutzwand-Geometrie

Die Abbildung der Geometrie und hier vor allem der Spitze hat einen entscheidenden Einfluss auf die Simulationen. Eine Konsequenz daraus ist, dass sich die Wirkung von Profil 1 möglicherweise mit einer einfachen Abdeckung direkt hinter der Spitze deutlich verbessern ließe, vor allem wenn diese absorbierend ausgeführt ist.

Abbildung des Geländes

Die Simulationen für die Korrekturwerte können sinnvollerweise nur für eine Geländeform durchgeführt werden. Bei den Validierungsrechnungen hat das Gelände eigentlich nur im tieffrequenten und bodennahen Bereich einen (geringen) Einfluss auf das Ergebnis. Für Frequenzen über 200 Hz ist die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen (Mittelflächen) geringer als 1 dB. Darunter treten größere Abweichungen von 2 dB und darüber nur in der tiefsten Messposition auf. Diese größtenteils geringen Abweichungen sind ein Indikator dafür, dass die Simulationen für die Korrekturfaktoren in ihrer durchgeführten Form zuverlässige Ergebnisse liefert.

Graslandmodell

Die Bodenbeschaffenheit ist normalerweise ein wichtiger Parameter in der Berechnung des Einfügedämmmasses. Auf die Unterschiede zwischen den Lärmschutzwand hat das Graslandmodell hinter der Lärmschutzwand allerdings nur einen sehr geringen Einfluss (rot gestrichelte Linie in Abbildung 1). Hier spielt wahrscheinlich der Einfluss des Bodens auf die freie Schallausbreitung eine untergeordnete Rolle, da die freie Schallausbreitung bei der Berechnung der Unterschiede zwischen den Lärmschutzwänden zum größten Teil herausfällt.

Zusammenfassend kann aus dieser Validierung geschlossen werden, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Lärmschutzwänden sehr robust sind gegenüber unterschiedlichen Annahmen wie Gelände und Bodenbeschaffenheit hinter der Lärmschutzwand. Daraus folgt, dass der gewählte Ansatz, die Korrekturfaktoren zu berechnen, die dann auf die Normberechnung aufgesetzt wird, zuverlässige Ergebnisse liefert.

2.3 Simulation komplexer Geometrien

Es wurde eine Anzahl von Standardgeometrien simuliert (Abbildung 2), um eine Basis für die Korrekturfaktoren verschiedenster Wandgeometrien, Höhen und Breiten zu haben.

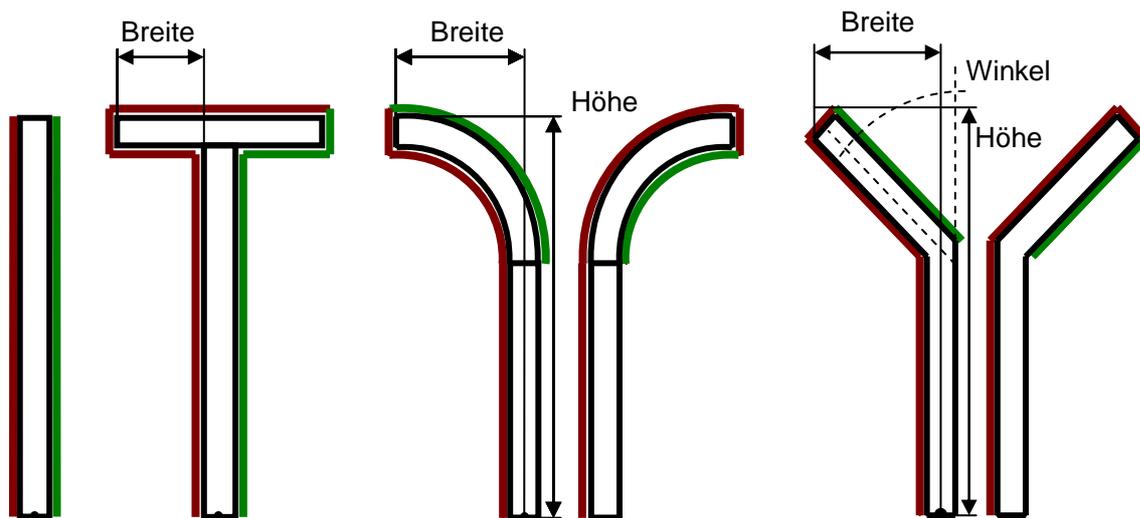


Abbildung 2: Übersicht über die verschiedenen simulierten Lärmschutzwandquerschnitte

Es wurden jeweils 3 Typen definiert: Typ 1 bedeutet dass die gesamte Lärmschutzwand als reflektierend ausgeführt ist. Für Typ 2 sind die jeweils rot gekennzeichneten Flächen absorbierend ausgeführt. Als Richtwert wurde hier die Grenzkurve für hochabsorbierende Lärmschutzwand verwendet (ÖNORM EN ISO 11654). Für Typ 3 sind sowohl die rot als auch die grün gekennzeichneten Flächen in absorbierendem Material ausgeführt. Aus der Vielzahl simulierter Geometrien lassen sich mehrere Erkenntnisse gewinnen.

Die Daten legen nahe, dass nicht nur die Geometrie sondern auch die Anordnung absorbierender Elemente einen gewichtigen Einfluss auf die Wirkung der Lärmschutzwand hat, vor allem im hochfrequenten Bereich. Hier ist es entscheidend, absorbierendes Material in den Ausbreitungsweg zu bringen, dadurch lässt sich die Wirkung jeder Geometrie deutlich verbessern.

Bei rein straßenseitiger Absorption (Abbildung 3) sind nach außen gekrümmte und auch 45° geknickte Wände teilweise effektiver, als ihre nach innen gerichteten Äquivalente. Wird aber außen auch Absorption verwendet, sind die nach außen gerichteten Wände nur bei hohen Wänden und nahen Quellpositionen und nicht allzu breiten Geometrien besser. Eine genauere Analyse zeigt, dass hier tieffrequente Effekte eine große Rolle spielen. Nach

außen gerichtete, absorbierende Profile wirken sehr gut im hochfrequenten Bereich. Die Wirkung bei großen nach innen gerichteten Profilen ist im tieffrequenten Bereich bis zu maximal 200 Hz besser. Hier spielt die Absorption eine untergeordnete Rolle, da die Absorptionskoeffizienten in diesem Frequenzbereich sehr niedrig sind. Wenn zusätzlich noch Absorption auf der Rückseite aufgebracht wird, verbessert sich die Wirkung der nach innen gerichteten Profile, sodass sie in Summe besser abschneiden.

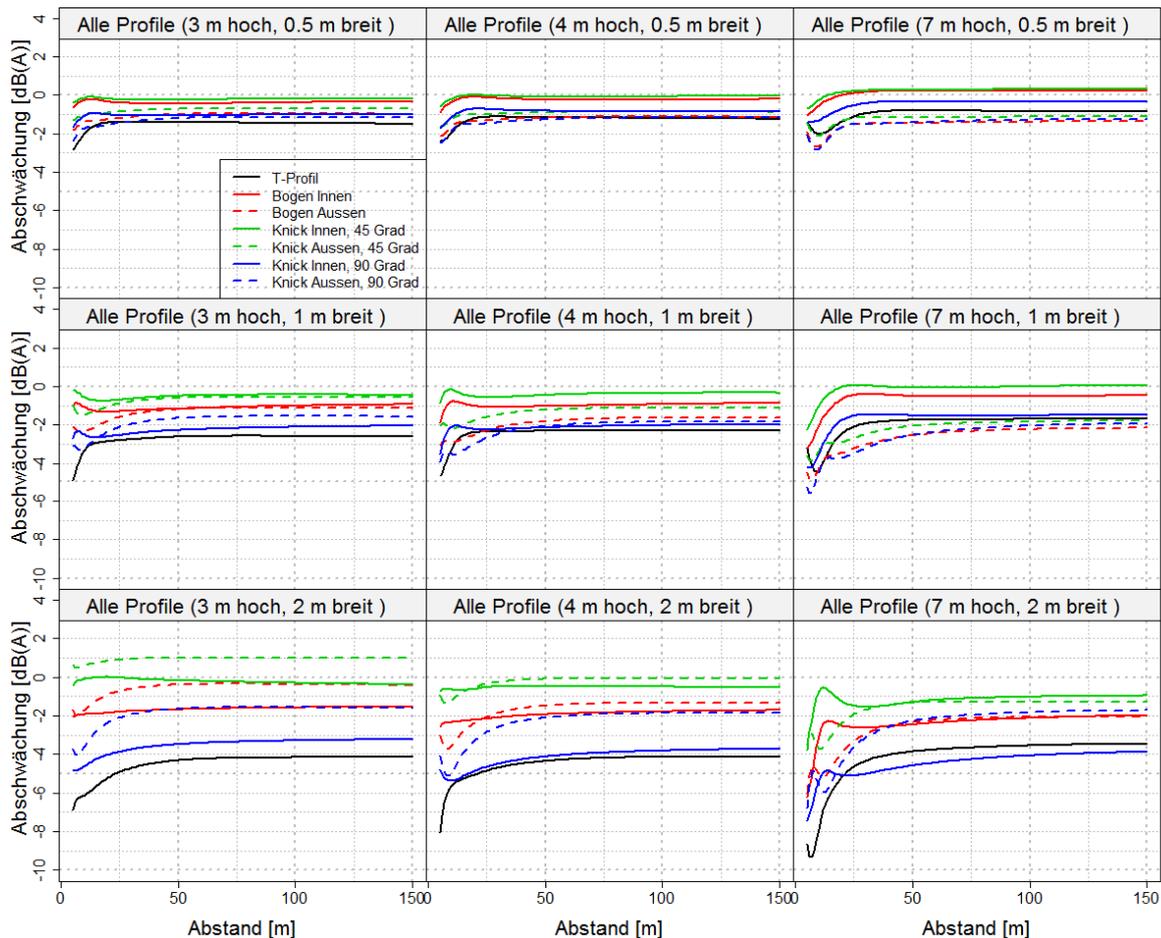


Abbildung 3: Vergleich der Wirkung straßenseitig absorbierender Profile im Vergleich zu einer gleich hohen geraden Wand

Weiters lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die T- und L-Wand bei hoher Absorption auf der Oberkante im Allgemeinen am Besten abschneiden. Bei etwa gleicher Oberkantenlänge sind das L zur Fahrbahn hin und die T-Wand am effektivsten, das nach außen gerichtete L-Profil ist hier etwas schwächer aufgrund der von der Quelle weg verschobenen Beugekante.

2.4 Simulation komplexer Geometrien, Bahnquerschnitt

Bei der Bahn treten einige Unterschiede zur Straße auf, hauptsächlich der reflektierende Wagenkasten und der erhöhte Bahndamm. Es wurden daher Simulationen mit einem solchen Querschnitt durchgeführt. Bei den Simulationen mit Bahnquerschnitt ergaben sich meist qualitativ ähnliche Ergebnisse wie beim Straßenquerschnitt und die Schlussfolgerungen gelten daher auch hier. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist hier der reflektierende Wagenkasten. Bei geraden Wänden ist der Effekt bei geringen Wandhöhen eher klein (1 dB(A)), bei höheren Wänden aber schon im Bereich von 3 dB(A).

Weiters treten Unterschiede bei den Geometrien zwischen der Bedingung mit und ohne Wagenkasten auf, d.h. die Wände wirken unterschiedlich, immer bezogen auf die jeweilig richtige gerade Bezugswand. Dies erschwert die Definition von Korrekturfaktoren erheblich, da schon von vornherein unklar ist, welche der beiden Varianten richtig ist. Eine weitere Schwierigkeit ist die fehlende Validierung der Korrekturfaktormethode für Bahnquerschnitte da leider keine Messdaten verschiedener Wandgeometrien zur Verfügung stehen.

Daher wurde von der Herleitung eigener Korrekturfaktoren abgesehen. Allerdings wurde ein zusätzliches Dokument erzeugt, in dem für 3 Auswertehöhen und 2 Quellentfernungen der Verlauf des Zusatzeffekts mit und ohne Wagenkasten und zusätzlich auch für die Straßengeometrie für ähnliche Quellentfernungen abgebildet sind. Diese basieren auf dem standardisierten Schienenlärmspektrum. Weiters sind die spektralen Effekte in einem Abstand von 100 Metern von der Wand für die gleichen 3 Quellhöhen abgebildet.

2.5 Korrekturfaktoren

Aus der Vielzahl an Simulationen konnten einfach anzuwendende Korrekturfaktoren hergeleitet werden, die auf dem Umweg, der durch die Lärmschutzwand verursacht wird, basieren (Abbildung 4). Die Korrekturfaktoren wurden für jeden Wandtyp, Höhe, Breite, Absorptionstyp und Terzband hergeleitet. Mit Hilfe dieser Funktionen ist es möglich, das Einfügedämmmaß einer komplexen Geometrie zu berechnen, basierend auf den aus der Norm berechneten Werten für die gerade Wand.

Die Korrekturfaktoren für unterschiedliche Geometrien wurden in SoundPlan (Version 7.3) implementiert. Um die Korrekturfaktoren zu testen, wurden Berechnungen mit Messungen verglichen. Hierbei wurden die Ergebnisse aus den Messungen an der A4 bei Mannswörth herangezogen.

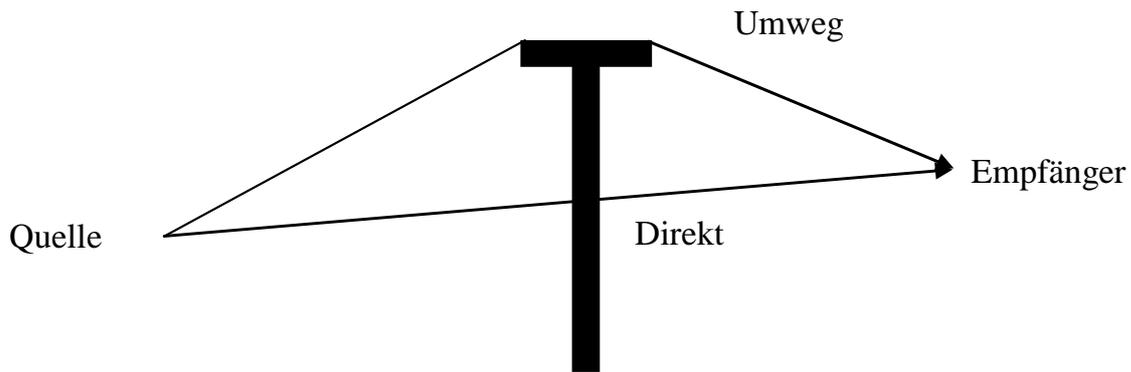


Abbildung 4: Geometrische Basis für die Herleitung und Verwendung der Korrekturfunktionen.

Es ergaben sich Unterschiede in den Pegeldifferenzen zwischen Messung und Berechnung von bis zu ± 1 dB. In einer Berechnungsvariante mit „abgewickelten“ Wandhöhen von Wänden komplexer Geometrie ergaben sich Unterschiede von bis zu rd. 3 dB, während eine Berechnung mit an die Beugekante herangerückter geraden Wänden gleicher Höhen einen Unterschiede von bis zu rd. 1,5 dB ergaben.

Somit zeigt sich für die Berechnungen mit den neu implementierten Korrekturfaktoren in der gegenständlichen Situation die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung.

3 VALIDIERUNG DES RECHENMODELLS IM MAßSTAB 1:4

Zur Validierung der Modelrechnungen wurden Messungen and Lärmschutzwänden (LSW) im Maßstab 1:4 durchgeführt (siehe Messbericht, Anhang A). Es wurden Randelemente-Simulationen für die verschiedenen, gemessenen Lärmschutzwandgeometrien durchgeführt (Abbildung 5). Von links nach rechts dargestellt sind eine einfach geknickte Wand, eine doppelt geknickte Wand und eine Wand mit T-Profil. Wenn die Wand von der Lärmquelle weg geneigt ist wird diese als nach außen geneigt bezeichnet.

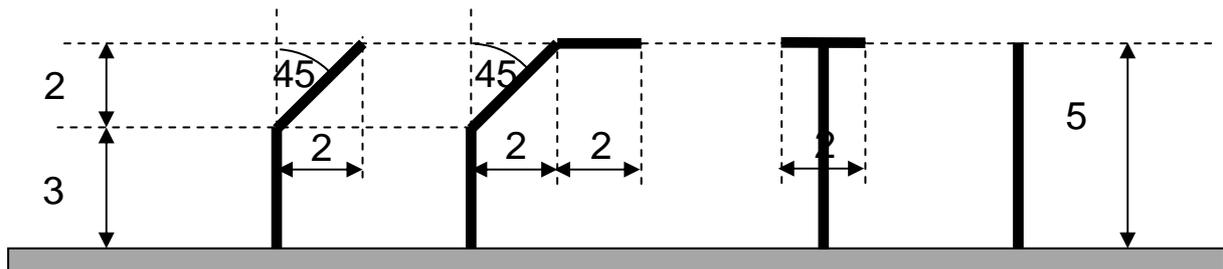


Abbildung 5: Die verschiedenen Geometrien zur Validierung der Berechnungssoftware
 Messung und Simulation erfolgte im Maßstab 1:4

3.1 Methoden

Evaluiert wurden die Unterschiede zwischen den komplexen Geometrien und der gleich hohen geraden Wand. Es wurden verschiedene Einstellungen betreffend der Materialeigenschaften der Wand und des Bodens getestet.

Für das absorbierende Material, das auf die LSW aufgebracht wurde, stand eine Hallraummessung zur Verfügung. Aus dem Reflexionskoeffizienten kann zwar der Betrag der Impedanz abgeleitet werden, allerdings ist es nicht möglich, Rückschlüsse über die Phase der komplexen Impedanz zu ziehen. Daher wurden zwei Varianten gerechnet, einmal mit 0° (reelle Impedanz) und einmal mit 45° Phase. Weiters wurde auch jeweils eine Variante mit voll reflektierender LSW gerechnet.

Der Boden wurde jeweils als voll reflektierend simuliert oder ein Impedanzmodell angenommen. Die Beschreibung für den Boden erfolgt im nächsten Abschnitt.

Da der Großteil der Simulationen in 2D durchgeführt wurde, besteht die Quelle aus einer einzelnen kohärenten Linienquelle. Es wurden auch Simulationen mit mehreren Linienquellen durchgeführt, die die Richtcharakteristik des Lautsprechers (Abbildung 6)

modellieren sollten. Diese Simulationen brachten allerdings keine entscheidende Verbesserung, vermutlich aufgrund der unbekanntenen Phaseneffekte des Lautsprechers, und werden in diesem Bericht daher nicht aufgeführt. Weiters wurden für 3 Geometrien 3D-Simulationen durchgeführt um den Effekt der Linienquelle zu untersuchen.

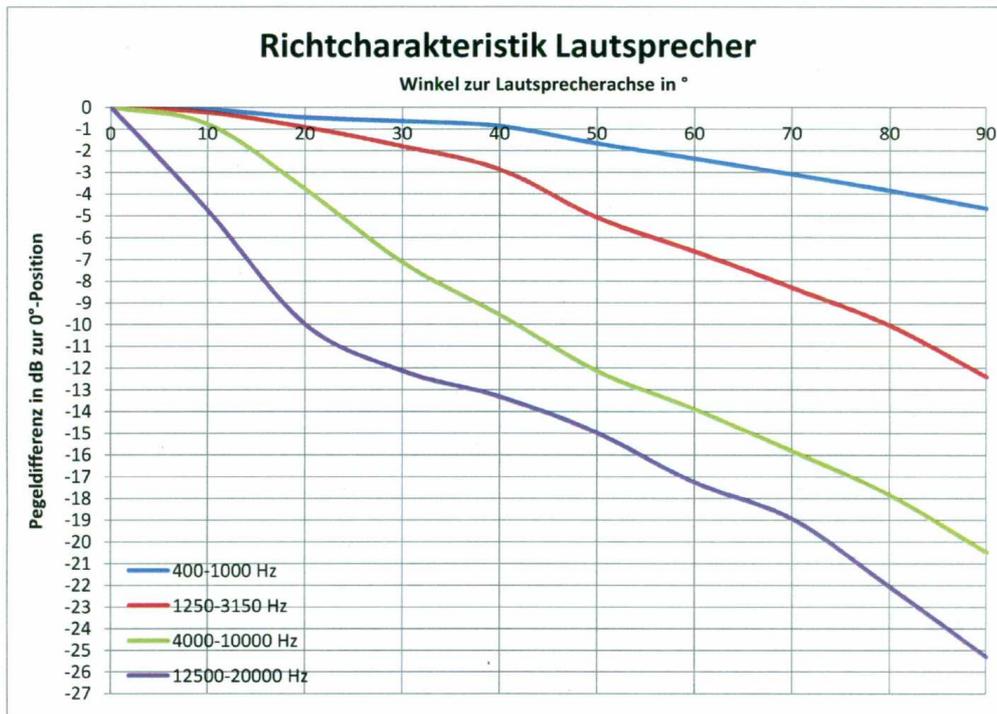


Abbildung 6: Richtcharakteristik des Lautsprechers in Abhängigkeit der Frequenz.

Wie in der Messung wurden zwei Quellpositionen simuliert, die in gleicher Höhe, aber unterschiedlichem Abstand zur Wand lokalisiert waren. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Simulationsparameter.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Simulationen

Eigenschaft	Varianten	Beschreibung
Wandmaterial	Refl	Voll reflektierende Wand
	Abs0	Absorbierend lt. Messung im Hallraum, Impedanz mit Phase 0° (reell)
	Abs45	Absorbierend lt. Messung im Hallraum, Impedanz mit Phase 45° (komplex)
Bodenmaterial	Refl	Voll reflektierender Boden
	Imp	Impedanzmodell mit erhöhter Absorption über 1 kHz
Quelle		Kohärente Linienquelle
Quellposition	LP1	1 m links von der Wand in 0.15 m Höhe
	LP2	2 m links von der Wand in 0.15 m Höhe

Verglichen wurden immer nur Varianten, die die gleichen Parameter für LSW-Material und Bodenmodell hatten. Die Simulationen wurden mit einer etwas dickeren Wand (15 cm) durchgeführt, um mögliche numerische Probleme zu vermeiden. Der Unterschied wurde aus den gleitend über Oktaven gemittelten Intensitäten berechnet, d.h. für die Mittenfrequenzen wurde die Terzbandreihe verwendet. Weiters wurde über ein um die Messpunkte zentriertes Auswertegitter von 7 mal 11 Punkten mit einer Rasterung 125 x 62.5 mm räumlich gemittelt. Dies ergibt einen rechteckigen Mittelungsbereich mit der Größe 750 x 625 mm.

3.1.1 Bodenmodell

Die Messung erfolgte auf Asphalt, einem Material das sehr spezielles Absorptionsverhalten haben kann. Bei porösem Asphalt können starke Absorptionsmaxima im Bereich 1-2 kHz auftreten [4]. Es gibt Impedanzmodelle für porösen Asphalt [4], [5], [6], allerdings muss hier das Modell an die Eigenschaften des jeweiligen Asphalts angepasst werden, was nur mit zusätzlichen Messungen möglich ist. Die Verwendung eines nicht angepassten Modells ist aufgrund der schmalbandigen Absorptionsmaxima problematisch und kann zu beträchtlichen Abweichungen führen. Da eine Anpassung hier nicht durchgeführt wurde, wurde daher mit einem anderen Bodenmodell gearbeitet, das eine hohe Absorption in diesem Bereich hat [5] wobei das Maximum aber deutlich breiter ist als beim Asphalt beobachtet.

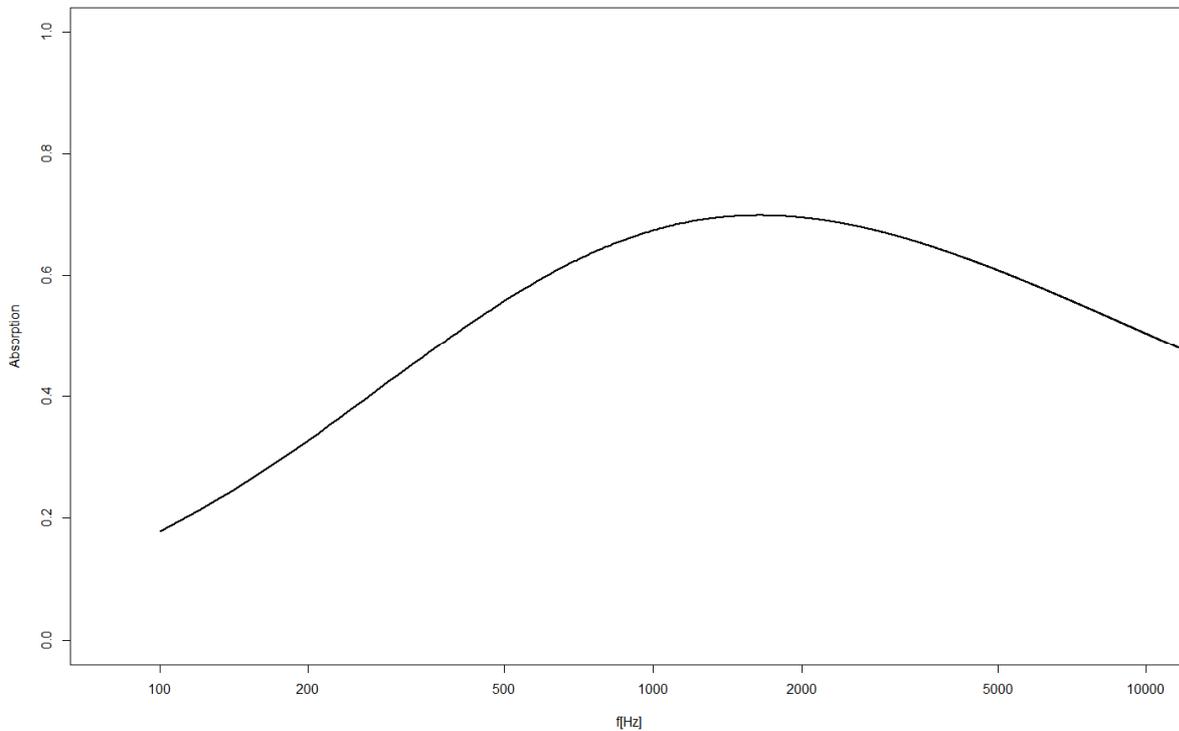


Abbildung 7: Absorptionskoeffizient des Bodenmodells in Abhängigkeit der Frequenz.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen Resultate aus Messungen und Simulationen für unterschiedliche Geometrien im Modell

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Einfach geknickte Wand nach innen geneigt, LP1

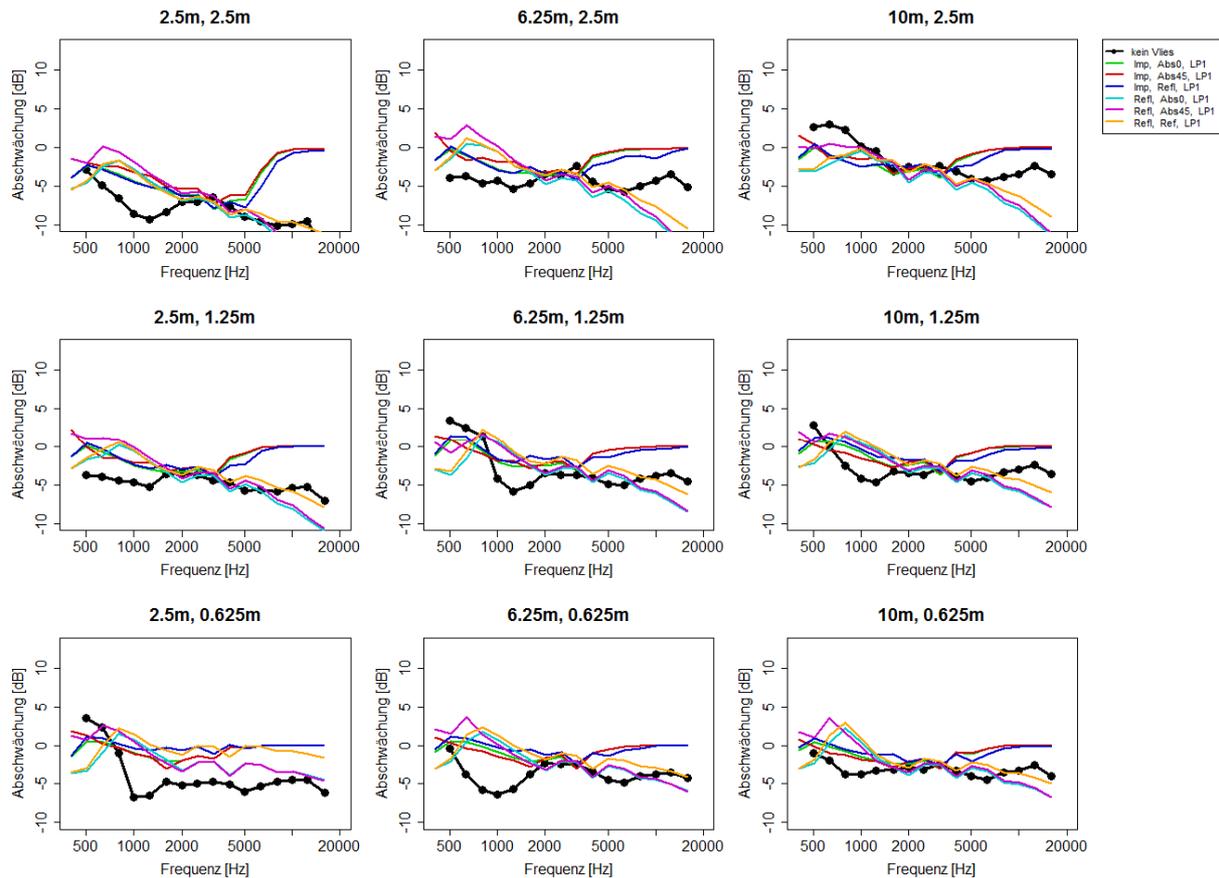


Abbildung 8: Unterschied zwischen gerader und einfach nach innen geknickter Wand für LP1.

In Abbildung 8 zeigt sich im mittleren Frequenzbereich zwischen 2 und 5 kHz eine teils gute Übereinstimmung für beide Bodenmodelle. Negative Werte bedeuten eine Verbesserung gegenüber der geraden Wand. Über 5 kHz ist das voll reflektierende Bodenmodell besser, wobei für diesen Boden die Interferenzeffekte insgesamt stärker ausgeprägt sind. In Boden- und Wandnähe zeigt sich bei hohen Frequenzen ein systematischer Unterschied fast im gesamten Frequenzbereich.

Um die Ursache für die Unterschiede eingrenzen zu können wurden 3D-Simulationen durchgeführt. Damit kann untersucht werden, ob die 2D-Rechnung (Linienquelle, konstante Geometrie) eines 3D-Problems (Punktquelle, endliche Länge) ein Problem darstellt. Es wurde nur LP1 simuliert, da der zeitliche Aufwand sehr hoch ist (bis zu 12 Stunden für eine Frequenz).

Es ist auch zu erwarten dass bei dieser Anordnung der Lautsprecher (LS) eine Rolle spielt, da die Beugungsskante nicht entlang der Mittelachse des LS (45°) liegt.

3D-Simulation mit Punktquelle

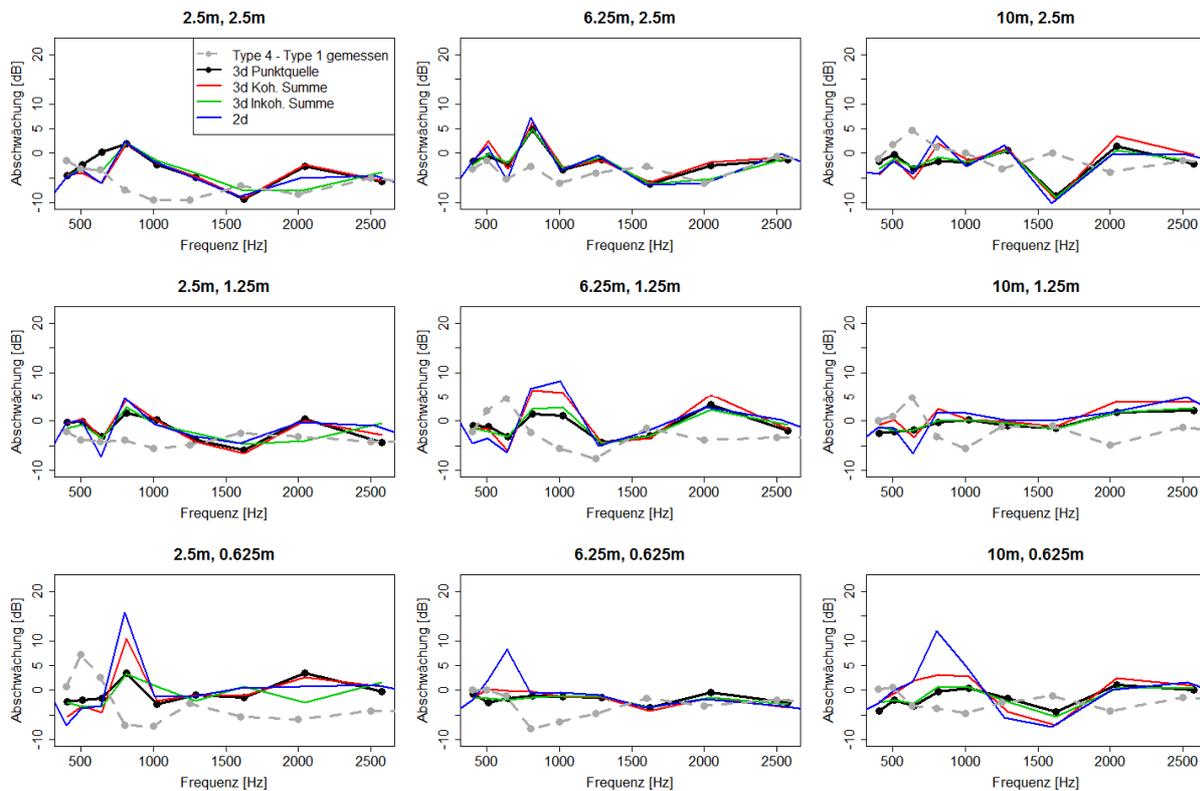


Abbildung 9: Vergleich des Unterschieds zwischen nach innen geknickter und gerader Wand zwischen 2D und 3D Rechnung als Terzbandspektren für LP1.

Die Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Simulation in 3D für reflektierenden Boden und reflektierende Wand. Die blaue Linie stellt die Rechnung in 2D dar, die schwarze dünne Linie die Rechnung in 3D mit einer Punktquelle. Die rote und grüne Linie entsprechen einer durch eine Reihe von Punktquellen angenäherten Linienquelle (10 cm Abstand, ± 3 m) die einmal phasenrichtig und einmal energetisch addiert wurde. Die schwarze strichlierte Linie zeigt das Messergebnis. Es konnte nur bis etwa 3 kHz gerechnet werden, darüber hinaus wäre die erforderliche Auflösung des 3D-Rasters zu hoch und die LSW nicht mehr berechenbar. Die Wände (gerade und geknickt) hatten eine simulierte Länge von 8 m, Dicke und Höhe sind gleich wie in der 2D-Simulation. Es zeigt sich dass die Ergebnisse vergleichbar sind, wengleich die 2D-Simulation die stärksten Interferenzeffekte produziert. Die kohärente (phasenrichtige) Summierung stellt eine gute Annäherung zur 2D-Simulation dar. Bei inkohärenter (energetischer) Summierung sind die Interferenzen erwartungsgemäß etwas schwächer ausgeprägt. Dieser Fall ist auch teilweise ähnlich zur reinen Punktquelle.

Es wird deutlich, dass die systematische Unterschätzung bei dieser Geometrie vor allem in Bodennähe auch in 3D auftritt. Daraus lässt sich schließen, dass der Effekt vermutlich mit Richtcharakteristik und Bodenimpedanz zusammenhängt, und nicht eine Folge der Annäherung der Messung durch ein 2D-Modell ist.

3.2.2 Einfach geknickte Wand nach innen geneigt, LP2

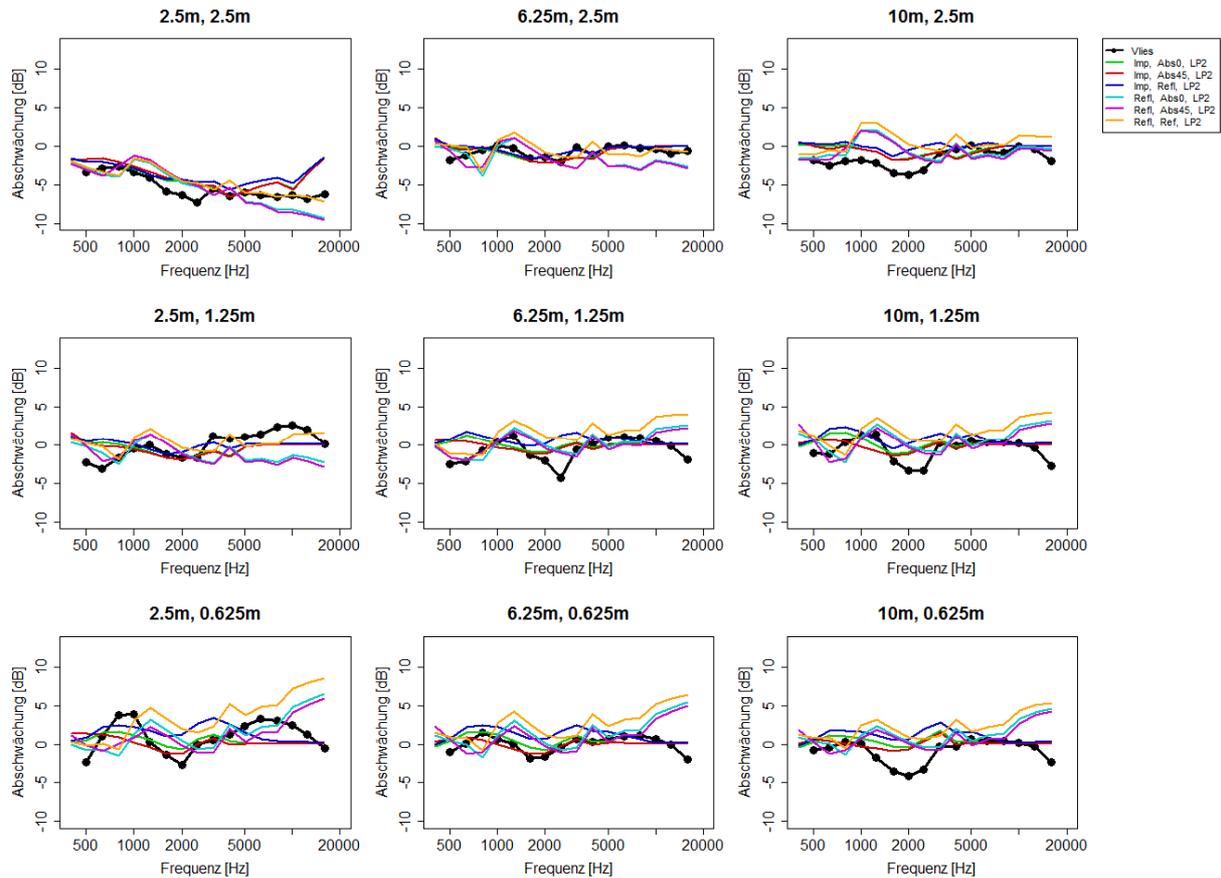


Abbildung 10: Unterschied zwischen gerader und einfach nach innen geknickter Wand für LP2.

Die Übereinstimmung bei der entfernten LS-Position ist deutlich besser, vor allem die hohen Mikrofonpositionen stimmen sehr gut überein. Aber auch die Übereinstimmung bei den tieferen Positionen ist teils sehr gut und etwas besser bei Verwendung des Bodenmodells. Bei voll reflektierendem Boden treten wiederum stärkere Interferenzen auf. Das Material der LSW hat geringere Auswirkungen auf die Simulation.

3.2.3 Einfach geknickte Wand nach außen geneigt, LP1

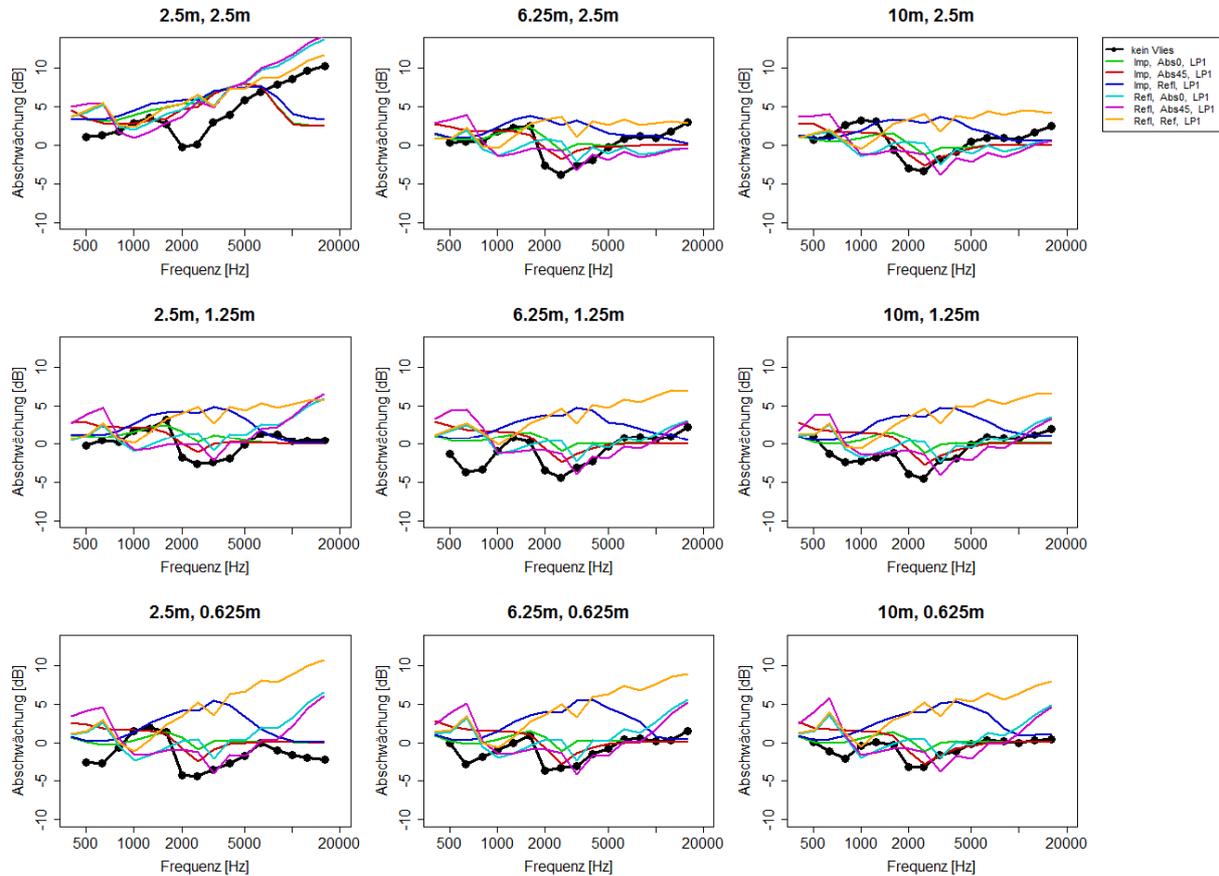


Abbildung 11: Unterschied zwischen gerader und einfach nach außen geknickter Wand für LP1.

Die stark frequenzabhängigen Unterschiede, die in der Messung auftraten, werden nur teilweise modelliert. Vor allem der Einbruch zwischen 1 und 2 kHz konnte nicht reproduziert werden. Weiters zeigt sich, dass bei voll reflektierender Wand die Ergebnisse deutlicher abweichen hin zu einer starken Verschlechterung der geknickten gegenüber der geraden Wand. Dies ist zu erwarten, da die Wirkung dieser Geometrie stark von der Absorption entlang der geknickten Oberfläche abhängt.

Das Bodenmodell wirkt sich teilweise aus, allerdings tritt dieser Effekt hauptsächlich im hochfrequenten Bereich auf.

3D-Simulation mit Punktquelle

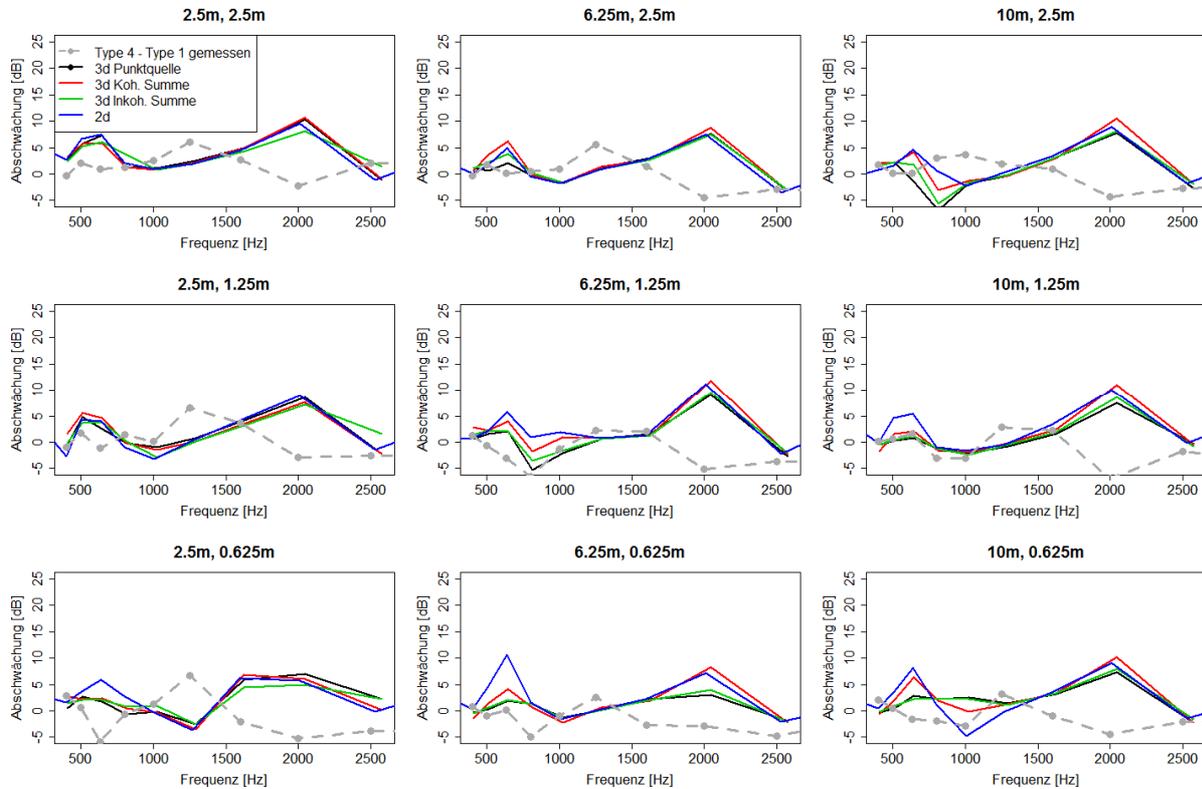


Abbildung 12: Vergleich des Unterschieds zwischen nach außen geknickter und gerader Wand zwischen 2D und 3D Rechnung als Terzbandspektren.

Die Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Simulation in 3D für reflektierenden Boden und reflektierende Wand. Die Legende ist gleich wie in Abbildung 7. So wie bei der nach innen geknickten Wand zeigt auch hier die 2D-Simulation die stärksten Interferenzeffekte. Prinzipiell sind die Ergebnisse sehr ähnlich außer im Bereich von 500 bis etwa 1000 Hz, wo vor allem die 2D-Simulation etwas abweicht. Auch hier ist aber die Ursache der Abweichungen zwischen Simulation und Messung nicht die zweidimensionale Modellierung.

3.2.4 Einfach geknickte Wand nach außen geneigt, LP2

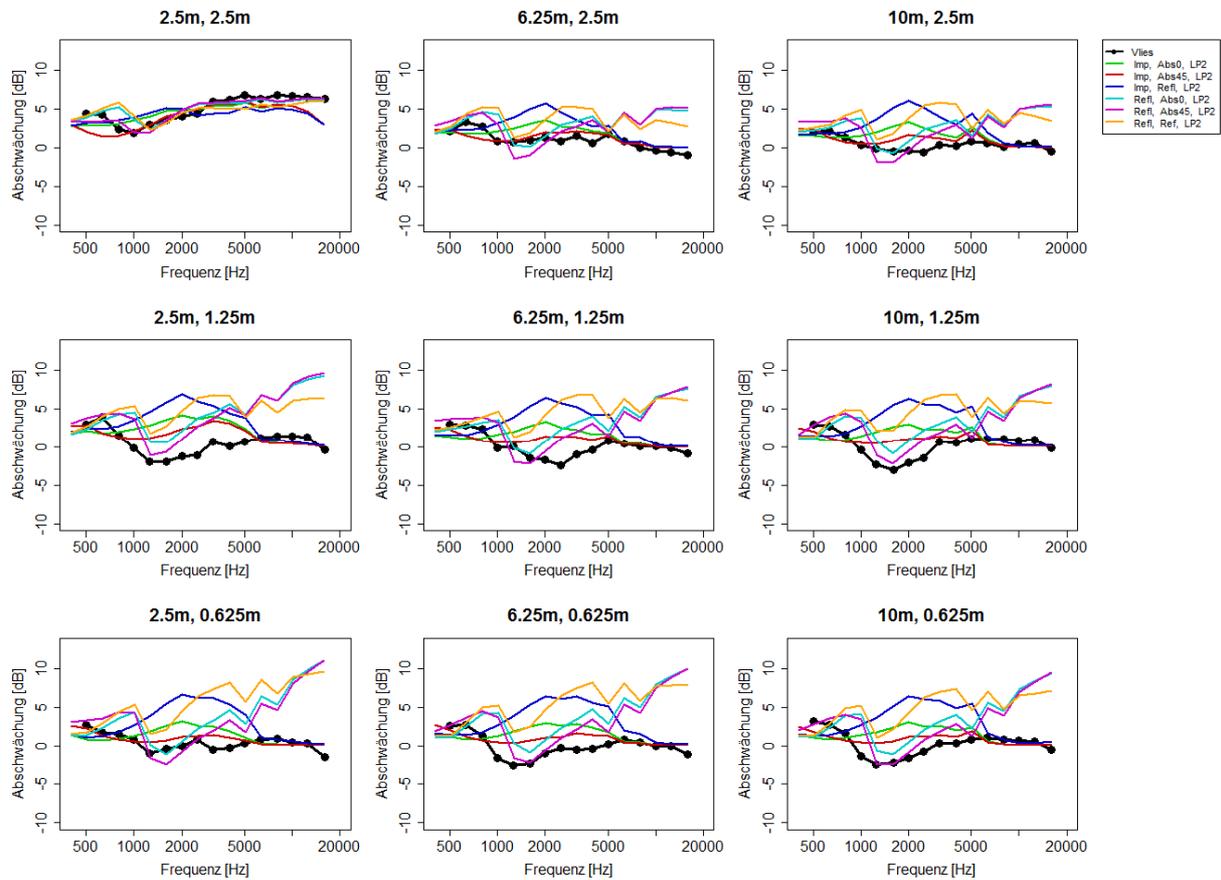


Abbildung 13: Unterschied zwischen gerader und einfach nach außen geknickter Wand für LP2.

Die Interferenzeffekte in der Messung sind hier deutlich weniger ausgeprägt und die Übereinstimmung mit der Simulation ist teils sehr gut. Wie schon für LP1 zeigt sich auch hier eine Verschlechterung für eine reflektierende Wand, vor allem im Bereich von 1 bis etwa 5 kHz. Über 5 kHz scheint sich das Bodenmodell am stärksten auszuwirken, vor allem im bodennahen Bereich, wobei hier der reflektierende Boden weniger Abweichungen liefert. Die berechneten aber auch die gemessenen Unterschiede zur gleich hohen geraden Wand sind insgesamt eher gering.

3.2.5 Doppelt geknickte Wand nach innen geneigt, LP1

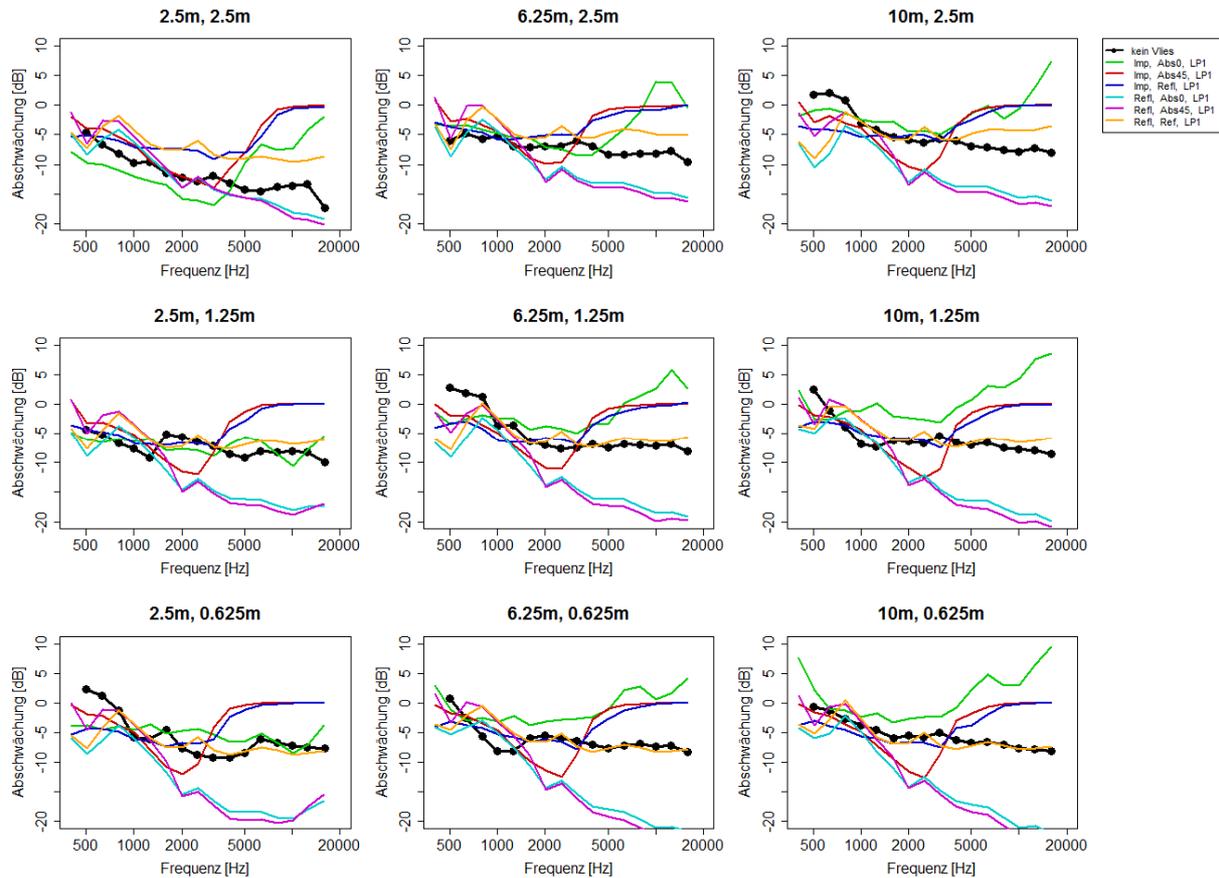


Abbildung 14: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach innen geknickter Wand für LP1.

Für die doppelt nach innen geknickte Wand ergeben sich durch die Abschattung der Lärmquelle erwartungsgemäß hohe Vorteile gegenüber der geraden Wand. Diese werden tendenziell auch in der Simulation abgebildet und bis zu etwa 2 kHz ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vorhanden. Bei hohen Frequenzen jedoch wird der Effekt teilweise unterschätzt oder stark überschätzt. Eine klare Systematik ist nicht erkennbar. Das beste Modell ist mit reflektierendem Boden und Wand. Die Vermutung liegt nahe, dass hier die Richtcharakteristik das Ergebnis stark beeinflusst, da die Kante der LSW in etwa 45° zur Lautsprecherachse liegt und hier die im Frequenzbereich zwischen 12,5 und 20 kHz schon 14 dB Abschwächung vorhanden sind. Bei der geraden Wand hingegen liegt die Kante ungefähr auf der Lautsprecherachse. Weiters hat in den Simulationen bei hohen Frequenzen das verwendete Bodenmodell einen starken Effekt.

3.2.6 Doppelt geknickte Wand nach innen geneigt, LP2

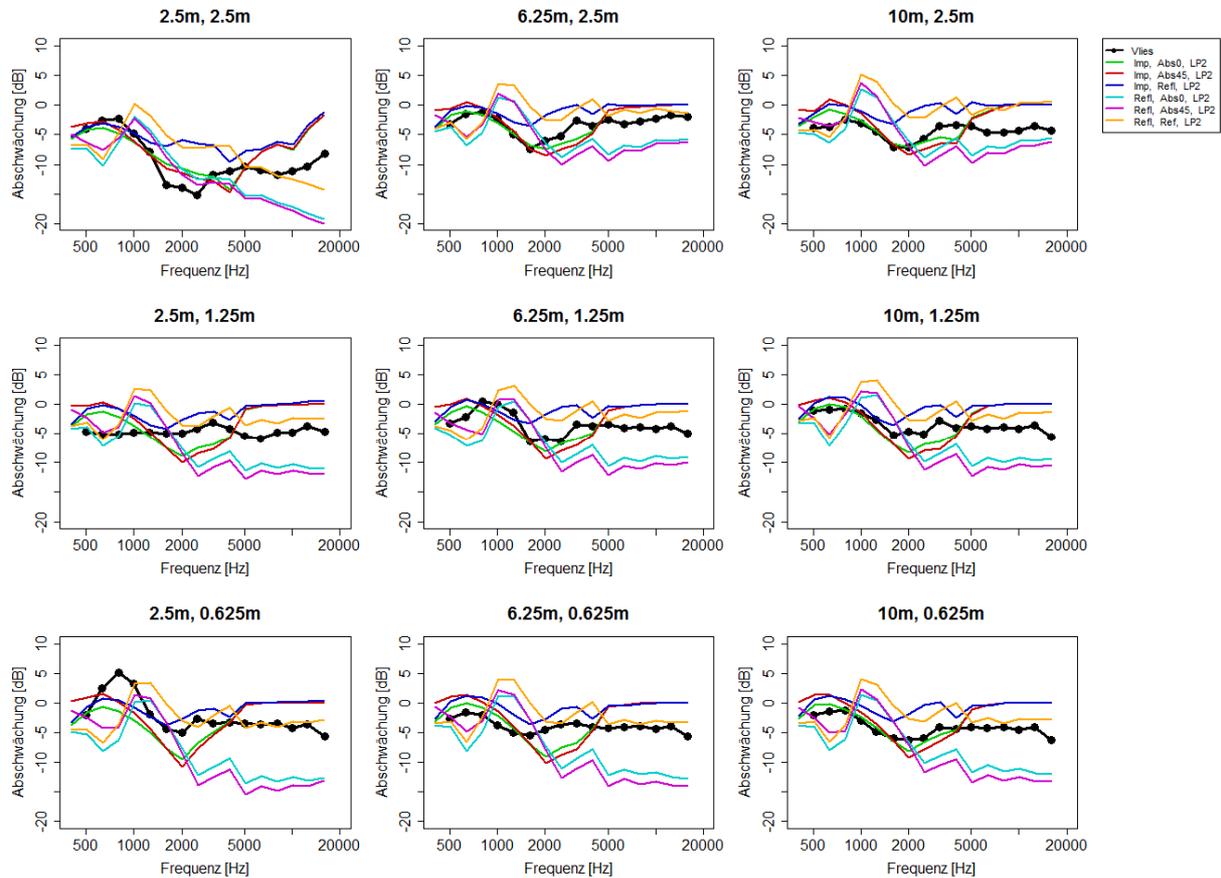


Abbildung 15: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach innen geknickter Wand für LP2.

Die Übereinstimmung bei LP2 ist deutlich besser als bei LP1. Tendenziell sind die Abweichungen ähnlich wie bei LP1 aber deutlich geringer. Diese Verbesserung passt gut mit der Vermutung zusammen, dass die starken Abweichungen von der Richtcharakteristik herrühren, da hier der Unterschied im Winkel zwischen der Lautsprecherachse und der Verbindungslinie Lautsprecher-Kante bei gerader und nach innen geknickter LSWs bei der entfernten Lautsprecherposition deutlich geringer ist.

3.2.7 Doppelt geknickte Wand nach innen mit reflektierender Oberkante, LP1

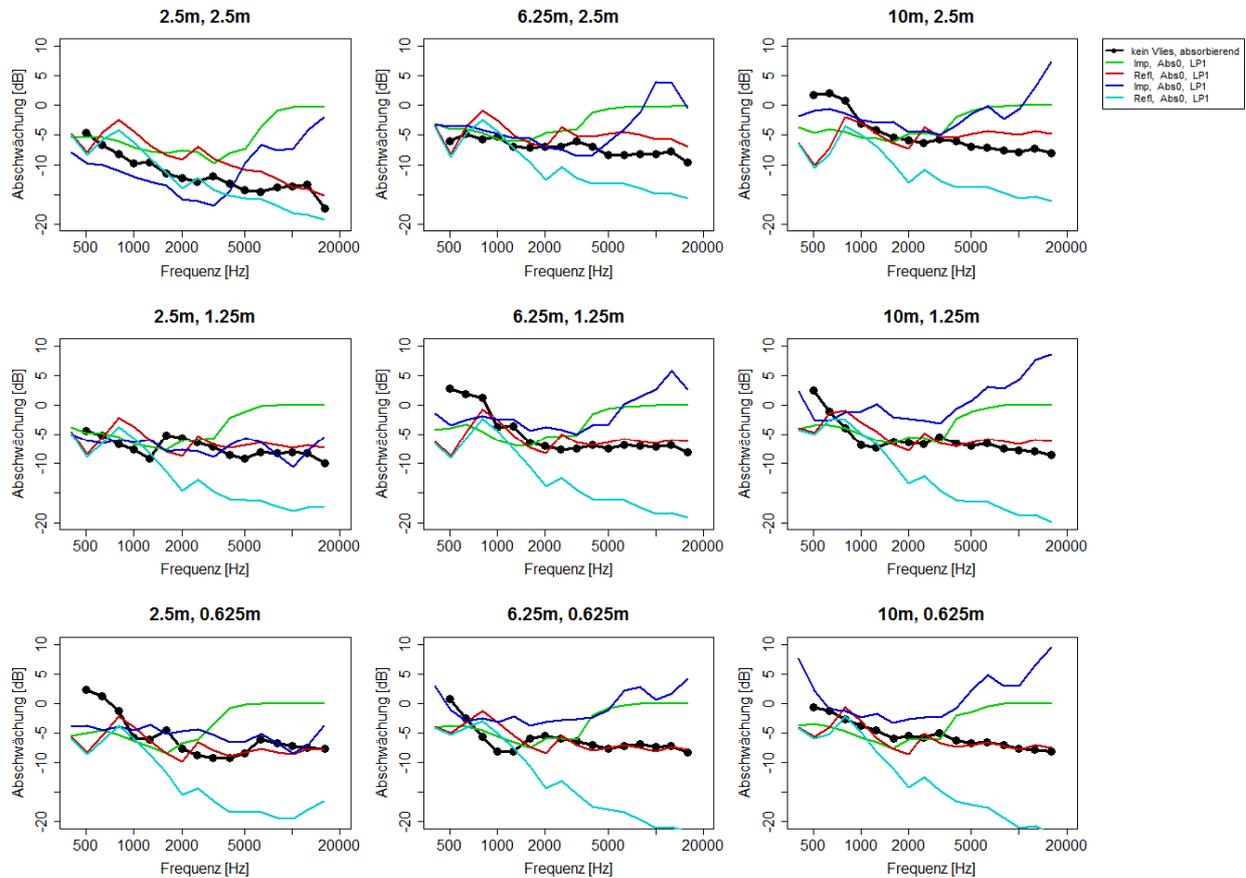


Abbildung 16: Doppelt nach innen geknickte Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.

Für die doppelt nach innen geknickte Wand mit reflektierender Oberkante wurde für LP1 keine Messung durchgeführt. Als Oberkante wird die nach oben zeigende Fläche des horizontalen Teils der doppelt geknickten Wand und später bei der T-Wand der Ausleger bezeichnet. Der Vergleich der Simulation mit der absorbierenden Wand (blau vs. grün und cyan vs. rot) zeigt meist eine schlechtere Schirmwirkung für die LSW mit reflektierender Oberkante. In manchen Fällen (mit Bodenmodell in Bodennähe) zeigt sich auch eine leichte Verbesserung.

3.2.8 Doppelt geknickte Wand nach innen mit reflektierender Oberkante, LP2

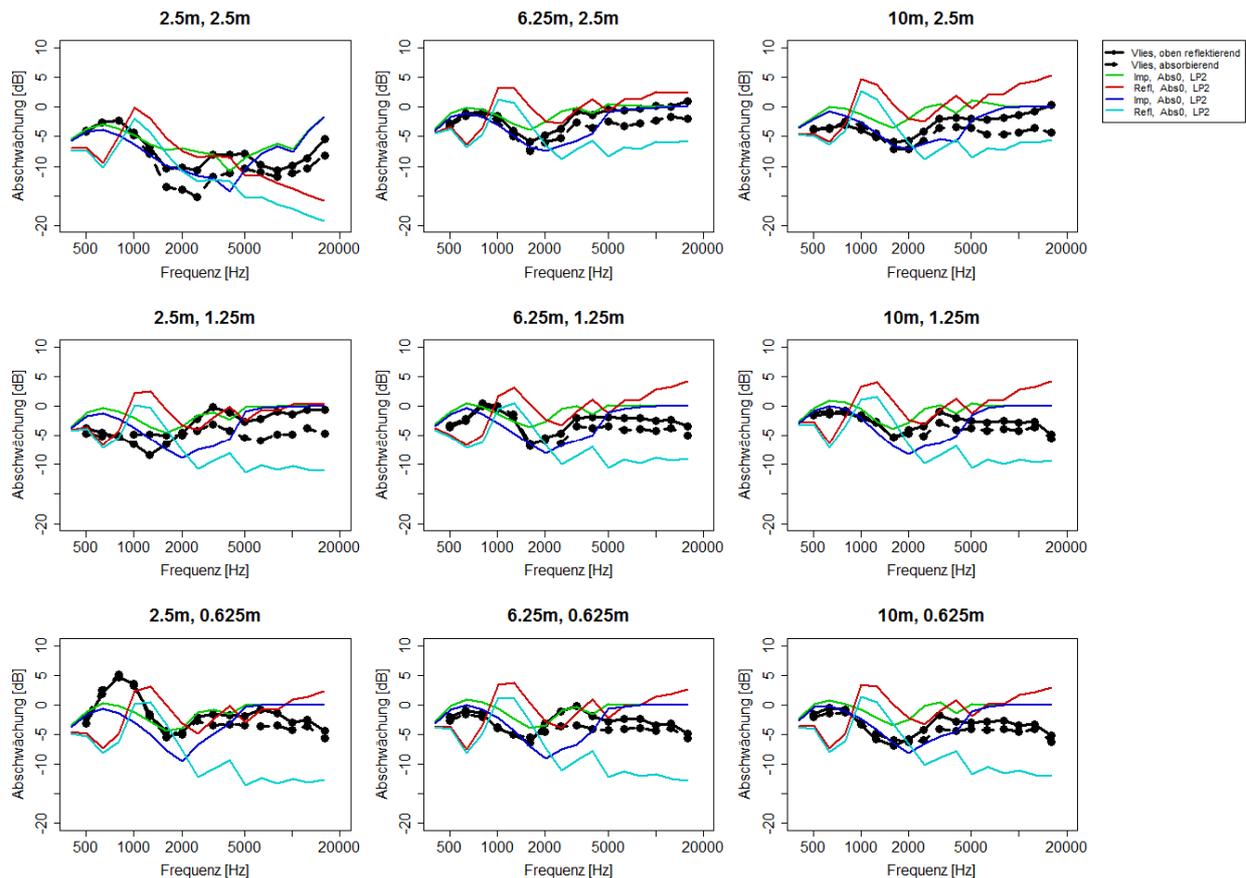


Abbildung 17: Doppelt nach innen geknickte Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.

Für LP2 gab es eine Messung mit reflektierender Oberkante und es zeigt sich teils eine gute Übereinstimmung. Hier bringt die Verwendung von absorbierendem Material eine deutliche Verbesserung der Schirmwirkung, wobei dieser Vorteil in der Simulation vor allem bei hohen Frequenzen überschätzt wird. Dies zeigt auch Abbildung 18 wo der Unterschied zwischen den beiden Varianten der doppelt geknickten Wand dargestellt ist. Interessant ist, dass der Effekt der Oberkante sowohl bei Messung als auch Simulation relativ konstant über die Positionen ist (Abbildung 18). Positive Werte zeigen hier eine Verschlechterung bei reflektierender Oberkante.

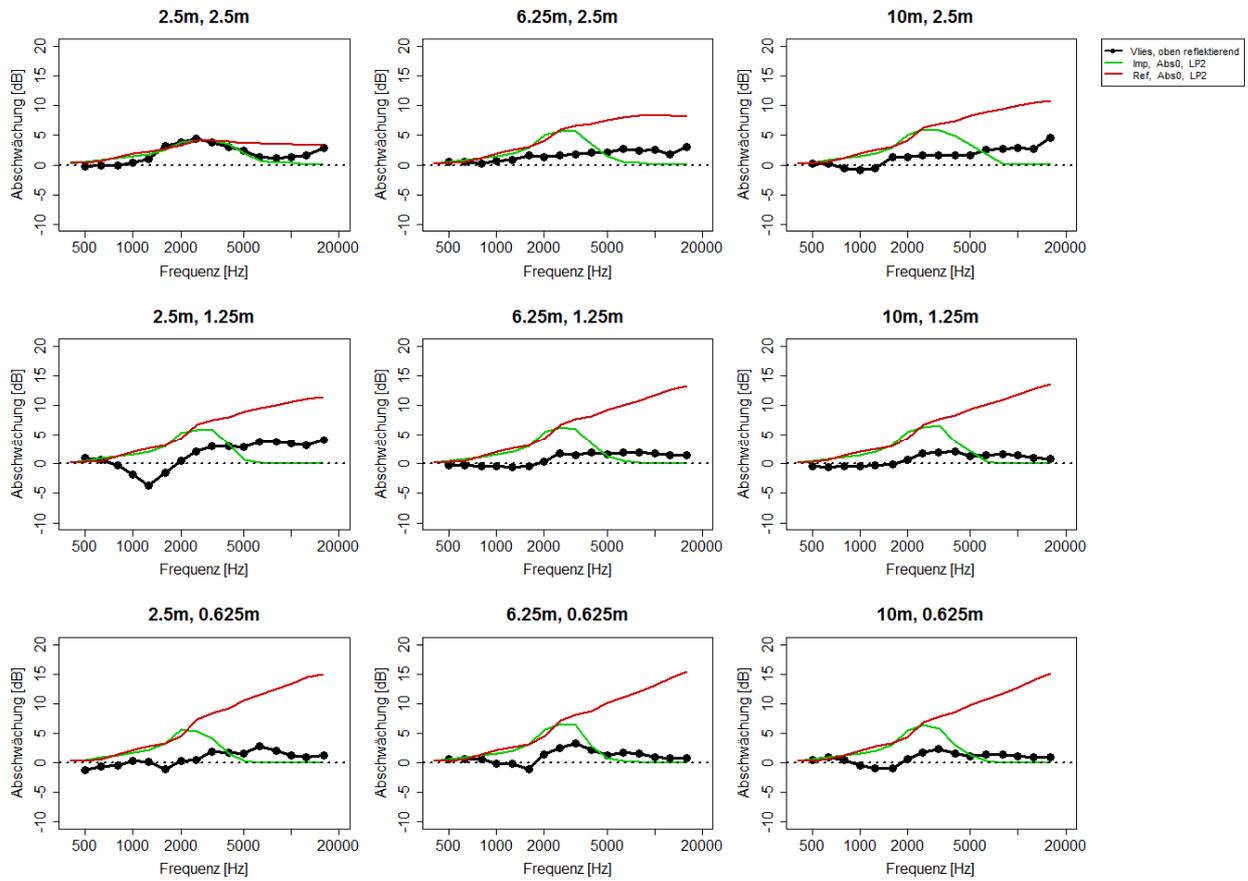


Abbildung 18: Vergleich zwischen doppelt nach innen geknickter Wand mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2

3.2.9 Doppelt geknickte Wand nach außen geneigt, LP1

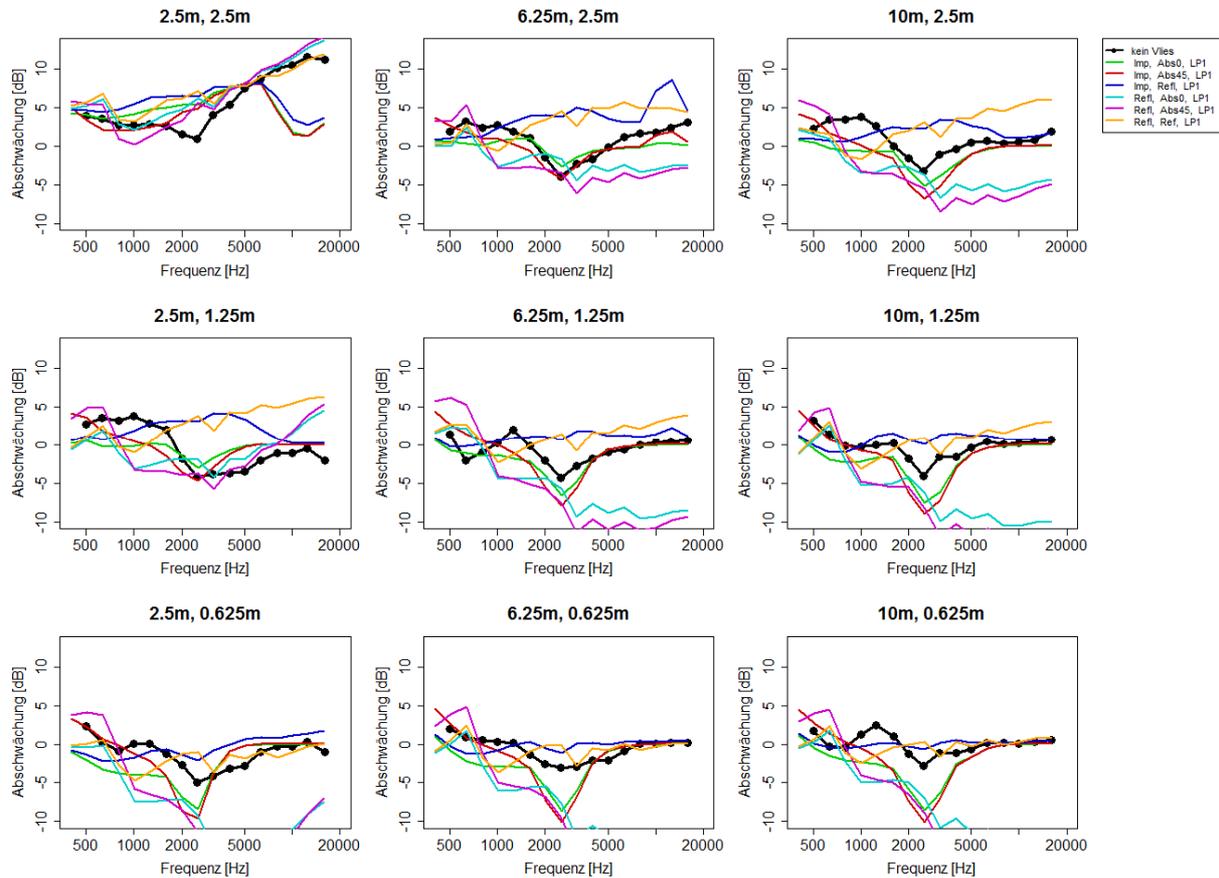


Abbildung 19: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach außen geknickter Wand für LP1.

Es zeigt sich ein deutlicher Effekt des Wandmaterials auf die Ergebnisse der Simulation. Das in den Messungen auftretende Maximum bei etwa 2-3 kHz wird in der Simulation etwas überhöht. Bei voll reflektierender Wand ist dieser Peak nicht vorhanden und es treten deutliche Abweichungen über etwa 3 kHz auf. Bei Simulation einer voll reflektierenden Wand treten teilweise deutliche Abweichungen auf, wobei dies hauptsächlich eine Verschlechterung der Schirmwirkung der geknickten LSW bedeutet. Dies ist nicht überraschend, da, wie schon bei der einfach nach außen geknickten LSW, die Absorption im Schallweg eine große Rolle spielt.

3.2.10 Doppelt geknickte Wand nach außen geneigt, LP2

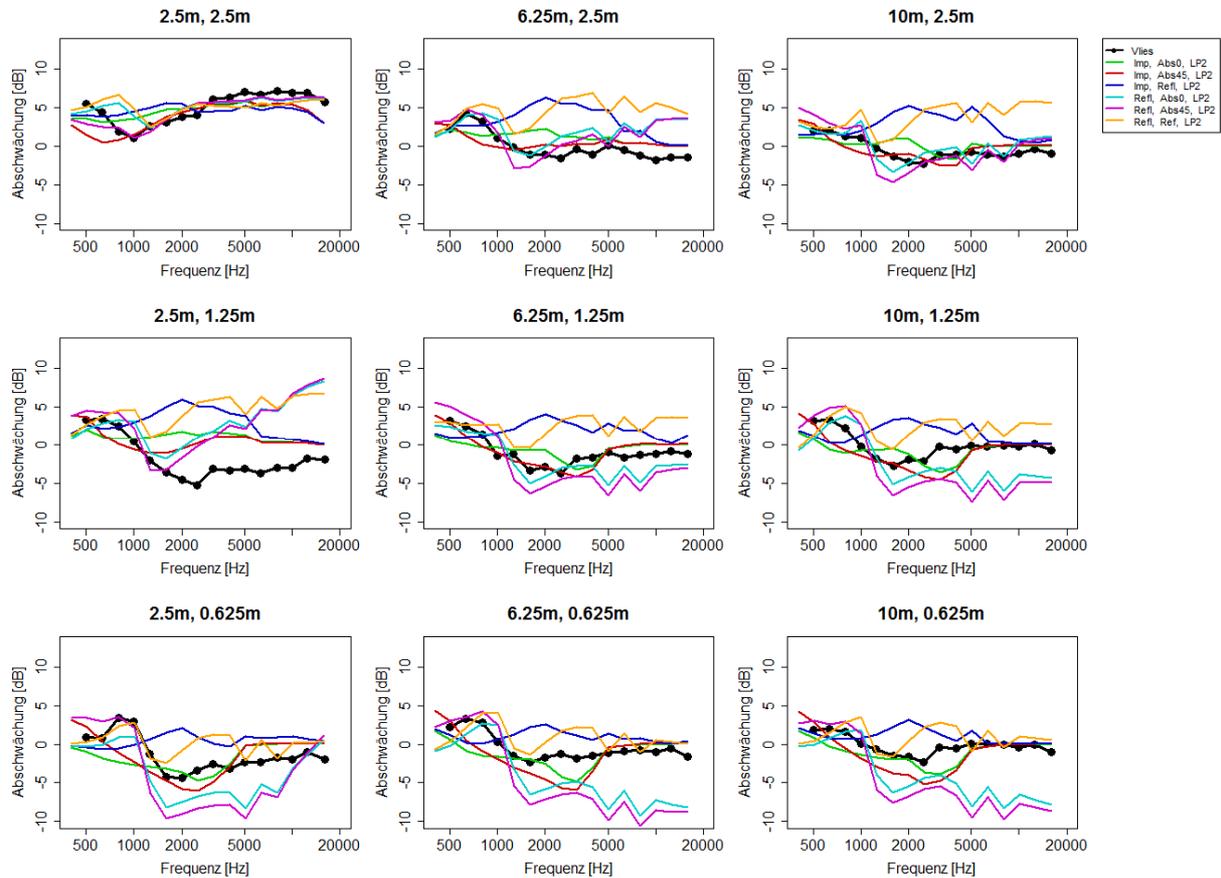


Abbildung 20: Unterschied zwischen gerader und doppelt nach außen geknickter Wand für LP2.

Die Ergebnisse stimmen vor allem auf den höheren Messpositionen sehr gut überein. Das Wandmaterial hat auch hier einen entscheidenden Einfluss. Bei bodennahen Positionen treten deutliche Unterschiede auf, vor allem bei reflektierendem Boden, wo der Effekt stark überschätzt wird.

3.2.11 Doppelt geknickte Wand nach außen mit reflektierender Oberkante, LP1

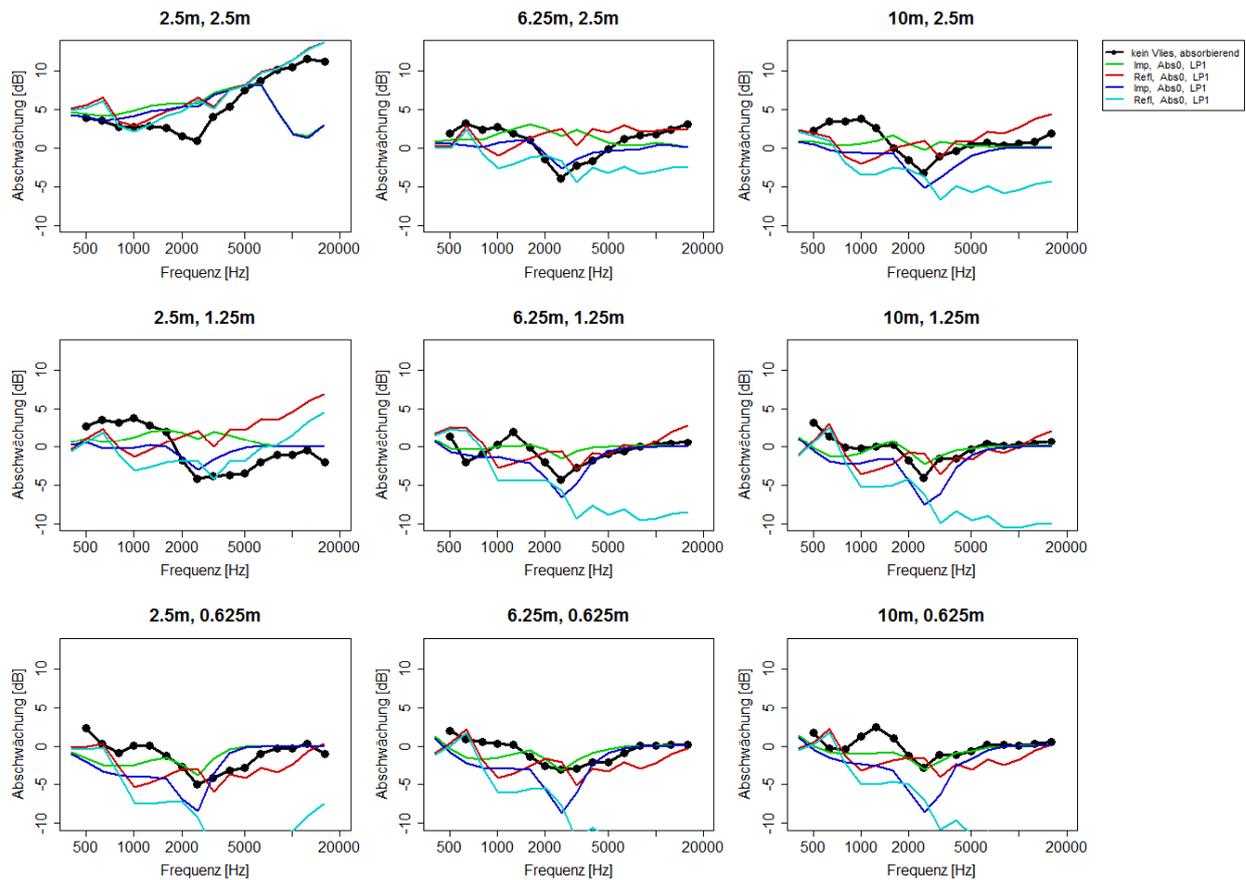


Abbildung 21: Doppelt nach außen geknickter Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.

Für diesen Fall gibt es kein Messergebnis, die Simulation zeigt aber eine bessere Schirmwirkung bei Verwendung von absorbierendem Material auf der Oberseite.

3.2.12 Doppelt geknickte Wand nach außen mit reflektierender Oberkante, LP2

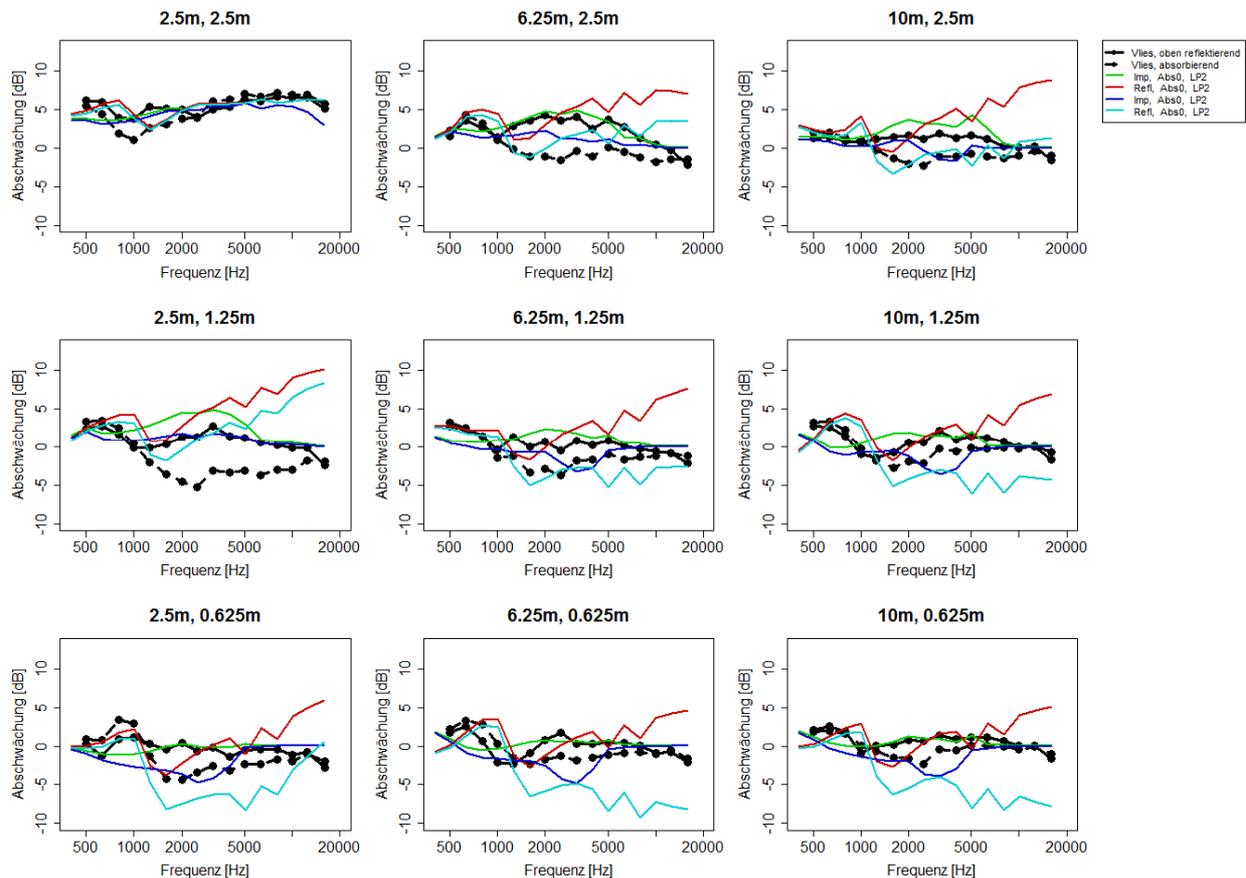


Abbildung 22: Doppelt nach außen geknickter Wand mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.

Tendenziell zeigen sowohl Messung als auch Simulation eine Verbesserung bei absorbierender Oberkante. Die Stärke der Änderung ist bei der Simulation im hochfrequenten Bereich bei reflektierendem Boden deutlich höher. Abbildung 23 illustriert den Unterschied zwischen den beiden Varianten etwas besser. Bis etwa 3 kHz ist die Übereinstimmung teils gut, darüber hängt es stark vom verwendeten Bodenmodell ab. Im Gegensatz zur doppelt nach innen geknickten Wand ist der Unterschied zwischen den Oberkanten-Varianten deutlich stärker und auch stärker positionsabhängig (vgl. Abbildung 18).

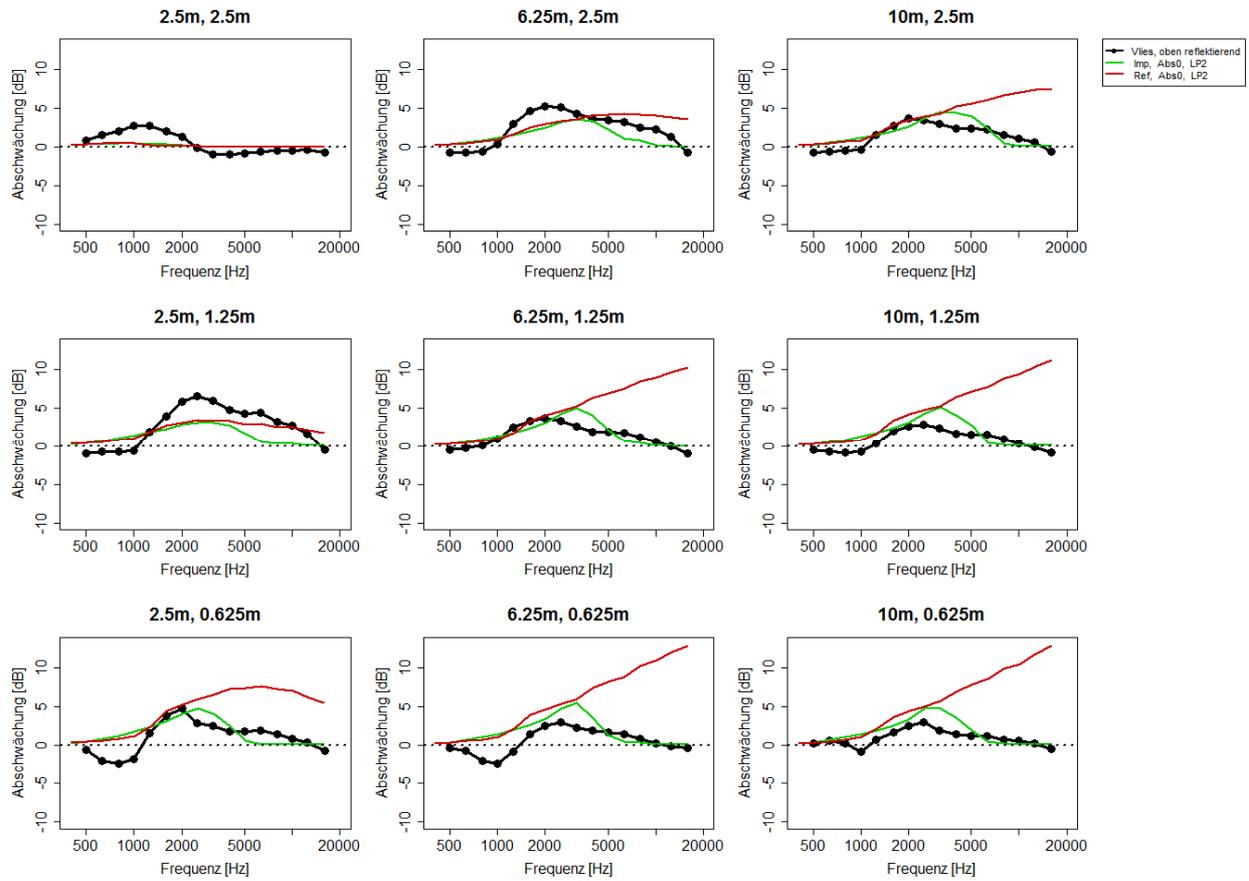


Abbildung 23: Vergleich zwischen doppelt nach außen geknickter Wand mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2

3.2.13 T-Profil, LP1

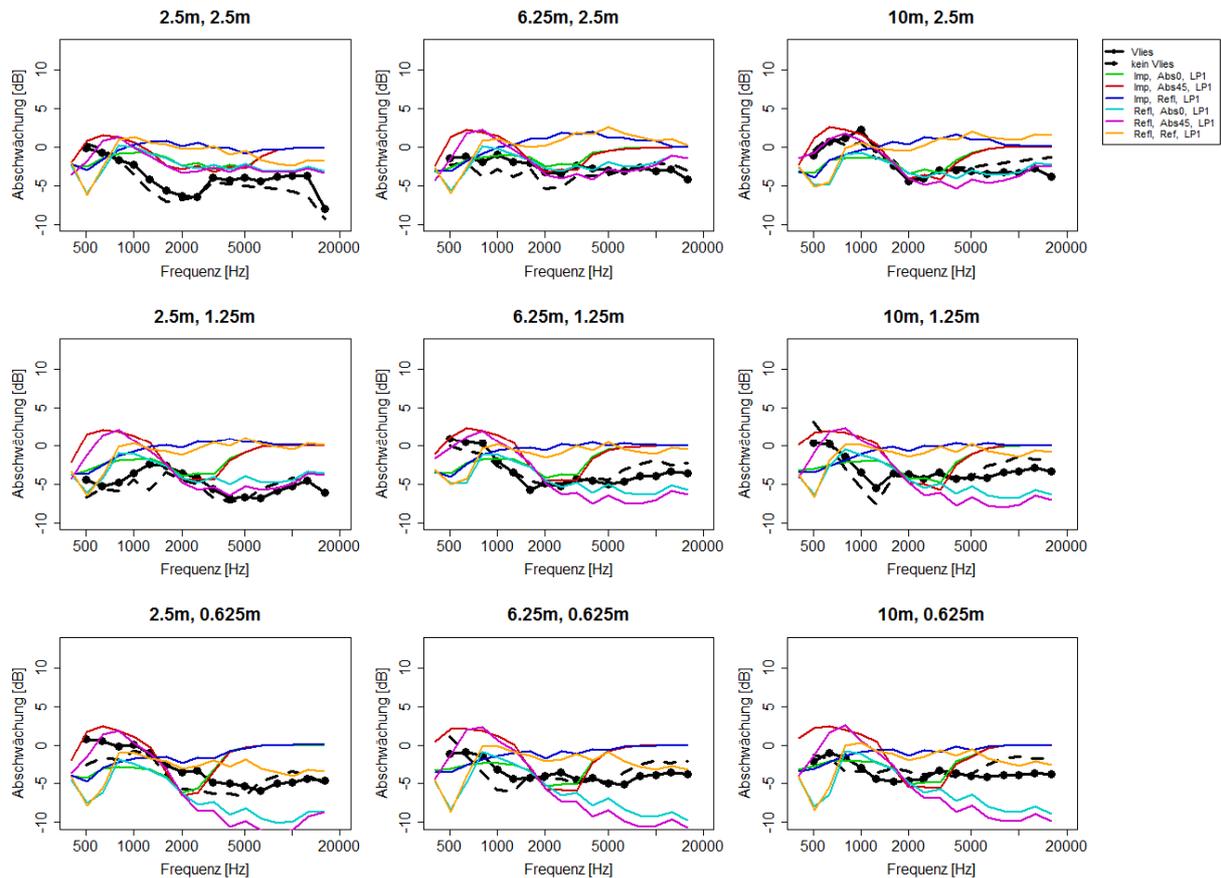


Abbildung 24: Unterschied zwischen gerader Wand und Wand mit T-Aufsatz für LP1.

Bei der T-Wand zeigt sich vor allem bei tieferen Frequenzen ein deutlicher Effekt der Phase des Wandmaterials (rot vs. grün und magenta vs. cyan). Über 2 kHz ist bei bodennahen Positionen sowohl das Bodenmodell ausschlaggebend als auch die Verwendung eines Absorptionsmaterials. Die reflektierenden Wände (blau und gelb) unterscheiden sich vor allem zwischen 2 und 5 kHz von den absorbierenden Wänden.

Die Ergebnisse zeigen auch dass das Vlies bei der Messung keinen allzu großen Einfluss hatte.

3.2.14 T-Profil, LP2

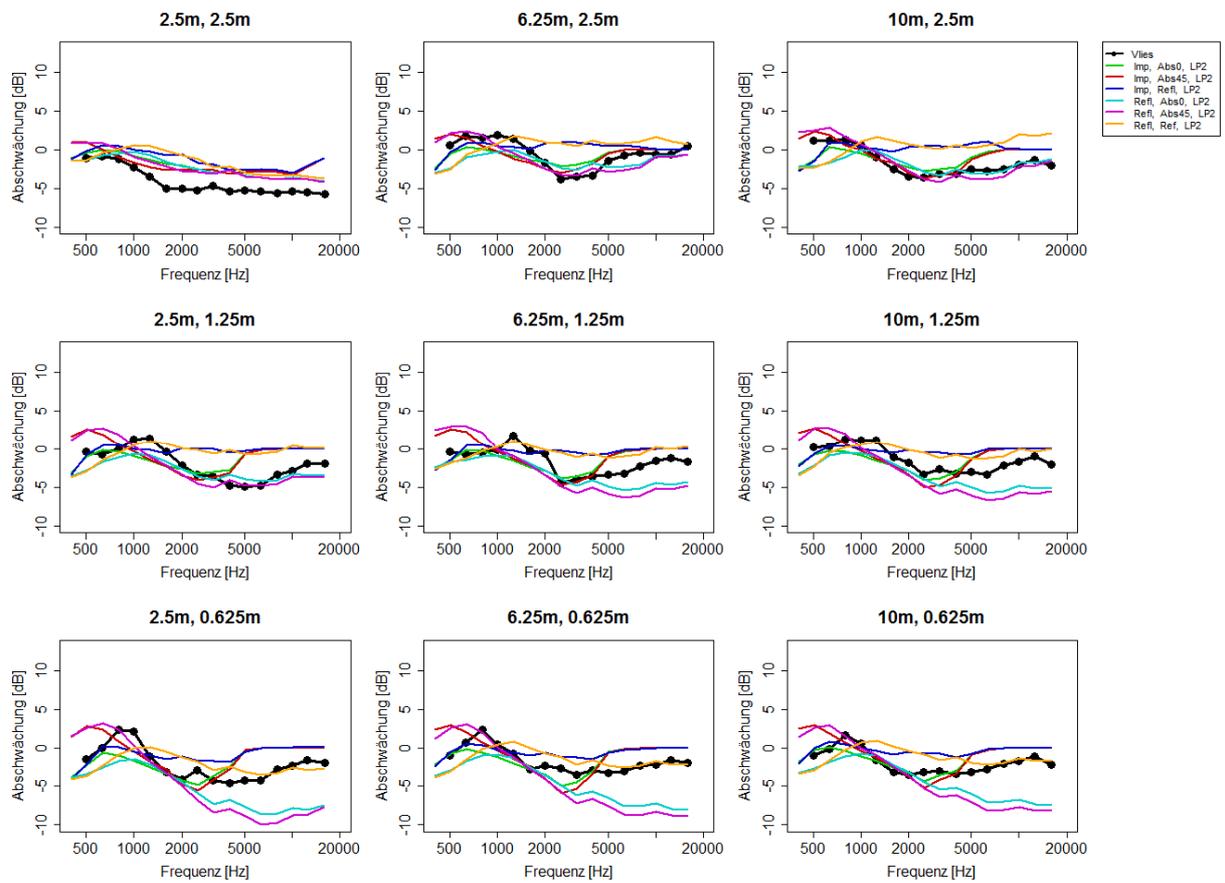


Abbildung 25: Unterschied zwischen gerader Wand und Wand mit T-Aufsatz für LP2.

Es gelten im Prinzip die gleichen Aussagen wie bei LP1. Für LP2 wurde nur eine Messung mit Vlies durchgeführt.

3.2.15 T-Profil, reflektierende Oberkante, LP1

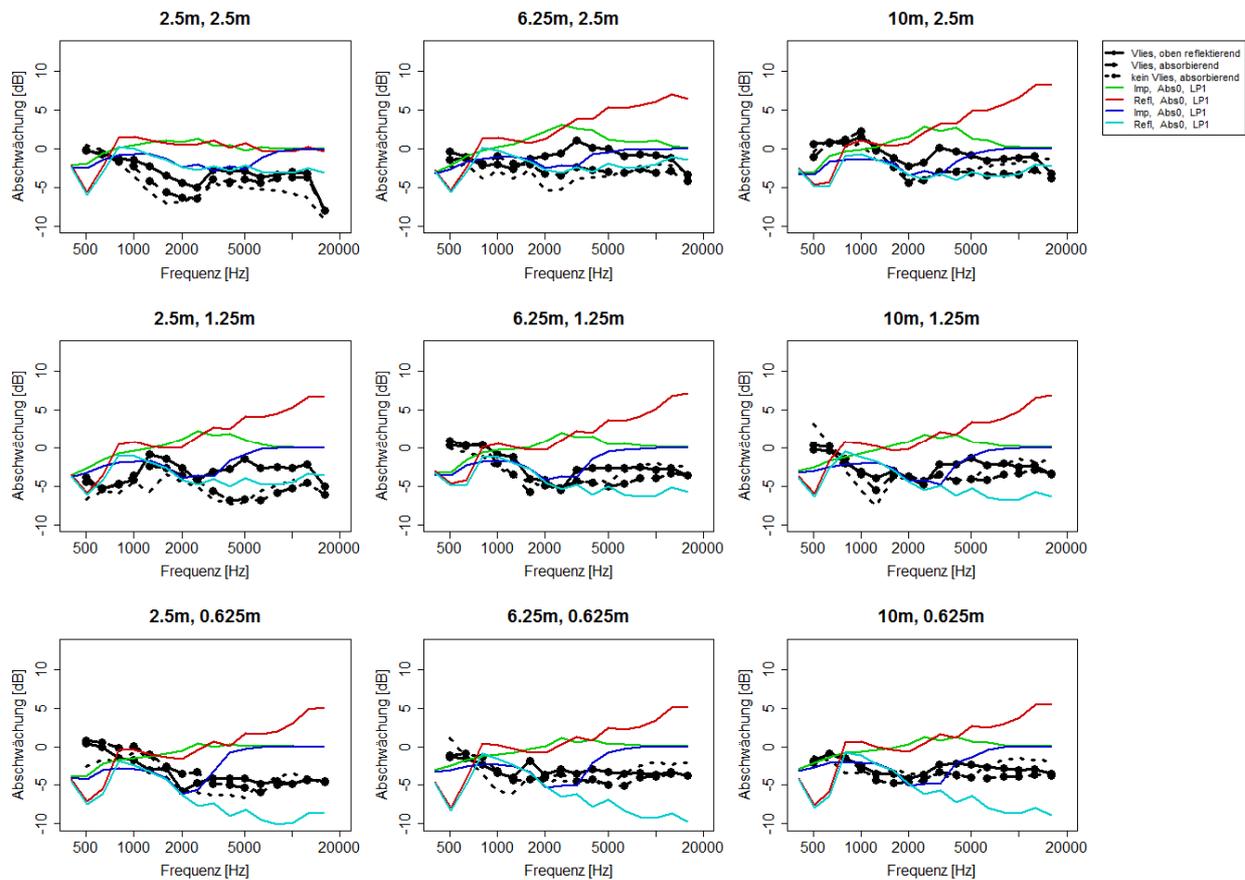


Abbildung 26: T-Profil mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP1.

Die Wirkung des T-Aufsatzes mit reflektierender Oberkante wird in der Simulation teils deutlich unterschätzt wogegen die Variante mit reflektierendem Boden und absorbierender Oberkante vor allem bei hohen Frequenzen überschätzt wird. Vergleicht man die beiden Varianten der Oberkante (Abbildung 27) zeigt sich, dass ein deutlicher Unterschied im Bereich 2-5 kHz auftritt und bei hohen Frequenzen vor allem der reflektierende Boden starke Abweichungen von der Messung verursacht.

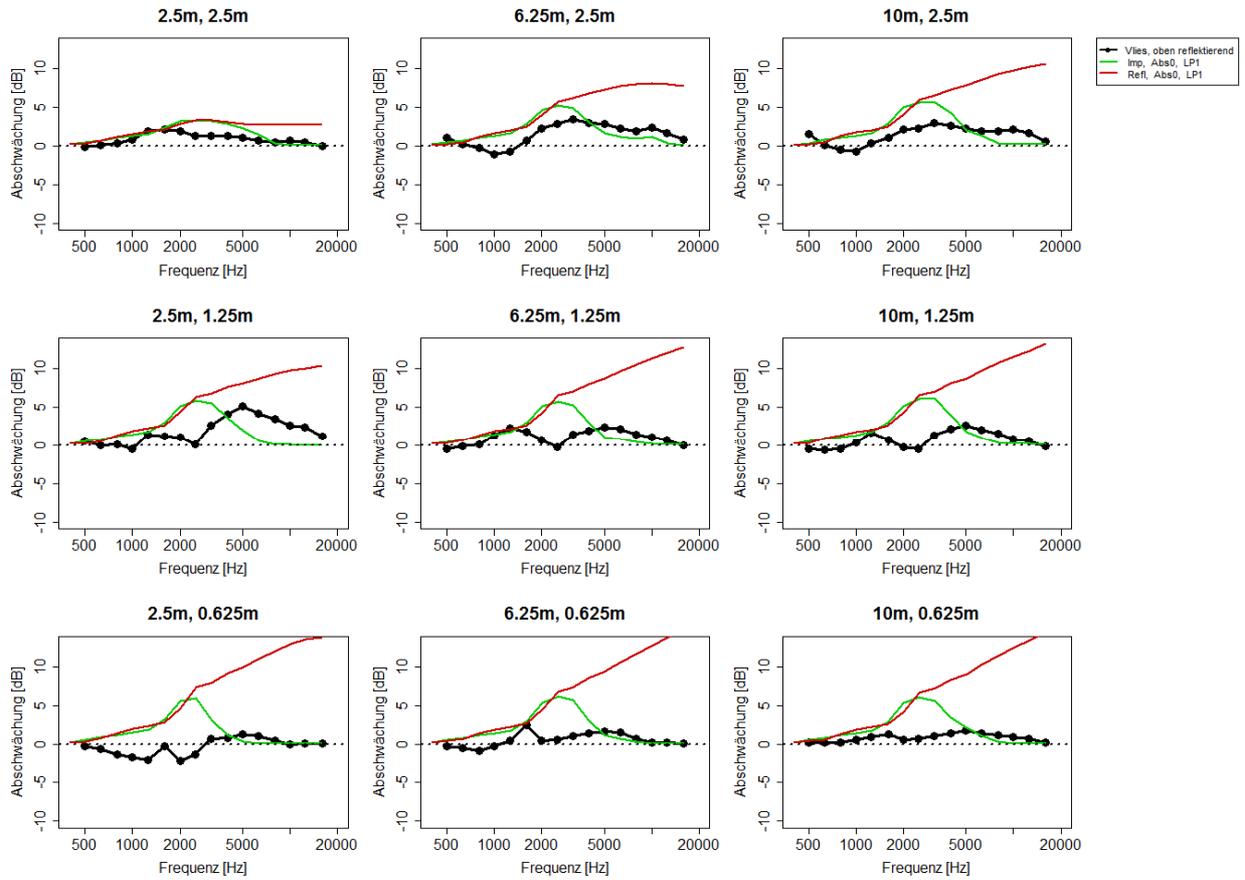


Abbildung 27: Vergleich zwischen T-Profil mit und ohne reflektierender Oberkante für LP1

3.2.16 T-Profil, reflektierende Oberkante, LP2

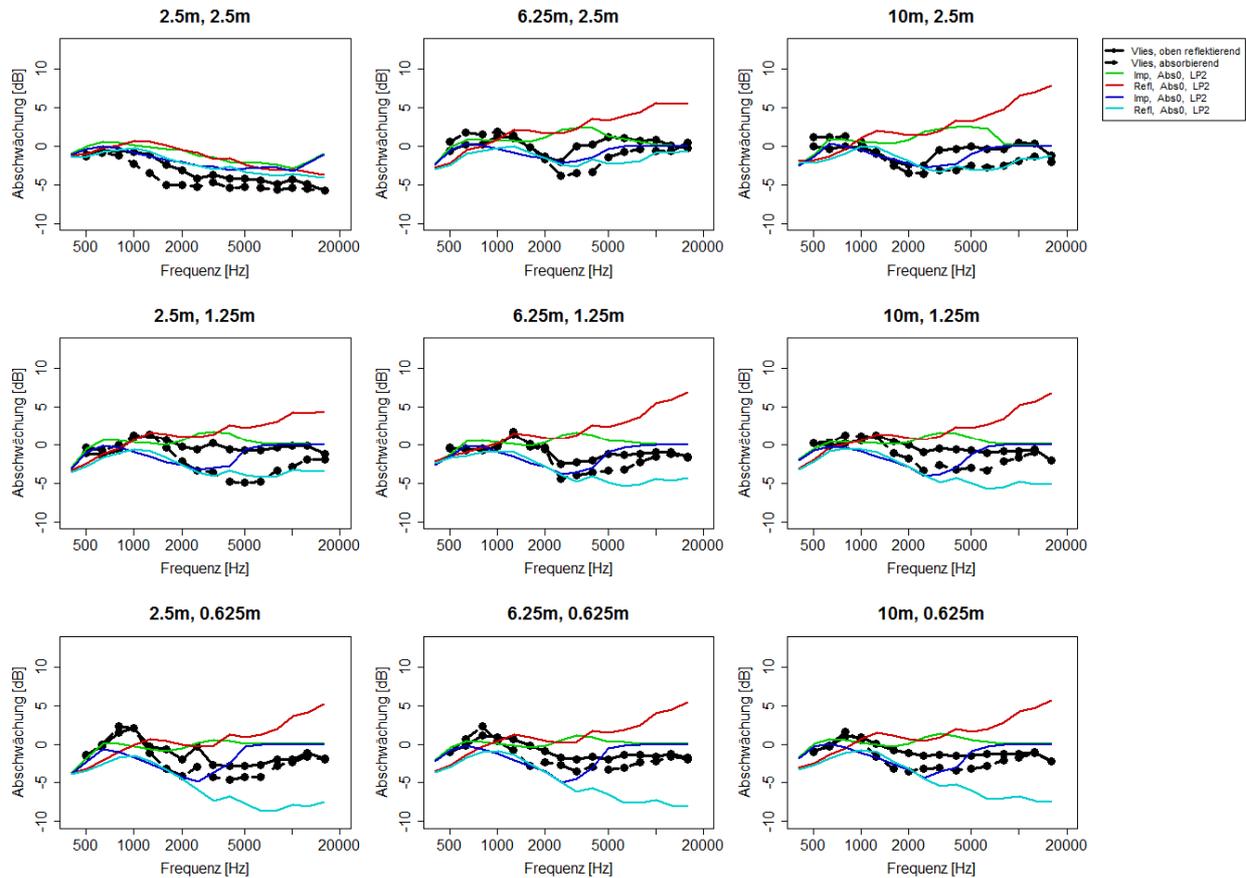


Abbildung 28: T-Profil mit reflektierender und absorbierender Oberkante im Vergleich zur geraden Wand für LP2.

Auch für LP2 wird die Wirkung insgesamt unterschätzt, der Effekt ist allerdings deutlich geringer. Bei hohen Frequenzen wirkt sich das angenommene Bodenmodell stark aus. Im Großen und Ganzen sind die Ergebnisse ähnlich wie bei LP1 mit etwas weniger stark ausgeprägten Abweichungen.

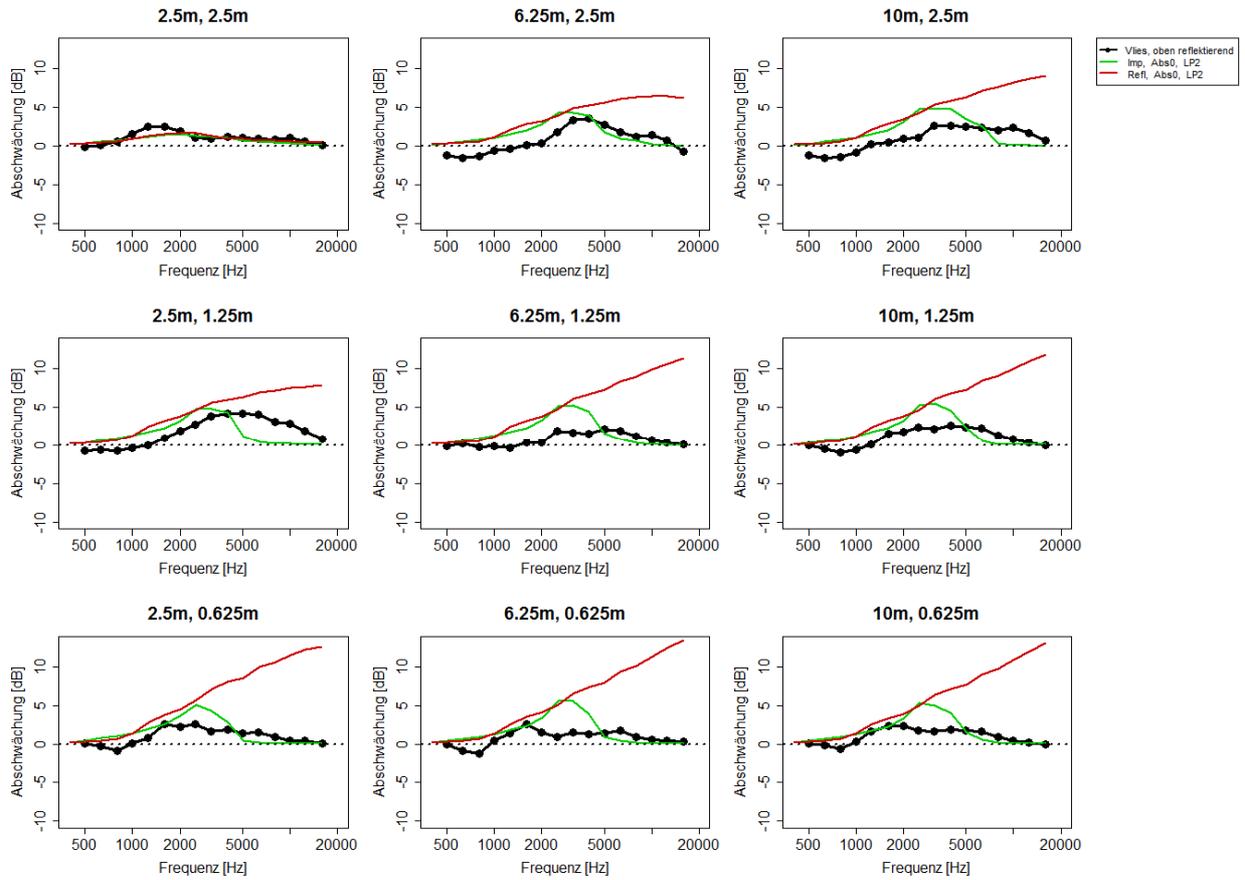


Abbildung 29: Vergleich zwischen T-Profil mit und ohne reflektierender Oberkante für LP2

3.3 Zusammenfassung

Die Simulationen zur Validierung des Rechenmodells zeigen teils sehr gute Übereinstimmung, vor allem auf der etwas weiter entfernten Lautsprecherposition LP2. Der Grad der Übereinstimmung ist auch abhängig von der verwendeten Geometrie der LSW. Diese Abhängigkeit ergibt sich zum Teil aus Wechselwirkungen der Geometrie und des verwendeten Messverfahrens und den Schwierigkeiten, die idealisierten Bedingungen in der Simulation in einer Modellmessung nachzubilden. Von der Messung ausgehend ist es aber genauso schwierig, die Simulation an die Gegebenheiten der Messung anzupassen. Im Folgenden werden kurz die Unterschiede zwischen Messung und Simulation und deren Effekte zusammengefasst.

Verwendung einer kohärenten Linienquelle in der Simulation

Eine Überprüfung der geknickten Wand mittels einer dreidimensionalen Simulation hat gezeigt, dass zwar Unterschiede zu 2D vorhanden sind, diese sind aber vergleichsweise gering gemessen am Unterschied zur Messung. Dies legt nahe, dass die Verwendung der 2D-Simulation gerechtfertigt ist.

Richtcharakteristik des Lautsprechers

Aufgrund der Simulationen zeigt sich, dass die Richtcharakteristik vor allem dann eine Rolle spielt, wenn zwischen den verglichenen LSWs ein starker Unterschied zwischen den Positionen der Kante in Bezug auf die Lautsprecherachse besteht. Dieser Effekt ist natürlich am stärksten für hohe Frequenzen, da hier die Richtcharakteristik sehr stark ausgeprägt ist. Das Nachbilden der Richtcharakteristik durch mehrere Quellen ist problematisch, da es nahezu unmöglich ist, Phaseneffekte zu messen und in der Simulation zu berücksichtigen. Daher brachte ein solches Modell für den Lautsprecher auf Basis der in Abbildung 6 dargestellten Charakteristik keine Verbesserung.

Akustische Impedanz des Asphalts (mit und ohne Vlies)

Bezüglich der akustischen Impedanz des Bodens zeigt sich, dass die Verwendung eines Impedanzmodells einen starken Einfluss auf die Berechnung hat. Das hier verwendete Impedanzmodell ist kein dezidiertes Modell für Asphalt. Es zeigt eine erhöhte Absorption bei für porösen Asphalt typischen Frequenzen. Allerdings sind diese Absorptionsmaxima bei

Asphalt deutlich schmalbandiger. Die Verwendung eines solchen Asphaltmodells wäre aber nur dann sinnvoll, wenn die genauen Reflexionseigenschaften des Asphalts bekannt wären. Diese müssten in einer weiteren Messung erhoben werden (siehe z.B. [4]) an deren Ergebnisse ein passendes Impedanzmodell angepasst werden muss. Selbst bei Durchführung einer entsprechenden Messung bleibt das Problem, dass diese Modelle bei hohen Frequenzen jenseits der 3 kHz nur schlecht oder gar nicht definiert sind.

Hallraummessung des Absorptionsmaterials

Die Absorptionswerte (aus Hallraummessung) des Absorptionsmaterials weisen keine Phaseninformation bzgl. der akustischen Impedanz auf. Dadurch lässt sich nur unter Annahme einer Phase die Impedanz herleiten. Die Verwendung zweier verschiedener Werte für die Phase hat gezeigt, dass bei manchen Geometrien z.B. T-Profil oder doppelt geknickter Wand die Phase Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Ob bei Verwendung eines für dieses Material geeigneten Impedanzmodells eine deutliche Verbesserung erzielt werden kann ist aber fraglich, da auch hier wiederum das Modell und eine Impedanzmessung abgeglichen werden müssten und auch dieser Prozess mit Unsicherheiten sowohl in Messung als auch Rechnung verbunden ist.

Es zeigt sich, dass beim Vergleich zwischen Messung und Simulation bestimmte Parameter nur schwer oder gar nicht abzugleichen sind. Es wurde versucht, möglichst viele dieser Parameter zu kontrollieren, aber gewisse Unterschiede können nur schwer vermieden werden. Viele dieser Unterschiede wie zum Beispiel der Lautsprecher sind aber für den Vergleich tatsächlicher LSW-Geometrien nicht relevant.

Trotz der vorhandenen Unterschiede zeigt sich aber eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Vor allem im Frequenzbereich bis etwa 5 kHz konnten die Unterschiede der komplexen Geometrie zur geraden Wand teils sehr gut nachgebildet werden. Die Unterschiede, die vor allem bei hohen Frequenzen auftreten, sind für die Simulationen im Maßstab 1:1 weniger interessant. Daraus folgt, dass die Berechnungsmethode gut geeignet ist, die Korrekturfaktoren für komplexe Geometrien herzuleiten.

4 VERGLEICH MESSUNG IN SITU UND SIMULATION

Um das Rechenmodell zu validieren wurde eine Messung an 2 Messquerschnitten der LSW und einem Referenzquerschnitt ohne LSW an der A4 bei Mannswörth durchgeführt. Diese Messungen wurden dann mit Simulationen der beiden LSW-Querschnitte verglichen. Es wurden verschiedene Varianten gerechnet um den Einfluss verschiedener Simulationsparameter zu untersuchen. Im Detail wurden folgende Simulationsparameter untersucht

4. Einfluss des Geländes auf die Berechnung des Unterschieds zwischen den Lärmschutzwänden
5. Einfluss der Abbildung der Querschnittsgeometrie der LSW in der Simulation
6. Einfluss eines Graslandmodells hinter der LSW

4.1 Beschreibung der Wandquerschnitte

In diesem Teil des Projekts ging es darum, den Unterschied zweier Geometrien zu messen und damit das Rechenmodell zu validieren. Im Bereich Mannswörth existieren 2 verschiedene LSWs. Die eine LSW (Profil 2) ist eine 5,85 m hohe, leicht nach innen (zur Fahrbahn hin gekrümmte LSW, die andere (Profil 1) ist 7,4 m hoch (7,7 m inklusive Blechverblendung, die in den Simulationen berücksichtigt wurde) und stark nach innen gekrümmt. In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die beiden verschiedenen Geometrien dargestellt. Beide LSWs bestehen aus in Stahlschienen eingeschobenen Aluminiumkassetten die einseitig absorbierend ausgeführt sind. Beide Wände haben außerdem einen Betonsockel.

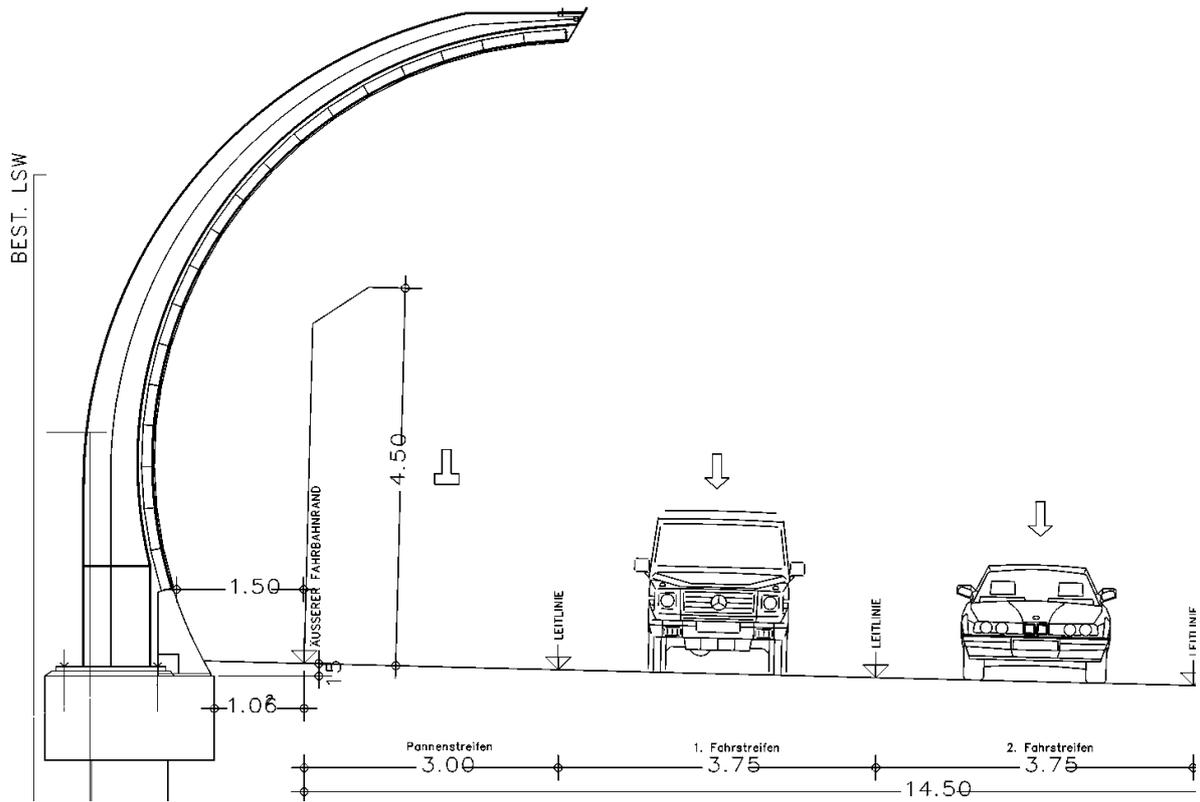


Abbildung 30: Hohes LSW-Profil (Profil 1)

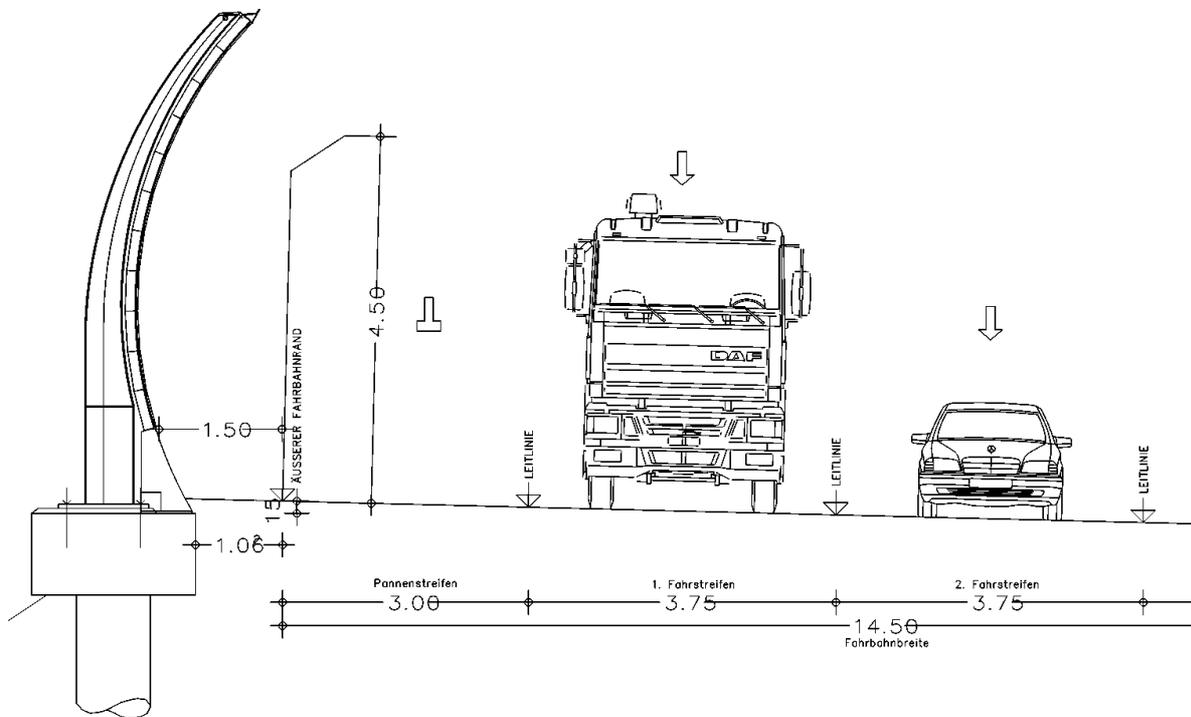


Abbildung 31: Niedriges LSW-Profil (Profil 2)

Abbildung 32 zeigt die Messkurve der LSW-Elemente aus dem Hallraum. Diese Werte wurden auch für die Berechnung der LSWs herangezogen. Die Messkurve entspricht in etwa der Bezugskurve für höchstabsorbierende Elemente (ÖNORM EN ISO 11654). Die Abbildung zeigt außerdem noch die extrapolierte Absorptionskurve, die für die spätere Simulation der verschiedenen Geometrien herangezogen wurde.

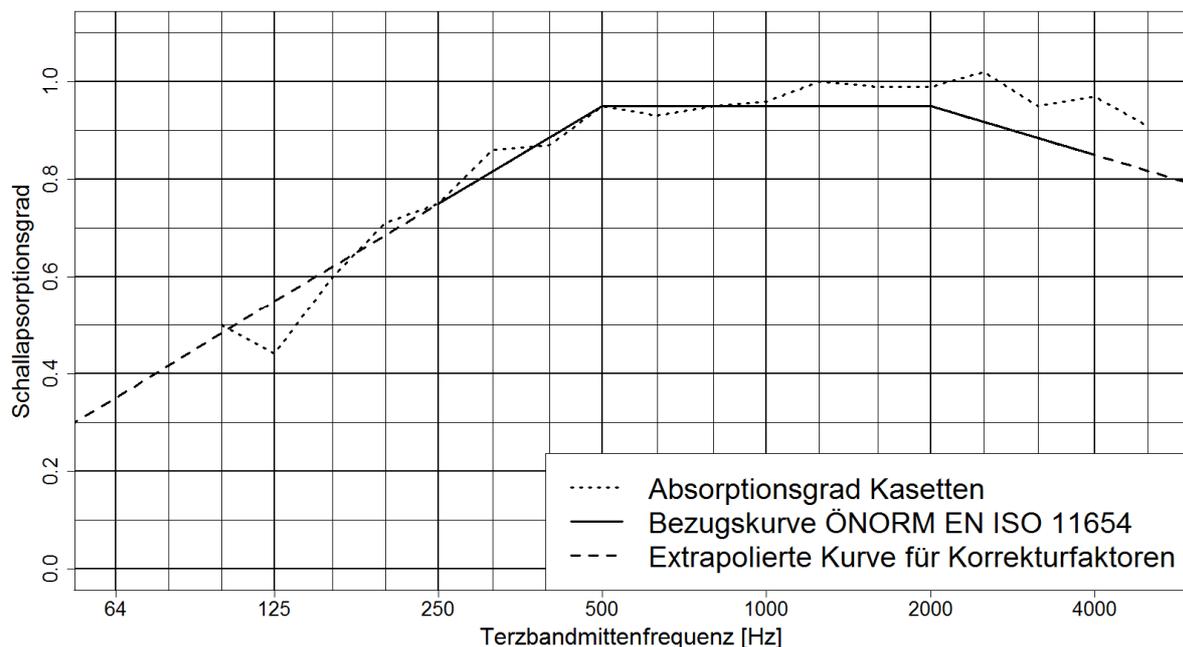


Abbildung 32: Gemessene Absorptionskurve im Hallraum für die Messstelle Mannswörth, ÖNORM-Bezugskurve und extrapolierte Kurve für die Berechnung der Korrekturfaktoren

4.2 Messung

Die Messung und Ergebnisse werden im beigefügten Messbericht beschrieben (Anhang B).

Beschreibung der Simulation

4.2.1 Diskretisierung der LSW-Geometrie

Mit Hilfe der Konstruktionszeichnungen der LSWs (Abbildung 30 und Abbildung 31) wurden die Querschnitte diskretisiert und für die Verwendung in der Software AcouBEM aufbereitet.

Wie bereits bei den Modellmessungen erwähnt, kann eine zu schmale Wandgeometrie zu numerischen Problemen in der Simulation führen. Aufgrund der geringen Dicke der LSW-

Elemente wurde anfänglich auf der Rückseite der LSW nicht der Umriss der LSW-Elemente verwendet, sondern der Umriss der deutlich breiteren Stahlkonstruktion. Diese Diskretisierungsvariante wird im weiteren Verlauf auch als dicke LSW bezeichnet.

Zusätzlich wurden auch Simulationen durchgeführt, in der Mittelflächenelemente verwendet wurden. Diese erlauben es, dünne Strukturen darzustellen. Hierzu wird nur die Vorderseite der LSW diskretisiert, wodurch die LSW hier keine Dicke aufweist.

4.2.2 Fahrbahn, Quell- und Mikrofonpositionen

Die Fahrbahn wurde als voll reflektierend angenommen und es wurden sechs Quellpositionen festgelegt, die in etwa der der LSW näheren Fahrzeugseite entsprechen. Die Simulationen wurden in 2D durchgeführt, daher sind die Quellen durch kohärente Linienquellen modelliert. Da für die Evaluierung des Einflusses des Geländes die Quellen nicht wie bei den späteren Simulationen in die Fahrbahn gelegt werden können, wurde eine Quellhöhe von 15 cm festgelegt um zu starke Interferenzen zu vermeiden.

Die Ergebnisse wurden auf einem Grid ausgewertet, das 5 bis 100 m Abstand zur Wand hat und die Höhen von 1 m bis 10 m über der Fahrbahn in 1 m-Schritten abdeckt.

4.2.3 Verkehrsaufkommen

Für die Bestimmung des Unterschieds zwischen den beiden LSW ist die Berücksichtigung des unterschiedlichen Verkehrsaufkommens auf den sechs Spuren wichtig. Daher wurde eine Verkehrszählung herangezogen, um den Quellpegelunterschied zu bestimmen. Die Vorgehensweise ist im angehängten Messbericht nachzulesen.

4.2.4 Absorption

Für die Berücksichtigung der Absorption an der Innenseite der LSWs wurden die Hallraummessungen der Aluminium-Elemente herangezogen. Wie schon bei den Modellmessungen und Simulationen wurden diese in reelle Impedanzen umgerechnet (d.h. mit 0 Grad Phasendrehung). Da die Absorption sehr nahe oder sogar über 1 liegt, wurde der Absorptionskoeffizient mit 0,9 multipliziert.

4.2.5 Geländeform

Die Autobahn ist um etwa 1 m erhöht gegenüber dem umliegenden Gelände. Daher wurde untersucht, welchen Einfluss die Berücksichtigung dieses Geländeabfalls auf die Ergebnisse der Simulation hat. In Abbildung 33 ist schematisch der Verlauf des Geländes eingezeichnet. Es wurden 2 Varianten simuliert. Einmal wurde der Geländeverlauf in die Simulation

miteinbezogen, während bei der zweiten Simulation einfach die Fahrbahnkante verlängert wurde (strichlierte Linie). Die zweite Situation entspricht den allgemeinen Bedingungen die zur Herleitung der Korrekturfaktoren verwendet werden.

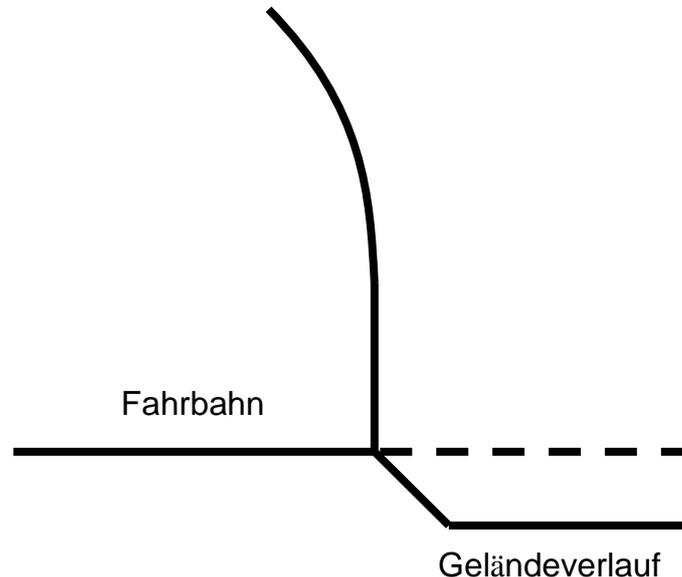


Abbildung 33: Schematischer Verlauf des Geländes

4.2.6 Berechnung der Spektren und Einzahlwerte

Das Hauptinteresse gilt den spektralen Unterschieden zwischen den beiden Wandtypen, da diese dann später auch für die Herleitung der Korrekturfaktoren verwendet werden. Daher werden Oktavspektren durch Mittelung berechnet. Die Mittenfrequenz wird in Terzen variiert, um eine höhere Auflösung zu erzielen. Dieser Vorgang wurde bereits bei der Modellvalidierung verwendet. Es wurden 10 Frequenzen pro Terz verwendet. Hierfür ist die Beaufschlagung mit einem Verkehrslärmspektrum nicht notwendig.

Zur Berechnung der Einzahlwerte wurde das Quellspektrum an die Referenzmessung angepasst. Dazu wurde auf Basis der berechneten Pegelunterschiede zwischen den Fahrbahnen das Terzspektrum im Referenzmesspunkt ohne LSW berechnet. Das Quellspektrum wurde dann so modifiziert, dass die Berechnung mit der Messung im Referenzmesspunkt übereinstimmt. Die Simulationen der beiden LSWs wurden dann mit diesem modifizierten Quellspektrum beaufschlagt, und daraus wurden dann die Einzahlwerte in dB(A) berechnet.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Effekt der Diskretisierung und des Geländes

Abbildung 34 zeigt die simulierte und gemessene Abschwächung durch Profil 1 im Vergleich zu Profil 2 in dB in Terzschritten über Oktaven gemittelt für verschiedene simulierte Diskretisierungen (Mittelflächen vs. Gesamtumriss) und verschiedene Geländeformen (Geländeabfall vs. flach). Im tieffrequenten Bereich ergeben sich vor allem Unterschiede durch die Geländeform, in den mittleren und hohen Frequenzen eher durch die Diskretisierung und hier vor allem in den tieferen und näheren Messpositionen. Für die Simulation mit den Mittelflächenelementen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung, während die Umriss-Geometrie eine deutliche Überschätzung der Wirkung von Profil 1 zeigt. Die Ursache dieser Diskrepanz liegt hauptsächlich in der Geometrie der Spitze der Wand. Beim Umriss der Wand plus Stahlträger folgt bei Profil 1 eine relativ lange horizontale Fläche hinter der Spitze der LSW. Die dadurch veränderten Verhältnisse an der Rückwand resultieren in einer besseren Abschattung des Bereichs hinter der LSW. Simulationen mit einer veränderten Diskretisierung bei der dieser flache Teil wesentlich kürzer ausfällt liegen sehr nahe an der Mittelflächen-Simulation. Diese Ergebnisse zeigen dass die Abbildung der LSW-Geometrie vor allem im Bereich des Kopfes der LSW wichtig ist. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Spitze nur mit Mittelflächenelementen gut abgebildet werden kann. Die gleiche Abbildung zeigt auch, dass hier der Einfluss des Geländes vor allem in hohen Positionen gering ist. Größere Unterschiede ergeben sich vor allem in Bodennähe bei Frequenzen unter 500 Hz.

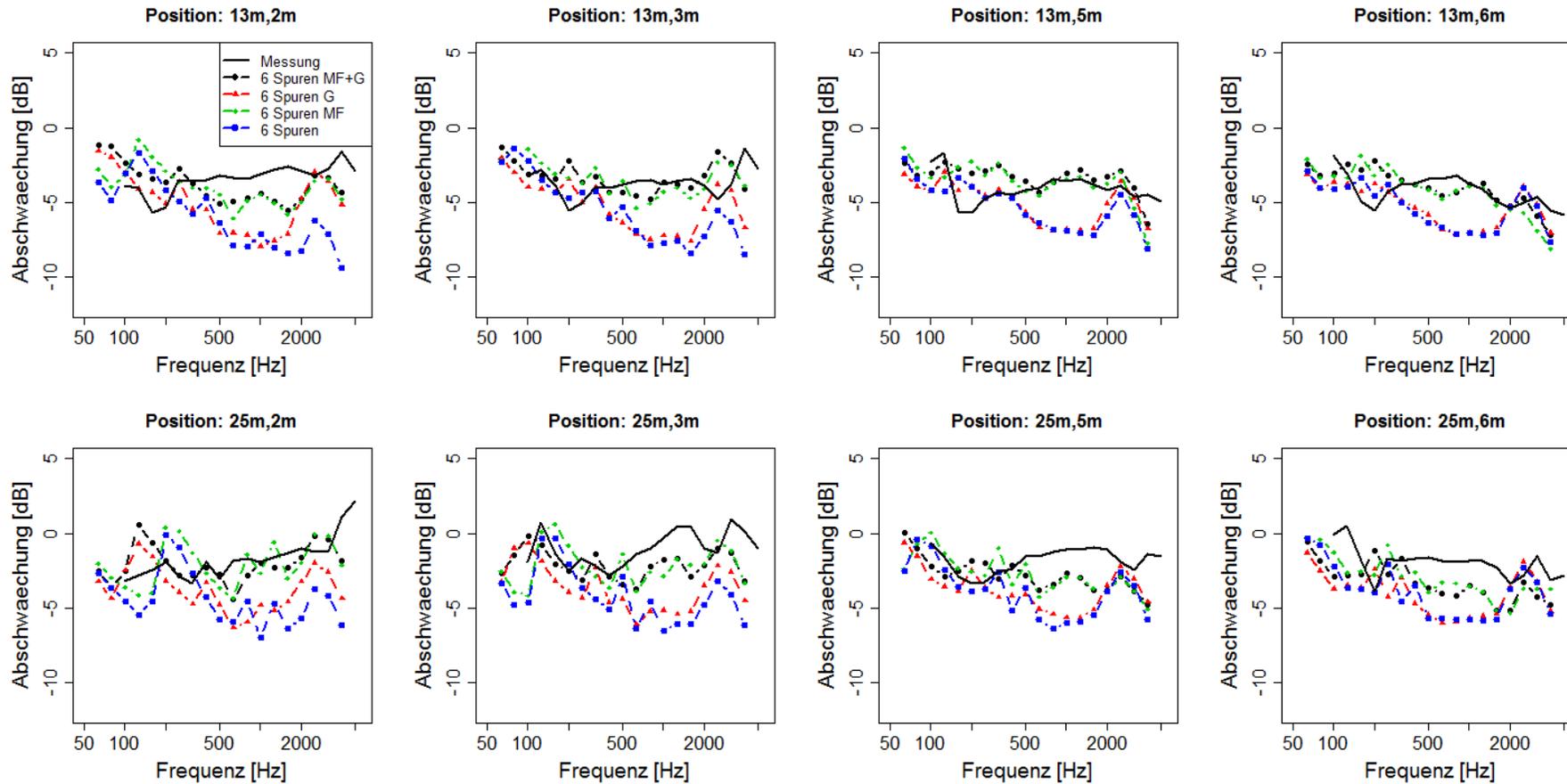


Abbildung 34: Vergleich Messung und Simulationen des Unterschieds zwischen Profil 2 und Profil 1. MF...Mittelflächen, G...Gelände

Einzahlwerte

Abbildung 35 zeigt was schon in den Spektren sichtbar war. Die Mittelflächensimulationen stimmen sehr gut mit der Messung überein. Abweichungen im Bereich von maximal 1,5 dB(A), teilweise auch deutlich weniger. Bei Verwendung der Umriss-Geometrie sind die Abweichungen deutlich größer. Das Gelände spielt eine untergeordnete Rolle.

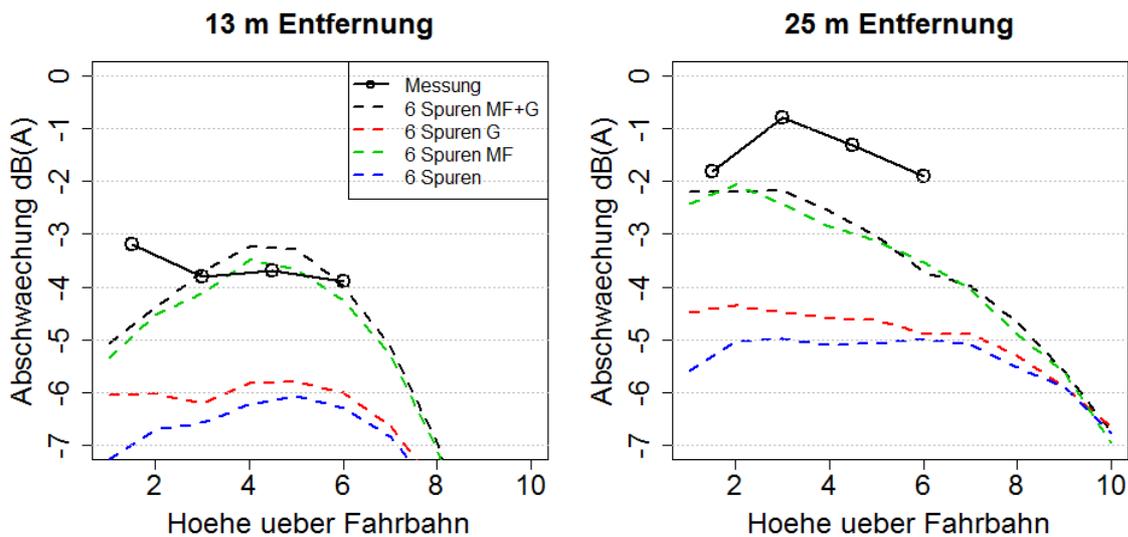


Abbildung 35: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Einzahlwerte

4.3.2 Einfluss der Entfernung der Fahrspur

Abbildung 36 zeigt den Einfluss der Entfernung der Fahrspur auf die Wirkung der höheren verglichen mit der niedrigeren LSW in 2 und 10 m Höhe. In größeren Entfernungen spielt die Quellentfernung praktisch keine Rolle, nur bei nahen Positionen ist ein Effekt erkennbar. Die hier gezeigten A-bewerteten Pegel wurden mit dem genormten Verkehrslärmspektrum berechnet.

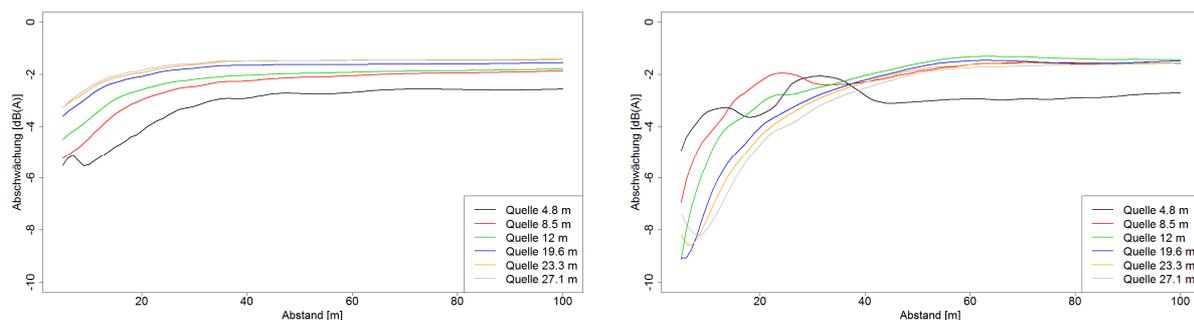


Abbildung 36: Einfluss der Quellentfernung in 2 und 10 m Höhe

4.3.3 Absorbierendes Material auf der Oberkante

Ausgehend von den Ergebnissen von absorbierenden T-Profilen (siehe nächstes Kapitel) wurde noch eine Simulation mit einer absorbierenden Oberkante, d.h. der waagrechte Abschnitt direkt hinter der Beugekante bei Profil 1, durchgeführt, allerdings nur für eine Quellentfernung (8.5 m, Abbildung 37). Es wurde die dicke Wandgeometrie verwendet. Wie zu erwarten hat die zusätzliche Absorption einen positiven Effekt auf die Wirkung der hohen LSW.

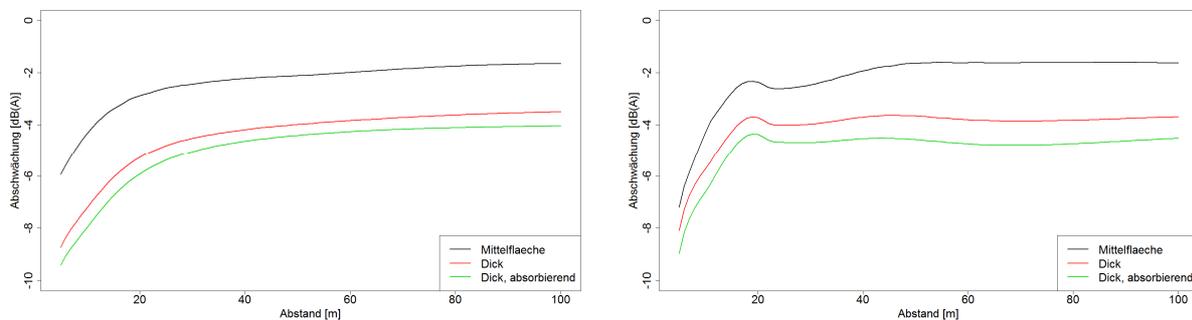


Abbildung 37: Einfluss von Absorption auf der Oberkante

4.3.4 Graslandmodell hinter der LSW

Es wurde auch eine Simulation mit einem Graslandmodell hinter der Wand durchgeführt, allerdings nur für Mittelflächelemente und modelliertem Geländeabfall. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen, dass der Effekt des Bodenmodells relativ gering ausfällt (weniger als 0,5 dB(A)), vor allem bei größerer Entfernung.

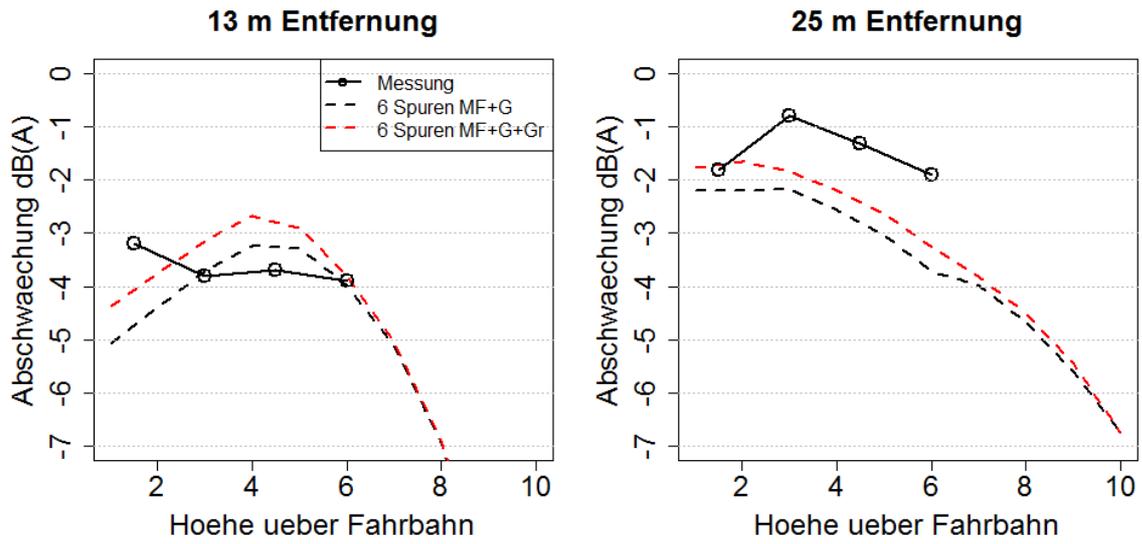


Abbildung 38: Effekt des Graslandmodells hinter der Wand auf den A-bewerteten Pegel

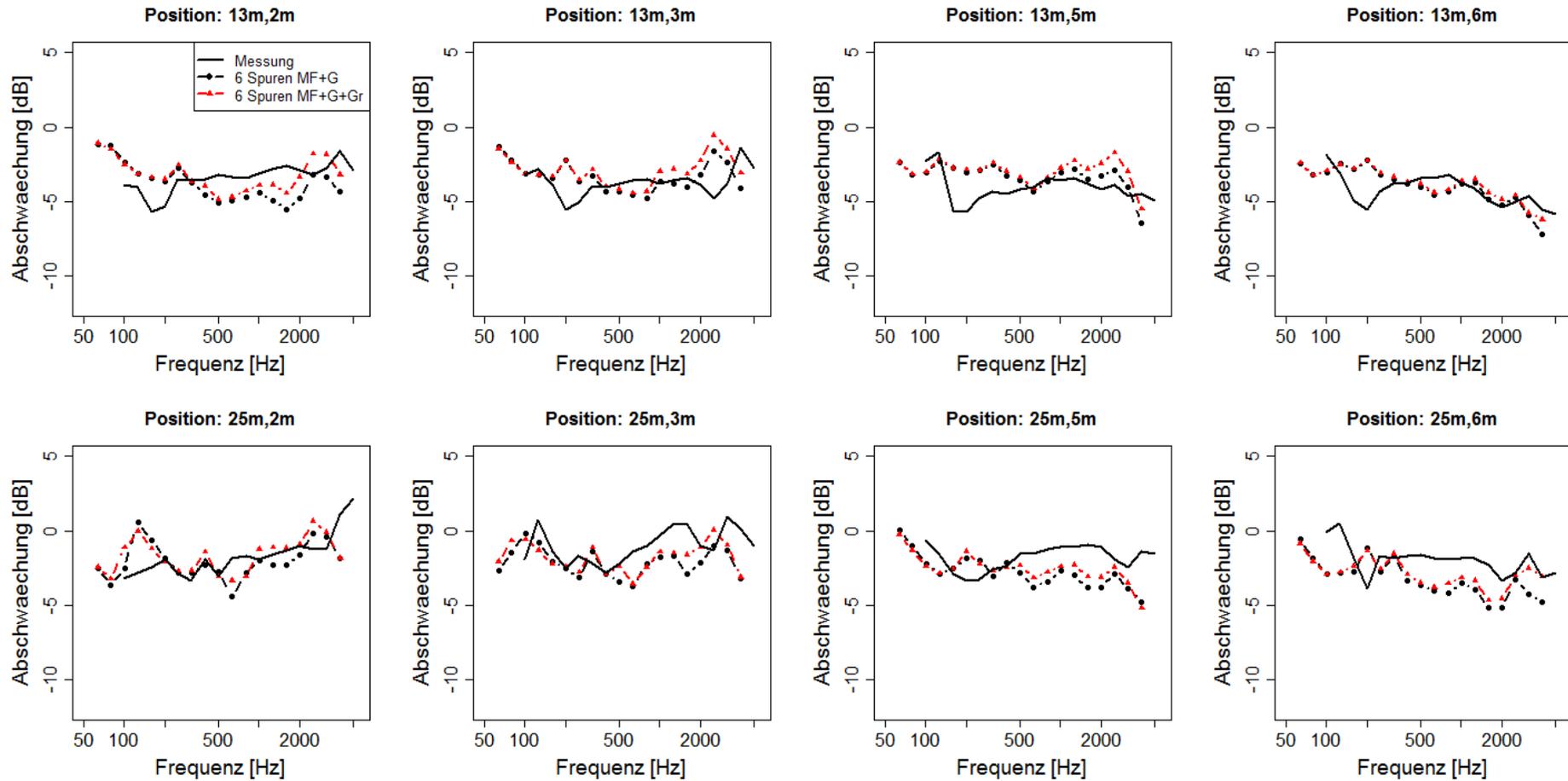


Abbildung 39: Vergleich der Mittelflächensimulationen inklusive Geländeabfall (G) mit und ohne Grasland (Gr)

4.3.5 Einfluss der Quellhöhe

Da die Simulationen für die Korrekturfaktoren mit Quellhöhe 0 m durchgeführt werden, wurde noch der Einfluss der Quellhöhe auf den Unterschied zwischen Profil 2 und 1 untersucht. Dies war nur für die Simulation ohne Geländeabfall möglich, da die Quelle ansonsten auf der in diesem Fall diskretisierten Fahrbahn gelegen wäre, was zu einer Singularität führt. Der Unterschied ist gering (meist im Bereich von 0,5 dB). Im Spektrum weichen einige Bänder ab, aber im Normalfall ist die Abweichung geringer als 1 dB.

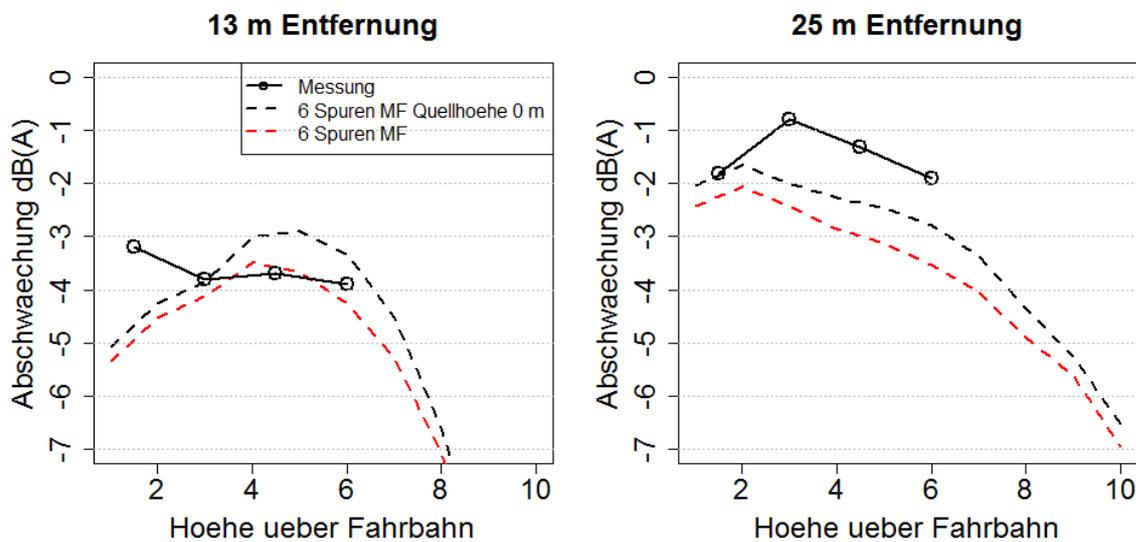


Abbildung 40: Effekt der Quellhöhe auf den A-bewerteten Pegel

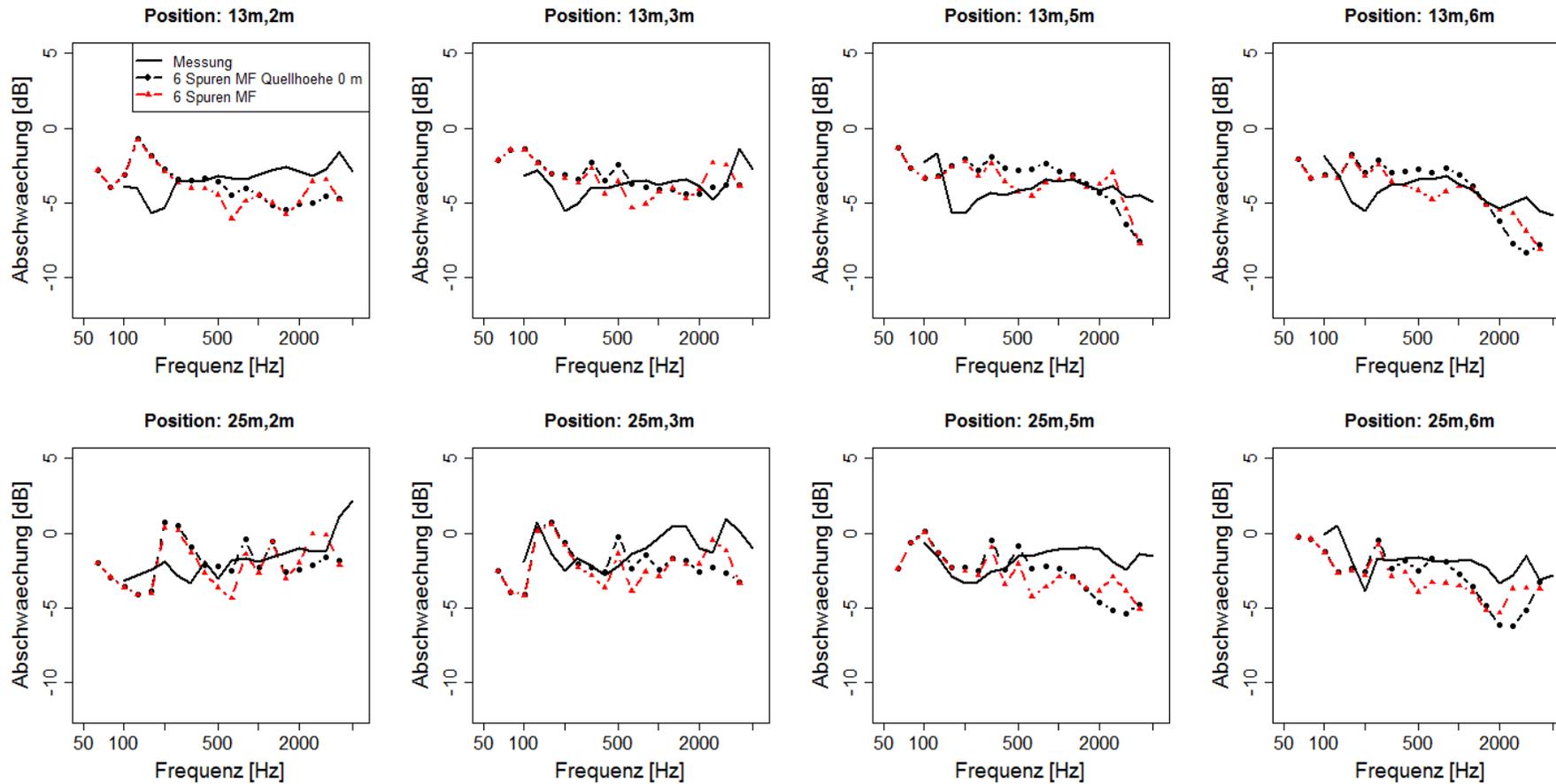


Abbildung 41: Vergleich der Mittelflächensimulationen ohne Geländeabfall mit Quellhöhe 0,15 und 0 m

4.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Simulation zeigen größtenteils eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung, sowohl im spektralen Bereich als auch für die Einzählwerte. Im Spektrum ergaben sich Unterschiede von maximal 2 dB, meist lagen die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung darunter. In den Einzählwerten waren die Abweichungen durchwegs im Bereich von um und unter 1,5 dB(A). Als Referenz werden hier die Simulation mit Mittelflächelementen und Geländeabfall herangezogen.

Die Variation der verschiedenen Geländeparameter hat außerdem noch einige interessante Punkte ergeben.

Abbildung der LSW-Geometrie

Die Abbildung der Geometrie vor allem der Spitze hat einen entscheidenden Einfluss auf die Simulationen. Eine Konsequenz daraus ist, dass sich die Wirkung von Profil 1 möglicherweise mit einer einfachen Abdeckung direkt hinter der Spitze deutlich verbessern ließe, vor allem wenn diese absorbierend ausgeführt ist.

Abbildung des Geländes

Die Simulationen für die Korrekturwerte können sinnvollerweise nur für eine Geländeform durchgeführt werden. Für diese Simulationen hat das Gelände eigentlich nur im tiefrequenten und bodennahen Bereich einen (geringen) Einfluss auf das Ergebnis. Für Frequenzen über 200 Hz ist die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen (Mittelflächen) geringer als 1 dB. Darunter treten größere Abweichungen von 2 dB und darüber nur in der tiefsten Messposition auf. Diese größtenteils geringen Abweichungen sind ein Indikator dafür, dass die Simulationen für die Korrekturfaktoren in ihrer durchgeführten Form zuverlässige Ergebnisse liefert.

Graslandmodell

Die Bodenbeschaffenheit ist normalerweise ein wichtiger Parameter in der Berechnung des Einfügedämmmasses. Auf die Unterschiede zwischen den LSWs hat das Graslandmodell hinter der LSW allerdings nur einen sehr geringen Einfluss. Hier spielt wahrscheinlich der

Einfluss des Bodens auf die freie Schallausbreitung eine untergeordnete Rolle, da diese bei der Berechnung der Unterschiede zwischen den LSWs zum Großteil herausfällt.

Zusammenfassend kann aus dieser Validierung geschlossen werden, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen LSWs sehr robust sind gegenüber unterschiedlichen Annahmen wie Gelände und Bodenbeschaffenheit hinter der LSW. Daraus folgt, dass der gewählte Ansatz, die Korrekturfaktoren zu berechnen, die dann auf die Normberechnung aufgesetzt wird, zuverlässige Ergebnisse liefert.

5 SIMULATION KOMPLEXER GEOMETRIEN

In diesem Kapitel werden die Simulationen verschiedener komplexer Geometrien beschrieben, und die Ergebnisse präsentiert. Diese Ergebnisse werden später für die Herleitung der Korrekturfaktoren herangezogen.

5.1 Beschreibung der Wandquerschnitte

Zur Ableitung der Korrekturfaktoren wurden verschiedene komplexe Basisquerschnitte simuliert und sowohl in Geometrie als auch Absorption variiert. Abbildung 42 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen verwendeten Geometrien und die verschiedenen Konfigurationen für das Absorptionsmaterial.

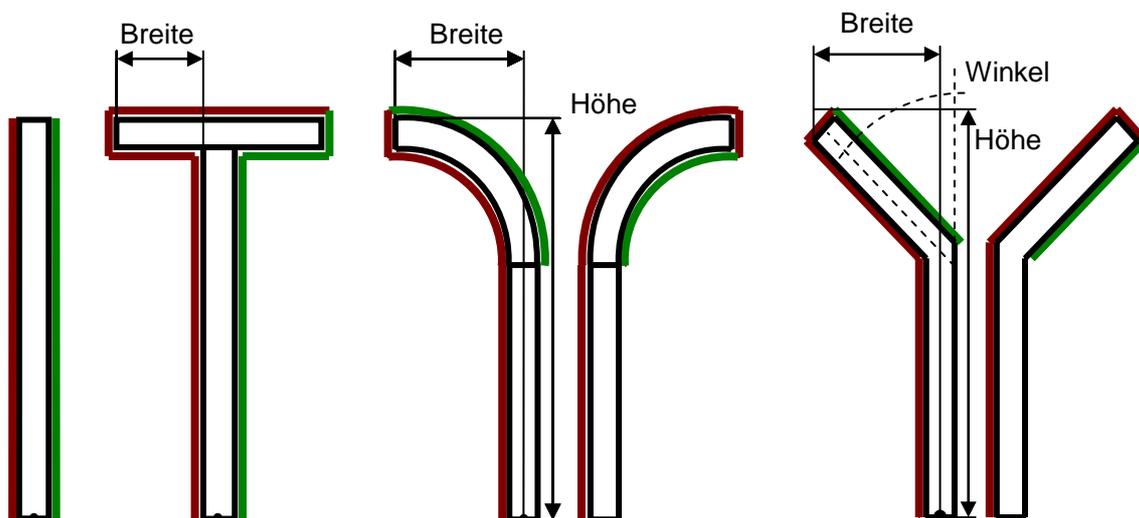


Abbildung 42: Geometrien für die Simulationen durchgeführt wurden

Abbildung 42 zeigt die 4 Basistypen (von links nach rechts): (1) gerade LSW, (2) T-Profil, (3) gekrümmte und (4) geknickte LSW. In Tabelle 2 sind alle Varianten der 4 Profile angeführt. Die Wanddicke wurde jeweils mit 25 cm angenommen, beim T-Profil ist das Querprofil allerdings nur 12,5 cm stark. Es ist anzumerken dass die 4,5 m breiten Ausleger nur für die Wandhöhen 5, 7 und 8 m berechnet wurden. Für 8 m hohen Bogenwände wurde ausserdem nur der 4,5 m breite Bogen berechnet.

Tabelle 2: Übersicht über die simulierten LSW Profile

Typ	Höhen [m]	Richtungen	Breiten [m]	Winkel
Gerade	3, 4, 5, 7 und 8	-	-	-
T-Profil	3, 4, 5 und 7	-	0,25, 0,5, 1 und 2	-
Bogen	3, 4, 5, 7 und 8	Innen und Außen	0,5, 1, 2 und 4,5	-
Knick	3, 4, 5 und 7	Innen und Außen	0,5, 1 und 2	45 und 90°

Es werden jeweils 3 Typen definiert: Typ 1 bedeutet dass die gesamte LSW als reflektierend ausgeführt ist. Für Typ 2 sind die jeweils rot gekennzeichneten Flächen absorbierend ausgeführt. Als Richtwert wird hier die Grenzkurve für höchstabsorbierende LSW verwendet (ÖNORM EN ISO 11654, Abbildung 32). Für Typ 3 sind sowohl die rot als auch die grün gekennzeichneten Flächen in absorbierendem Material ausgeführt. Simulationen wurden für 4 Quellpunkte in 4, 6, 8 und 10 Metern Entfernung von der LSW durchgeführt.

Die Quellhöhe beträgt 0 m, d.h. die Quelle wird in den Boden gelegt. Dies hat den Sinn, die durch eine kohärente Linienquelle und deren Spiegelquelle entstehenden Interferenzen zu reduzieren, da die beiden Quellen zusammenfallen.

5.2 Messpunkte

Die Analyse der verschiedenen LSW-Geometrien erfolgt in einem Raster das sich von 5-150 Meter hinter der Wand erstreckt und 10 Meter in die Höhe reicht. Die Empfängerpositionen sind auf in horizontalem und vertikalem Abstand von 1 m voneinander angeordnet, daraus ergeben sich 146 x 10 Positionen.

5.3 Analyse

Es werden Einzahlwerte berechnet. Die Berechnung wurde schon im vorherigen Kapitel beschrieben. Es wurde das genormte Verkehrslärmspektrum in Terzen verwendet (ISO 1793-3 [7]) und für jede Quellentfernung wurden die A-Pegel berechnet. Da dieses Spektrum nur bis 100 Hz reicht, wurden für die 3 Terzen darunter die Werte aus der RVS 04.02.11 entnommen.

Dargestellt wird immer die Wirkung der Wand im Vergleich mit der geraden Wand vom Typ 2 (straßenseitig absorbierend), da dies der am häufigsten verwendete LSW-Typ ist. Ein negativer Wert bedeutet, dass die komplexe Geometrie einen Vorteil gegenüber der geraden Wand hat. Wichtig anzumerken ist, dass die Einzahlwerte nur einen Eindruck der zu erreichbaren Wirkungen geben sollen. Die Wirkung ist natürlich vom Quellspektrum

abhängig, und im Weiteren von der Entfernung der Spuren, und bei mehreren Spuren vom unterschiedlichen Verkehrsaufkommen. Die Wirkung einer bestimmten Wand sollte daher nur aus den im nächsten Kapitel hergeleiteten Korrekturfaktoren hergeleitet werden.

Zur Herleitung der Korrekturfaktoren wurden Oktavspektren berechnet, diese werden aber aufgrund der hohen Anzahl von Geometrien nicht im Detail dargestellt.

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse für die einzelnen Geometrien kurz zusammengefasst, und abschließend werden die verschiedenen Geometrien noch direkt miteinander verglichen. Die Herleitung der Korrekturfaktoren wird im nächsten Kapitel behandelt.

5.4 T-Profil

Im Allgemeinen zeigen sich beim T-Profil zwei zu erwartende Effekte (Abbildung 43). Einerseits wird die Wirkung mit zunehmender Breite stärker, andererseits hat vor allem die Absorption auf der Oberkante des T-Profiles einen starken Einfluss auf die Verbesserung gegenüber der geraden LSW (vgl. Typ 2 (mittlere Reihe) vs. Typ 1 (obere Reihe)). Die absorbierende Rückseite hat keinen nennenswerten Effekt auf die Verbesserung.

Weiters ist zu beobachten dass deutliche Verbesserungen im Bereich von 5 dB(A) erzielt werden können und dies auch noch in großer Entfernung. Bei fehlender Absorption auf der Oberkante sind die Werte teils deutlich geringer.

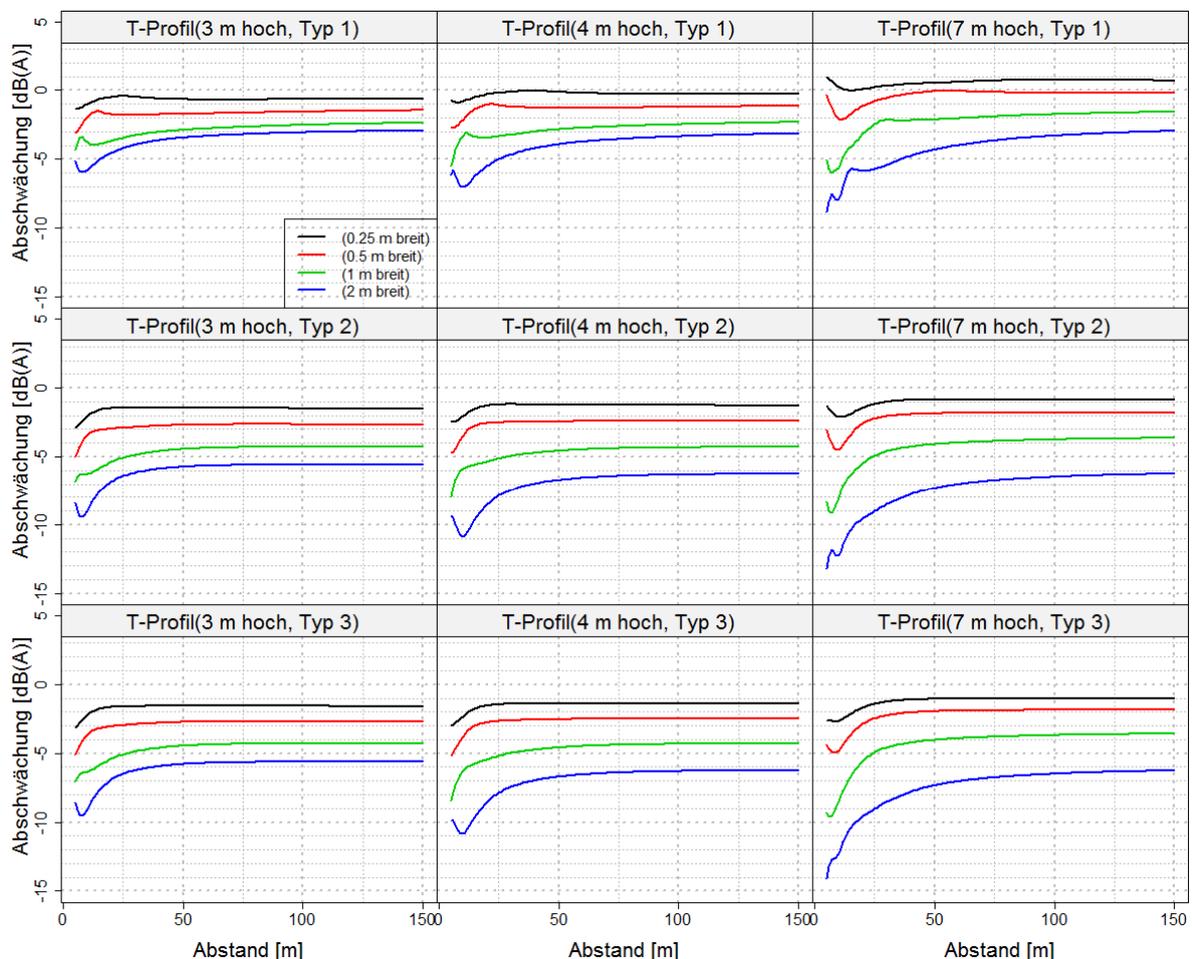


Abbildung 43: Effekt des T-Profiles in Abhängigkeit von Wandhöhe, Quellentfernung 4 m, Absorption und Abstand von der Wand. Die Empfängerhöhe beträgt 2 m.

5.4.1 Effekt der Empfängerhöhe

In 10 Metern Höhe zeigen sich ähnliche Trends (Abbildung 44). Aufgrund der Geometrie ist auch klar ersichtlich, dass bei sehr nahen Messpositionen und niedrigen Wänden der Abschirmeffekt sehr groß sein kann. Die Werte in größerer Entfernung sind in etwa vergleichbar mit jenen in 2 Metern Höhe.

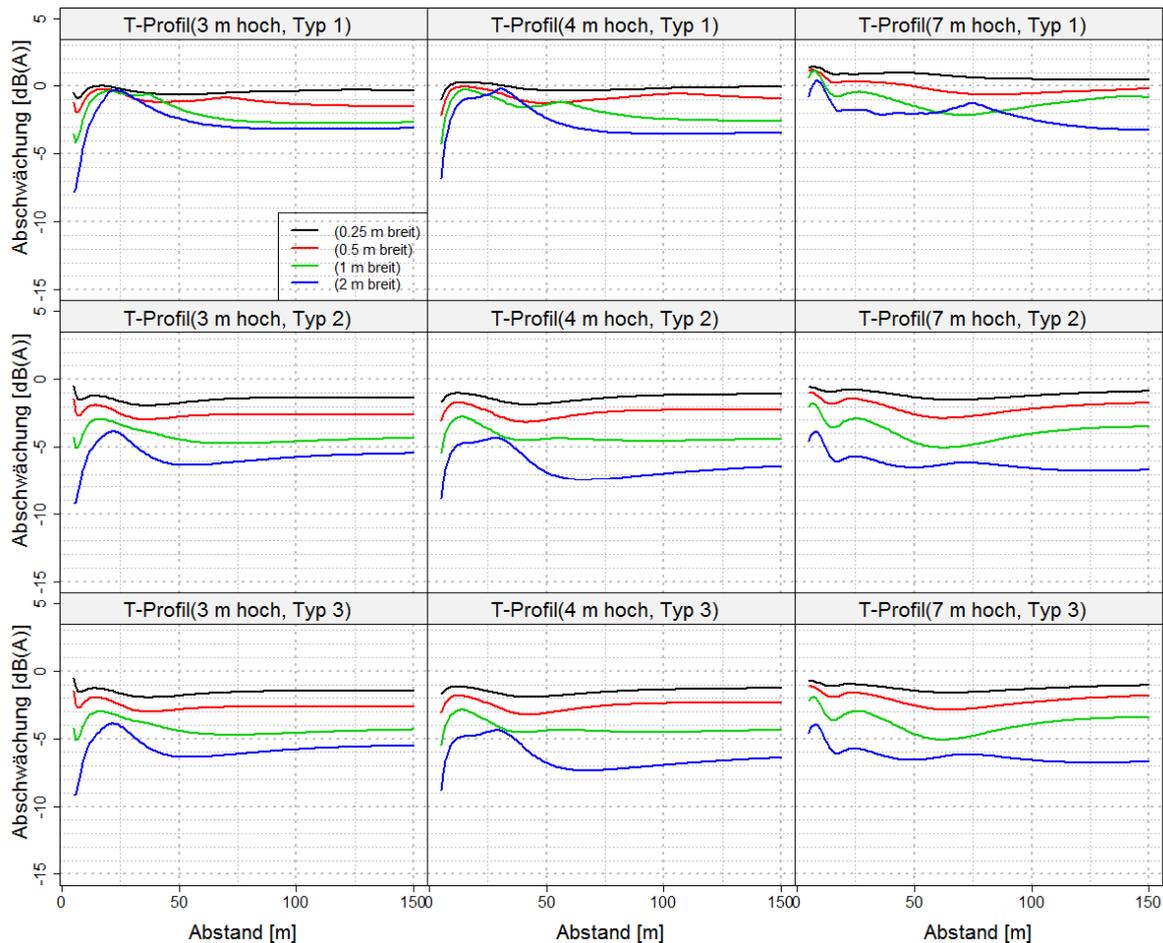


Abbildung 44: Effekt des T-Profiles in Abhängigkeit von Wandhöhe, Quellentfernung 4 m, Absorption und Abstand von der Wand. Die Empfängerhöhe beträgt 10 m.

5.4.2 Effekt der Neigung

Es wurde anhand eines Beispiels (Höhe 4 m, Breite 1 m, Typ 2) der Effekt einer leichten Neigung ($\pm 10^\circ$) untersucht im Vergleich zum horizontalen Auflager (Abbildung 45). Es zeigt sich, dass bei einer Neigung zur Straße hin die Wirkung besser wird, vermutlich aufgrund der Absorption auf der Oberkante. Bei einer Neigung von der Straße weg ist der Effekt in etwa umgekehrt.

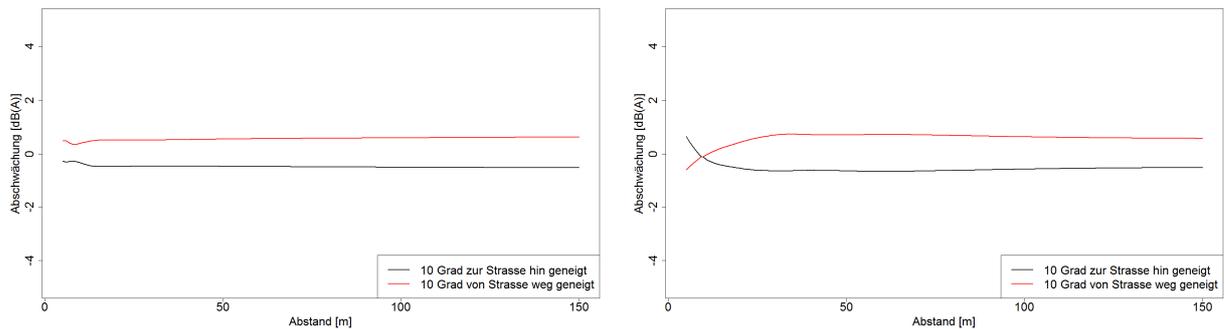


Abbildung 45: T-Profil (Wandhöhe 4 m) für +/- 10° Neigung und Empfängerhöhen von 2 (links) und 10 (rechts) Metern (Quellentfernung 4 m).

5.4.3 Effekt der Quellentfernung

Wie zu erwarten, nimmt die Zusatzwirkung der Geometrie mit steigender Entfernung der Quelle ab (Abbildung 46). Bei den größeren Entfernungen ist die Abnahme relativ gering und beträgt weniger als 1 dB(A). Die stärksten Änderungen treten hier bei den breiteren T-Profilen und niedrigen Wänden auf wodurch die verschieden breiten Geometrien in ihrer Wirkung ähnlicher werden.

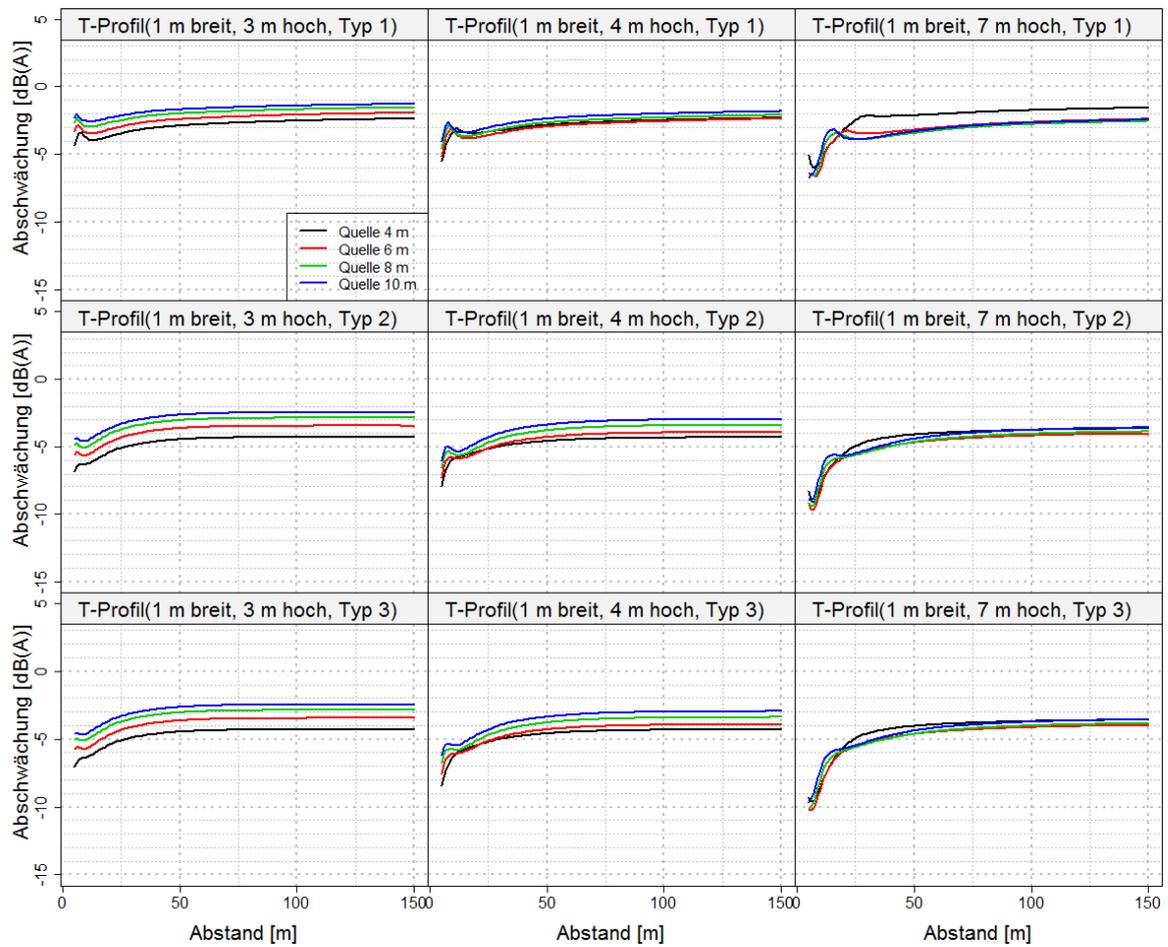


Abbildung 46: Effekt der Quellentfernung, Empfängerhöhe 2 m

5.4.4 3D-Simulationen

Für das T-Profil wurden auch 3D-Simulationen, und zwar für eine 4 m hohe LSW vom Typ 2, durchgeführt. Beide LSW waren 30 m lang. Die T-Wand hat hier eine Auslegerbreite von 1 m und die Quellentfernung beträgt 4 m. Um eine inkohärente und eine kohärente Linienquelle in 3D zu simulieren, wurde ein Auswertegitter verwendet, das 1 m Schritten bis zu einer Höhe von 10 m reicht. Um die Rechenzeit zu reduzieren wurde die Entfernung zwischen 5 und 150 m in 5 m-Schritten abgetastet. In der Richtung parallel zur LSW wurde in 0.3 m Abstand Punkte bis zu einer Entfernung von 15 m von der Mittelachse verwendet.

Aufgrund des Reziprozitätsprinzips lassen sich der Quelle und Auswertepunkt vertauschen. Dadurch ist es möglich, die Linienquelle durch eine Linie von Auswertepunkten zu ersetzen. Dies hat den Vorteil, die Simulation der Linienquelle in einem Schritt durchzuführen, da ansonsten für jeden Punkt der Linienquelle eine Simulation durchgeführt werden müsste. In Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die Ergebnisse für 3D kohärent, inkohärent und Punktquelle im Vergleich zur 2D-Simulation in verschiedenen Empfängerhöhen dargestellt.

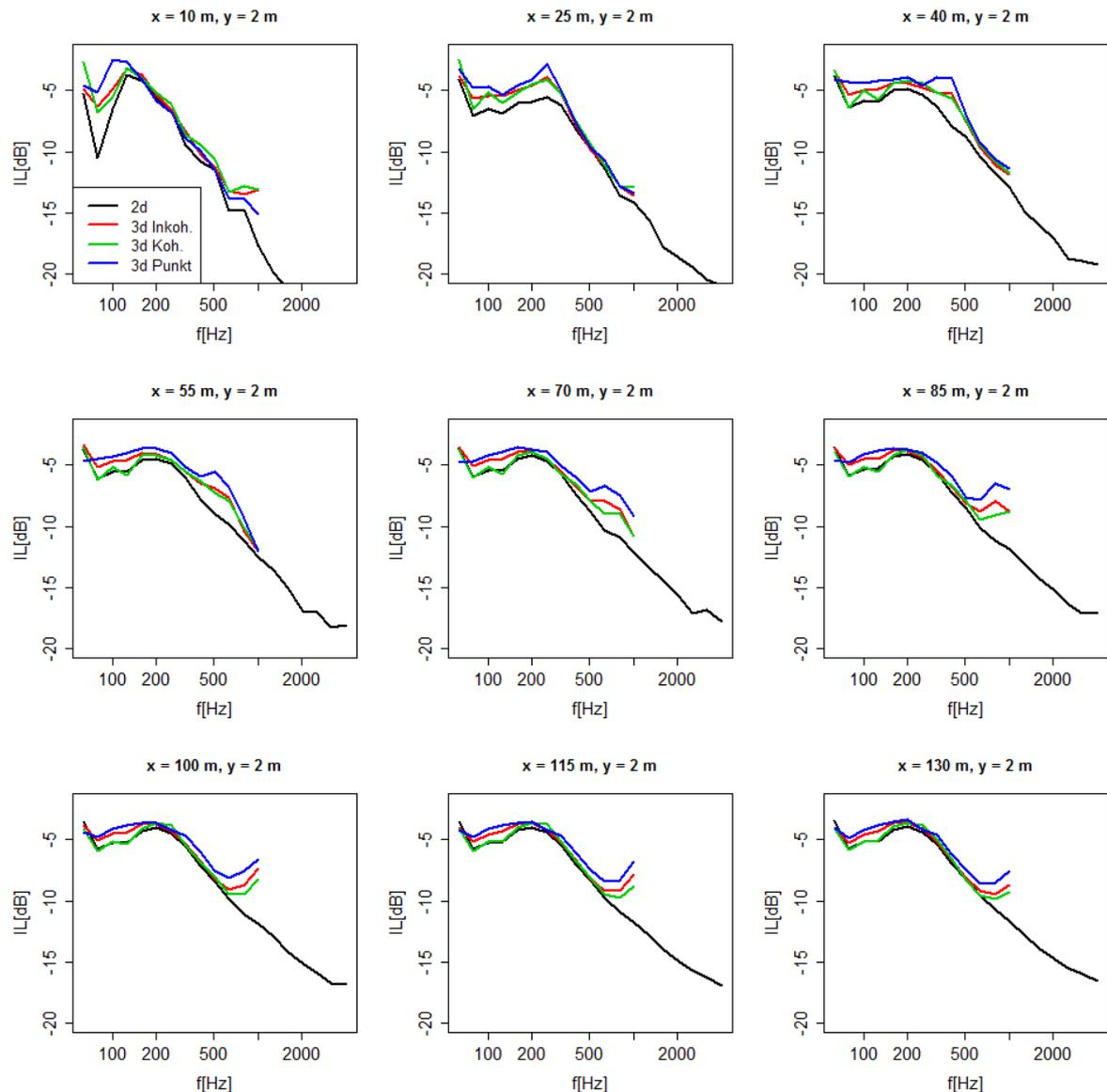


Abbildung 47: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 2 m Höhe

Die kohärente Summation stimmt sehr gut mit der 2D-Lösung überein, der Unterschied zu inkohärenter Summation und der Punktquelle ist gering. Stärkere Abweichungen in den tieffrequenten Bereichen können zum Teil auch von der beschränkten Länge (± 15 m) verursacht worden sein. Bei hohen Frequenzen kann zum Teil auch eine zu geringe Auflösung bei der Diskretisierung der Wand ein Grund für Abweichungen sein. Im Großen und Ganzen ist die Übereinstimmung sehr gut.

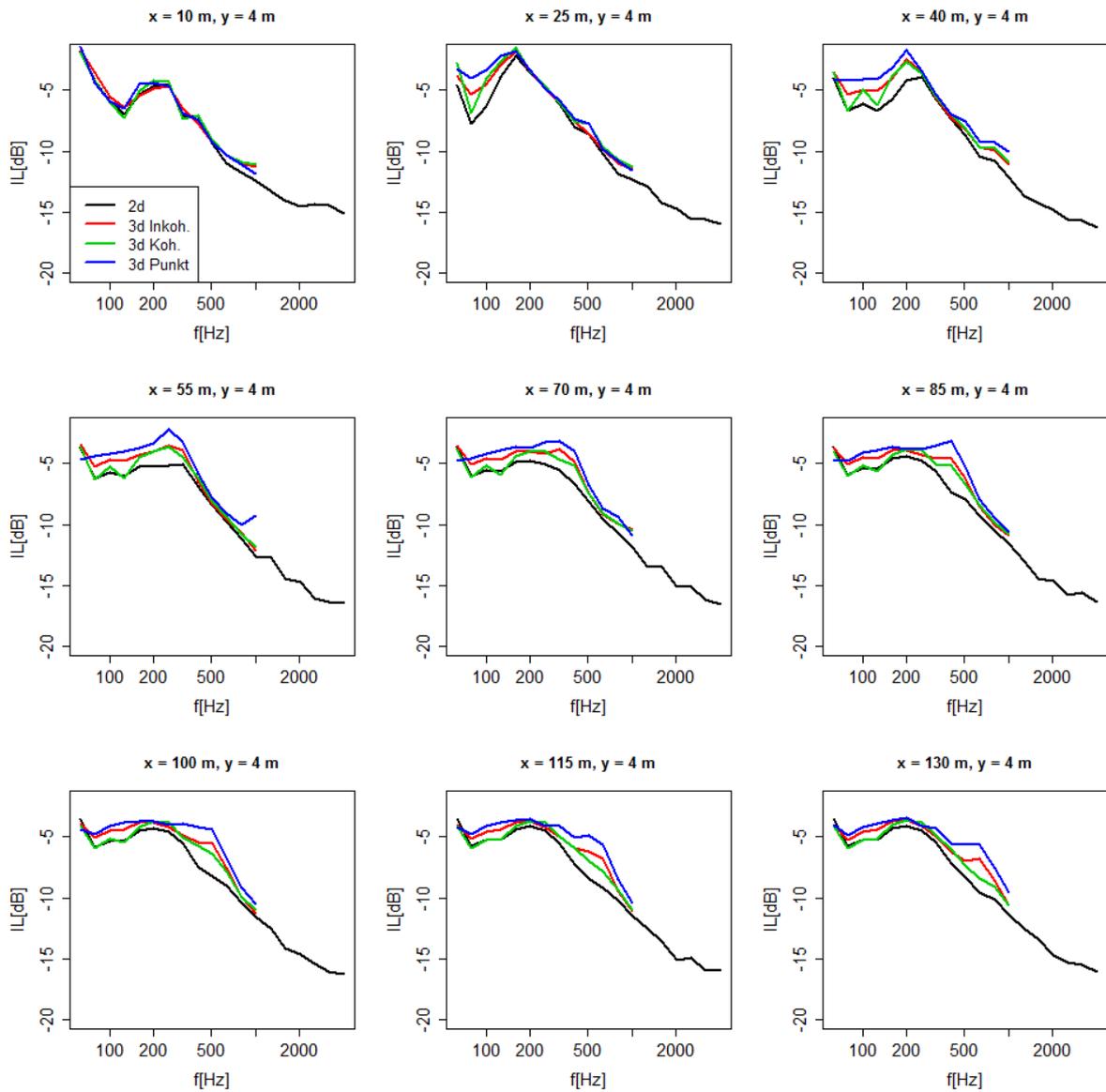


Abbildung 48: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 4 m Höhe

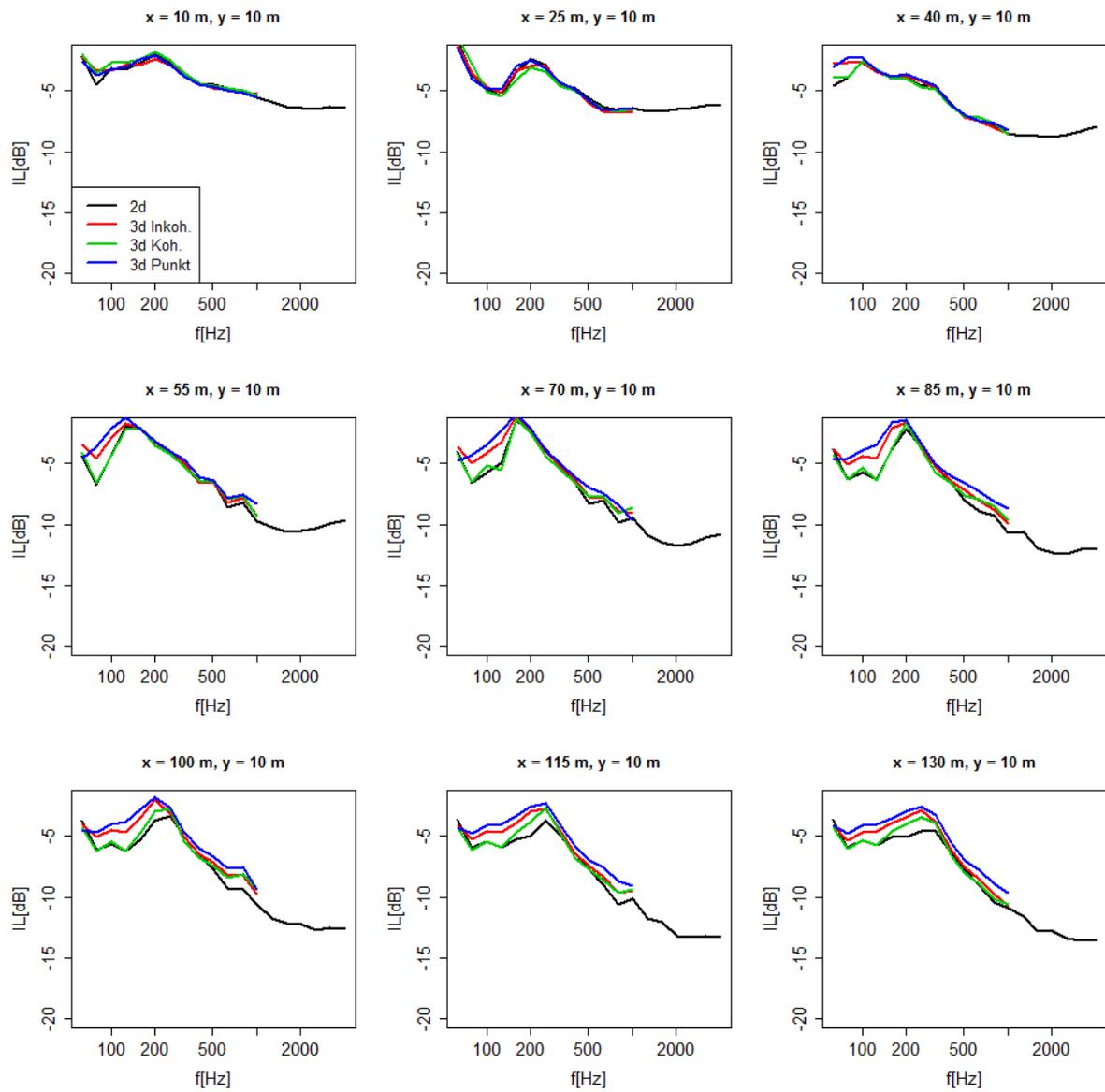


Abbildung 49: Unterschied 2D und 3D-Simulation in 10 m Höhe

5.5 Gekrümmte Wand

Bei gekrümmten Wänden zeigt sich sehr schön der Effekt der Krümmungsrichtung (Abbildung 50). Die Quellentfernung beträgt 4 m und es werden alle 3 Breiten und die Richtungen dargestellt. Die Messpositionen liegen in 2 m Höhe. Die Wirkung der voll reflektierenden Variante ist gering bis negativ für beide Richtungen. Sobald aber die Innenseite absorbierend ausgeführt ist (Typ 2) zeigt die nach außen gekrümmte LSW meist eine deutliche Verbesserung, die auch noch in großer Entfernung vorhanden ist. Bei der Krümmung nach innen ist der Effekt bei schmalen Profilen gering, bei breiteren Profilen aber mit der Außenkrümmung vergleichbar oder höher (vor allem bei niedrigen Wänden).

Wird jedoch zusätzlich der äußere Teil der Krümmung mit Absorption belegt (Typ 3), zeigt sich eine deutliche Verbesserung, vor allem bei großen Auslegerbreiten und großen Wandhöhen. Diese Verbesserung ist zu erwarten, da das absorbierende Material nun im Schallweg aufgebracht ist. Für die nach außen gekrümmte Wand zeigt sich keine Änderung. Die Ursache warum die nach außen gekrümmte Wand bei großen Breiten vergleichsweise schlecht wirkt liegt an den tiefen Frequenzen, wo die Absorption gering ist und daher der verlängerte Weg über der absorbierenden Fläche weniger stark ins Gewicht fällt.

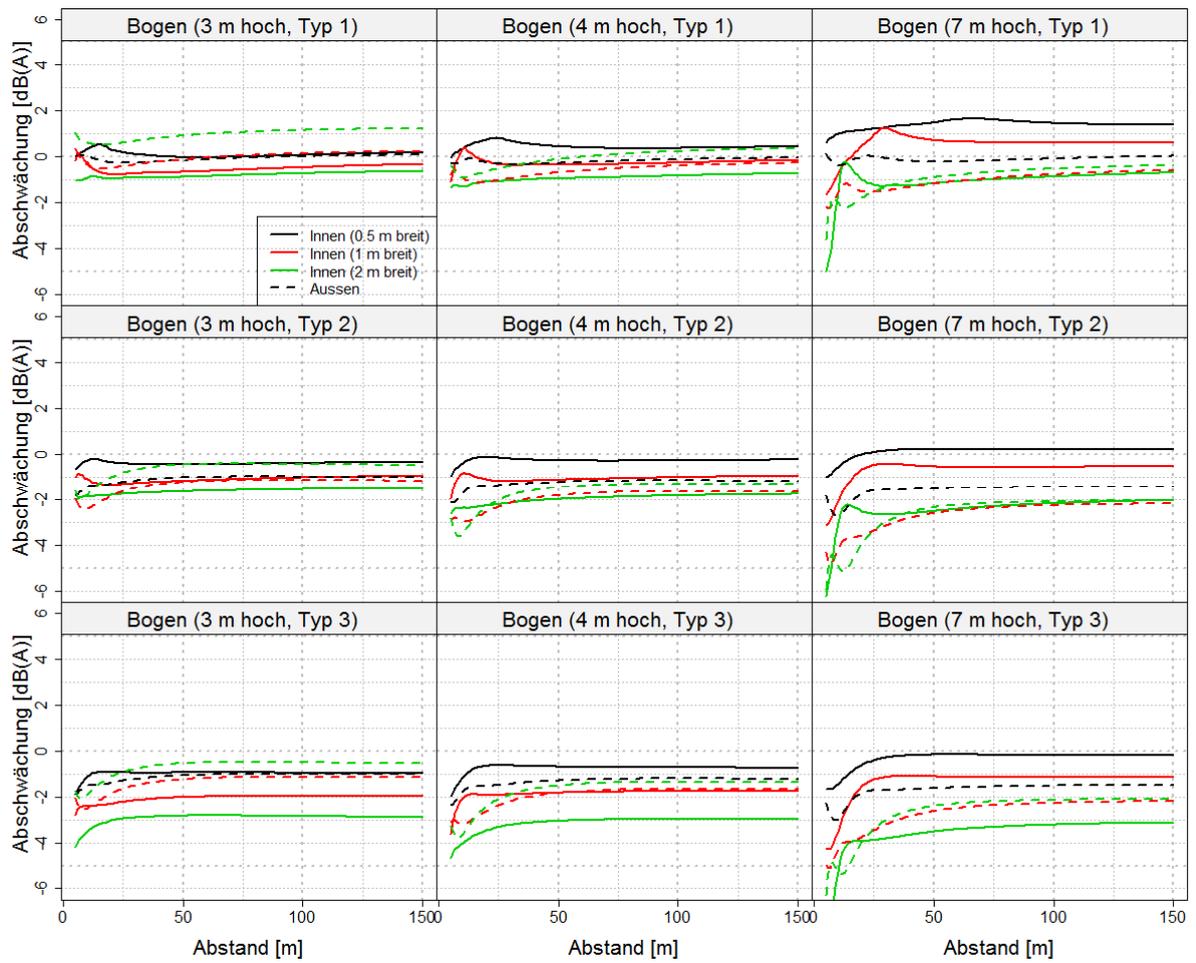


Abbildung 50: Gekrümmte Wand mit einer Quellentfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m

5.5.1 Effekt der Empfängerhöhe

Wie aus Abbildung 51 ersichtlich, zeigen sich in hoher Messposition (10 m) sehr stark ausrichtungsspezifische Effekte. Bei der nach innen gekrümmten LSW zeigt sich bei sehr nahen Positionen eine deutliche Verbesserung, der durch die erhöhte Abschattung dieser Positionen gegenüber der geraden Wand erklärt werden kann. Bei der nach außen gekrümmten Wand ist dieser Effekt genau umgekehrt, da durch die Krümmung weg von der Wand sehr hoch gelegene Punkte nicht mehr durch die gerade Wand abgeschattet werden, wodurch die Wirkung der Krümmung deutlich negativ ausfällt.

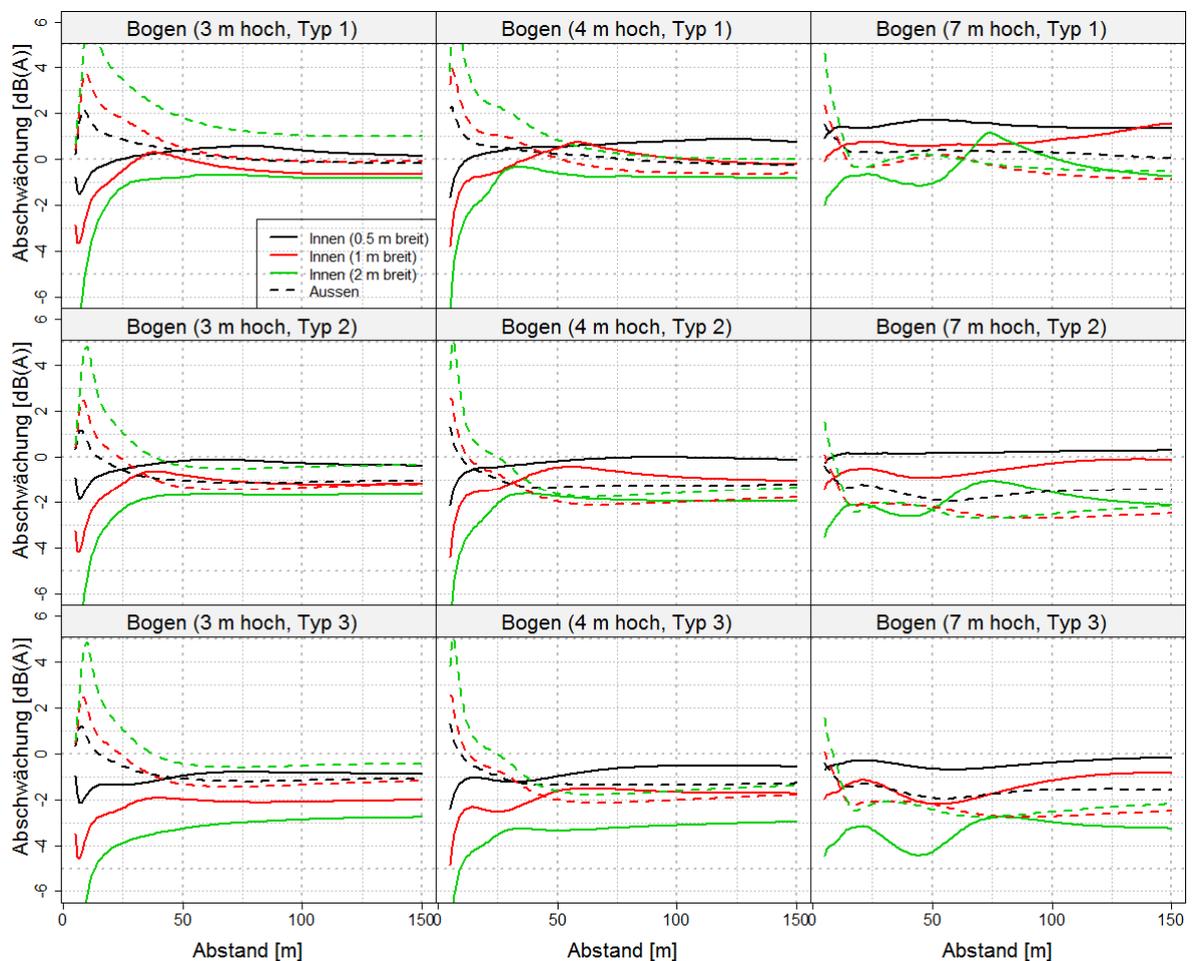


Abbildung 51: Gekrümmte Wand mit einer Quellentfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m

5.5.2 Effekt der Quellentfernung

Wie zu erwarten, nimmt die Zusatzwirkung der Geometrie mit steigender Entfernung ab. Bei den größeren Entfernungen ist die Abnahme relativ gering und beträgt weniger als 1 dB(A). Die stärksten Änderungen scheinen hier bei den breiteren Profilen und niedrigen Wänden aufzutreten wodurch die verschieden breiten Profile in ihrer Wirkung ähnlicher werden.

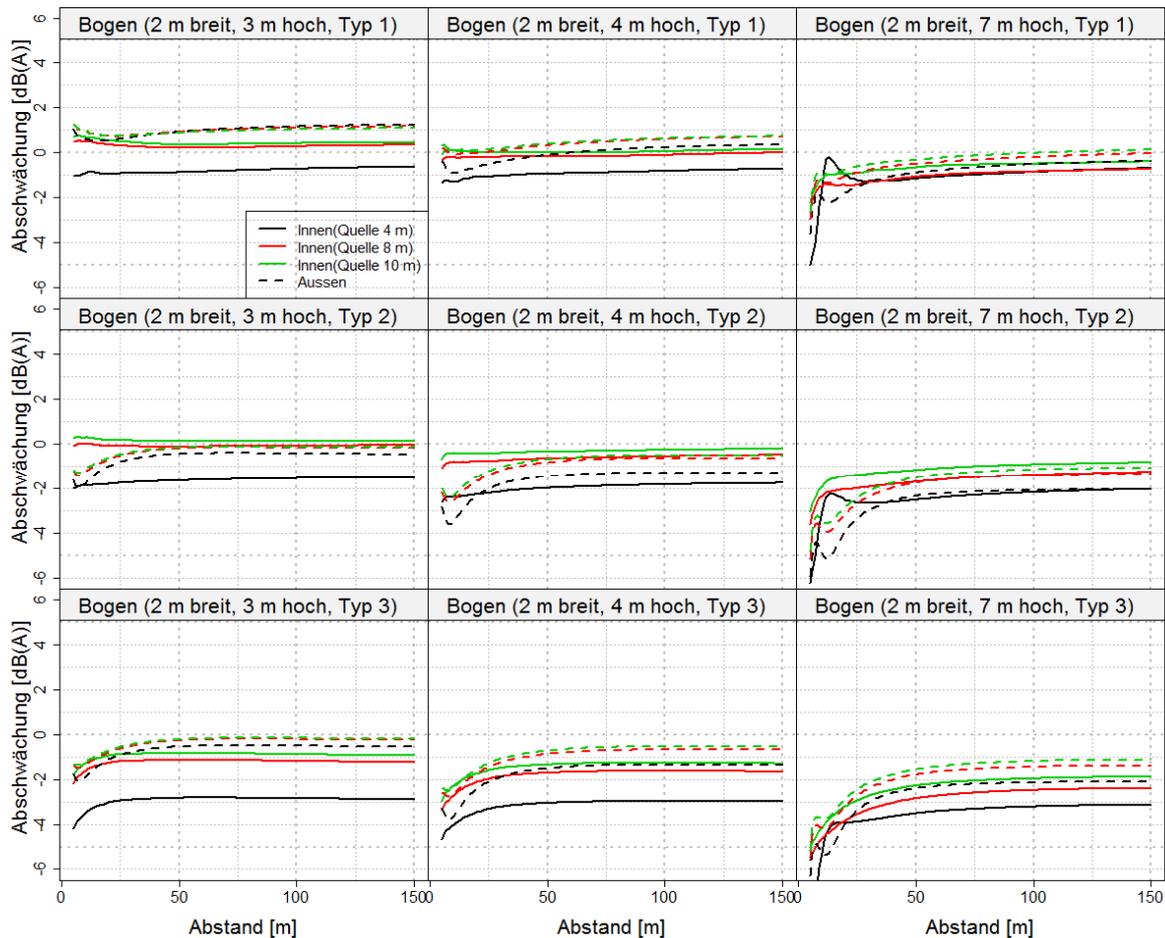


Abbildung 52: Gekrümmte Wand (2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m

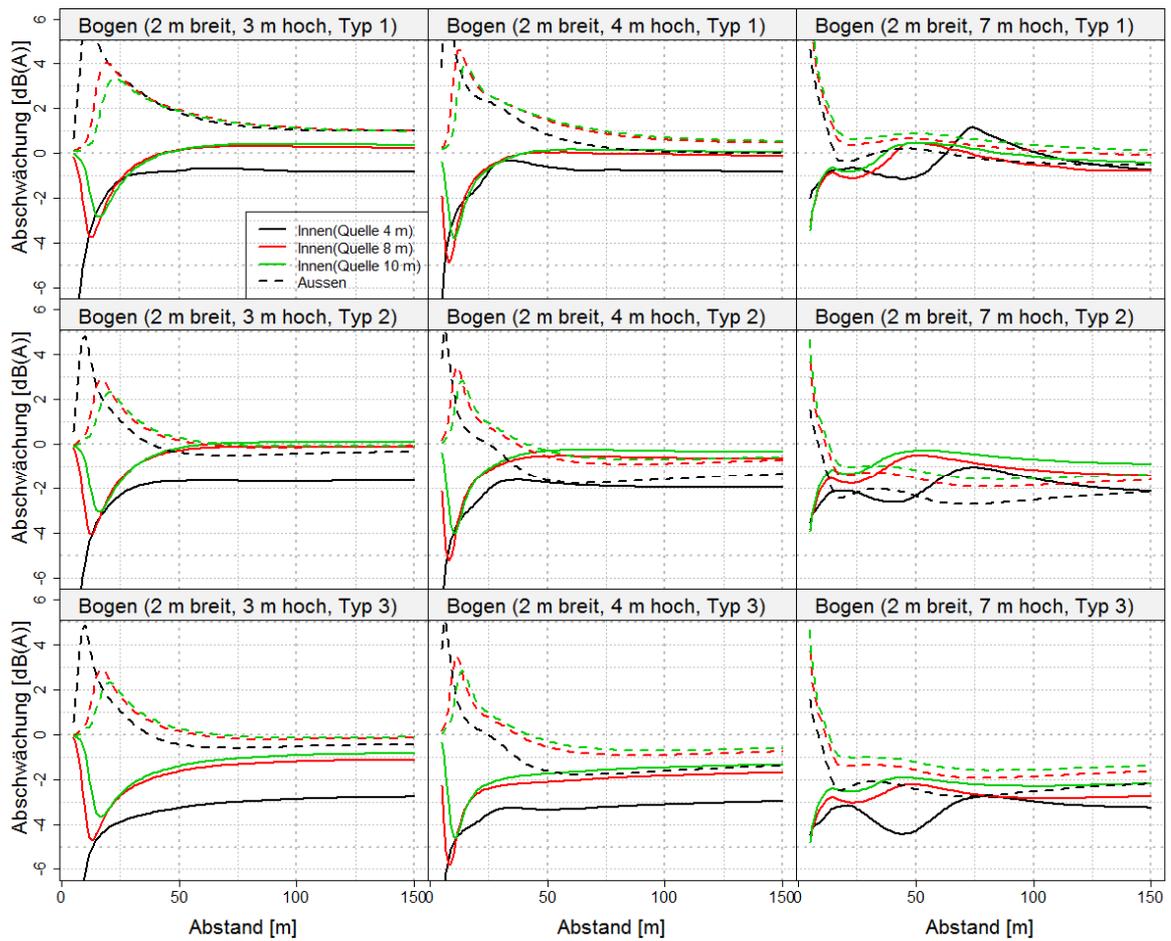


Abbildung 53 Gekrümmte Wand (2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 10 m

5.6 45 °Knick

Die grundlegende Abhängigkeit von der Knickrichtung ist ähnlich wie beim Bogen. Nach außen geknickte Wände zeigen vor allem bei geringen Höhen und/oder fehlender Absorption schlechtere Wirkung. Bei geringer bis mittlerer Breite, großer Wandhöhe und Absorption zur Straßenseite hin funktionieren sie allerdings besser als nach innen geknickte Wände.

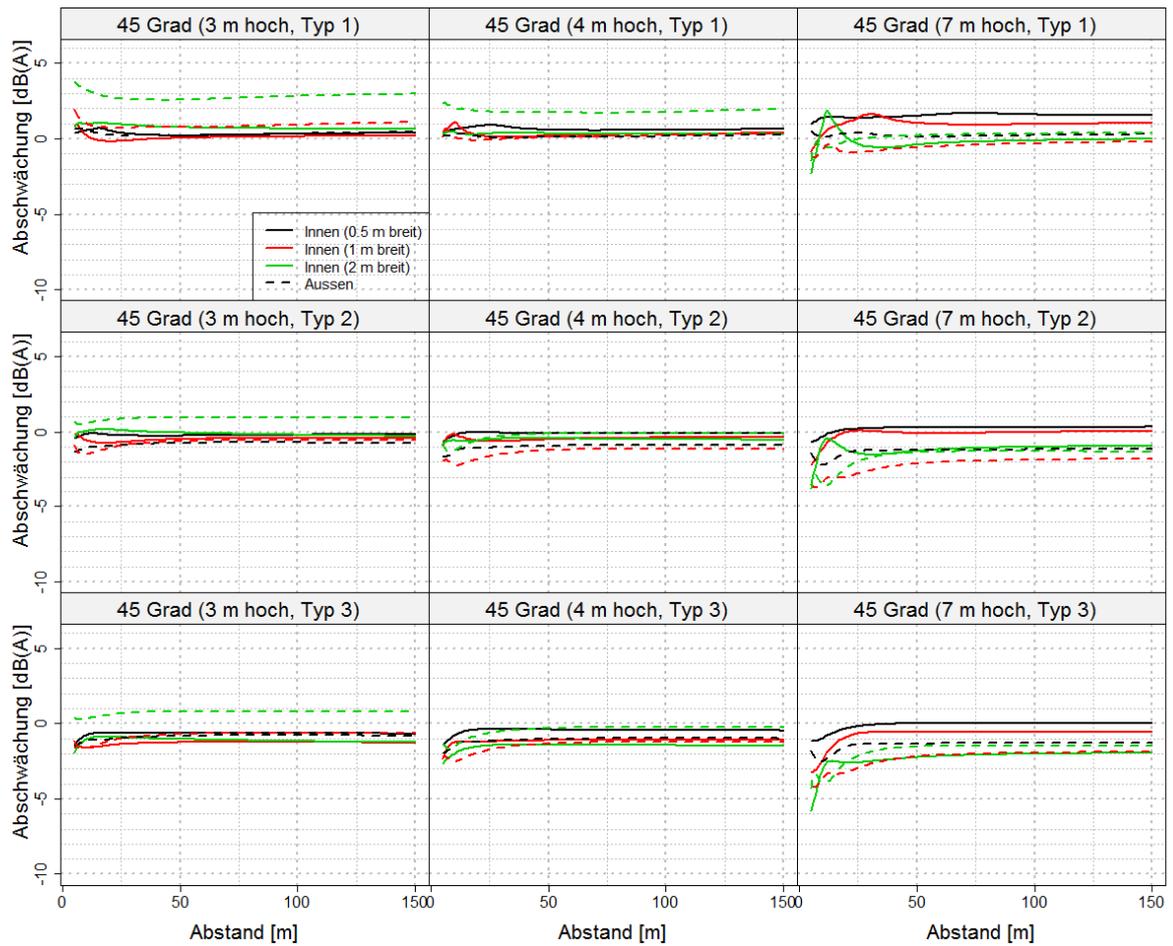


Abbildung 54: Geknickte Wand (45°) mit einer Quelle nfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m

5.6.1 Effekt der Empfängerhöhe

Wie zu erwarten, sind bei den 45° geknickten Wänden die Abschirmungseffekte in größerer Empfängerhöhe (hier 10 m) ähnlich wie beim Bogen. Durch die von der Fahrbahn weg versetzte Beugungskante werden sehr nahe liegende Empfängerpunkte nicht mehr abgeschirmt. Bei Verwendung absorbierender Materials und bei großer Quellentfernung ist dieser Effekt allerdings deutlich schwächer ausgeprägt. Auch in größerer Höhe kann die nach außen geknickte LSW bei größeren Wandhöhen, wenn auch geringe, Vorteile bringen.

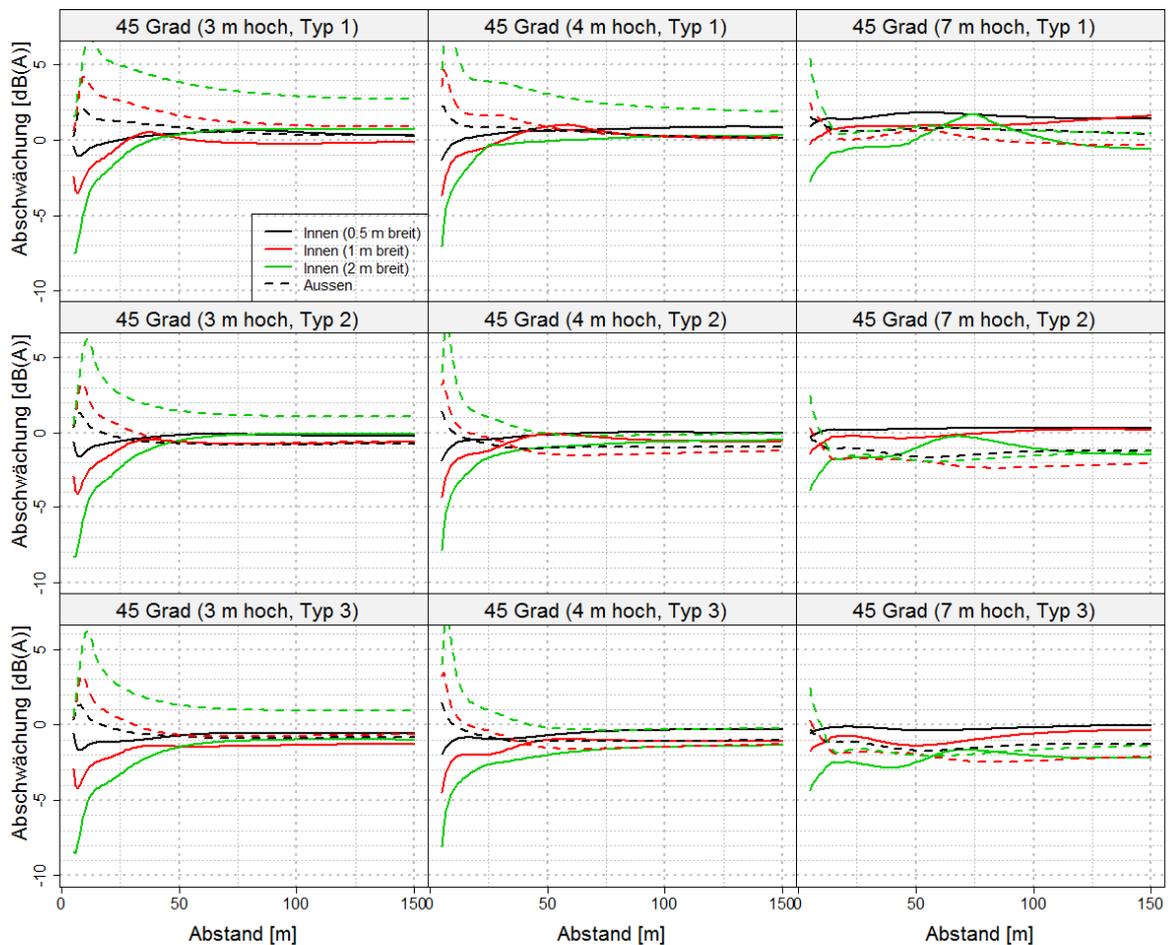


Abbildung 55: Geknickte Wand (45°) mit einer Quellentfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m

5.6.2 Effekt der Quellentfernung

Wie zu erwarten, nimmt die Zusatzwirkung der Geometrie mit steigender Entfernung ab. Bei den größeren Entfernungen ist die Abnahme relativ gering und beträgt weniger als 1 dB(A). Die stärksten Änderungen scheinen hier bei den breiteren Profilen und niedrigen Wänden aufzutreten.

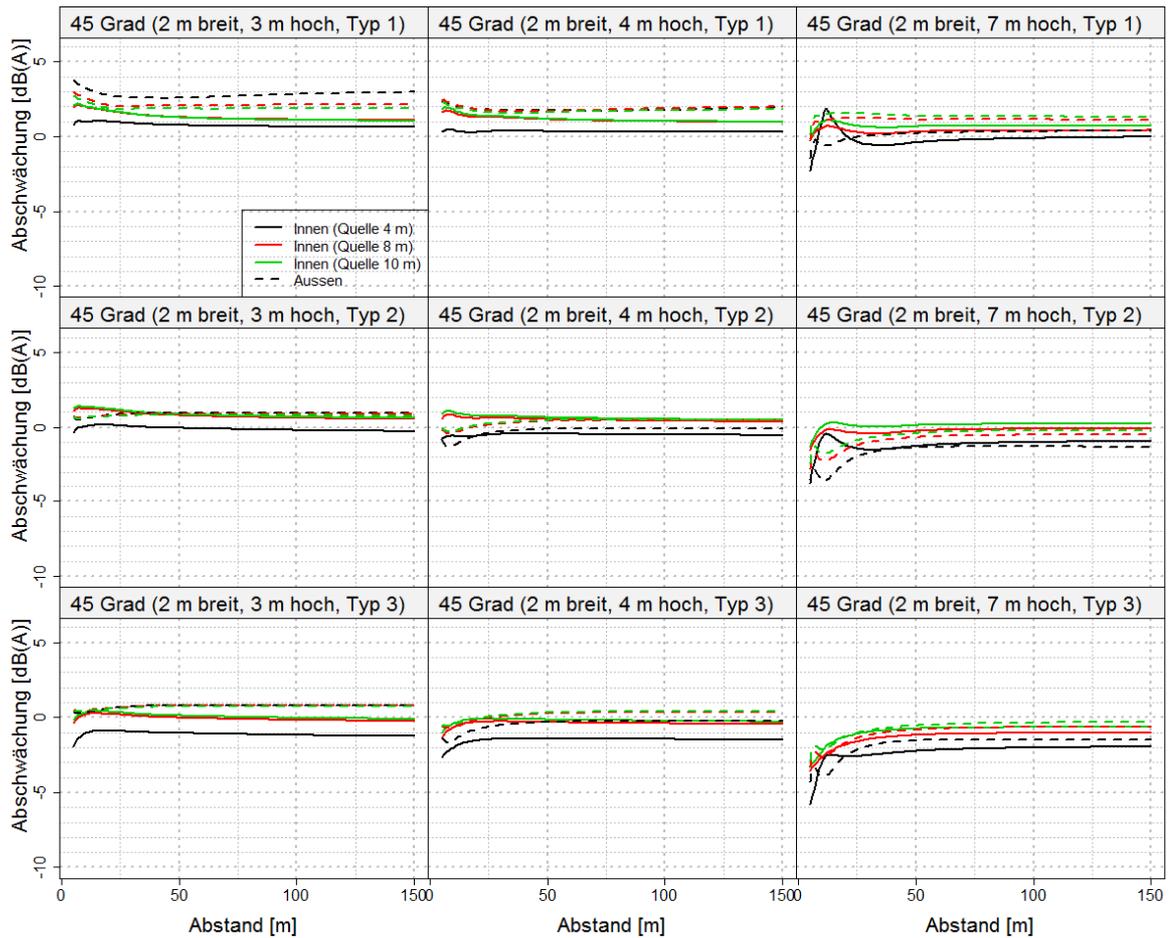


Abbildung 56: Geknickte Wand (45°, 2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m

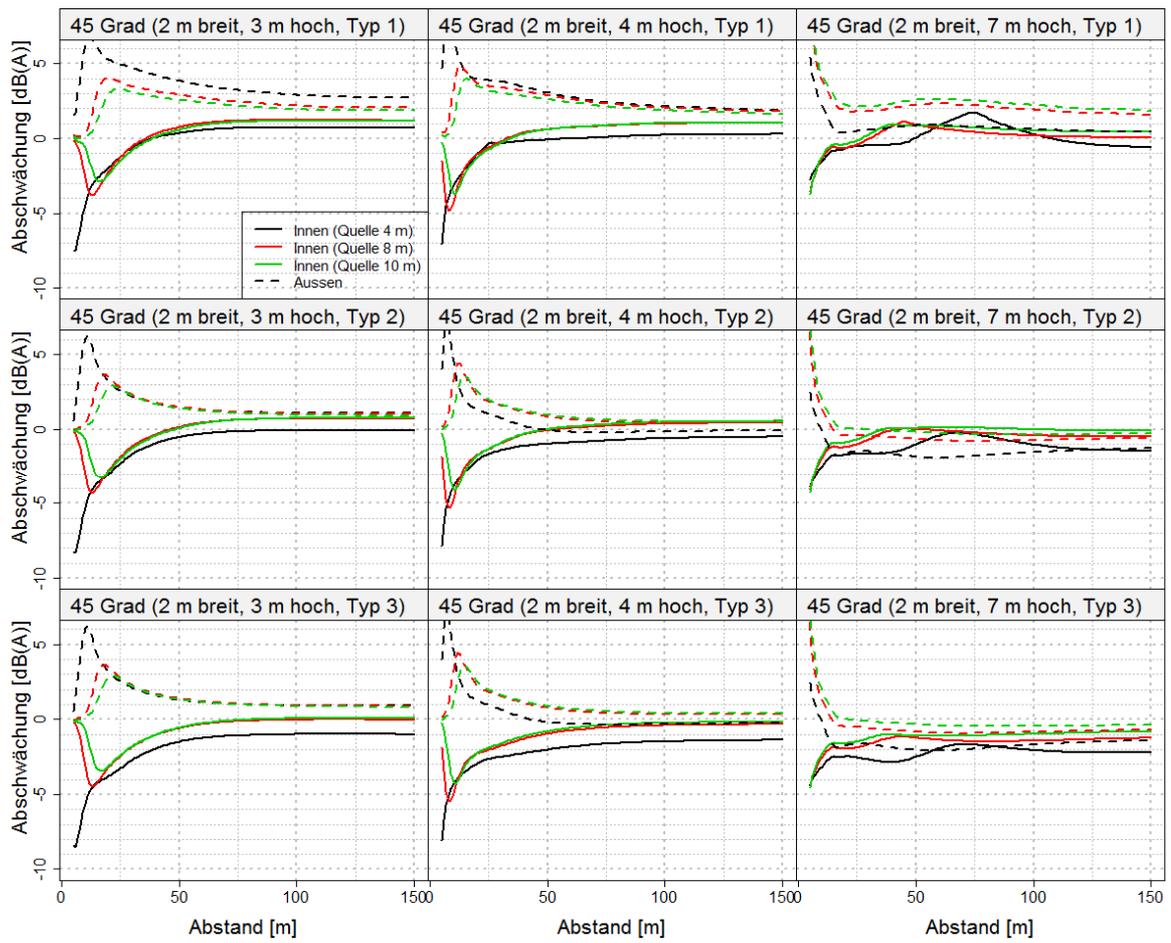


Abbildung 57: Geknickte Wand (45°, 2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 10 m

5.7 90 °Knick

Der interessanteste Vergleich ist hier bezüglich Typ 3 der geknickten Wände, da hier sowohl nach innen als auch nach außen gerichtete LSW eine absorbierende Oberkante haben. Es ergibt sich eine deutliche Verbesserung gegenüber der geraden Wand, und, wie zu erwarten hat das nach innen gerichtete L eine bessere Wirkung durch die näher an der Fahrbahn liegende Beugungskante. Dies gilt auch für Typ 1, Die Wirkung ist aber deutlich geringer. Ein direkter Vergleich mit der T-Wand erfolgt im nächsten Abschnitt.

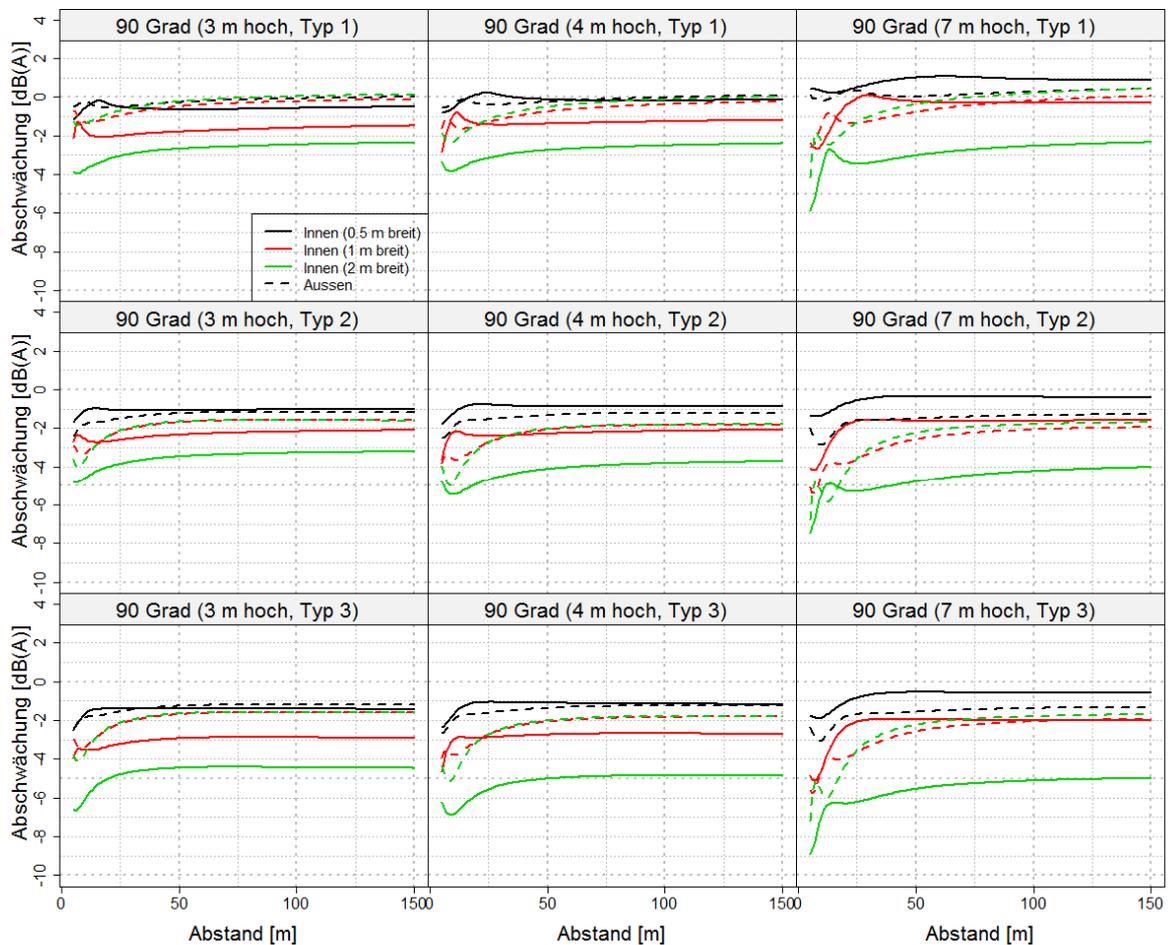


Abbildung 58: Geknickte Wand (90°) mit einer Quelle ntfernung von 4 m, Empfängerhöhe 2 m

5.7.1 Effekt der Empfängerhöhe

Die Empfängerhöhe spielt hauptsächlich im Nahbereich eine große Rolle (bis 50 m, Abbildung 59), darüber hinaus sind die Ergebnisse mit denen bei geringerer Empfängerhöhe vergleichbar.

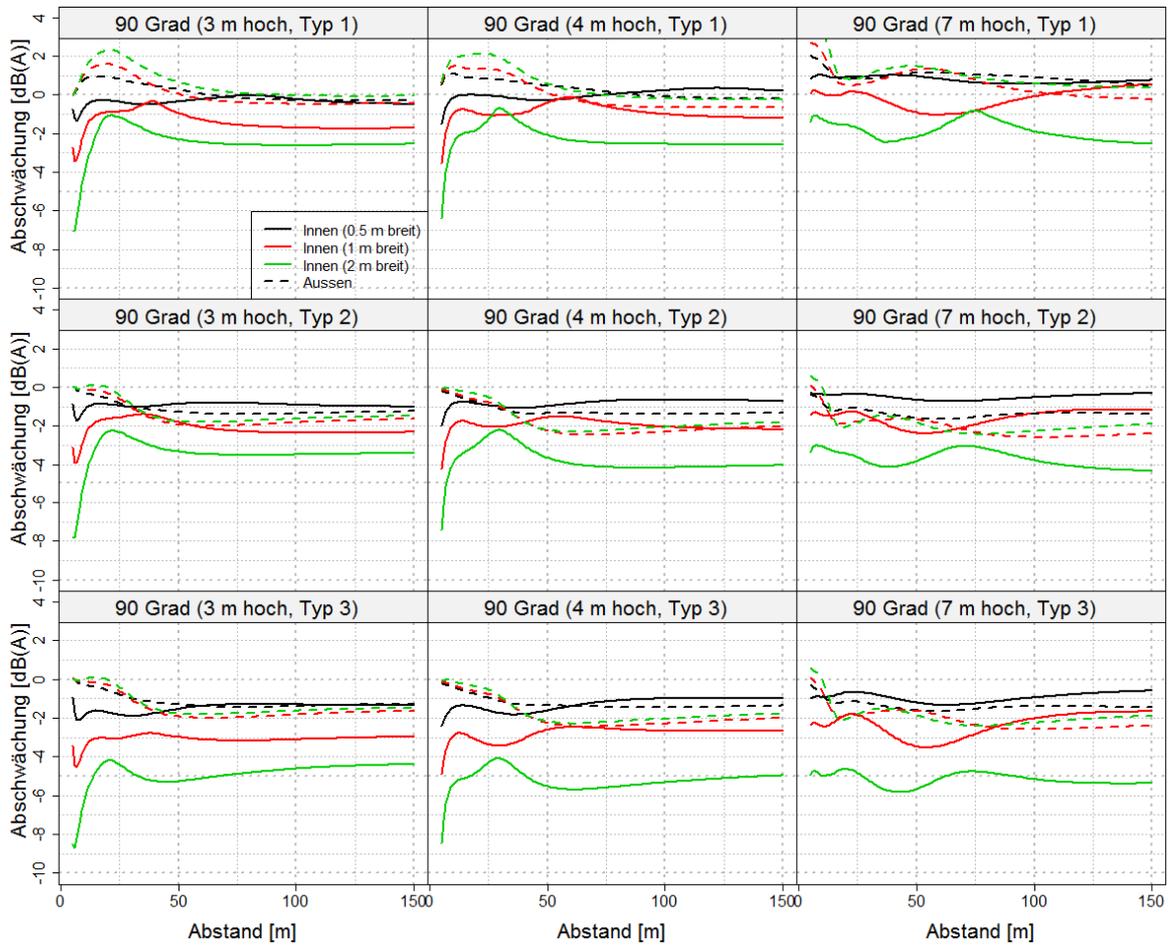


Abbildung 59: Geknickte Wand (90°) mit einer Quelle nfernung von 4 m, Empfängerhöhe 10 m

5.7.2 Effekt der Quellentfernung

Wie zu erwarten, nimmt die Zusatzwirkung der Geometrie mit steigender Entfernung ab.

Im Fernbereich beträgt sie meist deutlich weniger als 1 dB(A) zwischen 8 und 10 m (grüne und rote Linien in Abbildung 60 und Abbildung 61). Die stärksten Änderungen treten wiederum bei den breiteren Profilen auf.

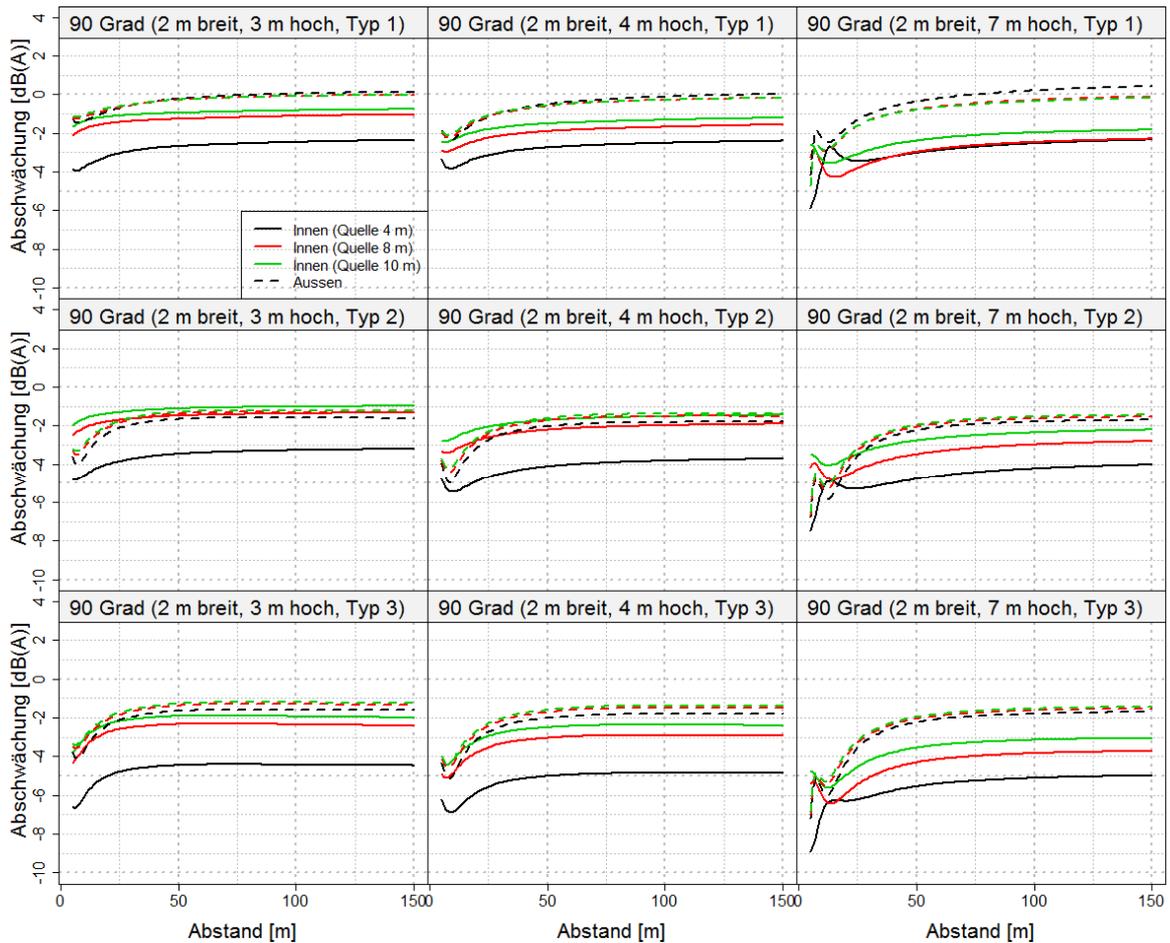


Abbildung 60: Geknickte Wand (90°, 2m) mit verschiedenen Quellentfernungen, Empfängerhöhe 2 m

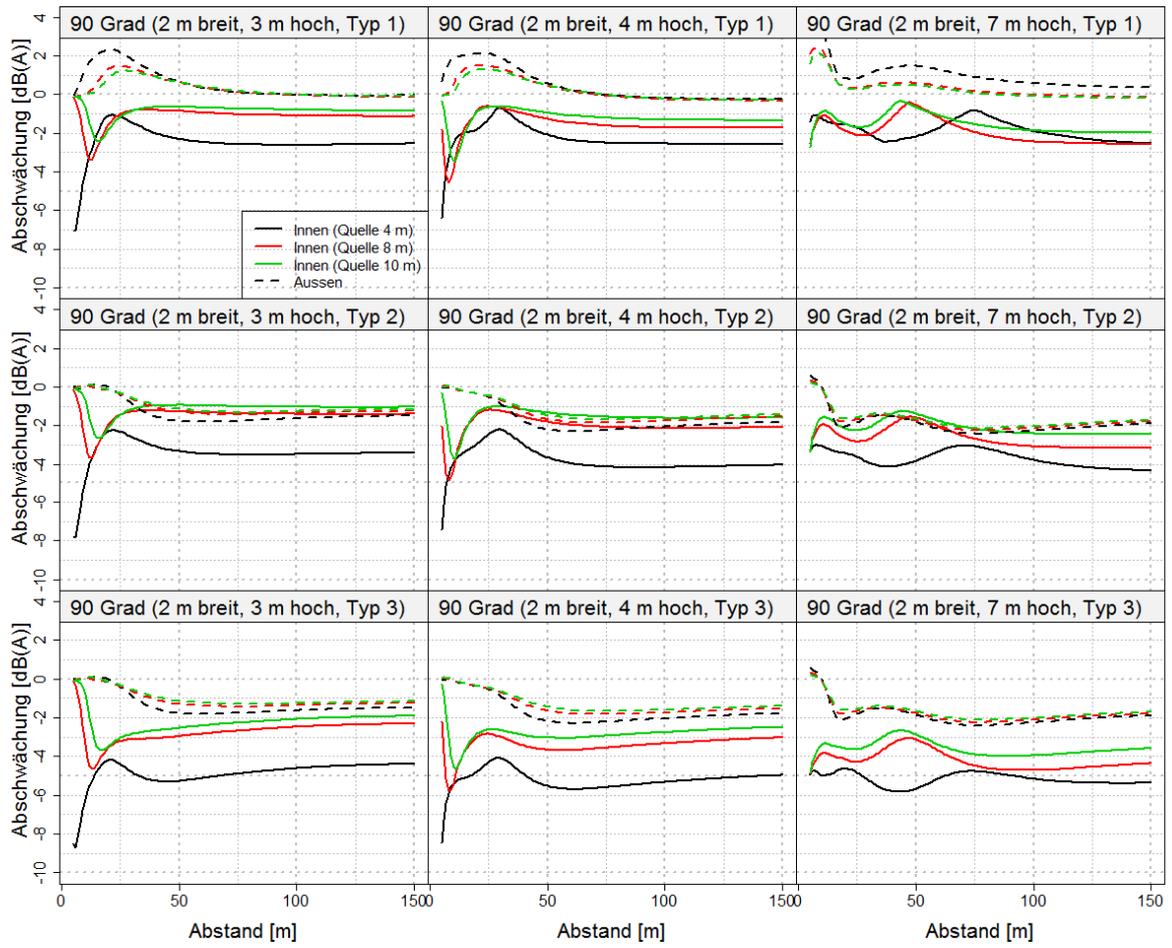


Abbildung 61: Geknickte Wand (90°, 2m) mit verschiedenen Quellentfernen, Empfängerhöhe 10 m

5.8 Direkter Vergleich aller Profile

Im Folgenden werden alle bisher beschriebenen Profile nochmals direkt miteinander verglichen.

Abbildung 62 zeigt einen direkten Vergleich aller Profile mit straßenseitiger Absorption (Typ 2). Das T-Profil ist so gewählt dass der gesamte Ausleger gleich breit ist wie bei den anderen Geometrien (plus der halben Wanddicke). Wie schon zuvor beschrieben, schneiden die nach innen gerichteten Wände teilweise schlecht ab, wenn auf der Außenseite keine Absorption stattfindet. Die L-Wände nach innen schneiden im Vergleich zum T wegen der fehlenden Absorption auf der Oberkante trotz der verschobenen Beugekante teilweise schlechter ab. Bei zusätzlicher Absorption (Abbildung 63) zeigt sich für die nach innen gerichteten Wände eine deutliche Verbesserung.

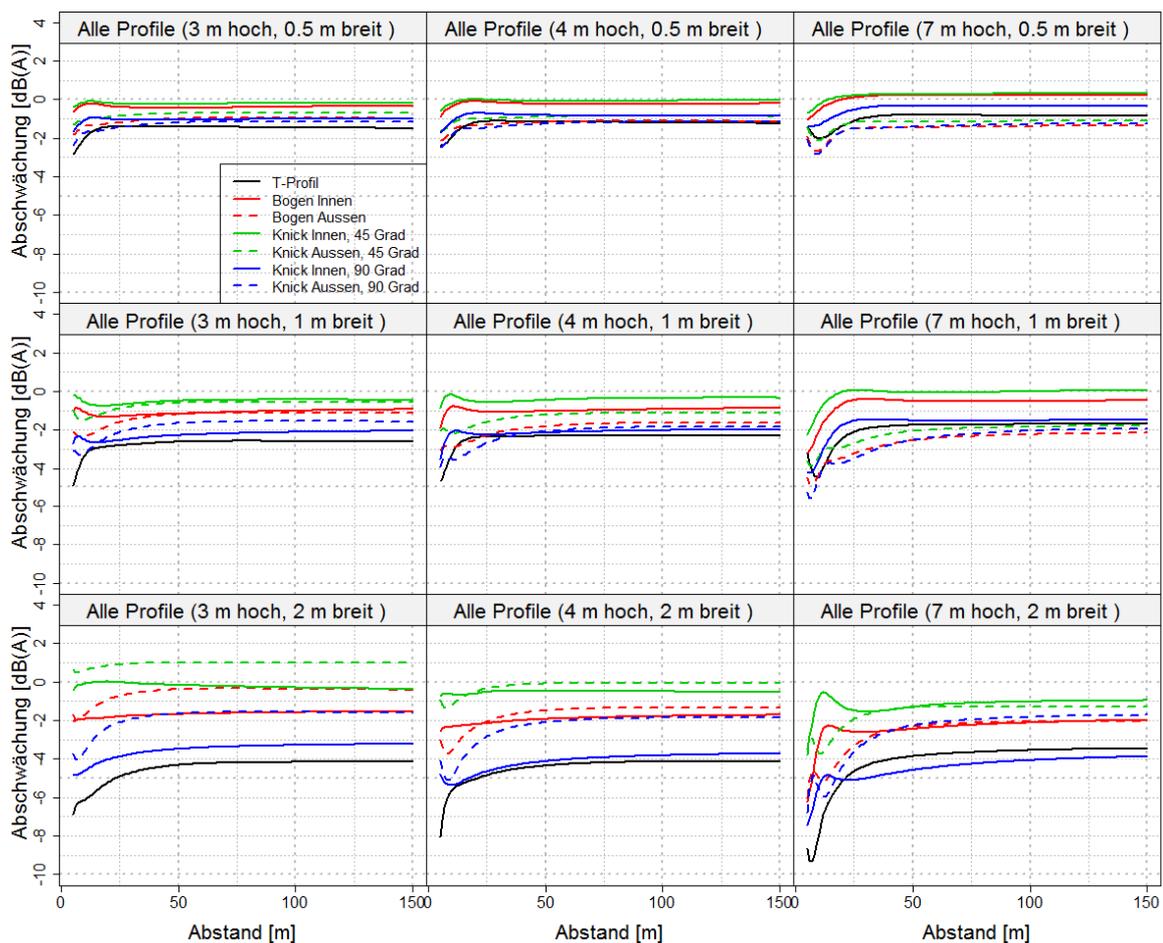


Abbildung 62: Vergleich aller verwendeten Profile mit straßenseitiger Absorption, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 4 m

Abbildung 63 zeigt die Wirkung der verschiedenen Formen bezogen auf eine gleich hohe gerade Wand vom Typ 2. Das T-Profil ist als Typ 2 ausgeführt und wieder so gewählt dass der gesamte Ausleger gleich breit ist wie bei den anderen Geometrien (plus der halben Wanddicke). Alle nach innen gekrümmten oder geknickten Wände sind hier als Typ 3 ausgeführt, um eine absorbierende Oberkante zu haben. Alle nach außen gerichteten Wände sind als Typ 2 ausgeführt. Wie zu sehen wirken in 2 m Höhe (Quellentfernung 4 m) das T-Profil und das nach innen gerichtete L (90°Knickwinkel) am besten. Beide sind in etwa gleich gut und der maximale Unterschied beträgt hier etwa 1 dB(A). Am schlechtesten schneidet das um 45° geknickte Profil ab. Es zeigt sich auch, dass die nach außen gerichteten Wände bei geringer Wandhöhe schlechter abschneiden, bei höheren Wänden und nicht zu breiten Auslegern aber besser, da dann die Absorption besser wirken kann. Bei der L-Wand wo nur die Beugekante von der Fahrbahn weg verschoben wird, ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt. Bei größerer Quellentfernung (Abbildung 64, 10 m) verschwindet der Unterschied zwischen den beiden Richtungen zusehends.

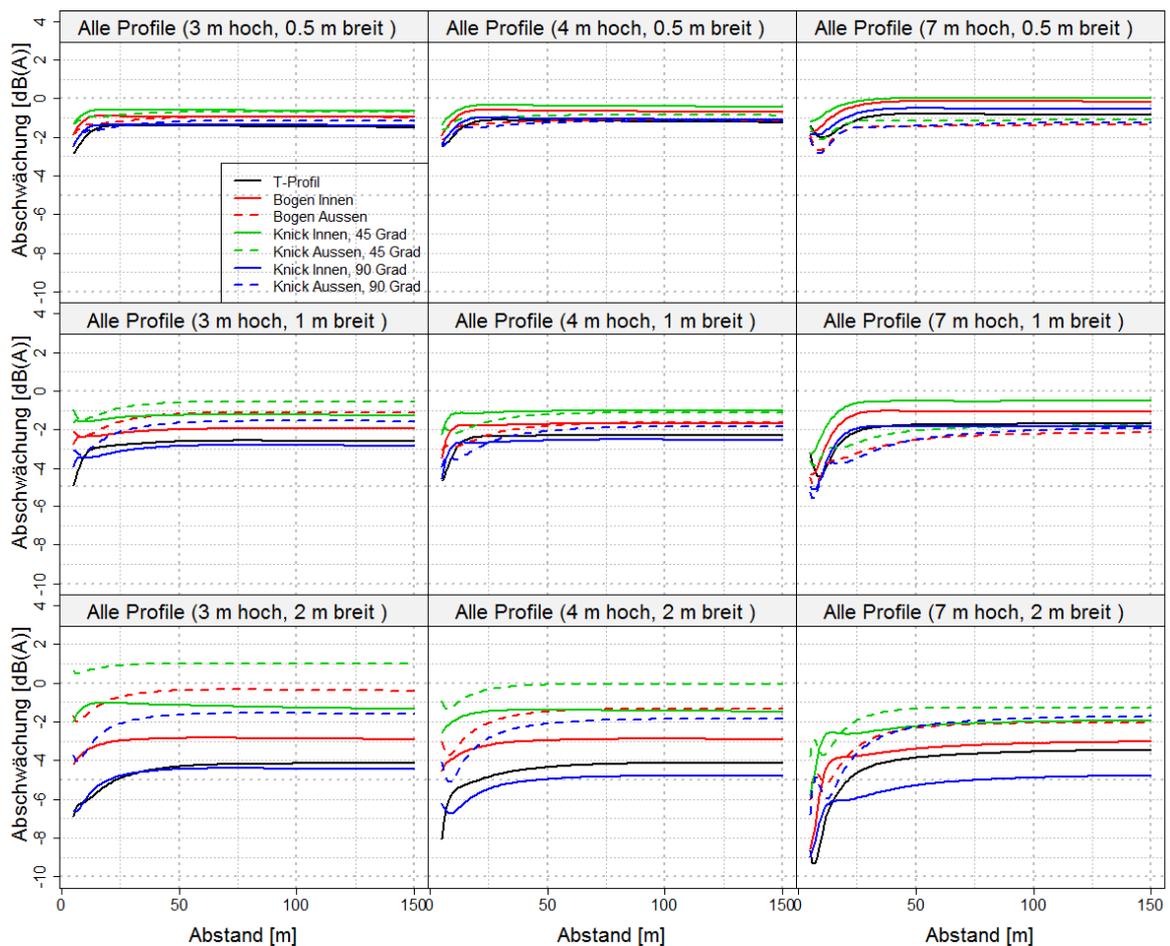


Abbildung 63: Vergleich aller verwendeten Profile, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 4 m

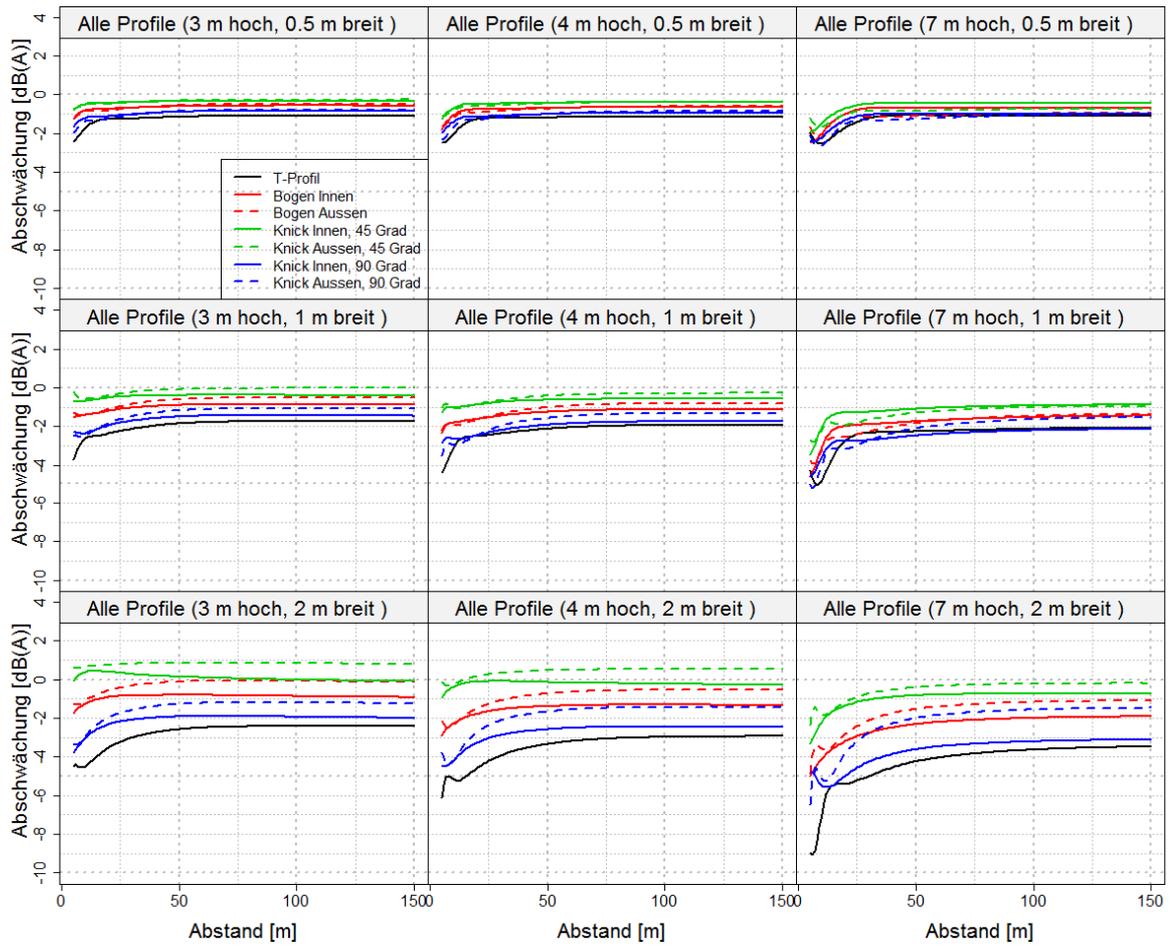


Abbildung 64: Vergleich aller verwendeten Profile, Empfängerhöhe 2 m, Quellentfernung 10 m

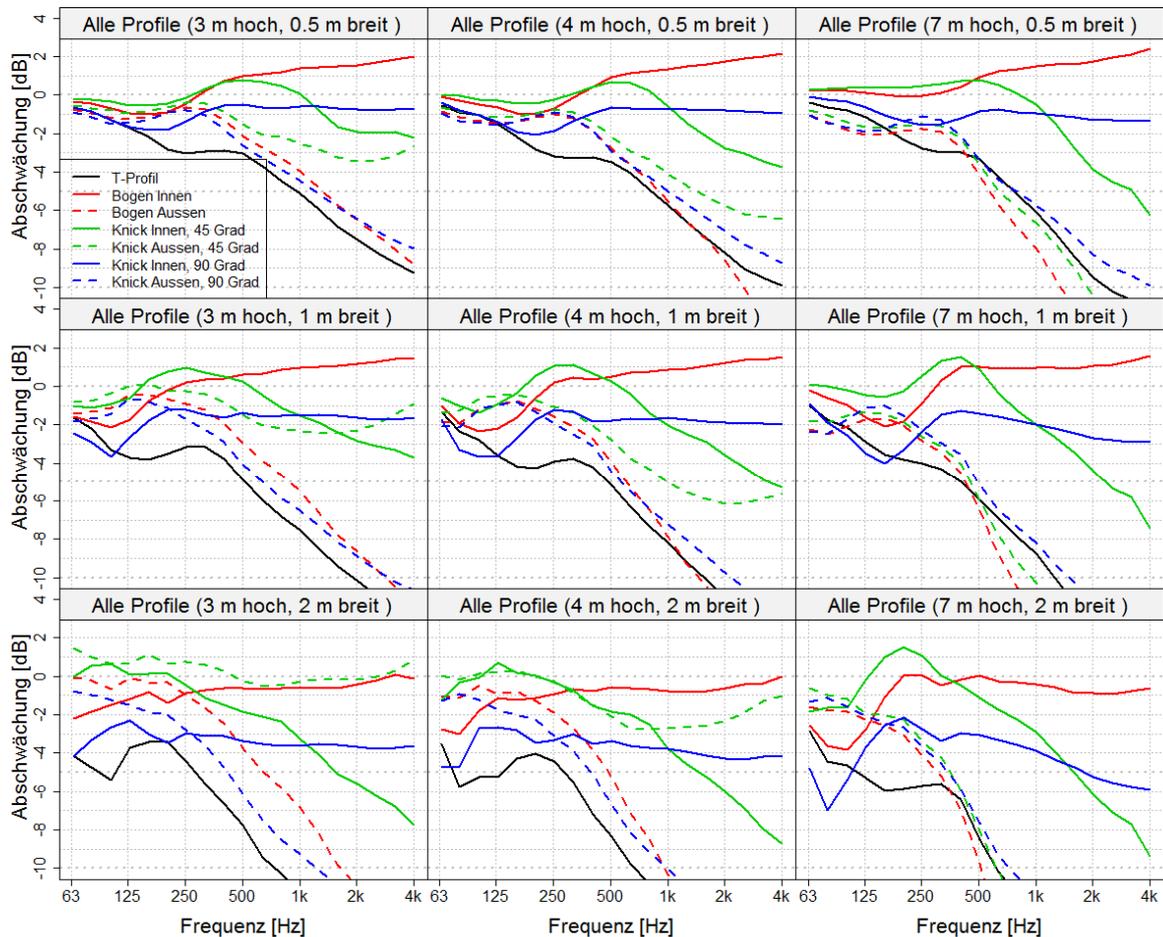


Abbildung 65: Unterschied der Profile (Typ 2) im Oktavbandspektrum in 100 Metern Entfernung, Empfängerhöhe 2 m

Abbildung 65 zeigt die Wirkung als Funktion der Frequenz in 100 Metern Entfernung (alle Profile sind Typ 2). Es ist gut ersichtlich, dass nach innen gerichtete Profile bei großen Breiten eine stärkere Wirkung im tieffrequenten Bereich (unterhalb 200 Hz) haben, als ihre nach außen gerichteten Gegenstücke. Im hochfrequenten Bereich zeigt sich dann der Vorteil der nach außen gerichteten Profile, die vor allem durch die Absorption wirken. Es ist auch ersichtlich, dass bei nach außen gerichtetem 45°-Knick, die Absorption bei niedrigen Wänden nicht sehr wirksam ist (grün strichlierte Kurve). Wenn bei nach innen gerichteten Profilen zusätzlich Absorption auf der Außenseite wirksam wird (Abbildung 66) zeigt sich eine deutliche Verbesserung im höherfrequenten Bereich (vor allem bei Krümmung und 90°-Knick).

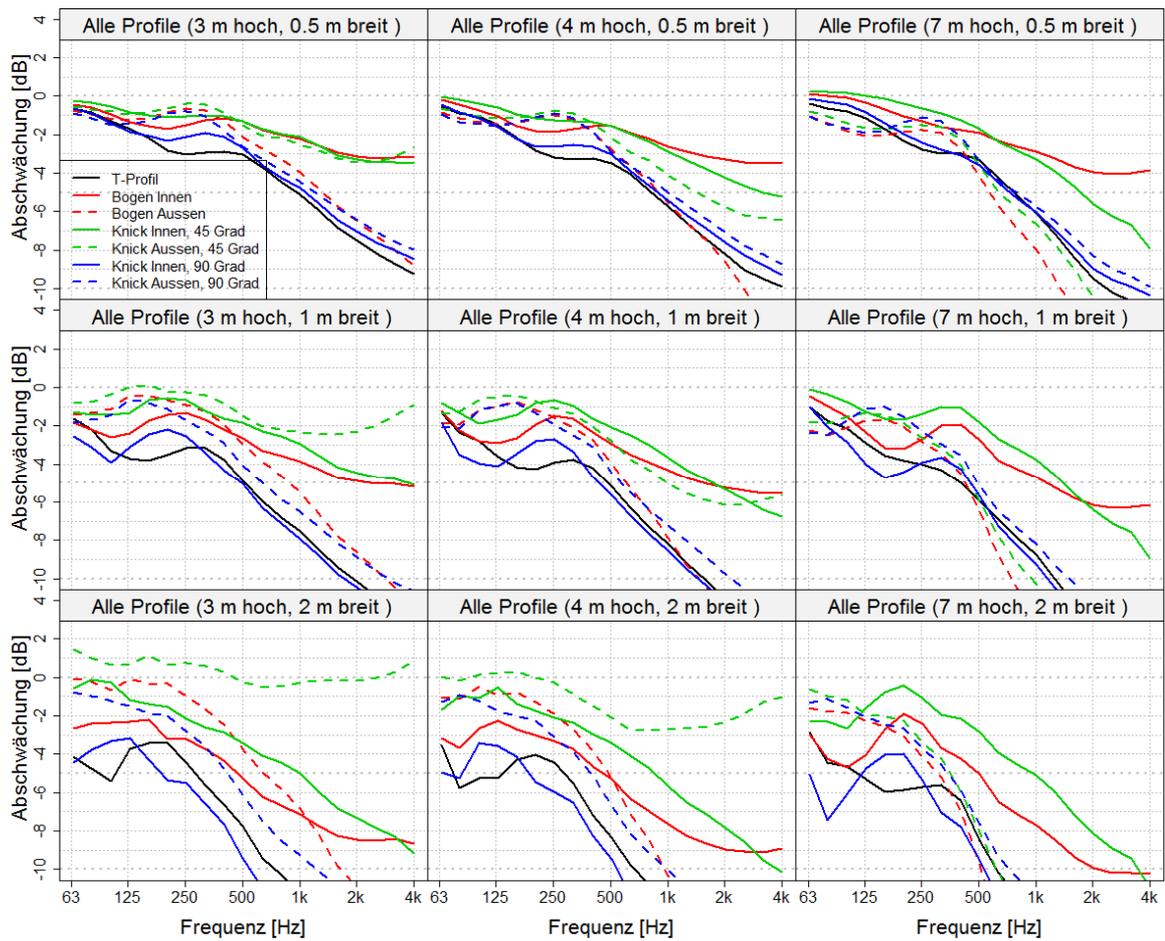


Abbildung 66: Unterschied der Profile (Typ 2 und 3) im Oktavbandspektrum in 100 Metern Entfernung, Empfängerhöhe 2 m

5.8.1 Verschiebung der Beugungskante

Eine Frage, die sich im Bezug auf gewisse komplexe Geometrien stellt ist, ob die zusätzliche Schirmwirkung nur durch die zur Straße hin verschobene Beugungskante entsteht. An sich ist die Frage schon dadurch beantwortet, dass das nach außen gerichtete L mit der exakt gleichen ersten Beugungskante eine bessere Wirkung als die gerade Wand erzielt (bei Absorption auf der Oberkante). Weiters zeigen die anderen nach außen gerichteten Profile, bei denen die Beugungskante nach außen wandert (bei 45° geknickten Profilen wandert sie für sehr nahe Positionen nach unten, beim gekrümmten Profil ist keine eindeutige Beugungskante definierbar) trotzdem eine Verbesserung, sofern Absorption im Schallweg aufgebracht wird. Nichtsdestotrotz kann man auch auf Basis der hier durchgeführten Simulationen den Effekt einer Verschiebung der Beugekante untersuchen, und zwar für nach innen gerichtete Profile mit 2 m Auflegerbreite. Diese wurden mit der geraden Wand verglichen wenn die Quellposition um 2 m zur Wand hin verschoben ist.

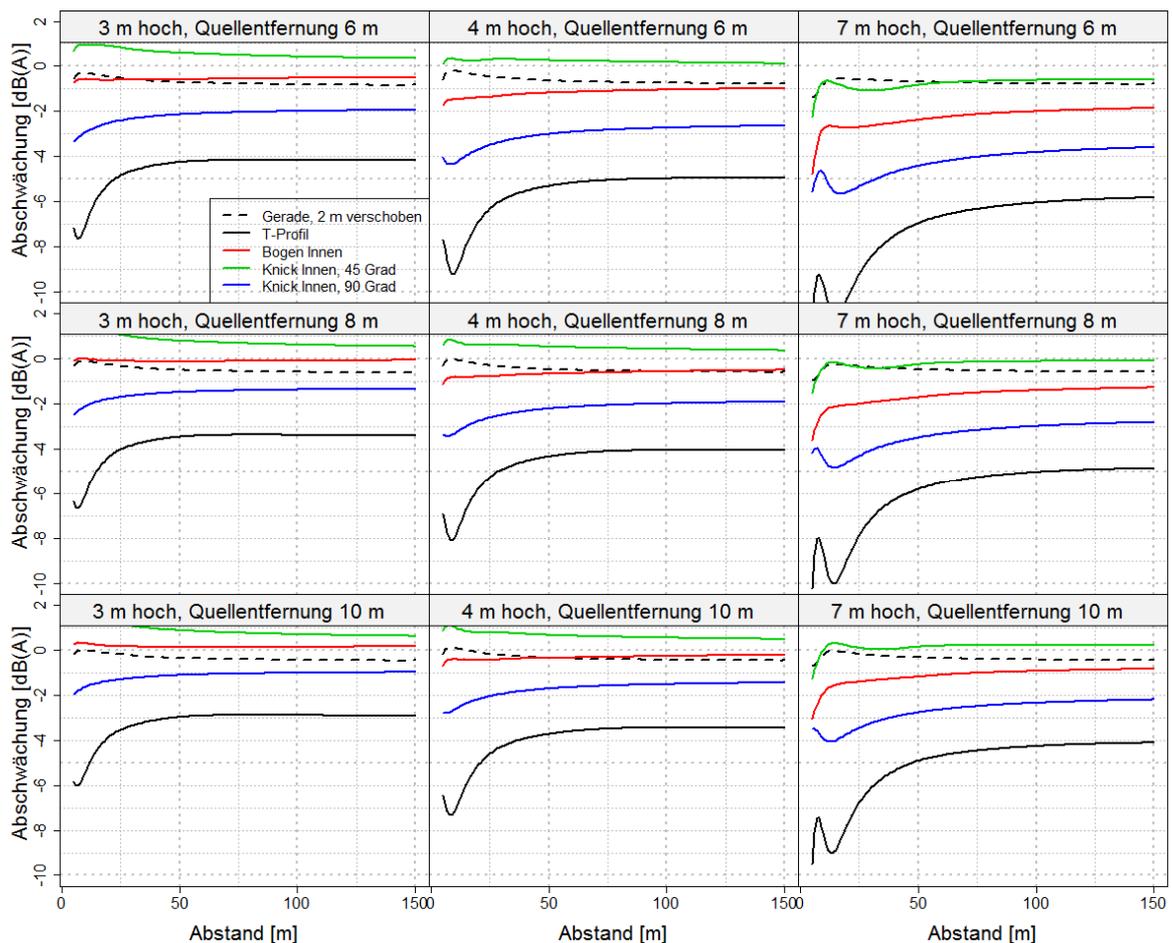


Abbildung 67: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (alle Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 2 m

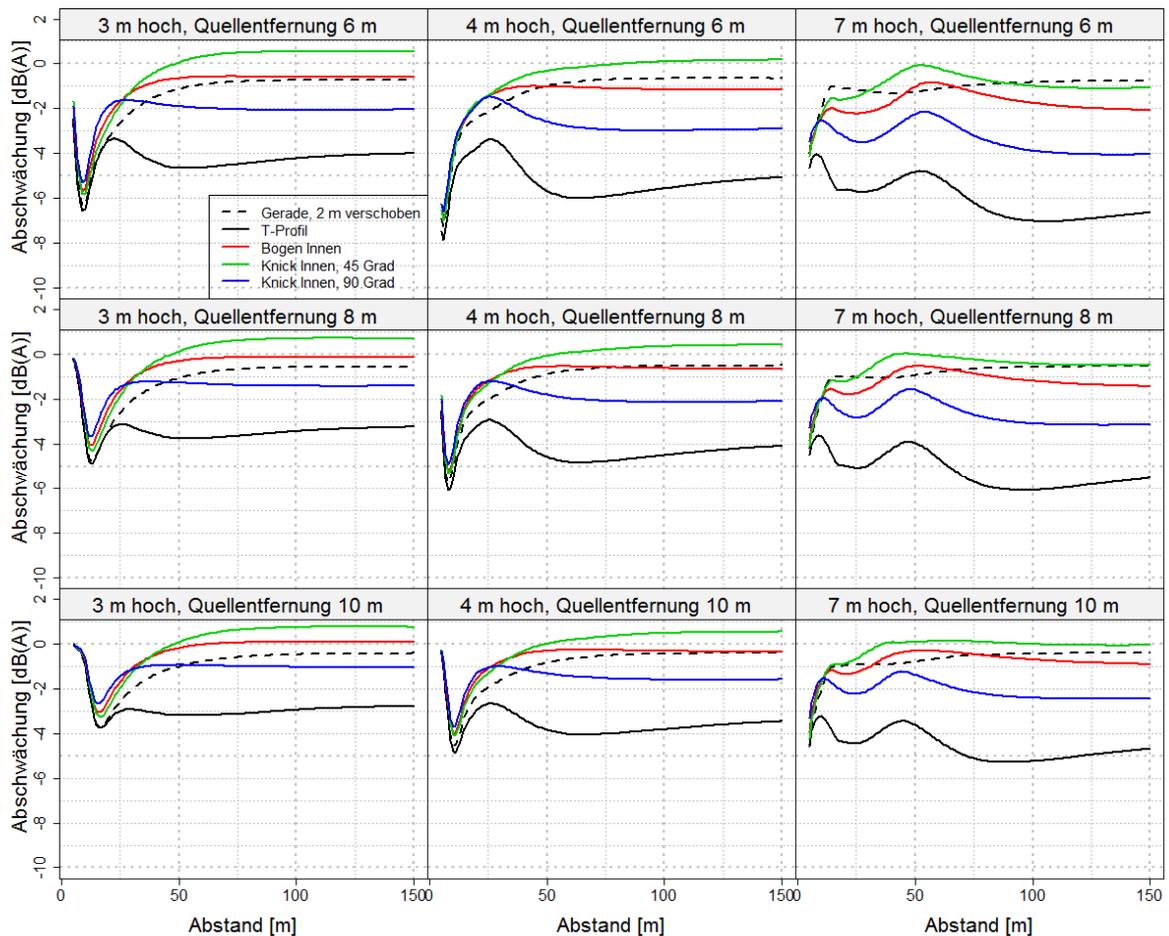


Abbildung 68: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (alle Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 10 m

In Abbildung 67 und Abbildung 68 wird die erreichbare Verbesserung durch verschiedene Geometrien (2 m Breite bei T-Profil, Bogen und Knick) vom Typ 2 verglichen. Als Vergleichswert ist die Wirkung einer Verschiebung der Wand 2 m zur Quelle dargestellt.

Für die komplexen Geometrien zeigt sich bei L- (oben reflektierend) und T-Profil (oben absorbierend) eine eindeutige Verbesserung wogegen die gekrümmte und 45° geknickte Wand bei größeren Entfernungen keine Verbesserung und teils eine Verschlechterung von max. 1 dB(A) gegenüber der Beugungskantenverschiebung zeigen.

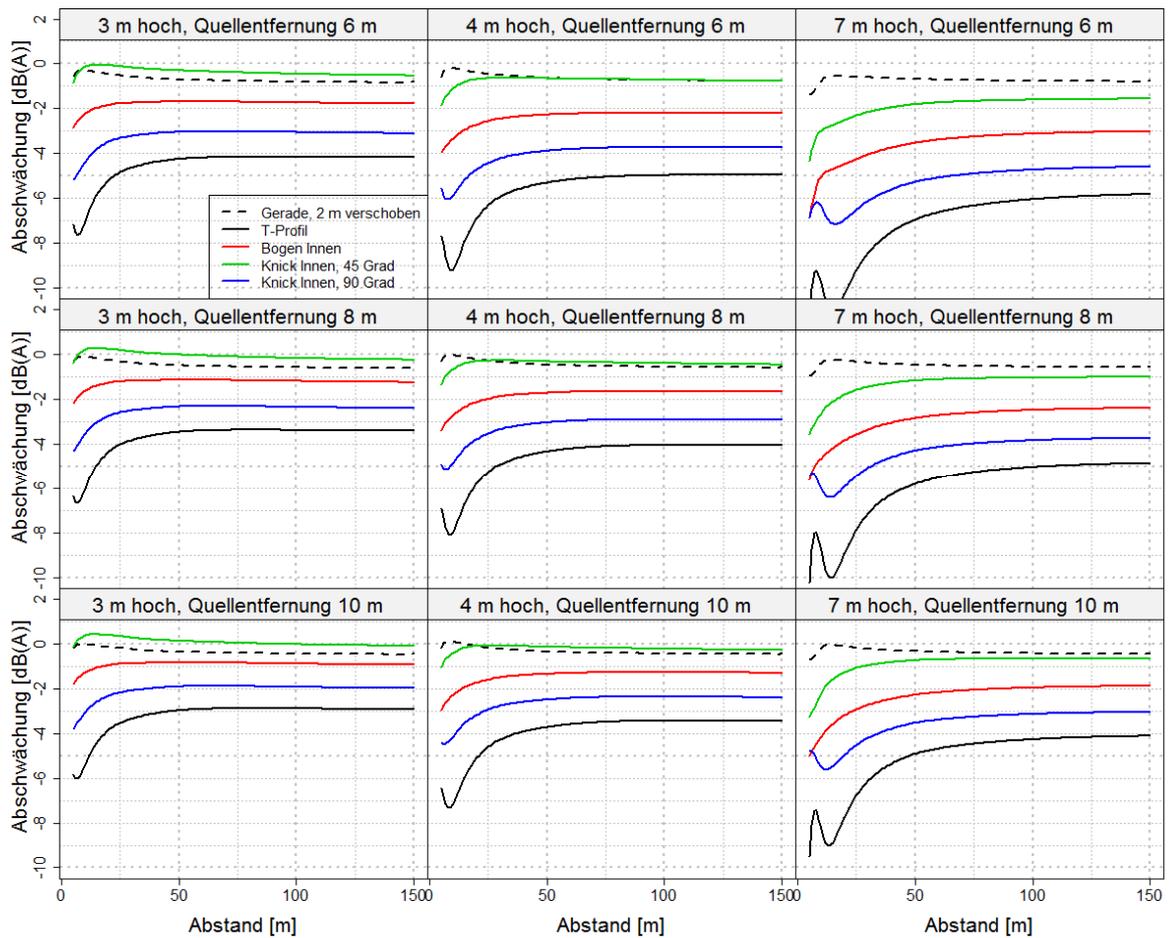


Abbildung 69: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (Typ 3, T-Profil Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 2 m

Bei Veränderung der Absorption für L, 45° Knick und Krümmung sodass die Rückseite (Oberseite bei L) absorbierend ausgeführt ist, zeigen sich deutliche Verbesserungen gegenüber einer simplen Verschiebung der Beugekante bei fast allen Geometrien und Höhen (Abbildung 69 und Abbildung 70).

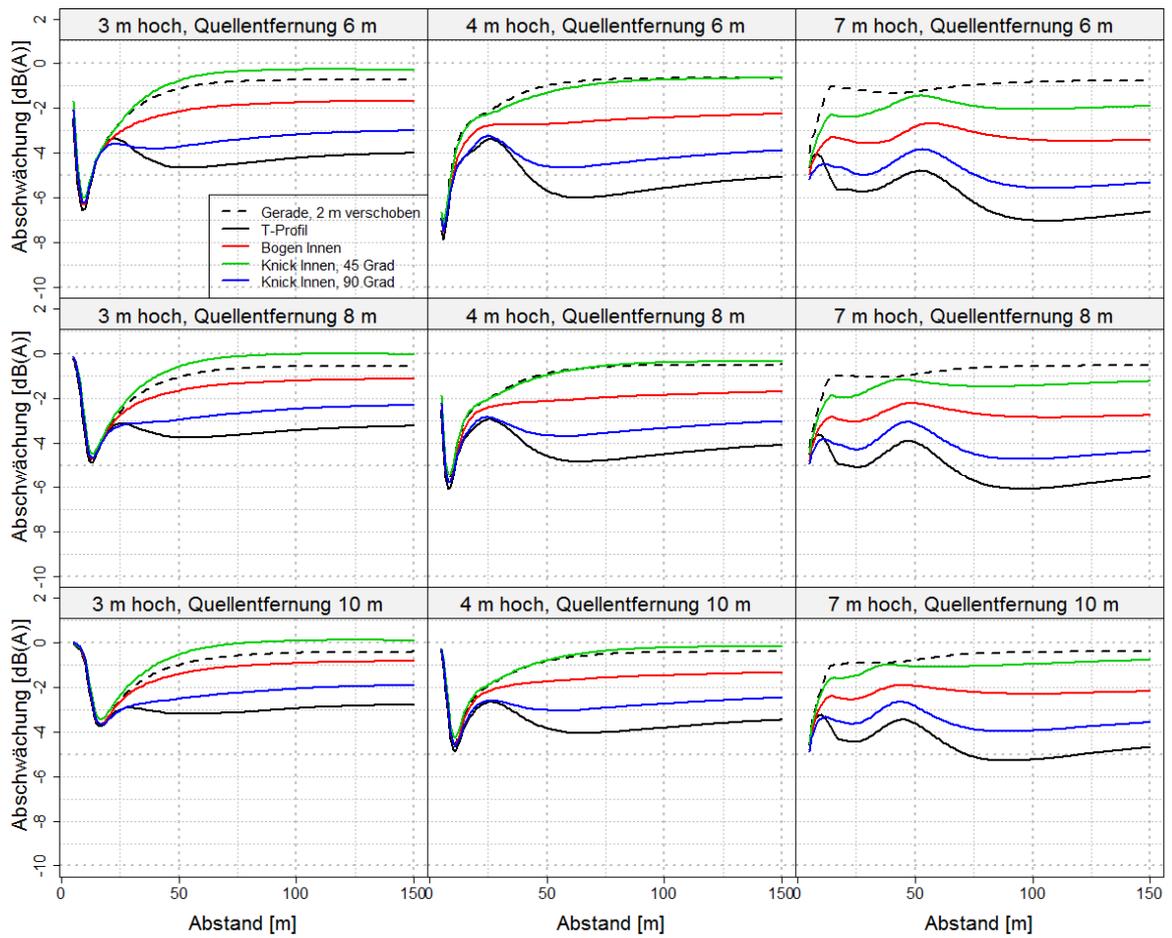


Abbildung 70: Vergleich der Wirkung von 2 m breiten Profilen und der geraden Wand (Typ 3, T-Profil Typ 2) mit um 2 m zur Quelle hin verschobener Wand (strichlierte Linie), Empfängerhöhe 10 m

5.9 Zusammenfassung

Es wurde eine Anzahl von Standardgeometrien simuliert, um eine Basis für die Korrekturfaktoren verschiedenster Wandgeometrien und Höhen zu haben. Aus der Vielzahl simulierter Geometrien lassen sich mehrere Erkenntnisse gewinnen.

Die Daten legen nahe, dass nicht nur die Geometrie sondern auch die Anordnung absorbierender Elemente einen gewichtigen Einfluss auf die Wirkung der LSW hat, vor allem im hochfrequenten Bereich. Hier ist es entscheidend, absorbierendes Material in den Ausbreitungsweg zu bringen, dadurch lässt sich die Wirkung jeder Geometrie deutlich verbessern.

Bei rein straßenseitiger Absorption sind nach außen gekrümmte und auch 45° geknickte Wände teilweise effektiver, als ihre nach innen gerichteten Äquivalente. Wird aber außen auch Absorption verwendet, sind die nach außen gerichteten Wände nur bei hohen Wänden und nahen Quellpositionen und nicht allzu breiten Geometrien besser. Eine genauere Analyse zeigt, dass hier tieffrequente Effekte eine große Rolle spielen. Nach außen gerichtete, absorbierende Profile wirken sehr gut im hochfrequenten Bereich. Die Wirkung bei großen nach innen gerichteten Profilen ist im tieffrequenten (bis zu maximal 200 Hz) Bereich besser. Hier spielt die Absorption eine untergeordnete Rolle, da die Absorptionskoeffizienten in diesem Frequenzbereich sehr niedrig sind. Wenn zusätzlich noch Absorption auf der Rückseite aufgebracht wird, verbessert sich die Wirkung der nach innen gerichteten Profile, sodass sie in Summe besser abschneiden.

Weiters lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die T- und L-Wand bei hoher Absorption auf der Oberkante im Allgemeinen am Besten abschneiden. Bei etwa gleicher Oberkantenlänge sind das L zur Fahrbahn hin und die T-Wand am effektivsten, das nach außen gerichtete L-Profil ist hier etwas schwächer aufgrund der von der Quelle weg verschobenen Beugekante.

6 SIMULATION KOMPLEXER GEOMETRIEN, BAHNQUERSCHNITT

Der grundlegende Unterschied in den Simulationen ist der Simulationsquerschnitt, der an die Bahn angepasst wurde.

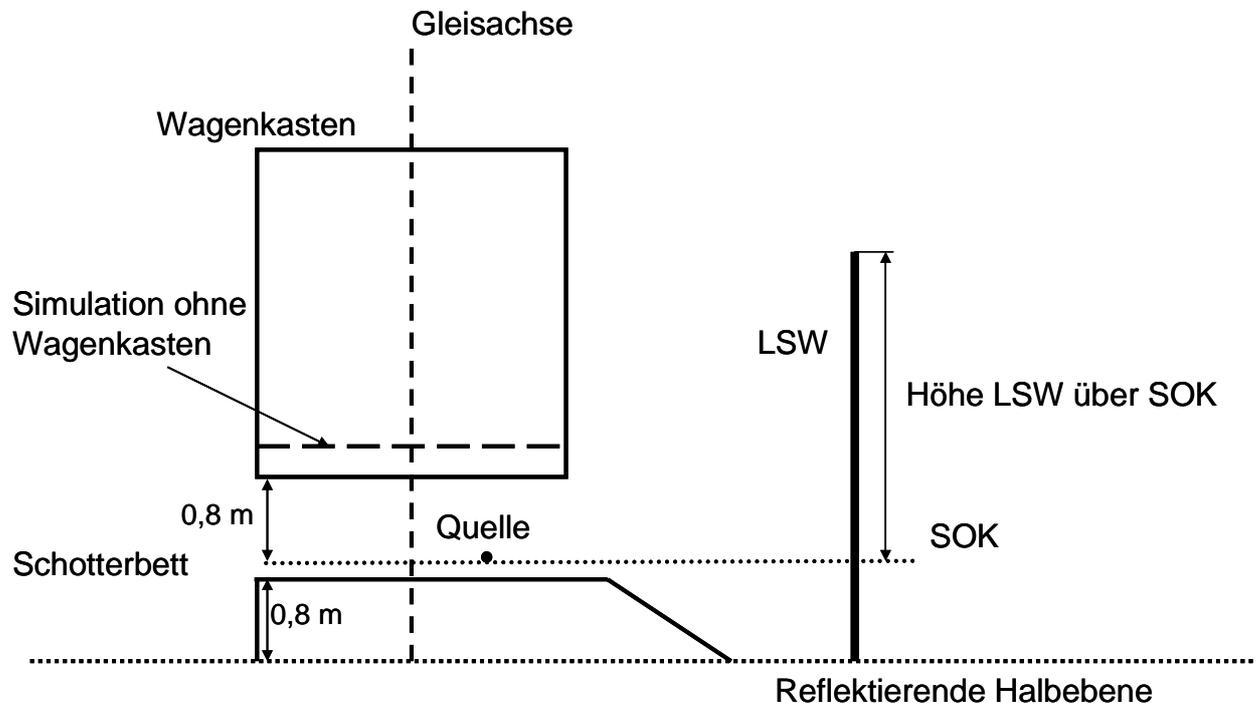


Abbildung 71: Simulationsquerschnitt für die Bahn

Abbildung 71 zeigt den Querschnitt. Es gibt 2 grundlegende Simulationstypen:

1. Mit Wagenkasten: Der (voll reflektierende) Wagenkasten ist mitmodelliert, um Mehrfachreflektionen zu berücksichtigen. Dieser wurde 3 m breit angenommen und reicht bis auf 4 m über Schienenoberkante (SOK).
2. Ohne Wagenkasten: Um die Abschirmung der Quelle vergleichbar zu halten, wurde ein 0.3 m hoher Kasten simuliert (strichlierte Linie). Mehrfachreflektionen sollten hier keine Rolle spielen.

Die Quelle wurde knapp über SOK angenommen (0.03 m, 0.2 m über dem Schotterbett). Die Höhe der LSW bezieht sich immer auf SOK. Der angegebene Abstand der Quelle ist auf die Gleisachse bezogen, die Quelle selbst ist um die halbe Spurbreite näher an der Wand.

Das Schotterbett wurde mittels eines Impedanzmodells [5] modelliert, die Parameterwerte stammen aus einer weiteren experimentellen Studie [8]. Um die Simulationszeit speziell bei

kleineren Quellentfernungen zu reduzieren, wurde das Schotterbett hinter dem Wagenkasten abgeschnitten. Dies sollte auf die Simulation keinen Einfluss haben.

Die Basisquerschnitte waren für die Bahn die gleichen wie für die Straße, sind aber der Vollständigkeit halber in Abbildung 72 nochmals dargestellt. Für die Simulationen ohne Wagenkasten bleibt weiterhin die Bezeichnung Typ 1, 2 und 3, mit Wagenkasten Typ 11, 12 und 13.

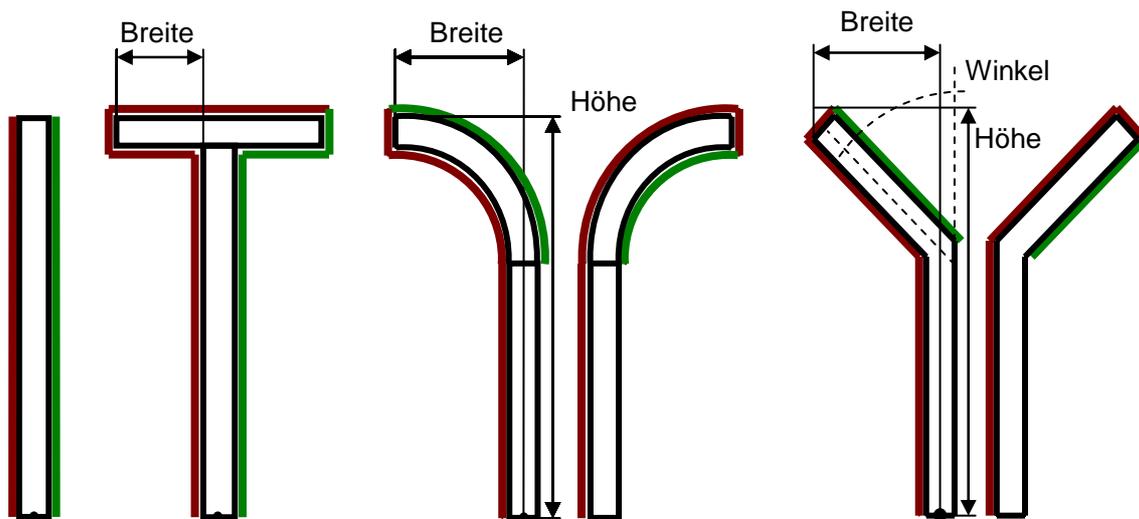


Abbildung 72: Geometrien für die Simulationen durchgeführt wurden

Die Unterschiede sind in der Höhe, da bei der Bahn im Allgemeinen niedrigere LSW zum Einsatz kommen.

Tabelle 3: Übersicht über die simulierten LSW Profile

Typ	Höhen [m]	Richtungen	Breiten [m]	Winkel
Gerade	2, 3 und 4	-	-	-
T-Profil	2, 3 und 4	-	0,25, 0,5, 1 und 2	-
Bogen	2, 3 und 4	Innen und Aussen	0,5, 1 und 2	-
Knick	2, 3 und 4	Innen und Aussen	0,5, 1 und 2	45 und 90°

Simulationen wurden für 4 Quellpunkte in 4,3, 8,3, 8,7 und 9 Metern Entfernung durchgeführt.

6.1.1 Messpunkte

Die Analyse der verschiedenen LSW-Geometrien erfolgt in einem Raster das sich von 5-150 Meter hinter der Wand erstreckt und 10 Meter in die Höhe reicht. Die Empfängerpositionen sind mit horizontalem und vertikalem Abstand von 1 m voneinander angeordnet, daraus ergeben sich 146 x 10 Positionen.

6.1.2 Analyse

Die Analyse erfolgt wie bei der Straße. Die Einzahlwerte werden allerdings auf Basis des Bahnlärmspektrums (EN 16272-3-1 [9]) berechnet.

6.2 Gerade Wand

Bei den Simulationen mit Bahnquerschnitt ist unter anderem der Unterschied zwischen Simulationen mit und ohne Wagenkasten interessant.

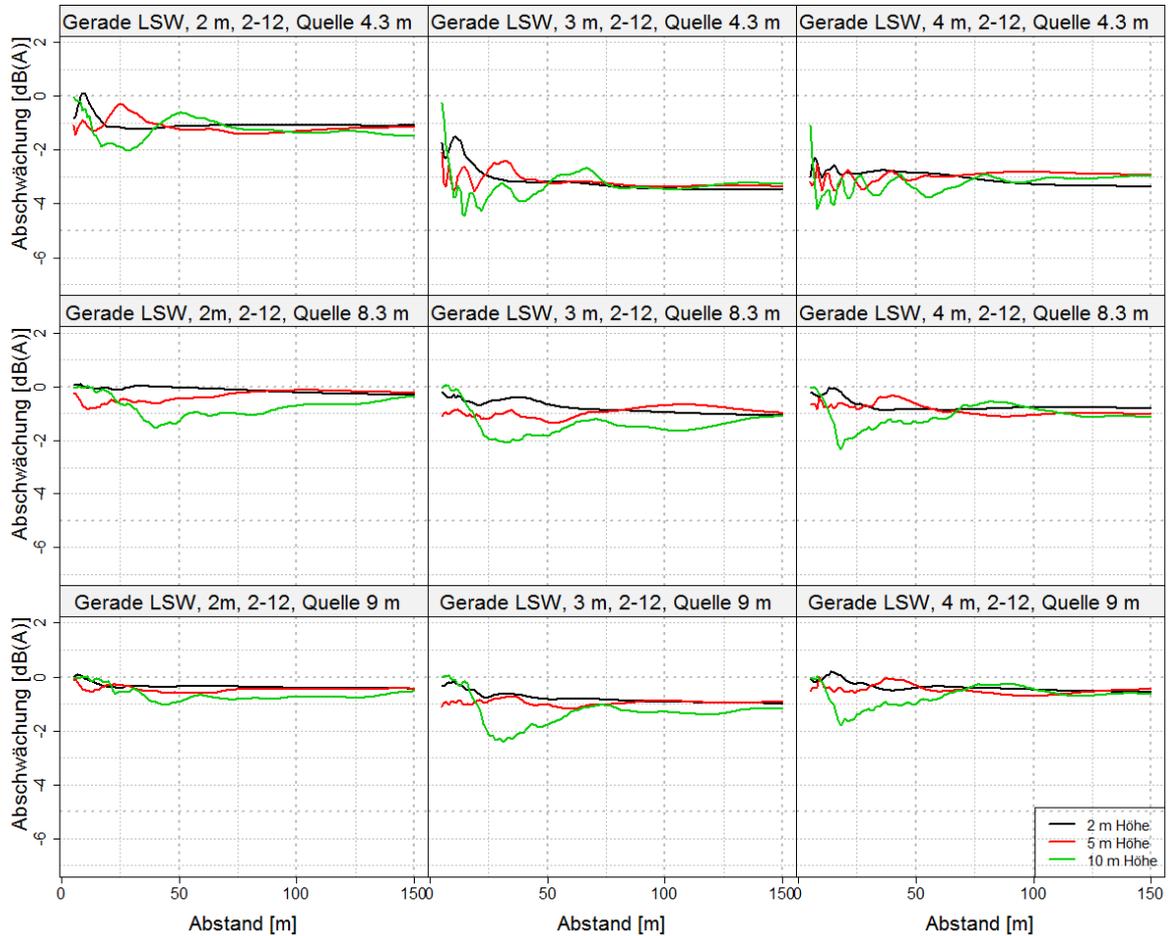


Abbildung 73: Unterschied der Wirkung gerader Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten

Abbildung 73 zeigt den Unterschied im A-bewerteten Pegel in der Abschwächung mit und ohne Wagenkasten für 3 LSW-Höhen, 3 Quellentfernungen und in 3 unterschiedlichen Empfängerhöhen. Negative Werte bedeuten dass die Wirkung mit Wagenkasten geringer ist. Unterschiede treten vor allem im Nahbereich bei größeren Empfängerhöhen auf, wobei der Unterschied bei der 3 m hohen LSW am größten zu sein scheint. Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen den Unterschied im Spektrum (Oktavbandmittelung mit Terzbandmittenfrequenzen). Hier wurde zusätzlich eine räumliche Glättung (± 1 m in der Höhe, ± 5 m in der Entfernung) durchgeführt, um die Interferenzen die durch die Quelhöhe ungleich Null entstehen etwas zu reduzieren. Es zeigt sich, dass teilweise beträchtliche Unterschiede im Nahbereich bei nahem Gleis im unteren Frequenzbereich auftreten, die sich aber nur teilweise auf den A-Pegel auswirken. Unterschiede im hohen Frequenzbereich treten nur in höheren Messpositionen auf.

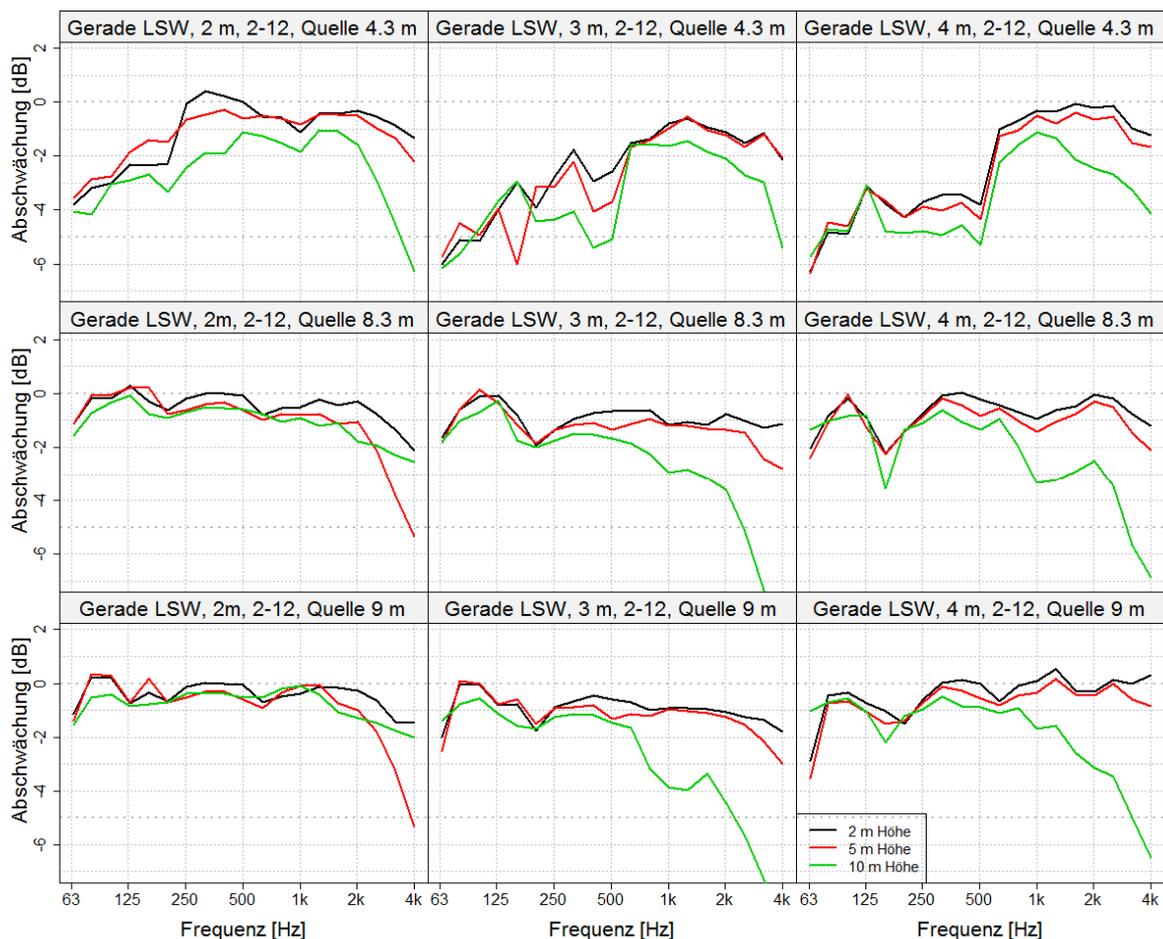


Abbildung 74: Spektraler Unterschied der Wirkung gerader Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten in 30 m Entfernung

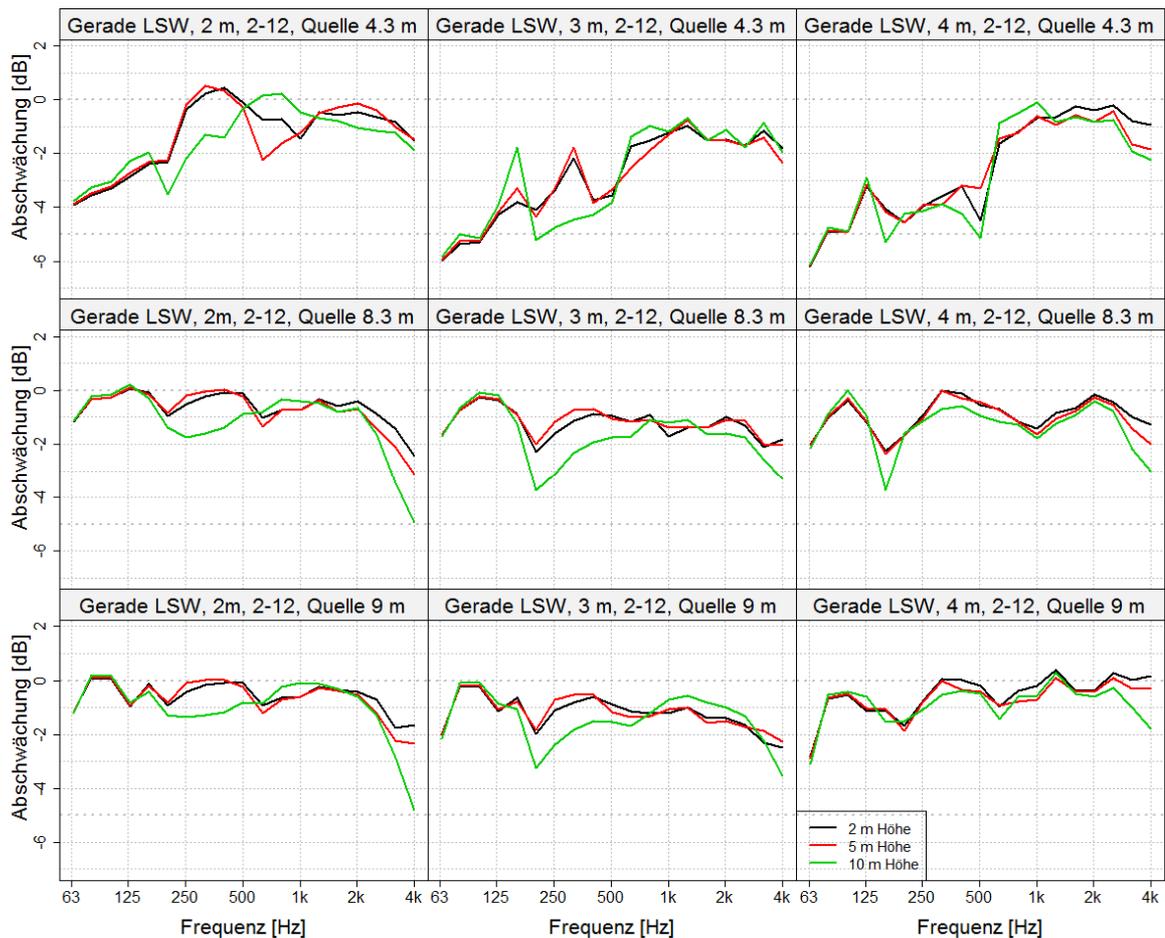


Abbildung 75: Spektraler Unterschied zwischen geraden Wänden mit (Typ 12) und ohne (Typ 2) Wagenkasten in 100 m Entfernung

In [10] wurden Messungen einer 2 m hohen LSW und Berechnungen mit zwei unterschiedlichen Standards, von denen einer Mehrfachreflexionen berücksichtigt, durchgeführt. Die Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen resultierte in einem geringeren Einfügedämmmaß der LSW im Bereich unter 1 kHz (vgl. Abbildung 74, obere linke Graphik, 2 und 5 m Empfängerhöhe mit Abbildung 6 in [10]). Dieser Effekt konnte in der Messung nicht nachgewiesen werden, wobei bei einigen Frequenzen eine sehr hohe Messvarianz auftrat.

6.3 T-Profil

Grundsätzlich ist die Wirkung des T-Profiles ähnlich wie bei der Straße. Vor allem ohne Wagenkasten sind die Ergebnisse qualitativ sehr ähnlich (Abbildung 76). Wenn der Wagenkasten simuliert wird (Abbildung 77), ist, wie zu erwarten, die voll reflektierende T-

Wand deutlich schlechter da die Referenzwand eine innenseitig absorbierende, gerade Wand gleicher Höhe ist (dies ist ein Vergleich der in der Praxis nicht vorkommt). Es zeigt sich auch eine leichte Verringerung der Wirkung des T-Profiles bei geringer Wandhöhe und größeren Breiten (man vergleiche 2. und 3. Reihe, 2 und 3 m Wandhöhe der beiden Abbildungen). Der Teils überproportionale Anstieg der Wirkung bei sehr breiten Profilen entsteht durch eine doppelte Abschattung verursacht durch die Wagenunterseite und die Beugungskante der LSW.

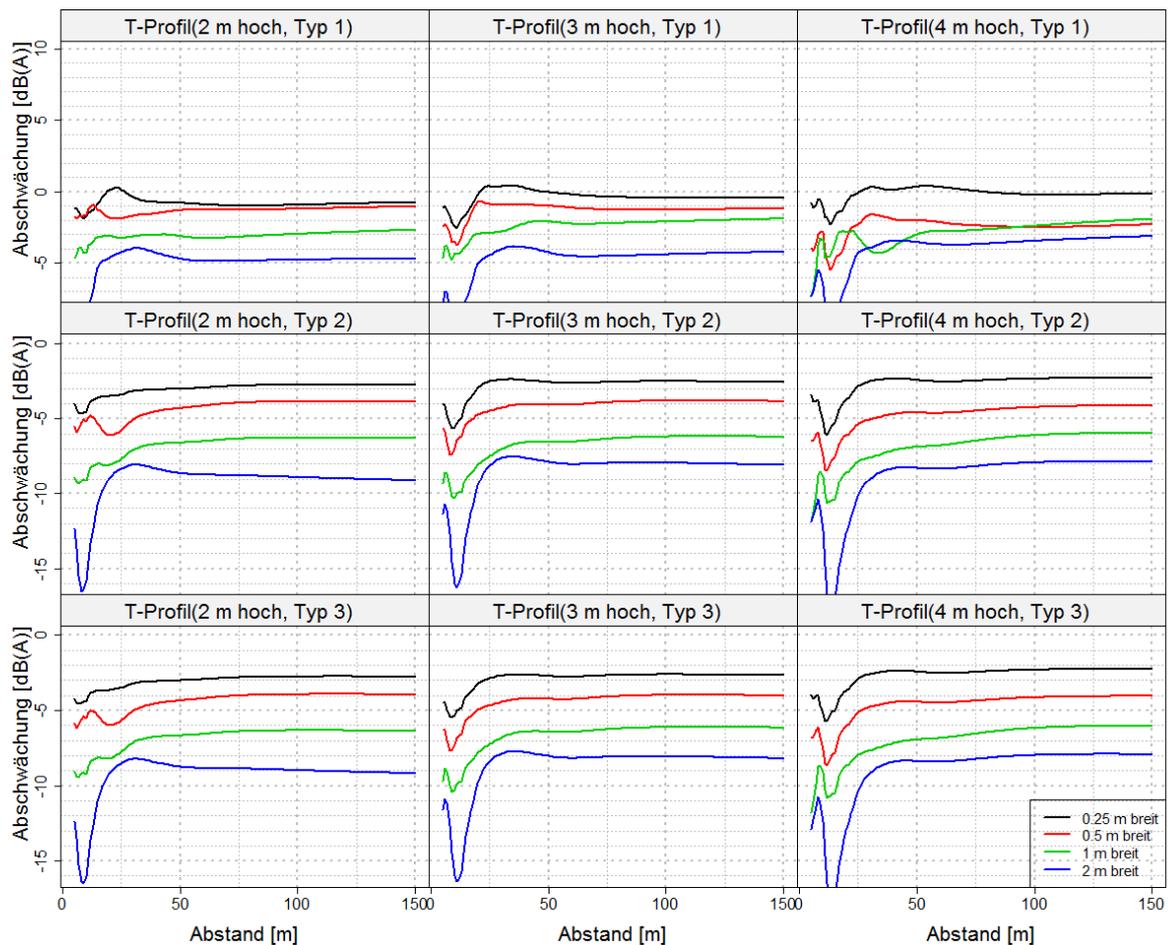


Abbildung 76: Effekt des T-Profiles ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

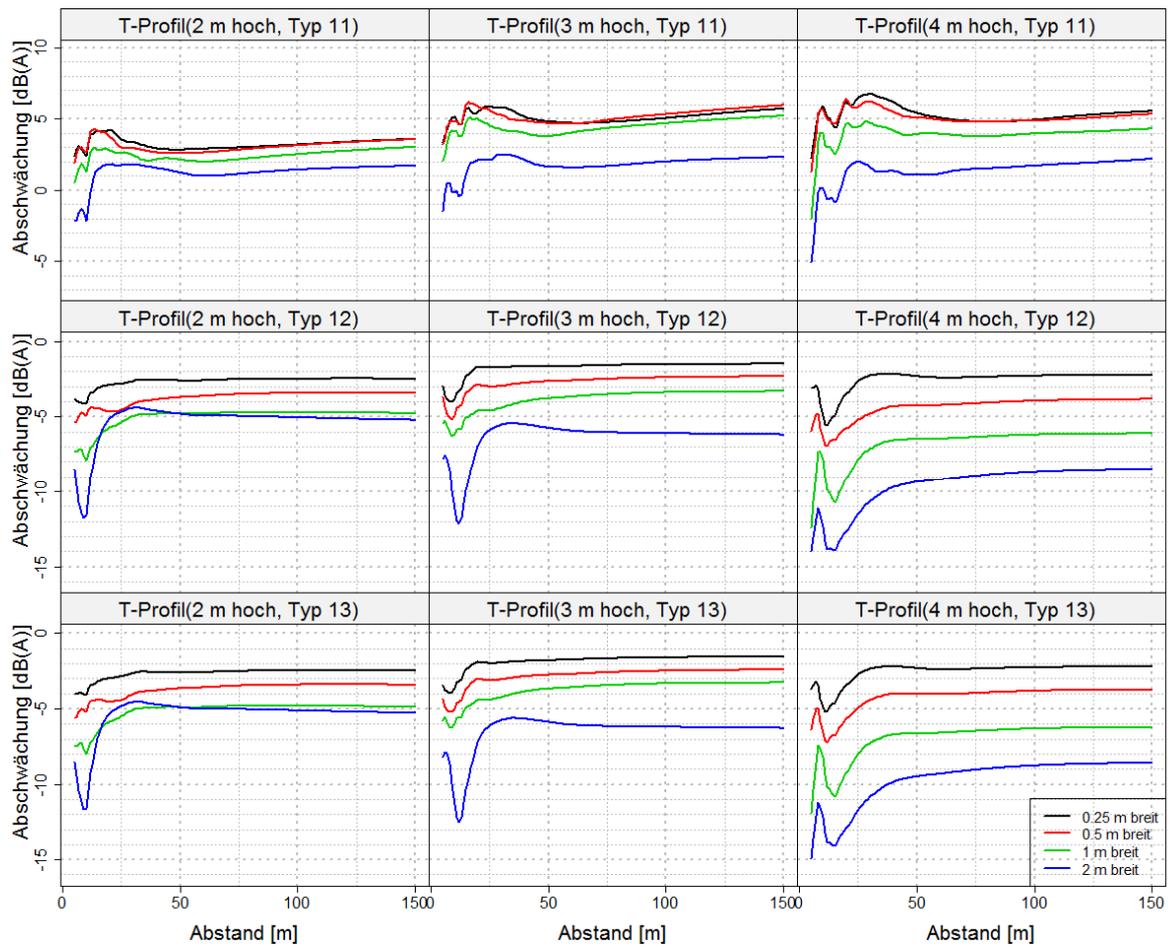


Abbildung 77: Effekt des T-Profiles mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

6.3.1 Effekt der Quellentfernung

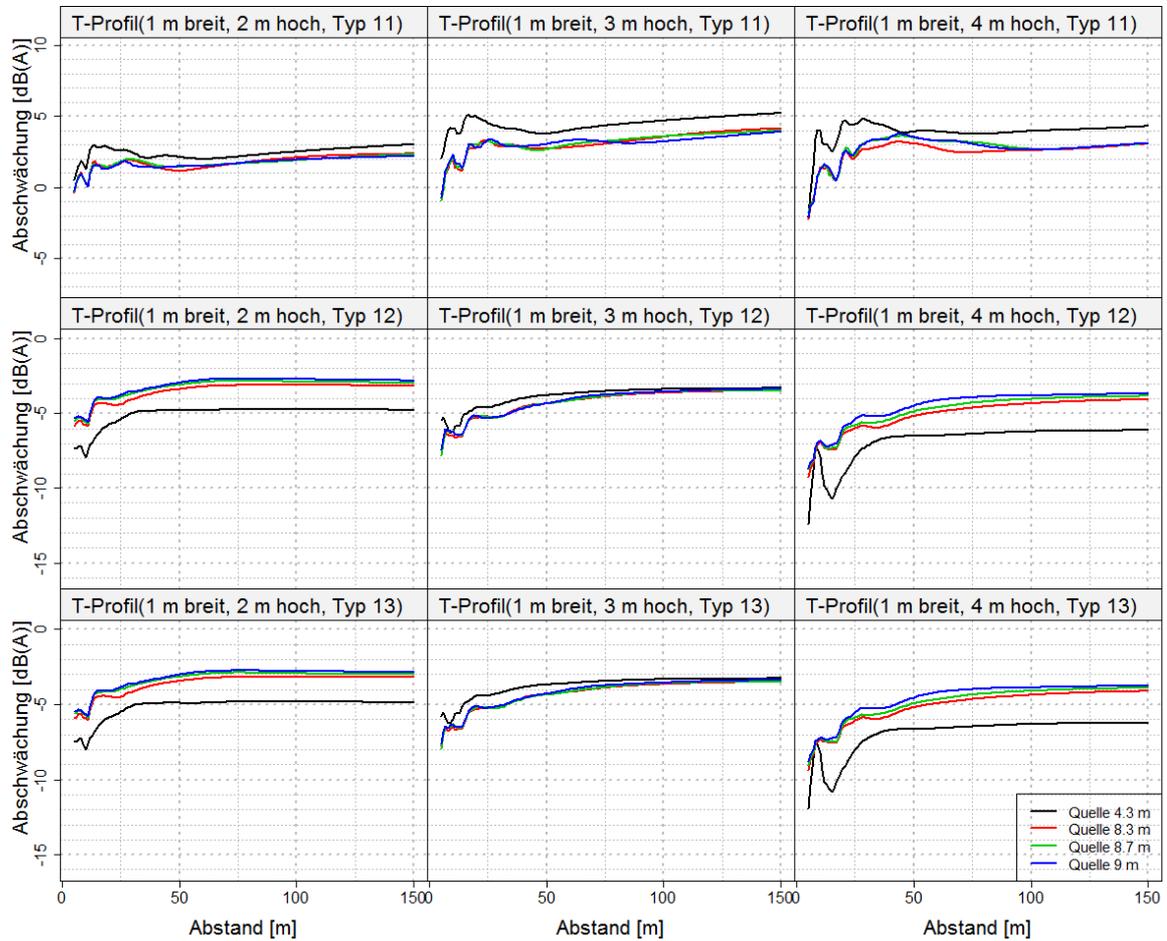


Abbildung 78: Effekt des Quellabstands bei T-Profil ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.

Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen, dass der Effekt des Quellabstands bei Simulationen ohne Wagenkasten und geringen Wandhöhen deutlich stärker ausgeprägt ist. Dies ist ein Effekt der Mehrfachreflexionen, die die Wirkung vor allem am nahen Gleis reduzieren.

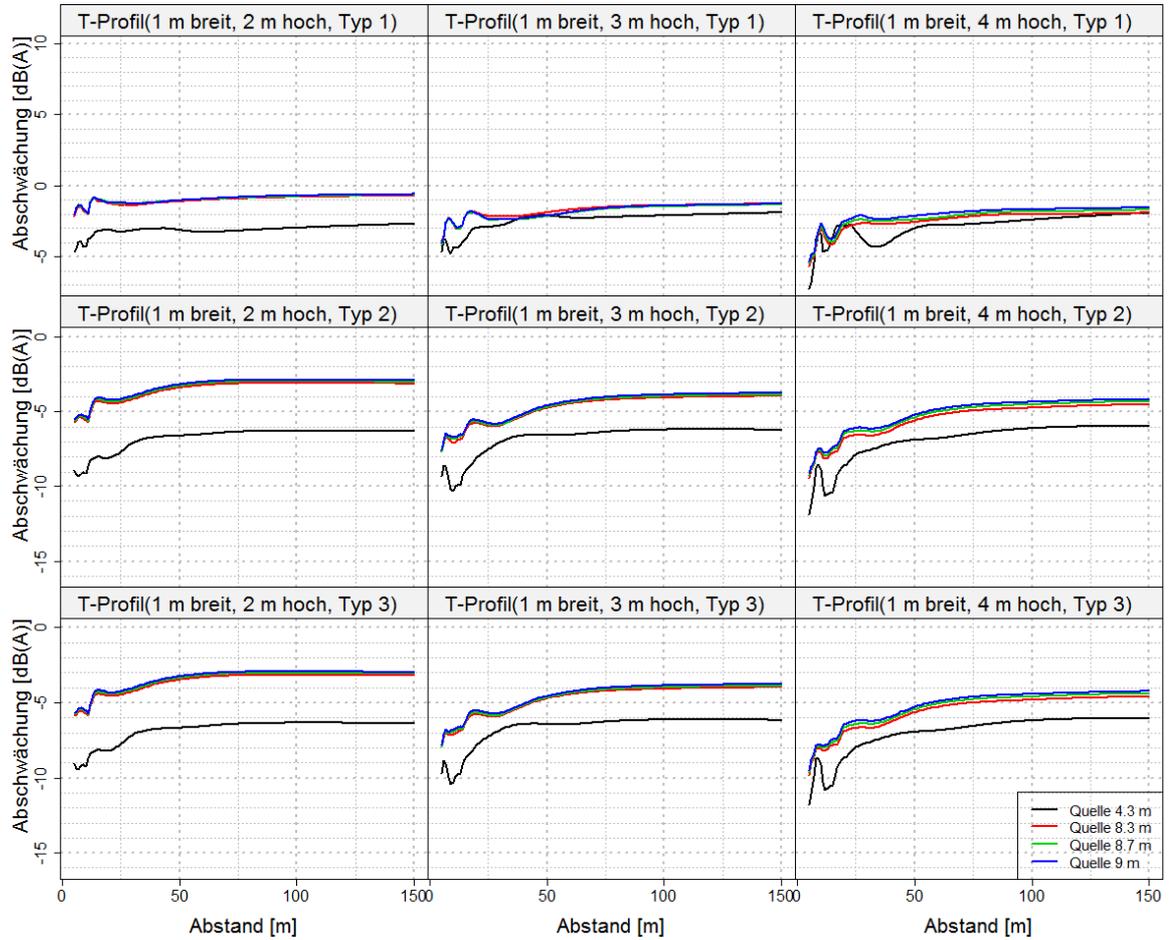


Abbildung 79: Effekt des Quellabstands bei T-Profil ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.

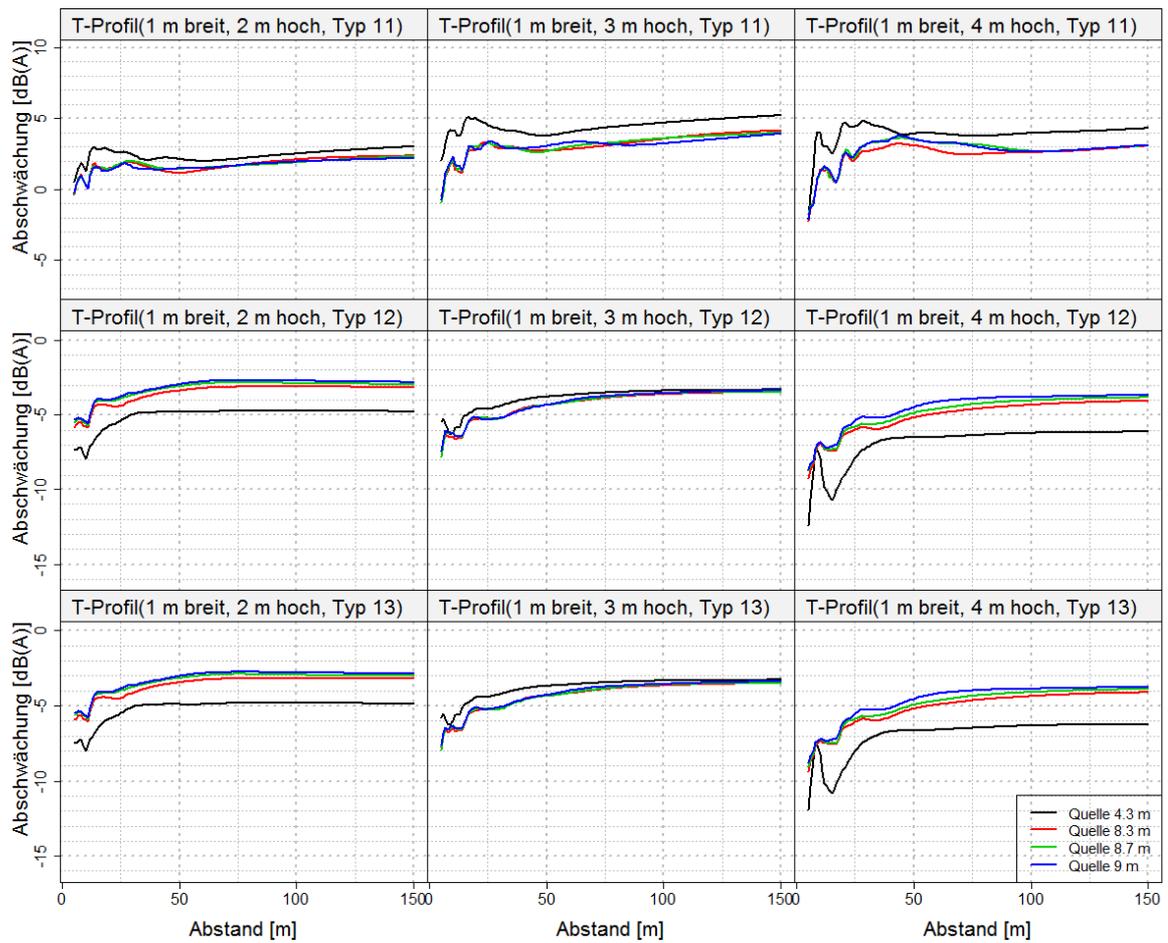


Abbildung 80: Effekt des Quellabstands bei T-Profil mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m.

6.3.2 Einfluss des Wagenkastens

Die jeweils oberste Reihe zeigt den Unterschied zwischen der Simulation mit und ohne Wagenkasten bei reflektierender T-Wand, der Erwartungsgemäß sehr hoch ausfällt (1. Reihe Abbildung 81 und Abbildung 82). Die Abbildungen zeigen die Differenz zwischen der Zusatzwirkung ohne und mit Wagenkasten bezogen auf die jeweilige gleich hohe, gerade Wand. Ein negativer Wert bedeutet daher eine Verschlechterung mit Wagenkasten. Bei den absorbierenden Varianten zeigen sich zum Teil deutliche Unterschiede, vor allem bei sehr breiten Profilen. Dieser Unterschied kommt daher, dass der Großteil des Direktschalls durch das T gut abgeschirmt wird, während die Reflektionen am Wagenkasten sozusagen am Ausleger vorbei die Wand passieren. Daher ist der Unterschied in hohen Messpositionen auch meist stärker ausgeprägt.

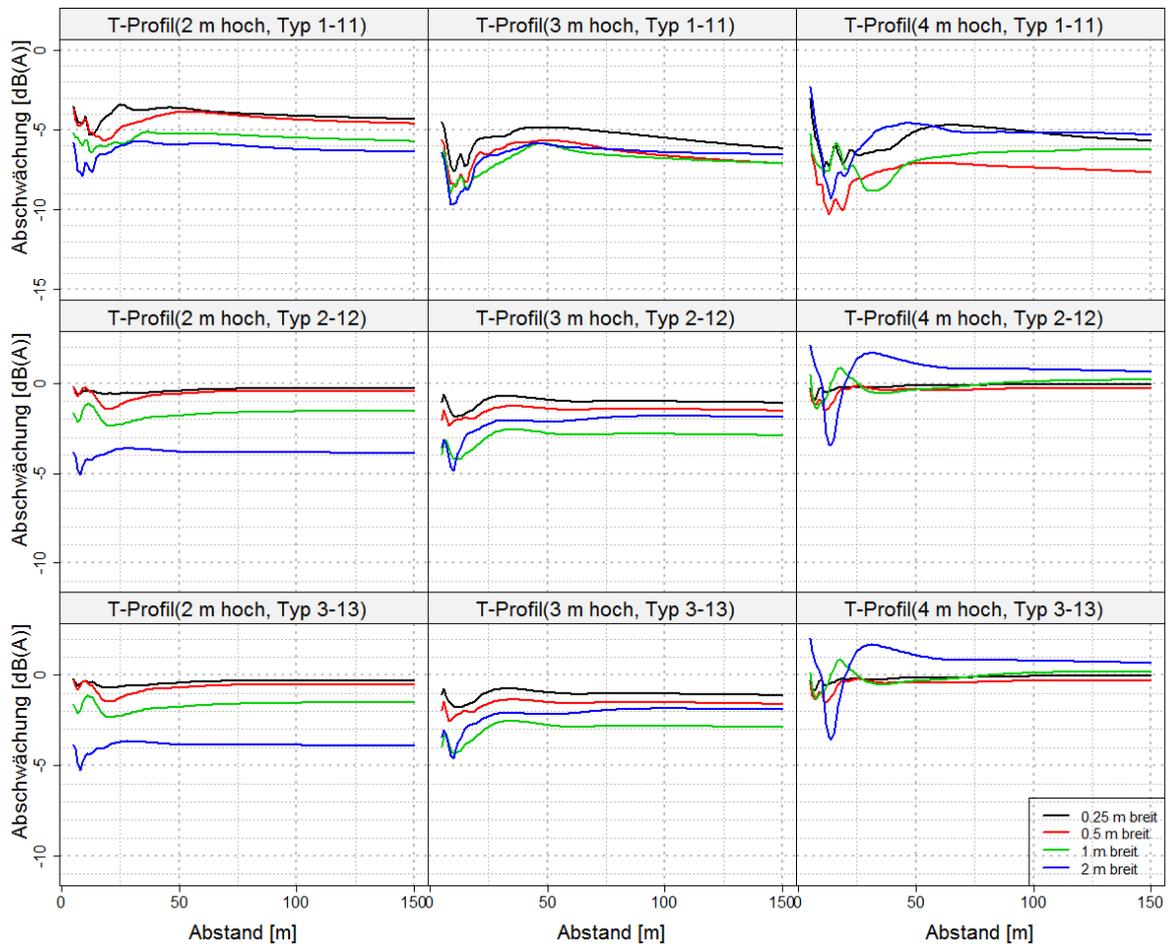


Abbildung 81: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m

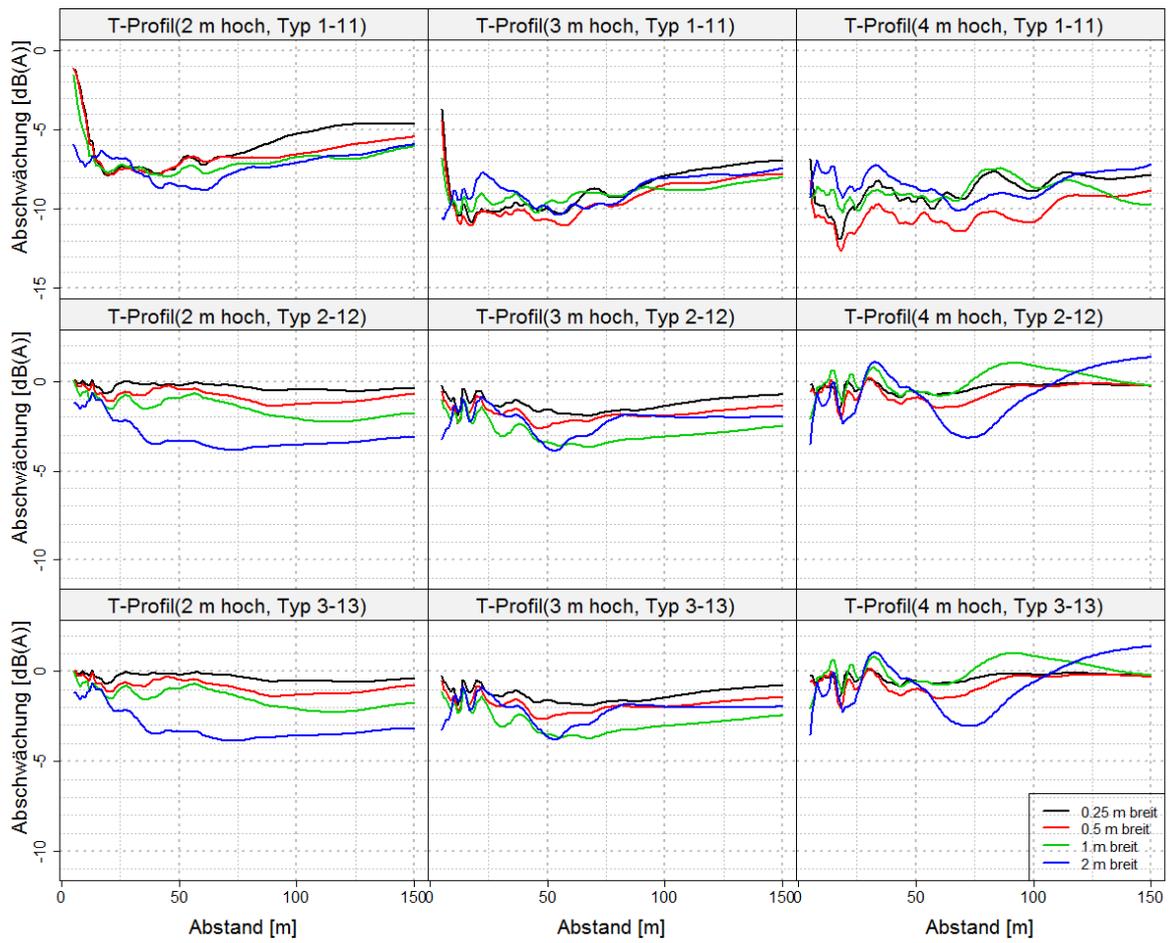


Abbildung 82: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10 m

6.4 Gekrümmte LSW

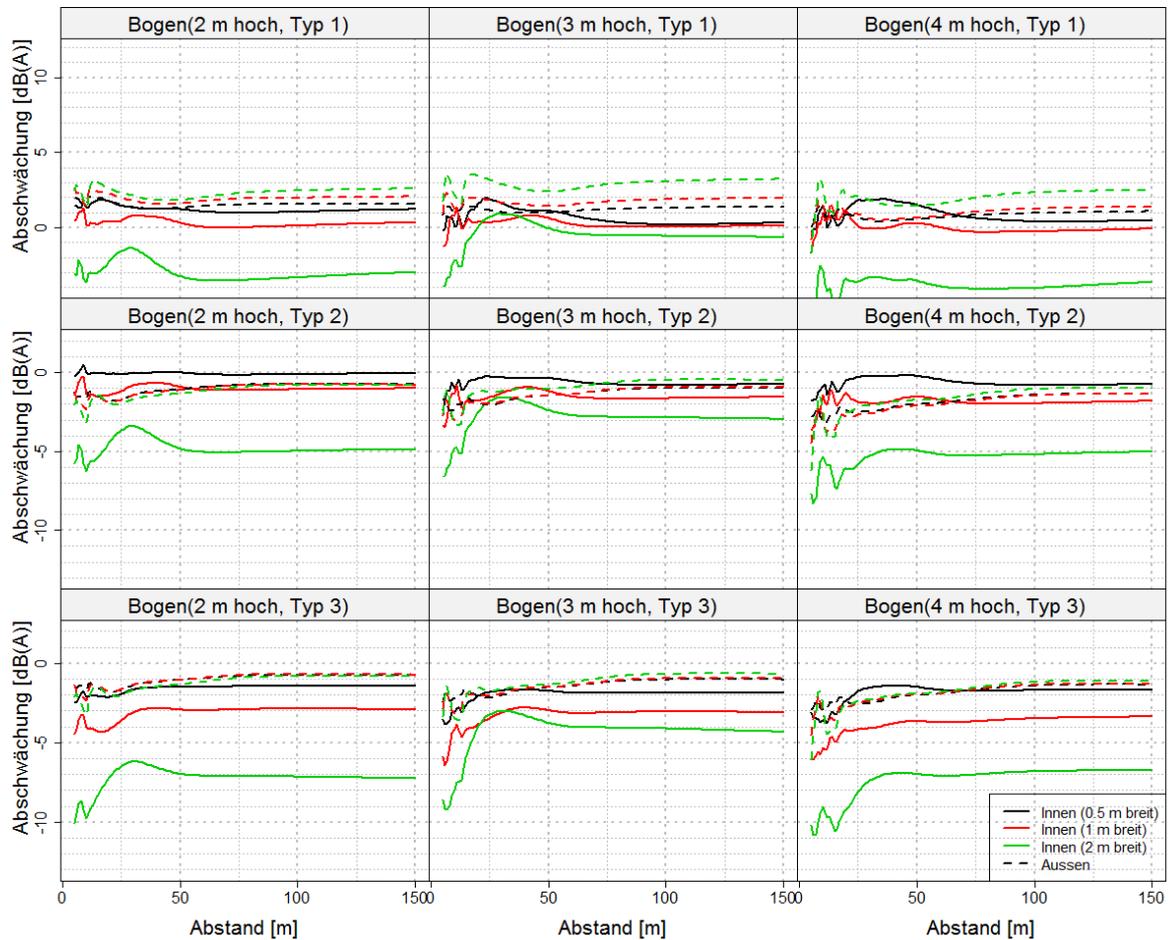


Abbildung 83: Effekt der gekrümmten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

Bei den Simulationen mit Bahndamm zeigt sich dass nach außen gekrümmte Wände bei nur bahenseitiger Absorption nur bei schmalen Profilen und geringer Höhe eine bessere Wirkung als nach innen gekrümmte Wände haben (Abbildung 83 und Abbildung 84, mittlere Reihe). Das 2 m nach innen gekrümmte Profil zeigt hier extreme Effekte, wiederum aufgrund der Unterseite des Wagenkastens zwischen Quelle und Beugungskante. Absorption auf der Außenseite verbessert die Wirkung der nach innen gekrümmten Wände. Mit Wagenkasten zeigen sich größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Breiten, vor allem bei den nach außen gekrümmten Wänden. Diese zeigen hier teils auch eine bessere Wirkung als nach innen gekrümmte Wände mit nur quellseitiger Absorption.

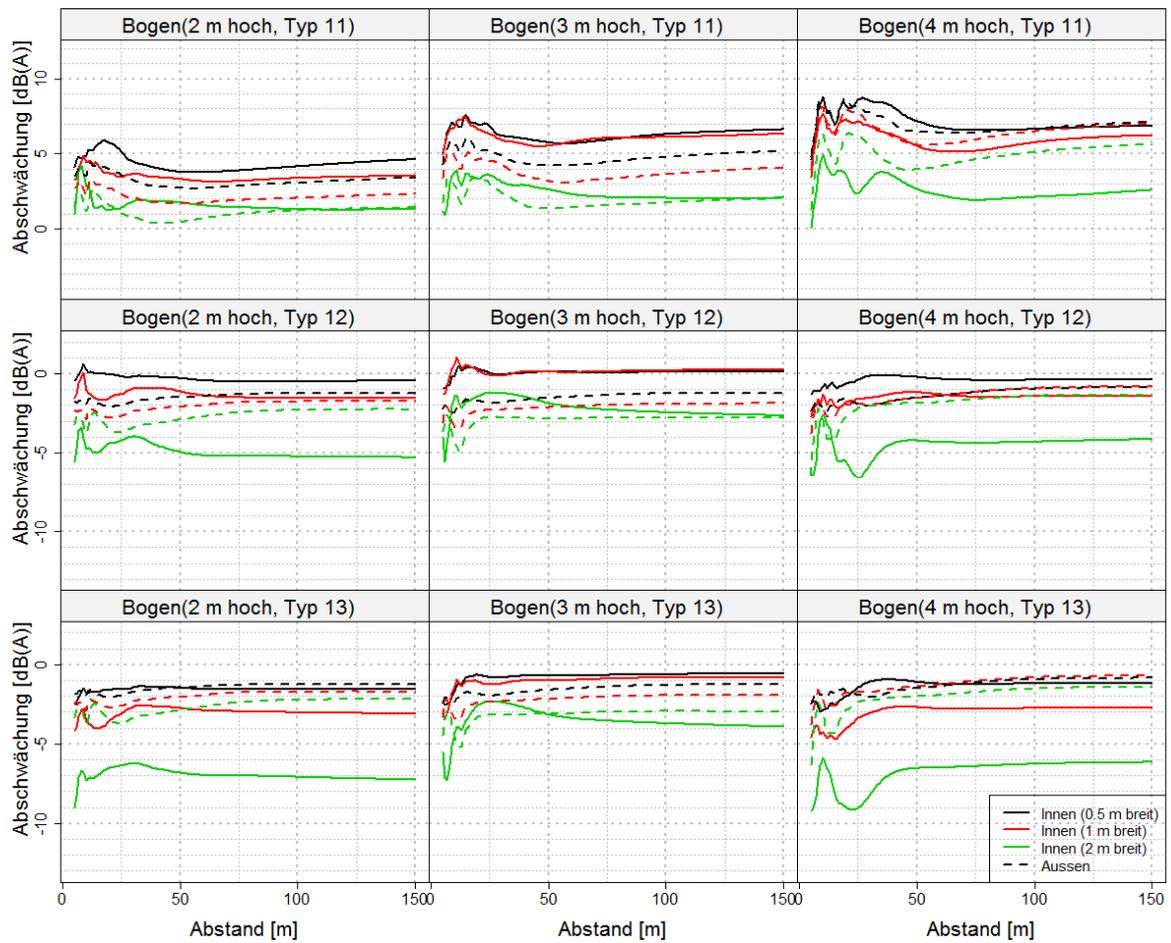


Abbildung 84: Effekt der gekrümmten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

6.4.1 Effekt der Quellentfernung

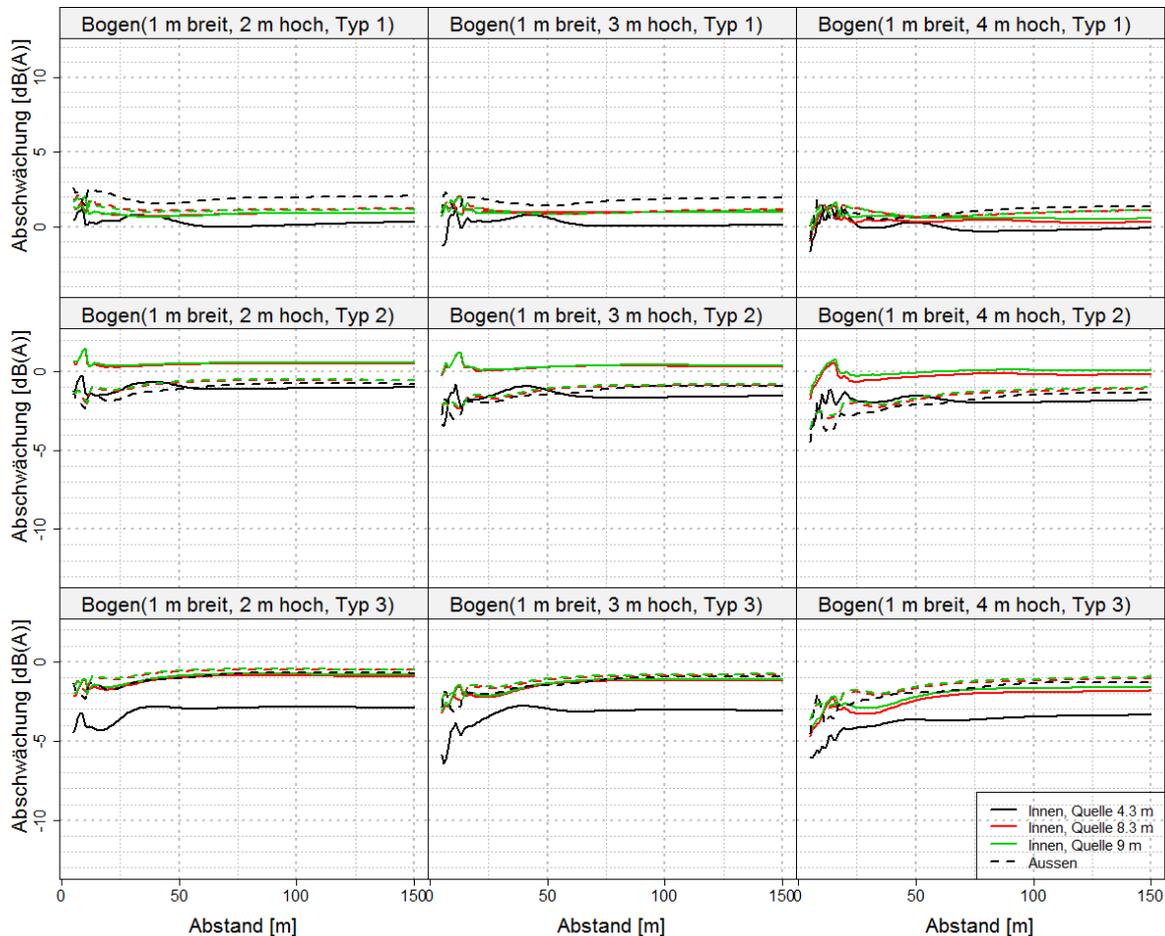


Abbildung 85: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

Auch bei dieser Geometrie ist der Effekt der Quellentfernung ohne Wagenkasten teilweise stärker ausgeprägt als mit Wagenkasten (Abbildung 85 und Abbildung 86), wenn auch insgesamt kleiner als beim T-Profil (man vergleiche nach innen gekrümmte Wände mit dem T-Profil). Durch die Krümmung nach innen gibt es auch beim nahen Gleis vermutlich weniger und anders gerichtete Mehrfachreflexionen zwischen LSW und Wagen.

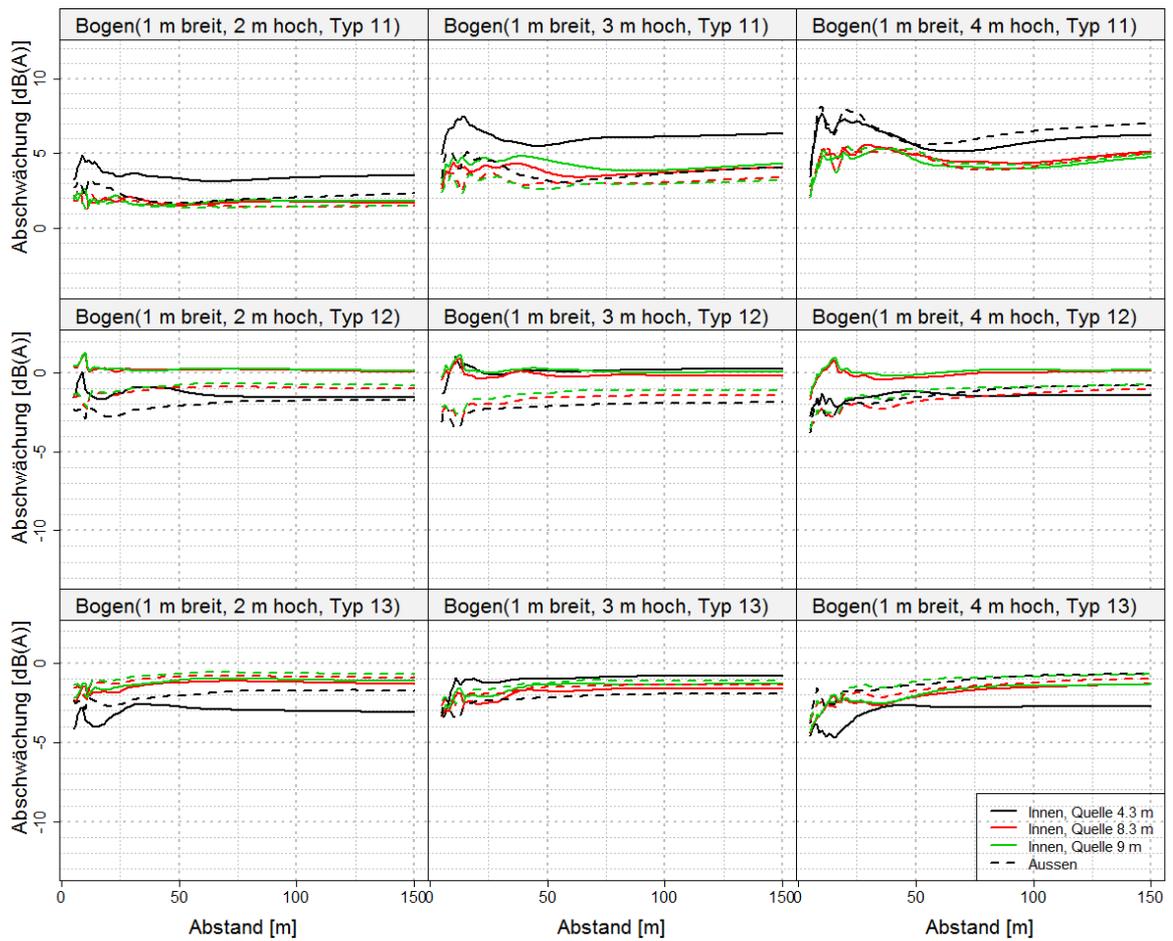


Abbildung 86: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

6.4.2 Effekt des Wagenkastens

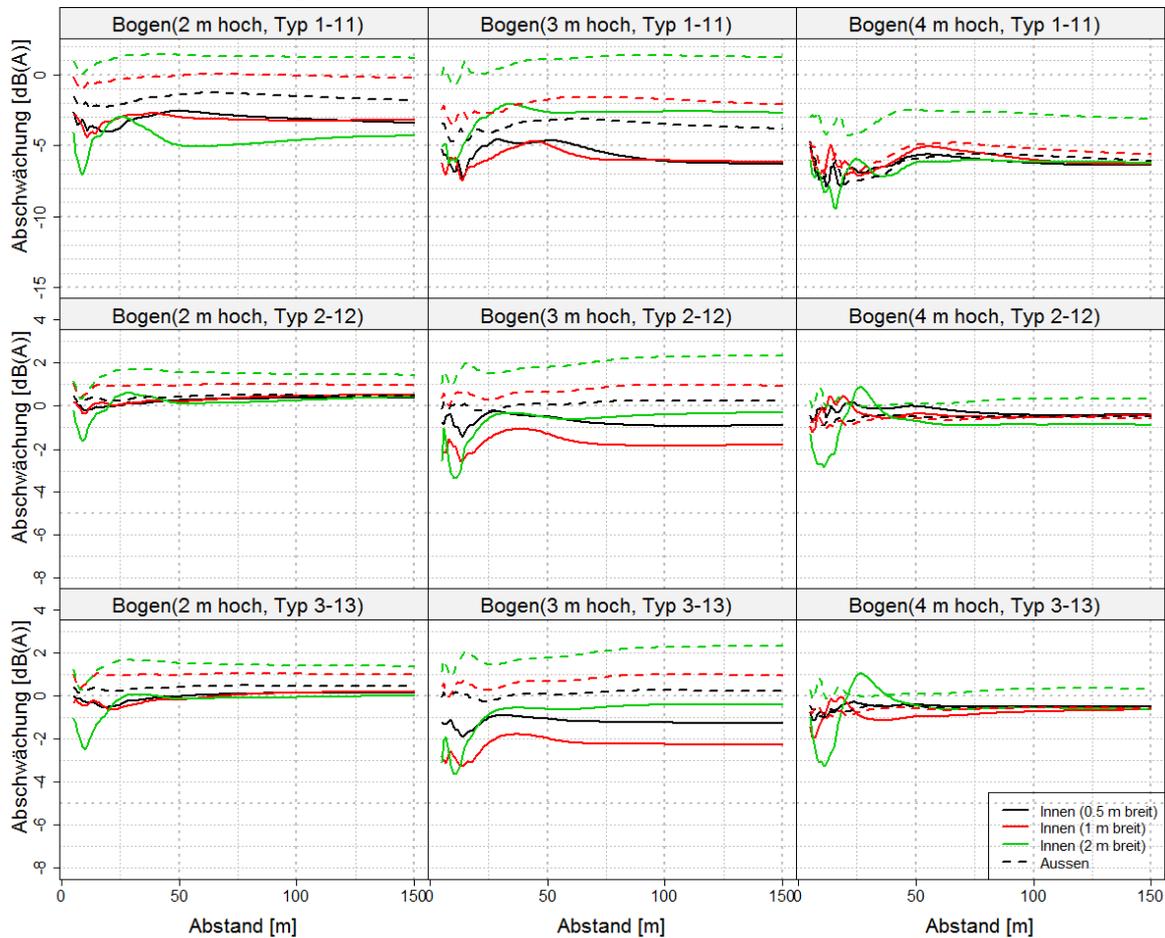


Abbildung 87: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m

Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen, dass der Effekt der Mehrfachreflexionen bei nach außen gekrümmten Wänden weniger ausgeprägt ist, vor allem bei breiteren Profilen. Dieser Unterschied tritt vermutlich aufgrund der durch die Krümmung nach oben abgelenkten Mehrfachreflexionen auf. Bei nach innen gerichteten Krümmungen zeigen breitere Profile eher eine Verschlechterung durch den Einfluss des Wagenkastens.

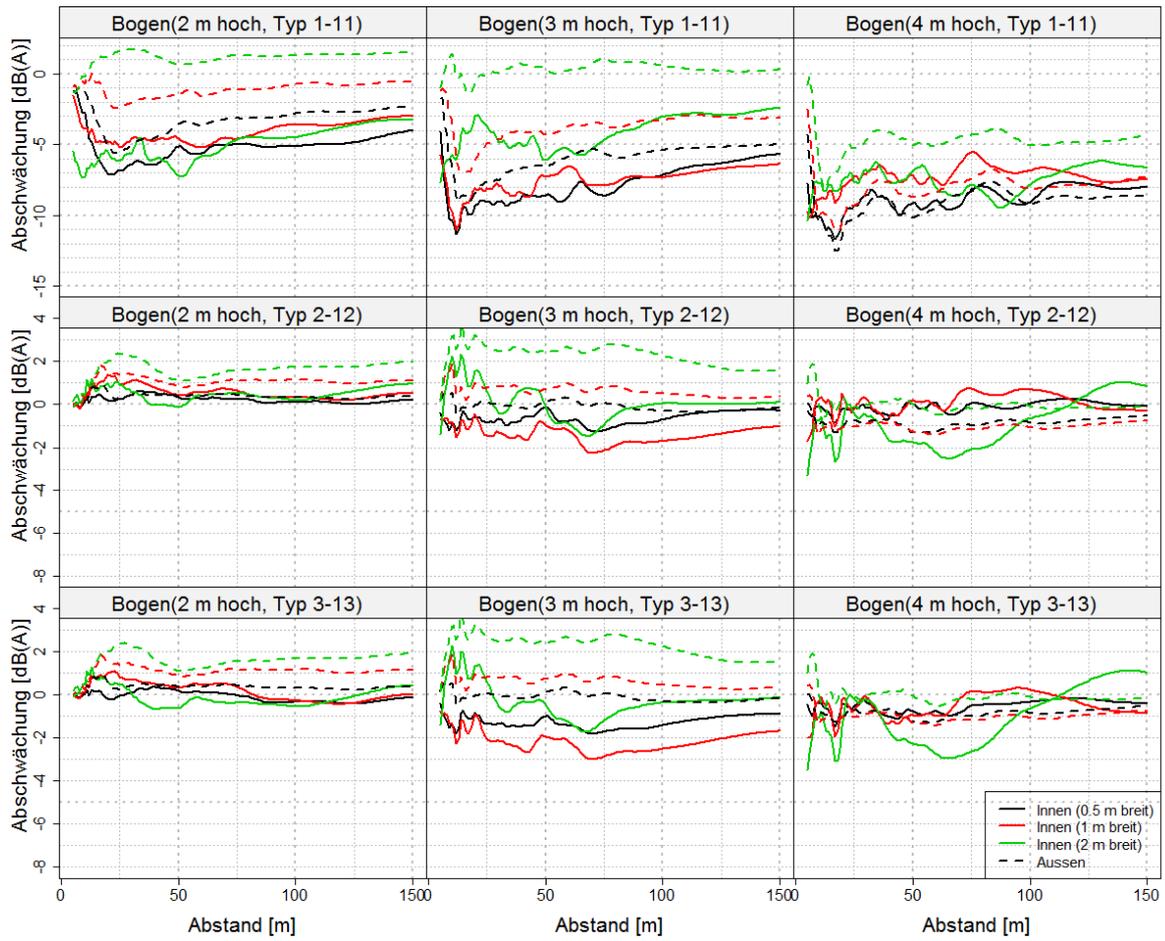


Abbildung 88: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m

6.5 45 Grad geknickte Wand

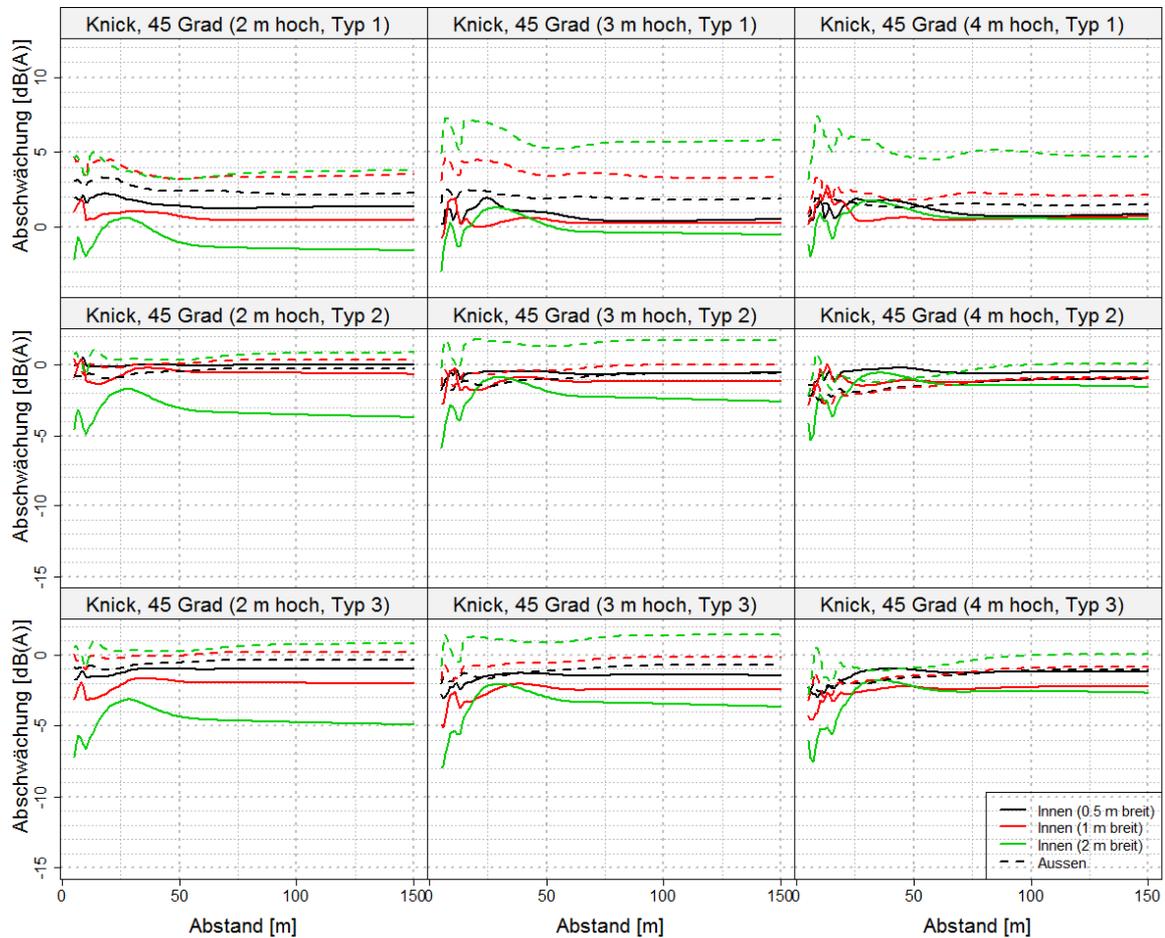


Abbildung 89: Effekt der 45° geknickten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

Die LSW verhält sich ähnlich der gekrümmten Wand, allerdings mit insgesamt geringer Wirkung. Der Vorteil der nach außen gerichteten Wand bei straßenseitiger Absorption ist hier gering oder teils nicht gegeben, vor allem bei breiten LSWs.

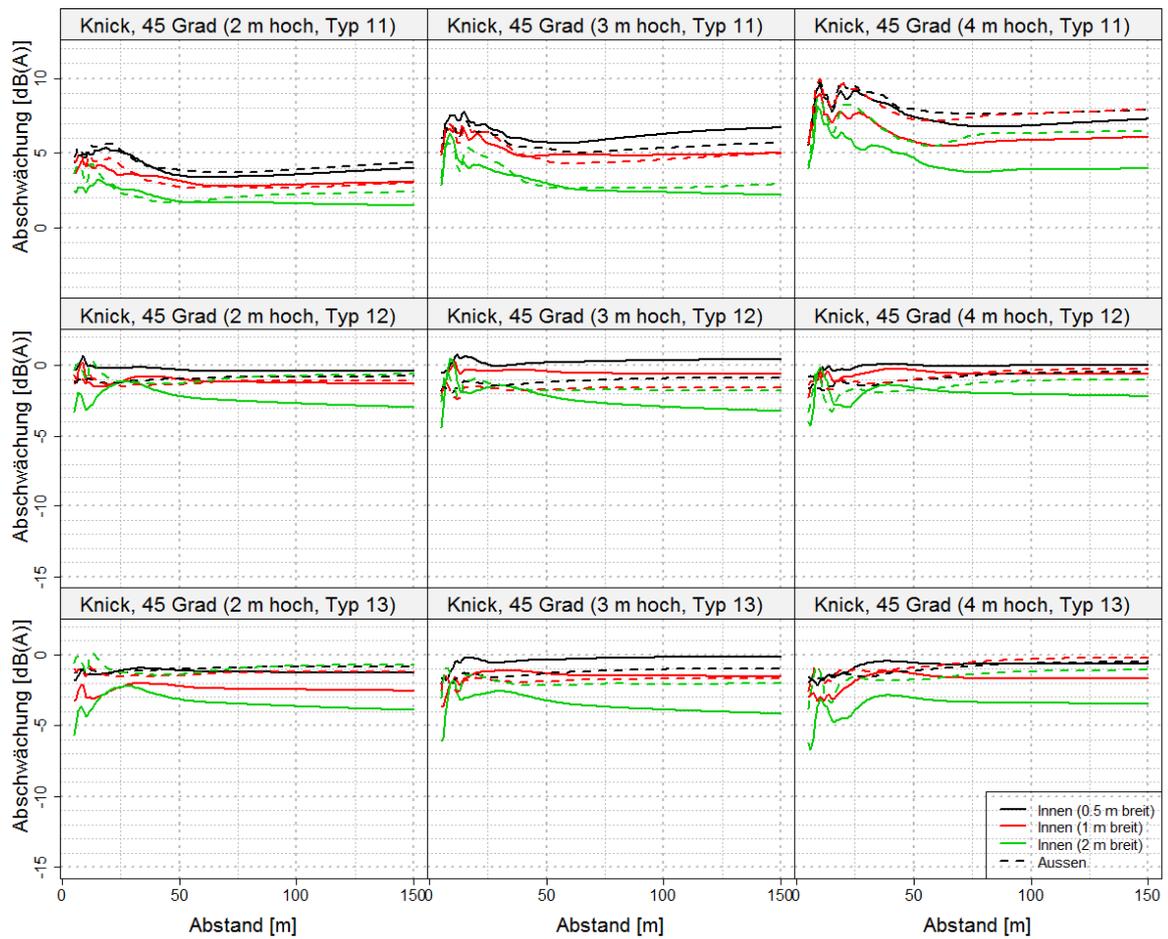


Abbildung 90: Effekt der 45° geknickten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

6.5.1 Effekt der Quellentfernung

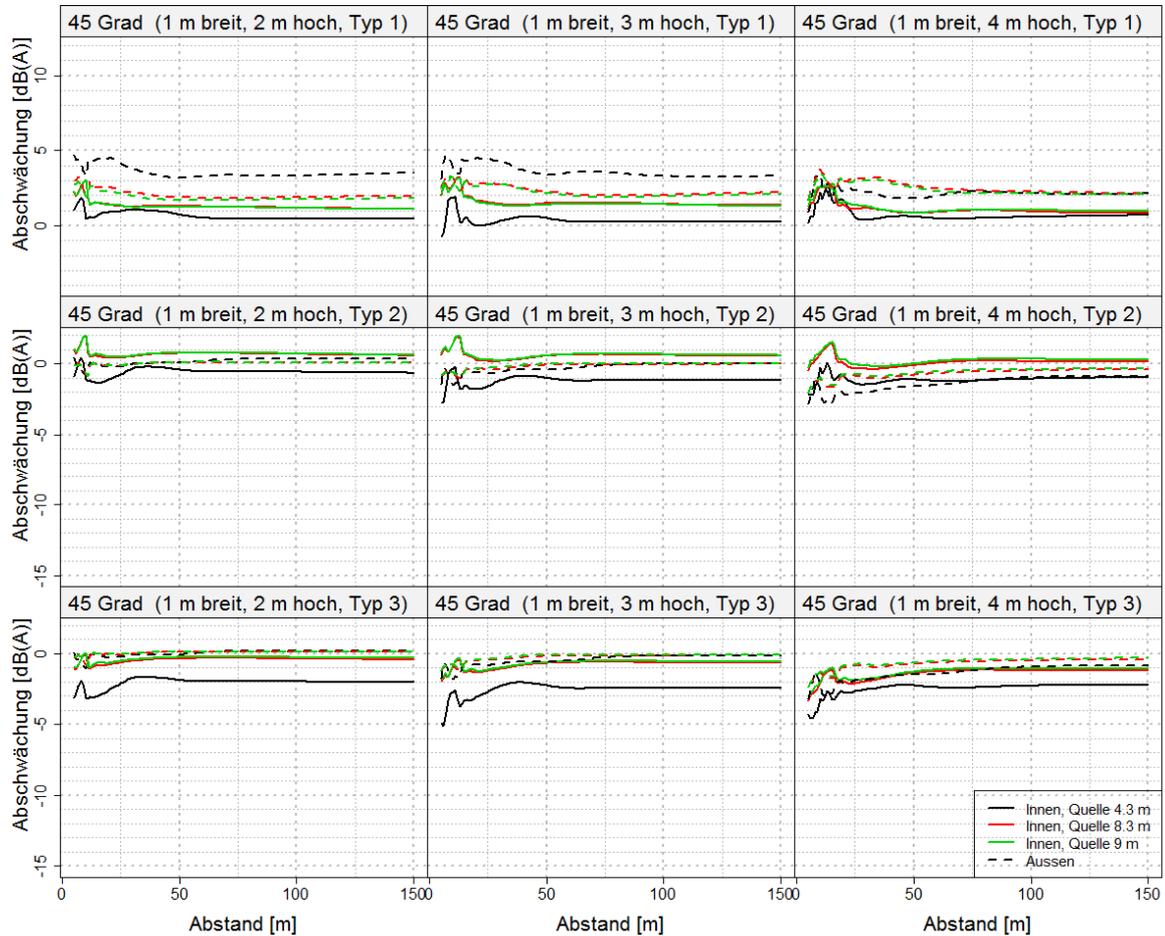


Abbildung 91: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

Auch der Effekt der Quellentfernung ist sehr ähnlich dem der gekrümmten Wände da bei dieser Geometrie die Reflexionen ebenfalls teilweise abgelenkt werden..

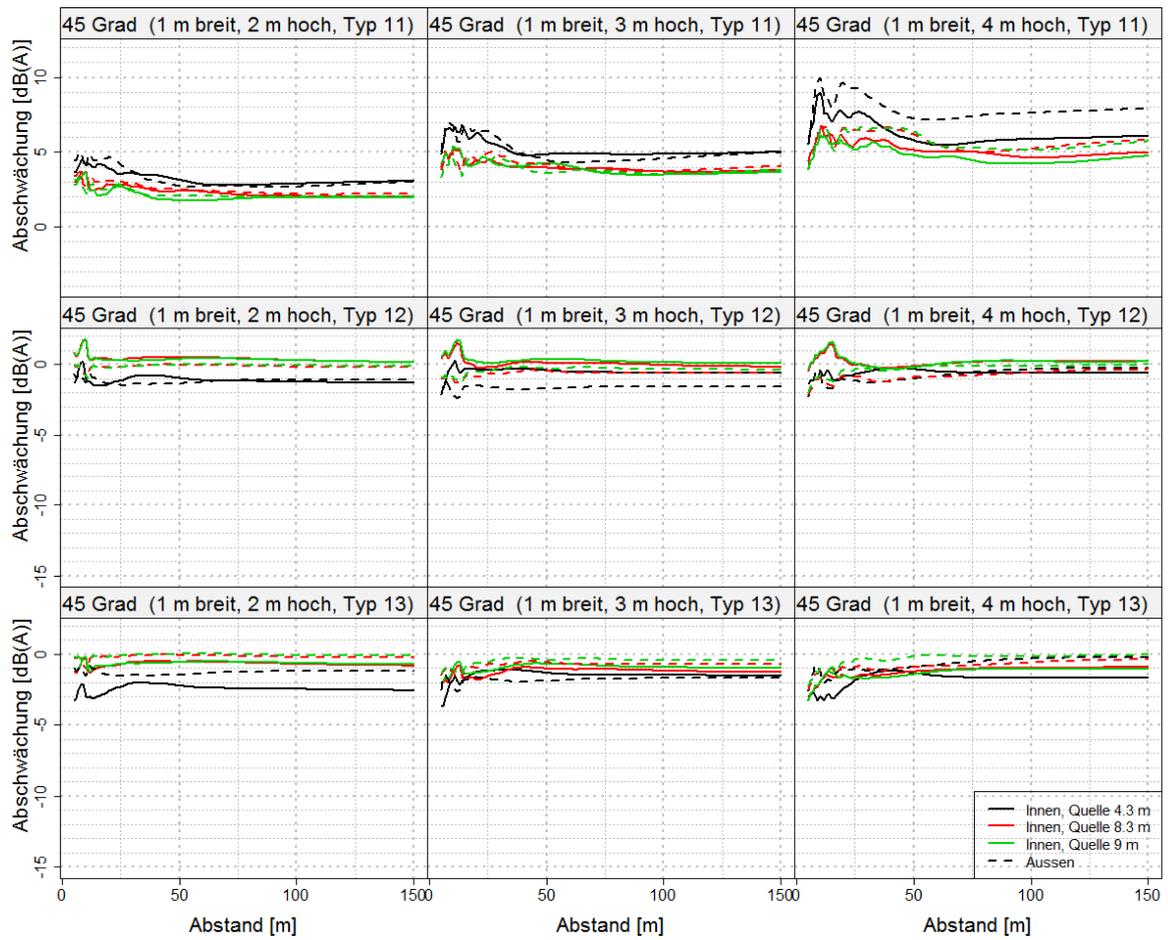


Abbildung 92: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

6.5.2 Effekt des Wagenkastens

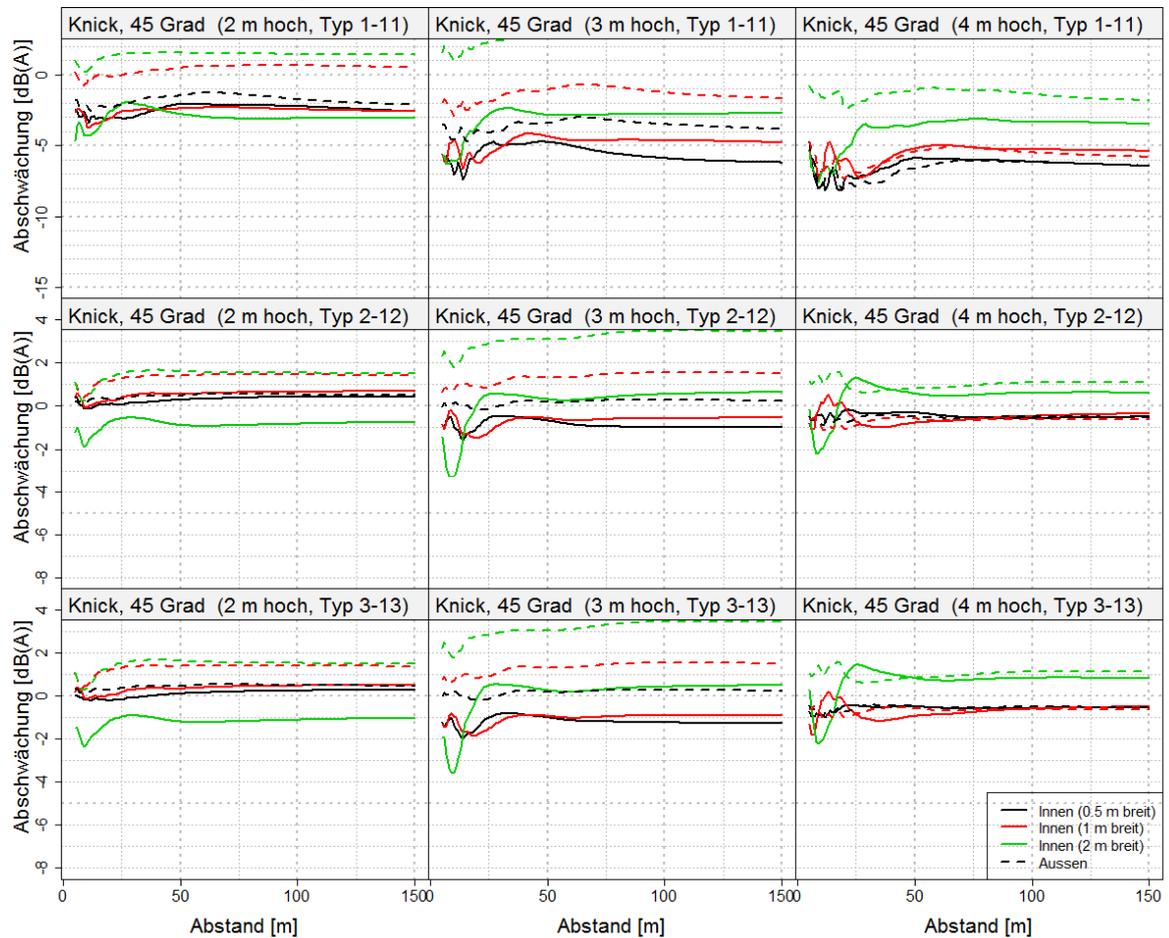


Abbildung 93: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m

Wie zu erwarten ist der Effekt des Wagenkastens vergleichbar mit dem bei der gekrümmten LSW, aber bis zu 1 dB(A) geringer.

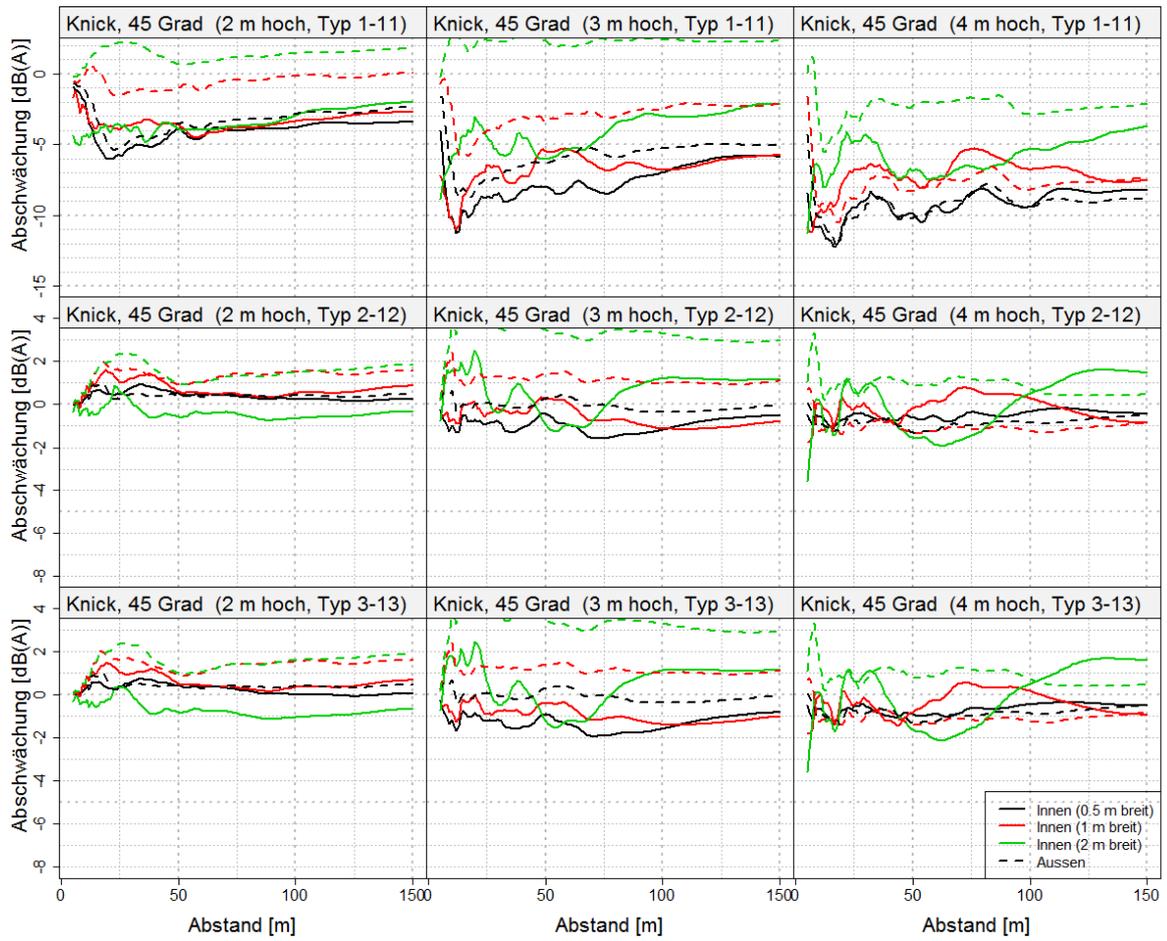


Abbildung 94: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m

6.6 90 Grad geknickte Wand

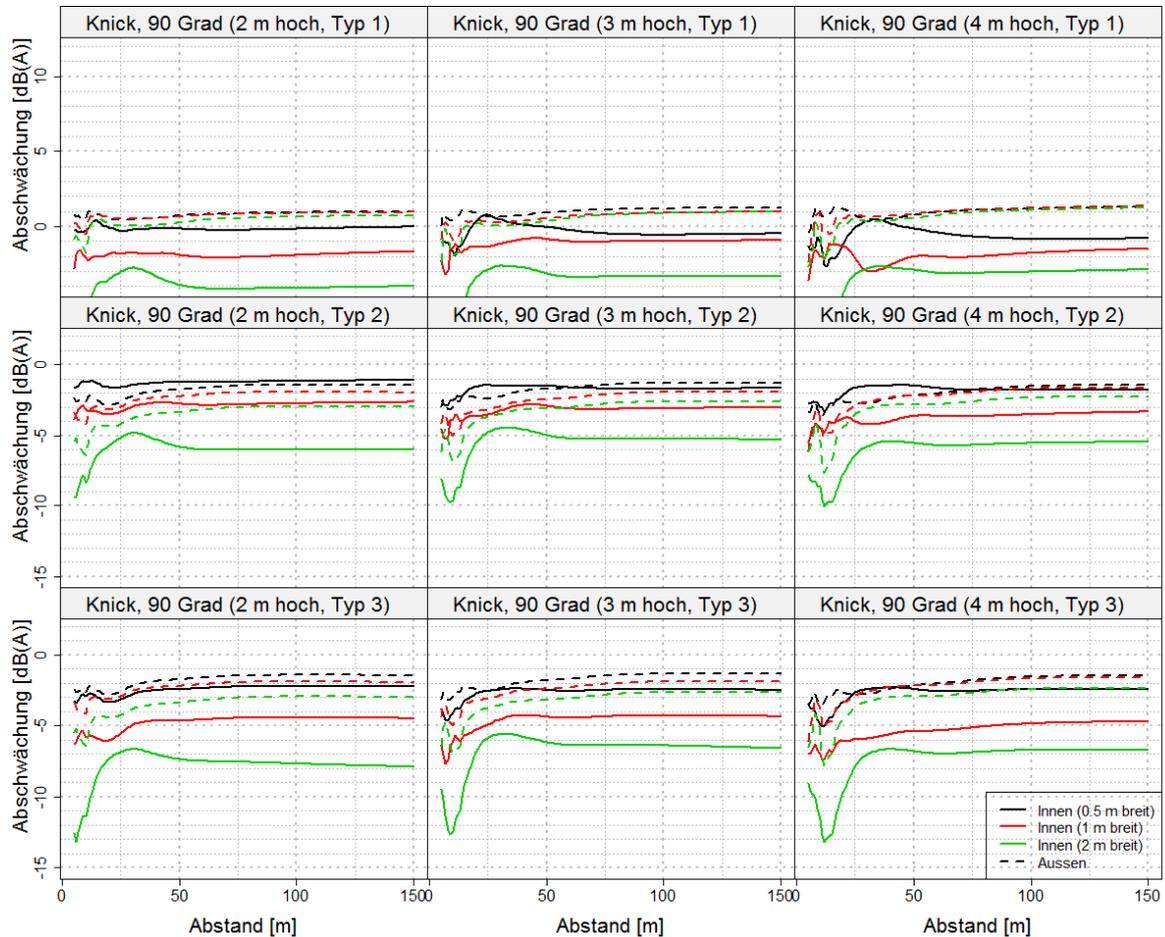


Abbildung 95: Effekt der gekrümmten Wand ohne Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

Die L-Wand verhält sich, wie zu erwarten, ähnlich der T-Wand, wobei, wie schon bei den Simulationen für den Straßenquerschnitt die nach innen geknickte Variante durch die Verschiebung der Beugekante zur Quelle hin besser abschneidet.

Auch der Effekt der Quellentfernung (Abbildung 97 und Abbildung 98) und des Wagenkastens (Abbildung 99 und Abbildung 100) sind ähnlich der T-Wand.

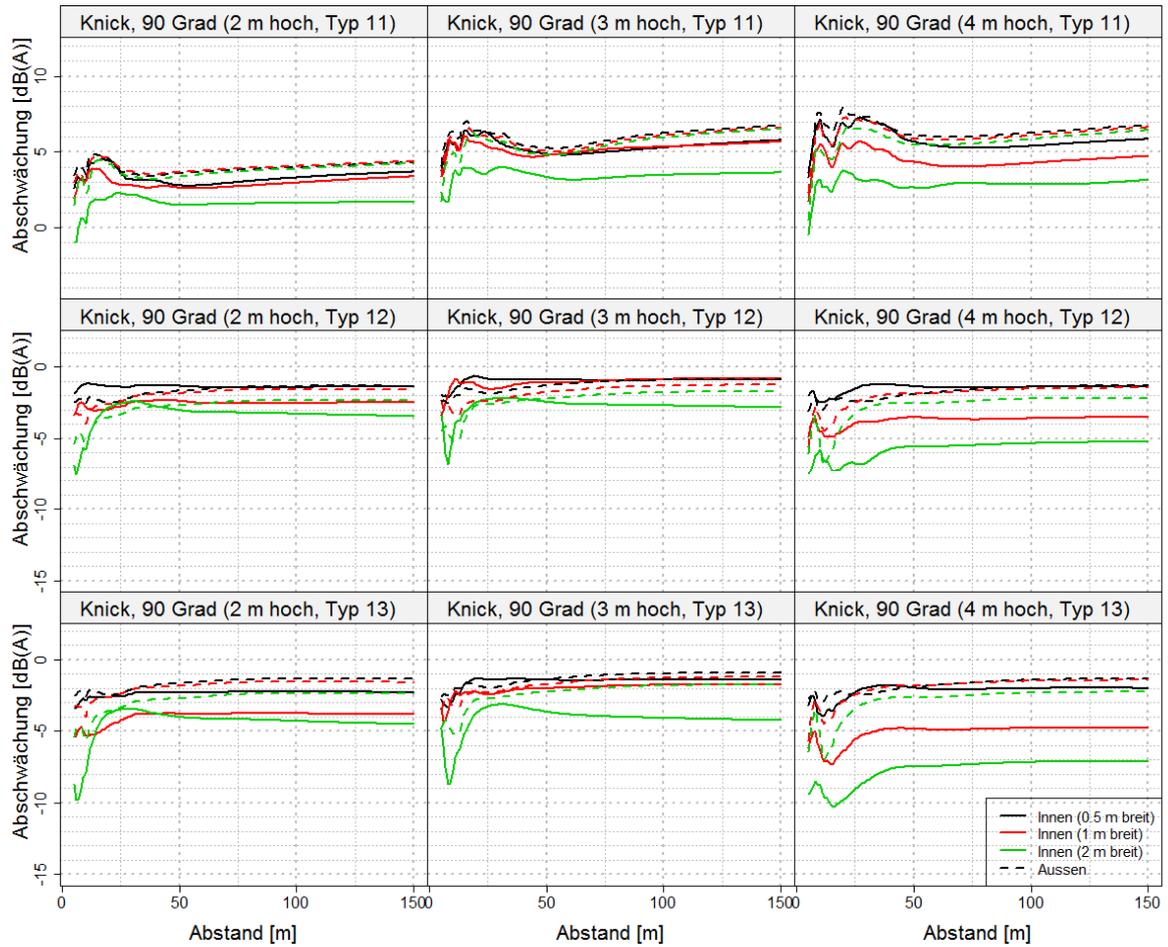


Abbildung 96: Effekt der gekrümmten Wand mit Wagenkasten. Quellabstand 4,3 m, Empfängerhöhe 2 m.

6.6.1 Effekt der Quellentfernung

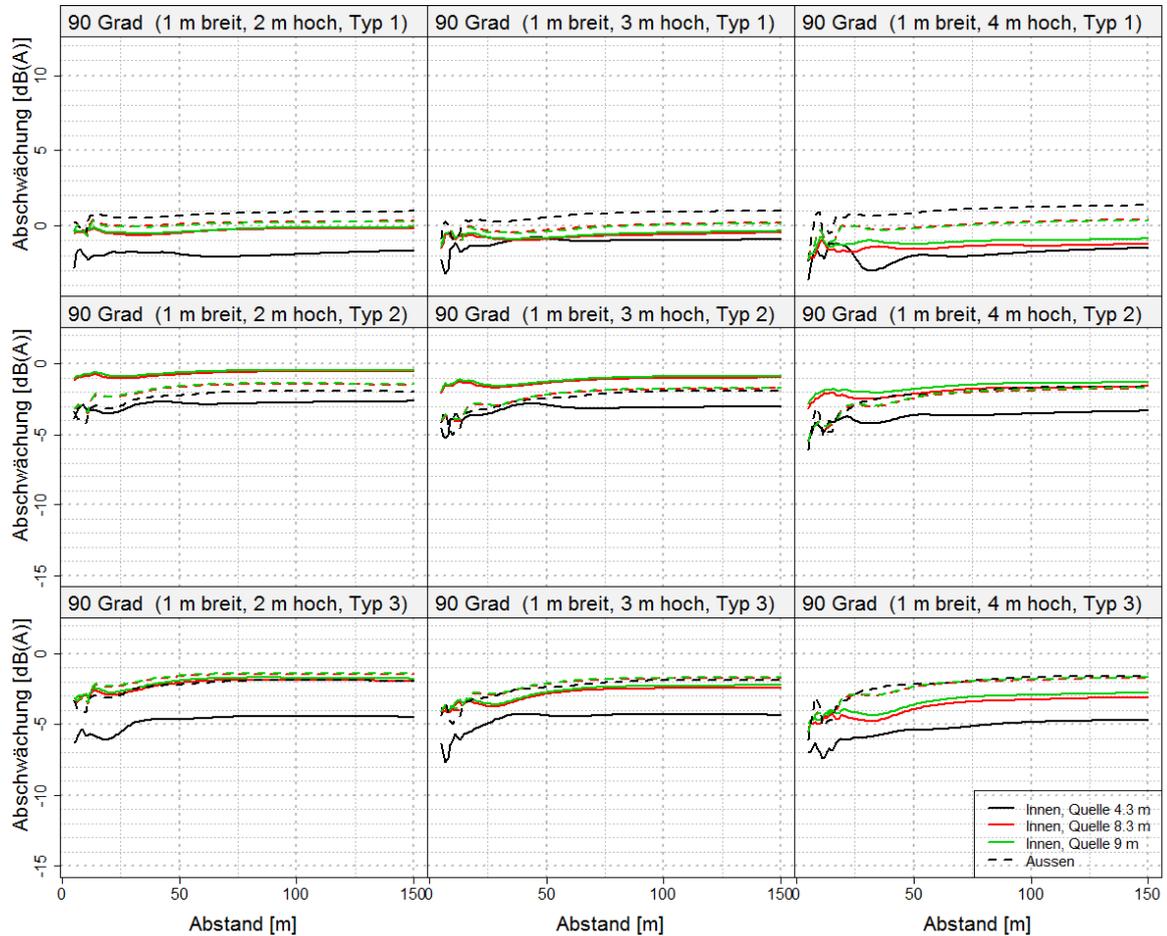


Abbildung 97: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

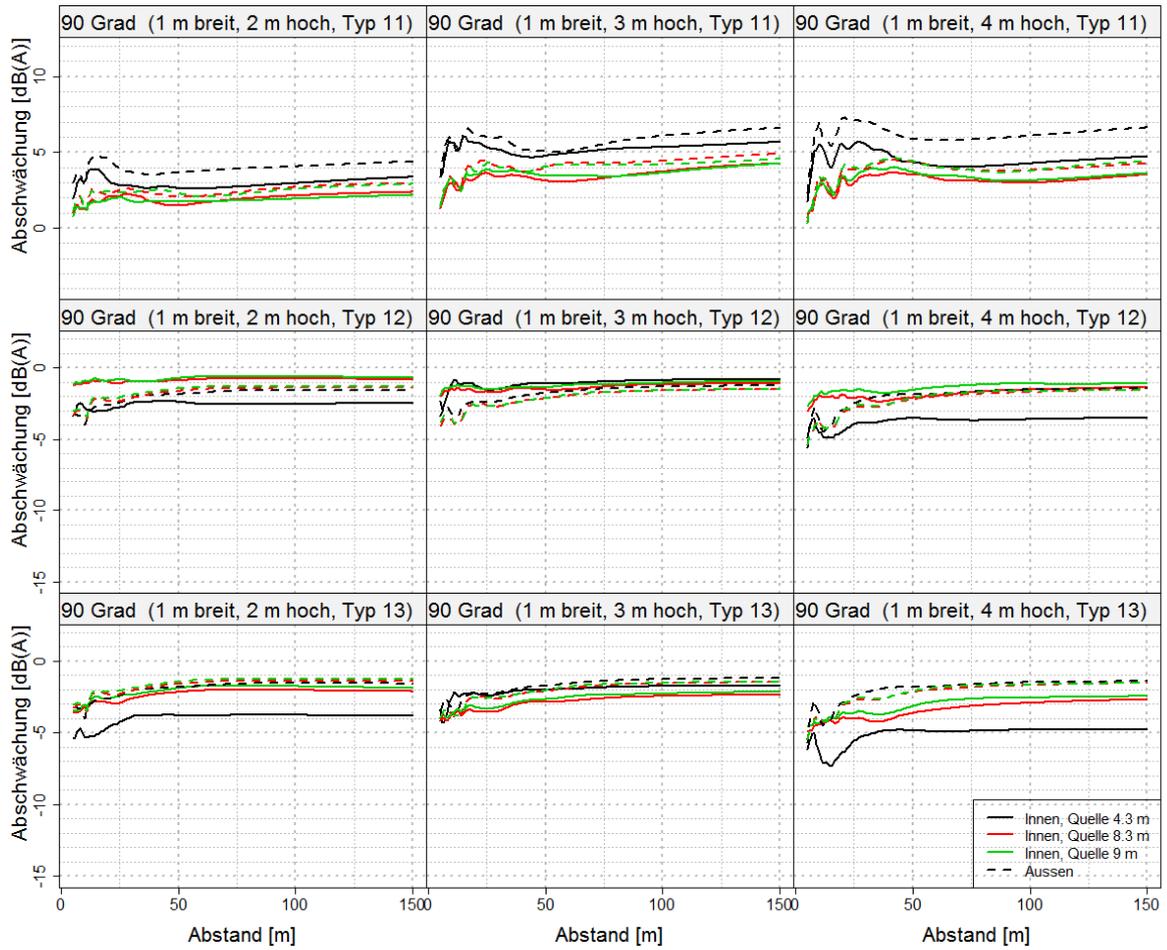


Abbildung 98: Einfluss des Quellabstands bei gekrümmter LSW ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

6.6.2 Effekt des Wagenkastens

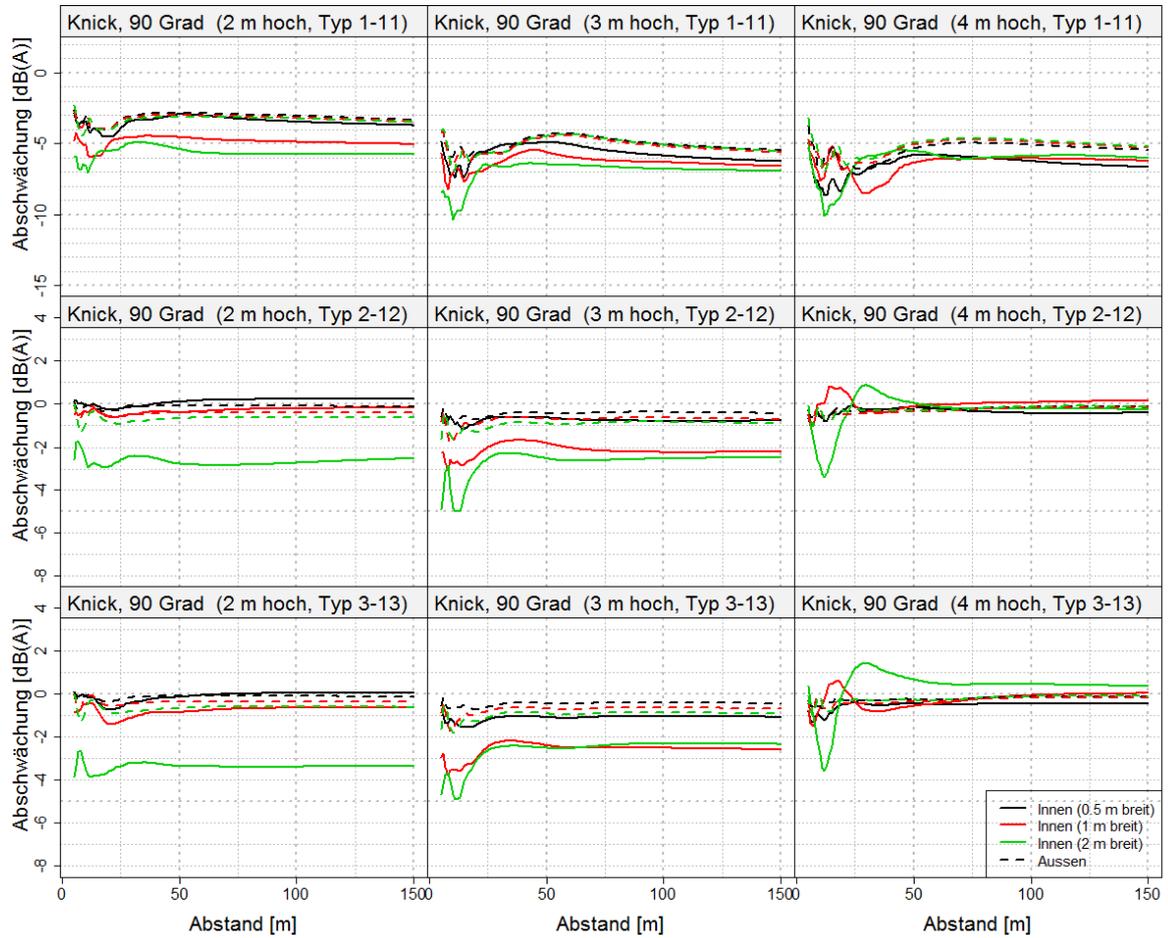


Abbildung 99: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 2m

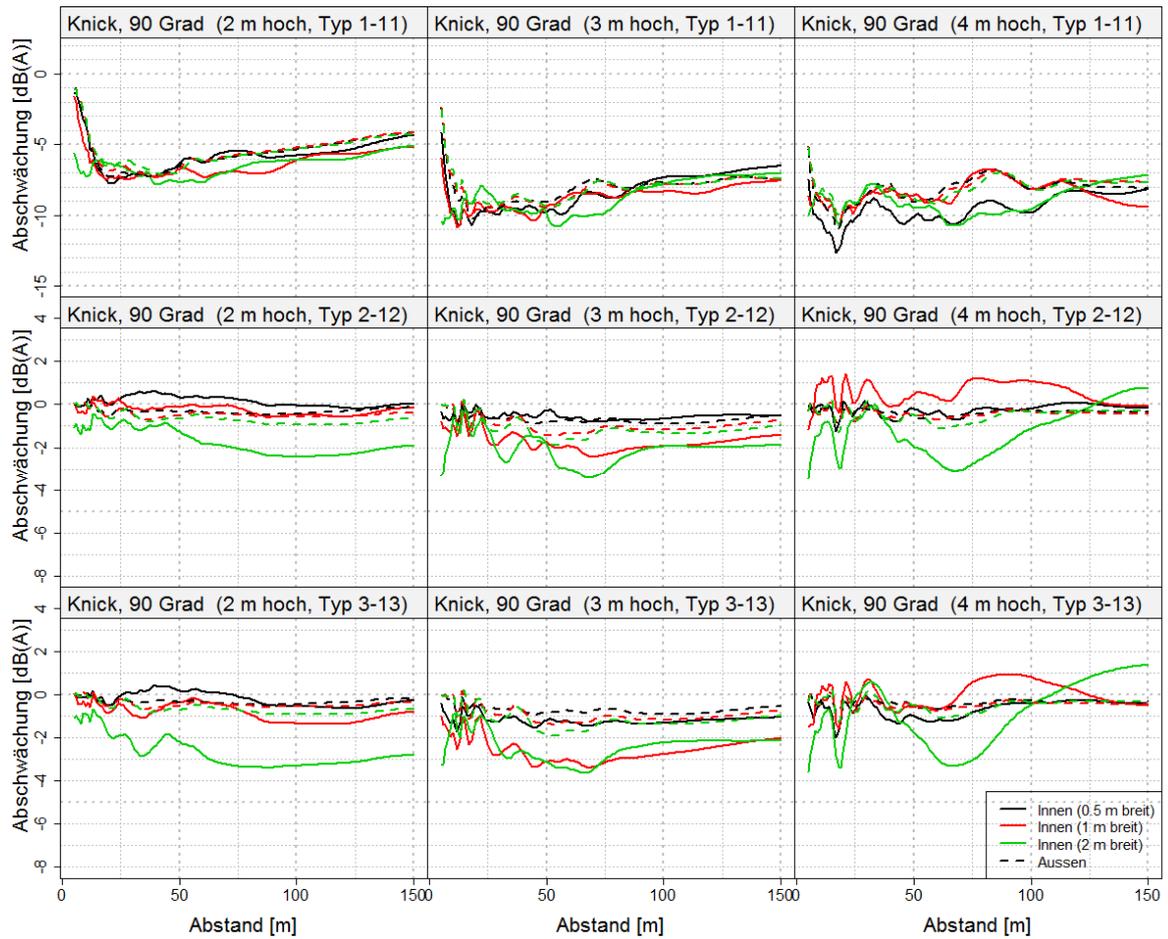


Abbildung 100: Einfluss des Wagenkastens, Empfängerhöhe 10m

6.7 Direkter Vergleich aller Profile

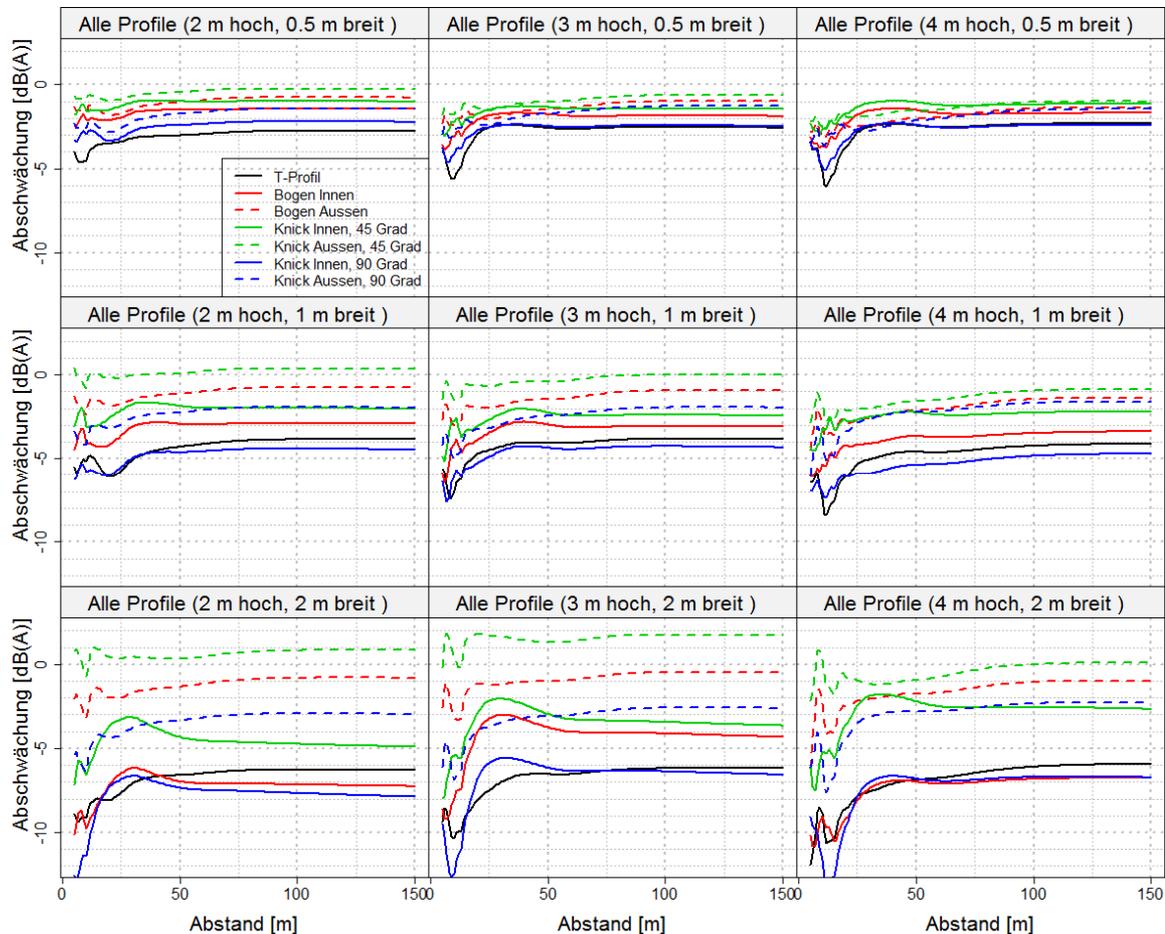


Abbildung 101: Vergleich verschiedener Profile ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

Qualitativ sind die Ergebnisse ähnlich zu den Simulationen ohne Bahndamm. Auch hier sind L (zur Quelle hin) und T die effektivsten Geometrien. Da das T-Profil mit gleicher Auflagerbreite definiert ist, ist der Effekt bei 2 m Breite beim T geringer, da die Beugekante hier nur 1 m zur Quelle verschoben ist. Die zur Quelle hin gerichteten Profile sind hier als Typ 3 ausgeführt, alle anderen inklusive T als Typ 2.

Die 45° geknickte Wand schneidet auch hier meistens schlechter ab als alle anderen Geometrien, sowohl mit als auch ohne Wagenkasten. Die Simulationen mit Wagenkasten zeigen meist einen reduzierten Effekt (bis zu etwa 2 dB(A)) und auch geringere Unterschiede zwischen den Geometrien.

In größeren Empfängerhöhen sind die Tendenzen ähnlich, wobei vor allem der 45°-Knick teilweise besser abschneidet. Der Effekt des Wagenkastens ist ähnlich, bei den sehr breiten Profilen treten aber auch größere Effekte auf.

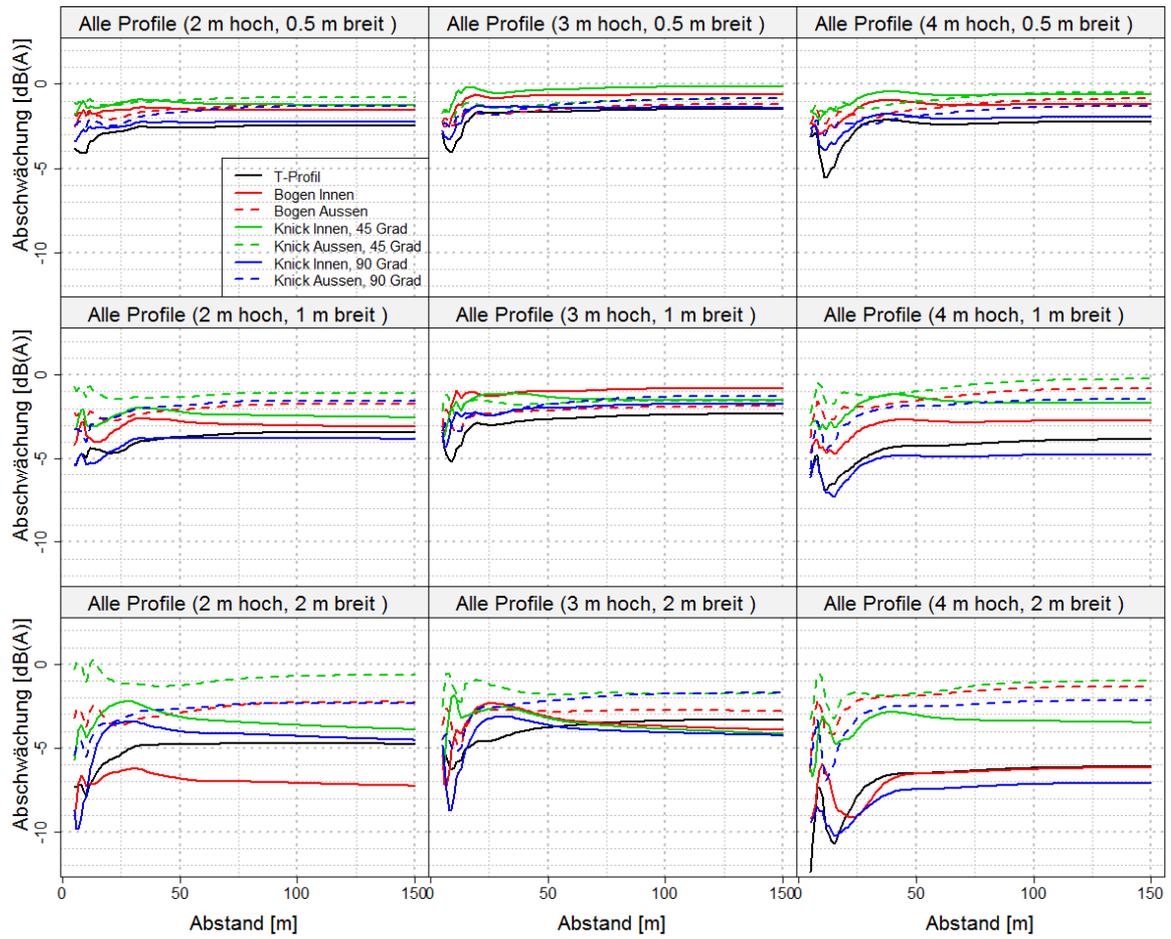


Abbildung 102: Vergleich verschiedener Profile mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 2 m

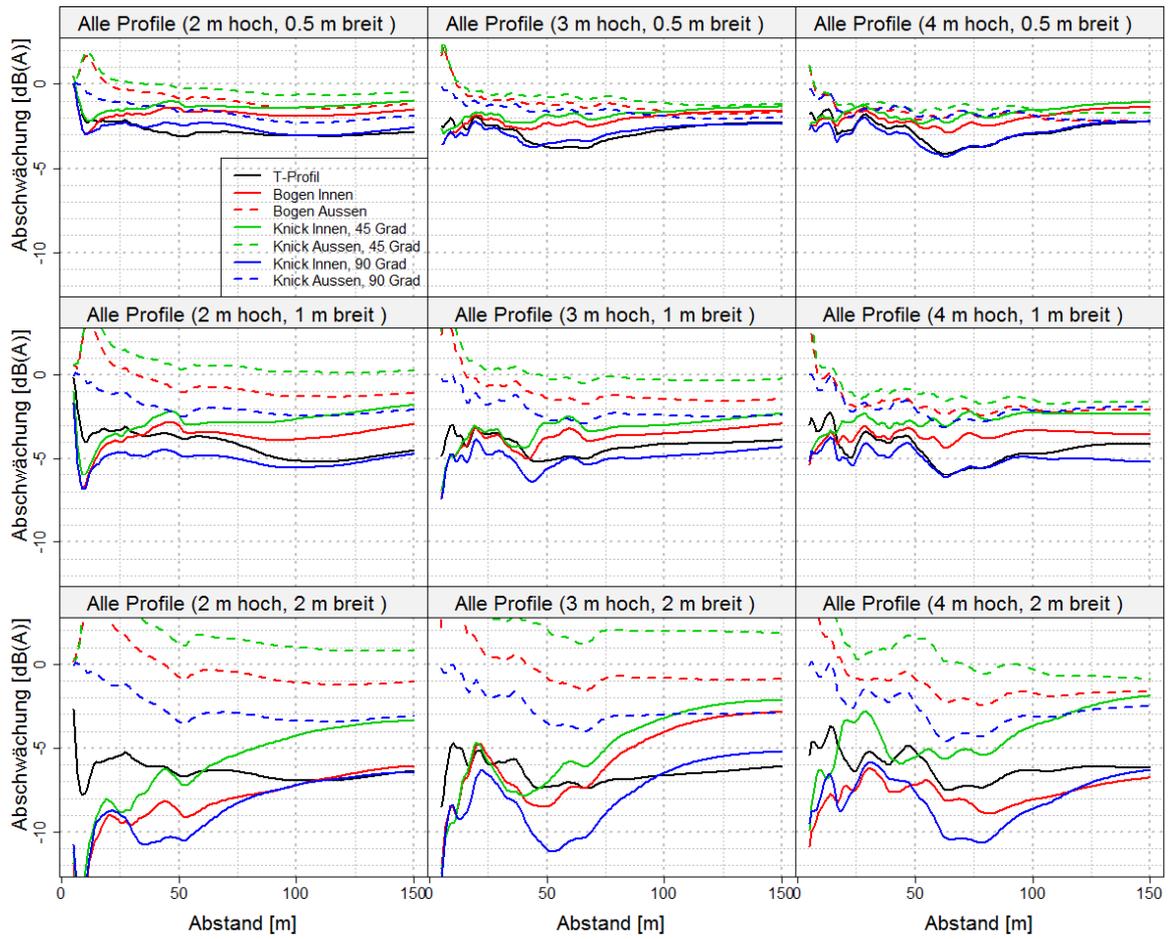


Abbildung 103: Vergleich verschiedener Profile ohne Wagenkasten, Empfängerhöhe 10 m

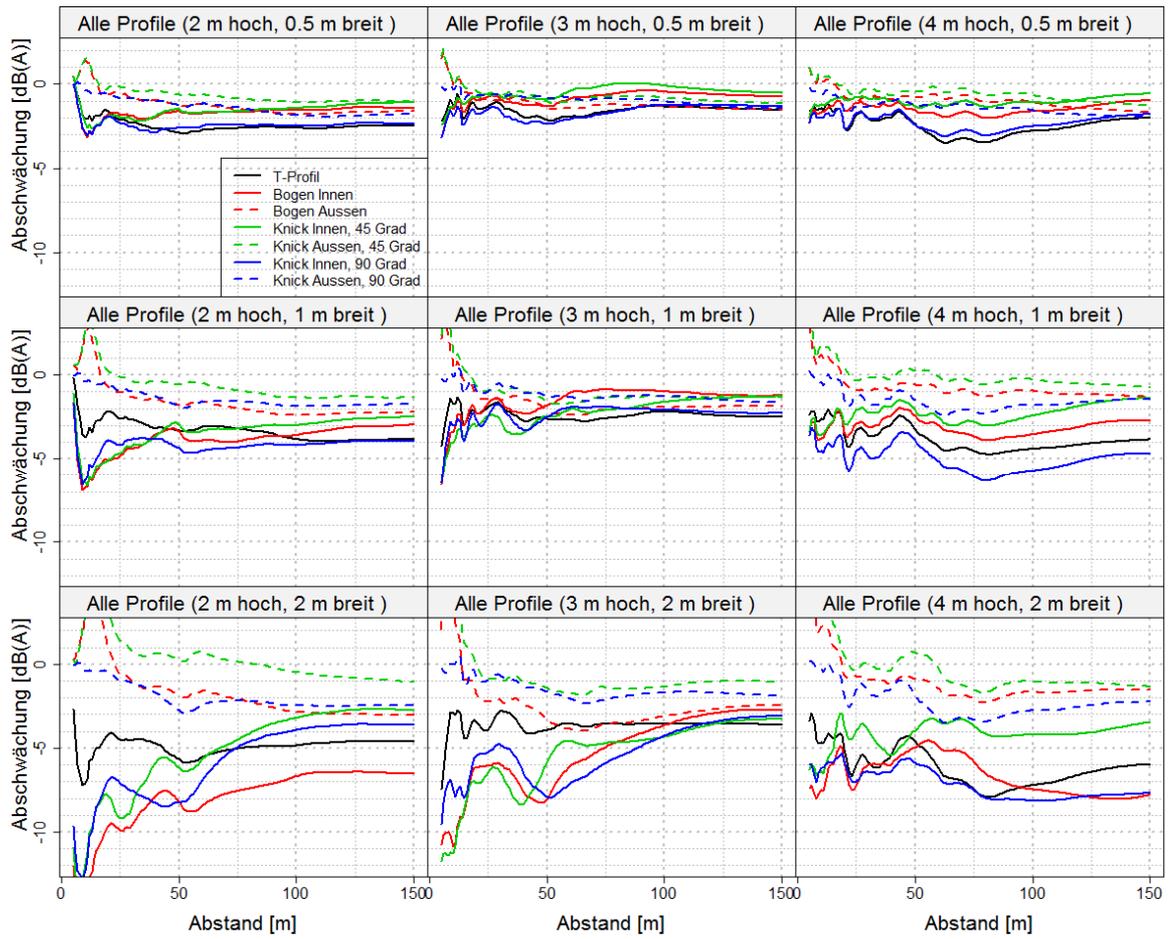


Abbildung 104: Vergleich verschiedener Profile mit Wagenkasten, Empfängerhöhe 10 m

6.8 Zusammenfassung

Bei den Simulationen mit Bahnquerschnitt ergaben sich meist qualitativ ähnliche Ergebnisse wie beim Straßenquerschnitt und die Schlussfolgerungen gelten daher auch hier. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist hier der reflektierende Wagenkasten. Bei geraden Wänden ist der Effekt bei geringen Wandhöhen eher klein (1 dB(A), bei höheren Wänden aber schon im Bereich von 3 dB(A).

Weiters treten Unterschiede bei den Geometrien zwischen der Bedingung mit und ohne Wagenkasten auf, d.h. die Wände wirken unterschiedlich, immer bezogen auf die jeweilig richtige gerade Bezugswand. Dies erschwert die Definition von Korrekturfaktoren erheblich, da schon von vornherein unklar ist, welche der beiden Varianten richtig ist. Eine weitere Schwierigkeit ist die fehlende Validierung der Korrekturfaktormethode für Bahnquerschnitte da leider keine Messdaten verschiedener Wandgeometrien zur Verfügung stehen.

Daher wurde von der Herleitung eigener Korrekturfaktoren abgesehen. Allerdings wurde ein zusätzliches Dokument erzeugt, in dem für 3 Auswertehöhen und 2 Quellentfernungen der Verlauf des Zusatzeffekts mit und ohne Wagenkasten und zusätzlich auch für die Straßengeometrie für ähnliche Quellentfernungen abgebildet sind. Diese basieren auf dem standardisierten Schienenlärmspektrum. Weiters sind die spektralen Effekte in einem Abstand von 100 Metern von der Wand für die gleichen 3 Quellhöhen abgebildet.

7 ERMITTLUNG DER KORREKTURFAKTOREN UND IMPLEMENTIERUNG IN SOUNDPLAN

Dieses Kapitel beschreibt die Herangehensweise zur Ermittlung der Zusatzdämpfung dL für besonders geformte Lärmschutzwände.

Zunächst wurde ein Programm geschrieben, welches sämtliche Datensätze, die mit dem BEM-Programm berechnet wurden, einlesen kann. Es wird jeweils eine Referenzdatei gelesen (Gerade Wand; voll reflektierend) und eine Testwand (z.B. T-Profil) mit der gleichen Wandhöhe. Die Differenzen beider Ergebnisse (=Zusatzdämpfung dL) werden grafisch als Rasterkarte dargestellt (für eine Quellposition und ein Frequenzband). Dies diente dazu, einen Überblick über die Daten zu bekommen.

Die T-Profil-Wand wird nun im Detail beschrieben.

Im nächsten Schritt galt es herauszufinden, welches der (die) relevante(n) Parameter ist (sind), um die Zusatzdämpfung zu beschreiben. Dazu wurden in einem Diagramm die gerechneten Zusatzdämpfungen gegen diverse Parameter aufgetragen (Winkel zu Quelle/Immissionsort, Mehrweg um die Beugungskante, etc.). Des Weiteren wurden 3 Zonen unterschieden, die im Diagramm jeweils unterschiedlich markiert wurden:

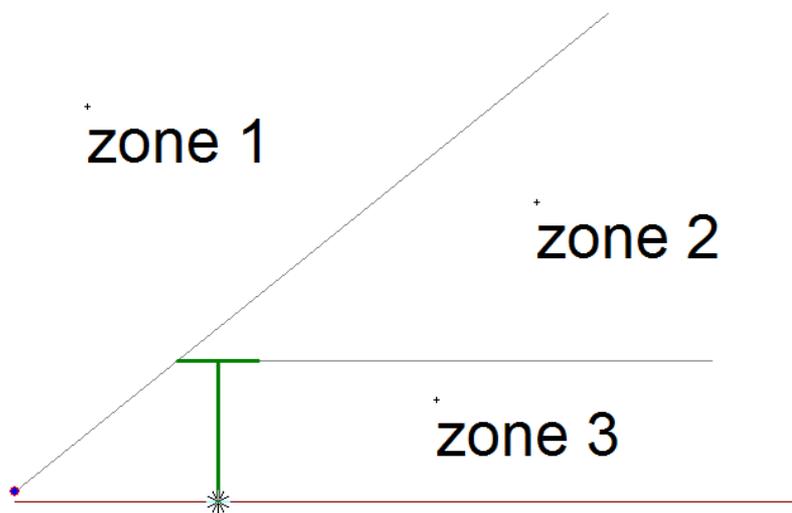


Abbildung 105: Definition der Zonen

Folgende Parameter wurden getestet:

- Winkel zum Immissionsort
- Winkel zur Quelle
- Summe der Winkel zu Immissionsort und Quelle

- Mehrweg
- Differenz der Mehrwege um Referenz- und Testwand

Es stellte sich heraus, dass der Mehrweg delta der einzig vernünftige Parameter ist, es konnten keine weiteren sinnvollen Abhängigkeiten gefunden werden. Dies gilt nicht nur für die T-Profil-Wand, sondern auch für alle anderen Wandtypen.

Definition von delta am Beispiel T-Profil, analog für andere Wandtypen (Abbildung 106):

In Zone 1: $\delta = SR - (ST1 + T1R) \{ < 0 \}$

In Zone 2: $\delta = ST1 + T1R - SR \{ > 0 \}$

In Zone 3: $\delta = ST1 + T1T2 + T2R - SR$

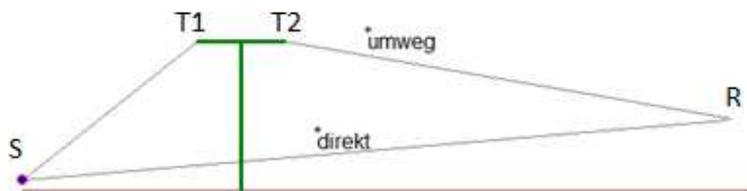


Abbildung 106: Definition des Mehrwegs

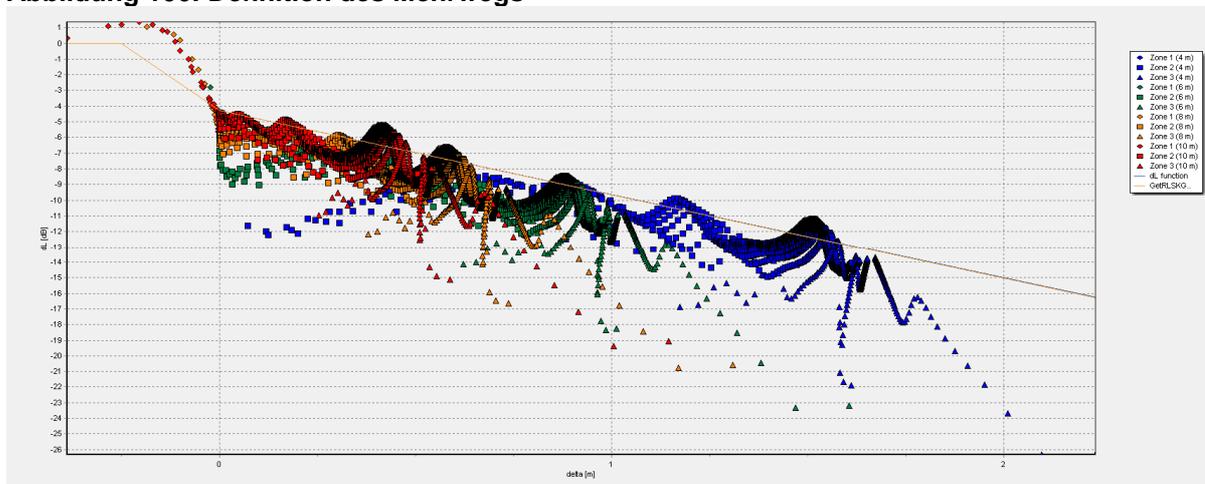


Abbildung 107: Beispiel: T-Profil, Höhe 3 m, Breite 2 m, Voll absorbierend @ 500 Hz

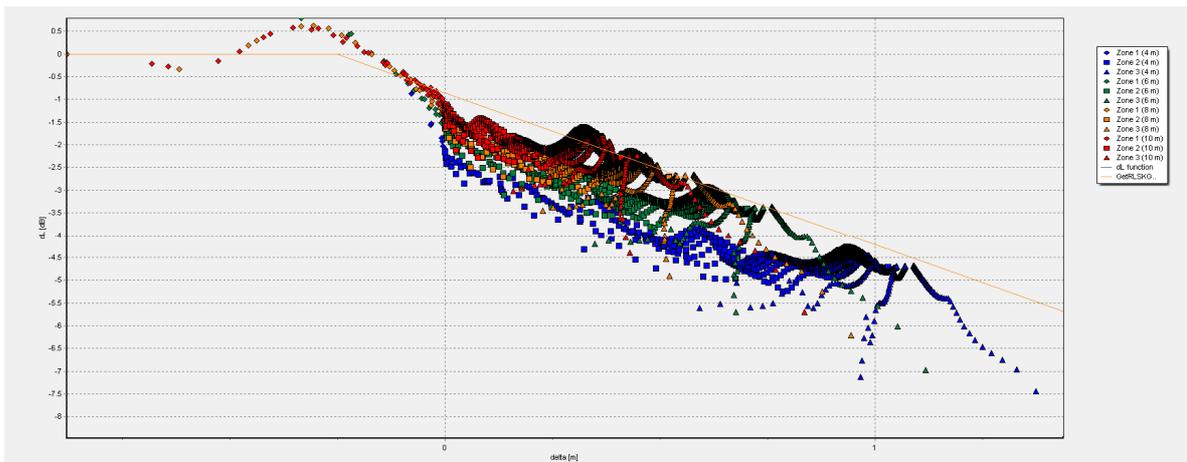


Abbildung 108: Beispiel: T-Profil, Höhe 3 m, Breite 0.25 m, Voll absorbierend @ 500 Hz

Für die Punkte aus Zone 2 und Zone 3 wurden (für alle Quellabstände) Regressionsgeraden $dL_{reg}(\delta)$ bestimmt. Daraus ergaben sich für jede Frequenz f [Hz] die Parameter Steigung (m [dB/m]) und Achsenabschnitt (b [m]). Folgende Funktion wurde zur Beschreibung der Zusatzdämpfung der einzelnen Wandtypen festgelegt:

$$deltamin = -\frac{125}{f[\text{Hz}]}$$

Für $\delta < \text{deltamin}$:

$$dL(\delta) = 0$$

Für $\text{deltamin} < \delta < 0$

$$dL(\delta) = \frac{\text{deltamin} - \delta}{\text{deltamin}} * b$$

Für $\delta \geq 0$

$$dL(\delta) = m * \delta + b$$

Um auf der sicheren Seite zu liegen wurde zum Achsenabschnitt noch die Standardabweichung addiert.

Im beigefügten Dokument finden sich tabellarisch die Steigung, Achsenabschnitt und Standardabweichung der Regressionsgeraden der verschiedenen Wandtypen.

Die Standardabweichung nimmt in der Regel mit der Frequenz, der Profilbreite und der Wandhöhe zu.

Die Zusatzdämpfung für beliebige Wandhöhen h und Profilbreiten a ergibt sich durch lineare Interpolation der Zusatzdämpfungen der nächstgelegenen tabulierten Wandtypen mit Höhen h_0 , h_1 und Profilbreiten a_0 , a_1 . Auf eine Extrapolation wurde verzichtet, in diesem Fall werden die jeweils nächstgelegenen Werte verwendet.

Gegeben: $dL(h_0, a_0)$, $dL(h_0, a_1)$, $dL(h_1, a_0)$, $dL(h_1, a_1)$

$$dL(h, a_0) = dL(h_0, a_0) + (h-h_0)/(h_1-h_0) * (dL(h_1, a_0) - dL(h_0, a_0))$$

$$dL(h, a_1) = dL(h_0, a_1) + (h-h_0)/(h_1-h_0) * (dL(h_1, a_1) - dL(h_0, a_1))$$

$$dL(h, a) = dL(h, a_0) + (a-a_0)/(a_1-a_0) * (dL(h, a_1) - dL(h, a_0))$$

7.1 Implementierung

Die Korrekturfunktionen wurden nun für alle Wandtypen in SoundPLAN für die ISO 9613-2 implementiert. Die Korrektur dL wurde zum Einfügedämpfungsmaß A_{bar} addiert. Zum Test auf korrekte Implementation wurde für alle Wandarten, Quellabstände, etc. eine Berechnung für eine Punktquelle im senkrechten Schnitt zur Wand (ohne Seitenbeugung und maximale Beugungsminderung!) durchgeführt. Die Ergebnisse lagen in derselben Form vor wie bei den BEM Berechnungen, so dass sie mit dem Testprogramm angeschaut werden konnten. Im Testprogramm wurde ebenfalls die Regressionsgerade dargestellt. Bei dieser Berechnung lagen - wie erwartet und gewünscht, da der Mehrweg zur Bestimmung der Regressionsgerade gerade für die Position der Punktquelle ermittelt wurde - alle Ergebnisse auf den Regressionsgeraden. Somit wurde die Implementierung in SoundPLAN validiert.

Bei einer langen geraden Linienquelle mit paralleler Beugungskante erfolgt in SoundPLAN die Berechnung durch eine Superposition von Teilquellen. D.h. die lange gerade Quelle wird in eine Anzahl Segmente zerlegt, die jeweils durch eine Punktquelle repräsentiert werden, deren Teilpegel energetisch (inkohärent) summiert werden. Damit die resultierende Zusatzdämpfung wieder den BEM – Simulationen entspricht wird die Berechnung des Mehrwegs δ zur Berechnung von dL in SoundPLAN auf den senkrechten Schnitt bezogen (Abbildung 109)

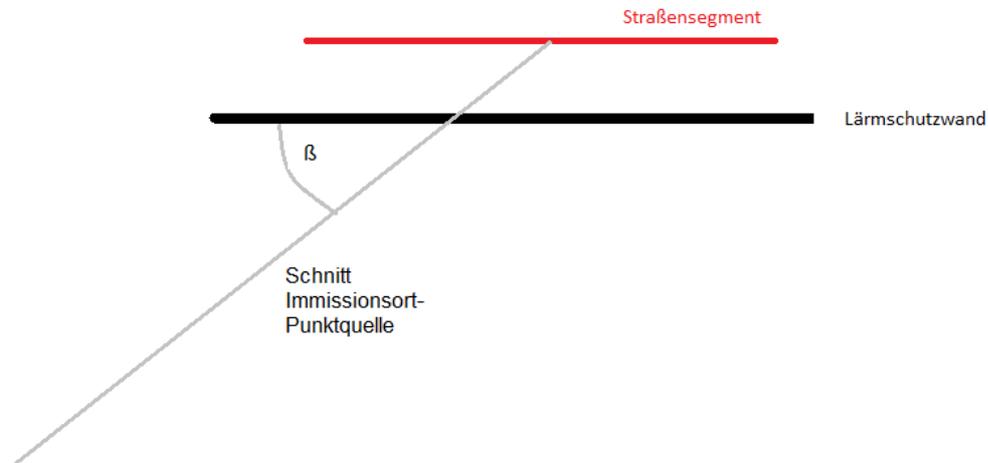


Abbildung 109: Illustration der Berechnung des korrigierten Einfügedämmasses

D.h. bei der Berechnung von Delta werden alle horizontalen Entfernungen mit dem Sinus des Winkels zwischen Beugungskante und Schnitt Immissionsort-Punktquelle β multipliziert.

Um die Wirkung einer komplexen Lärmschutzwand zu berechnen gibt es bei der Eingabe einer Lärmschutzwand in SoundPLAN ein Kärtchen „Zusätzliche Elemente“ („Additional Elements“).

Bei Betätigung des Knopfes  werden spezielle Wandoberkantenformen (edge modified barrier) eingefügt entsprechend der Liste in Abbildung 110 (dafür muss RVS 4.02 als Vorgabe-Straßenrichtlinie in den Einstellungen gewählt sein, bei der japanischen ASJ gibt es noch andere Wandoberkantenformen).

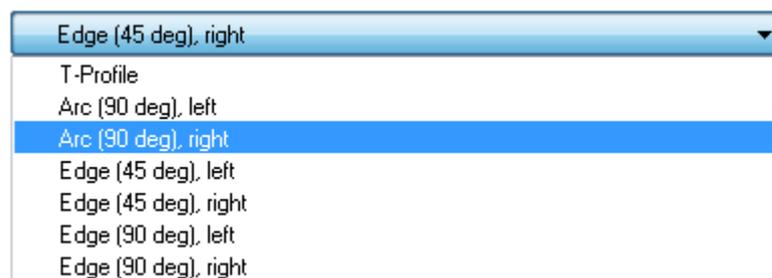
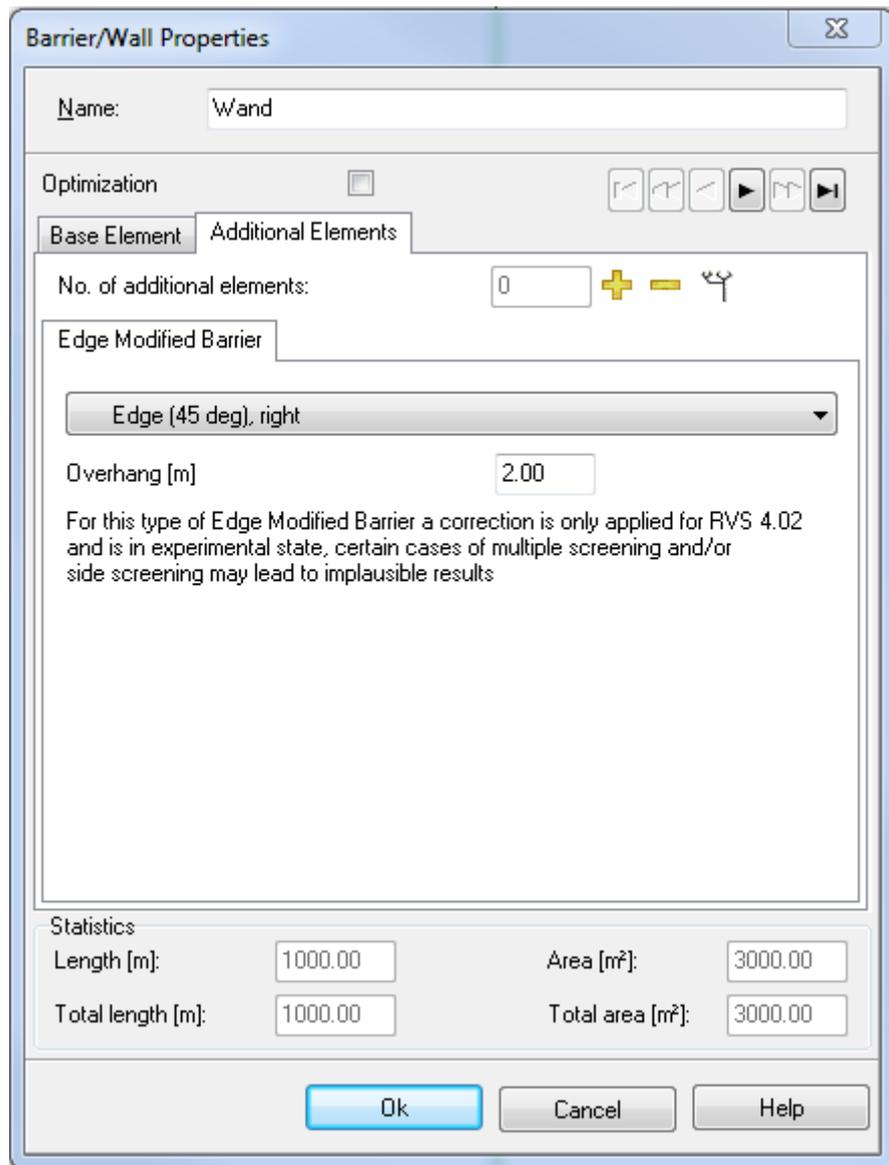


Abbildung 110: Liste der verfügbaren Wandtypen in Soundplan

Dann wird für die entsprechende Wand noch der Überhang definiert (Abbildung 111).



Barrier/Wall Properties

Name:

Optimization

Base Element Additional Elements

No. of additional elements: + - ✖

Edge Modified Barrier

Overhang [m]

For this type of Edge Modified Barrier a correction is only applied for RVS 4.02 and is in experimental state, certain cases of multiple screening and/or side screening may lead to implausible results

Statistics

Length [m]:	<input type="text" value="1000.00"/>	Area [m²]:	<input type="text" value="3000.00"/>
Total length [m]:	<input type="text" value="1000.00"/>	Total area [m²]:	<input type="text" value="3000.00"/>

Ok Cancel Help

Abbildung 111: Eingabefenster der Parameter der gewünschten Wandgeometrie

7.2 Zusammenfassung

Es konnten einfach anzuwendende Korrekturfaktoren hergeleitet werden, die auf dem Umweg, der durch die LSW verursacht wird, basieren. Mit Hilfe dieser Funktionen ist es möglich, das Einfügedämmmaß einer komplexen Geometrie zu berechnen, basierend aus dem aus der Norm berechneten Werten für die gerade Wand.

8 TESTBERECHNUNG MIT KORREKTURFAKTOREN

Die Korrekturfaktoren für unterschiedliche Geometrien wurden in SoundPlan (Version 7.3) implementiert. Um die Korrekturfaktoren zu testen, wurden Berechnungen mit Messungen verglichen. Hierbei wurden die Ergebnisse aus den Messungen an der A4 bei Mannswörth (siehe Anhang B) herangezogen.

Zu diesem Zweck wurden die Differenzen zwischen den Messquerschnitten MQ-1 (hohe, stark gekrümmte LSW) und MQ-2 (niedrigere leicht gekrümmte LSW) an äquivalenten Messpunkten gegenübergestellt (siehe hierzu auch Abbildung 30 und Abbildung 31).

Die Berechnung wurde gemäß RVS 04.02.11 durchgeführt. Für die Berechnungen wurden entsprechende Verkehrsdaten herangezogen.

In Abbildung 112 sind die SoundPlan-Einstellungen für die Lärmschutzwände komplexer Geometrie an den beiden Messquerschnitten der betrachteten Situation exemplarisch wiedergegeben.

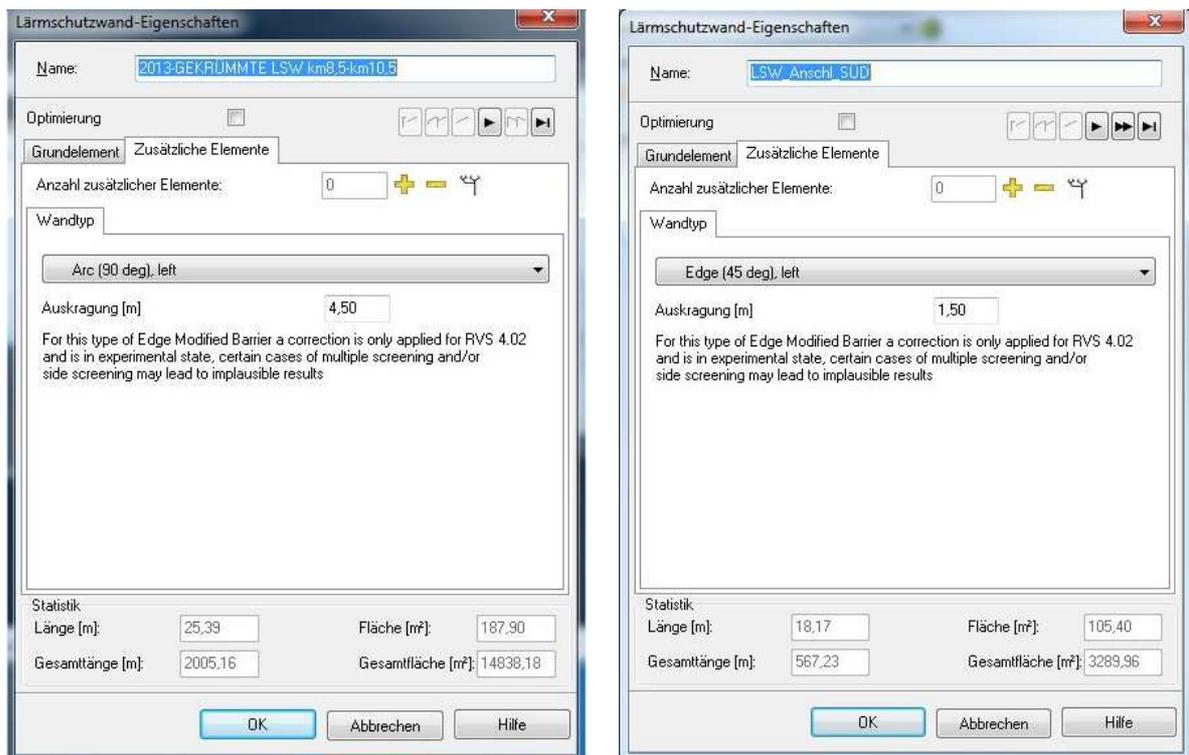


Abbildung 112: SoundPlan-Einstellungen für die Lärmschutzwände an den Messquerschnitten

Tabelle 4: Gegenüberstellung Messung Mannswörth und Berechnung mittels Korrekturfunktionen

	Pegeldifferenzen zwischen den Messquerschnitten in dB							
	MP-Abstand 12,5 m				MP-Abstand 25 m			
	MP-1	MP-2	MP-3	MP-4	MP-5	MP-6	MP-7	MP-8
MP-Höhe	6 m	4,5 m	3 m	1,5 m	6 m	4,5 m	3 m	1,5 m
Messung	3,9	3,7	3,8	3,2	1,9	1,3	0,8	1,8
Berechnung	2,9	3,3	4,4	4,2	1,7	1,5	1,4	1,8
Differenz Messung/Berechnung	1,0	0,4	-0,6	-1,0	0,2	-0,2	-0,6	0,0

Tabelle 4 zeigt gemessene als auch berechnete Pegeldifferenzen zwischen den beiden Messquerschnitten MQ-2 und MQ-1 an den entsprechenden Messpunkten (MP-1 bis MP-8). Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, ergeben sich Unterschiede in den Pegeldifferenzen zwischen Messung und Berechnung von bis zu ± 1 dB.

Des weiteren wurden Berechnungen für gerade Wände mit „abgewickelten“ Wandhöhen von Wänden komplexer Geometrie an den entsprechenden Messquerschnitten durchgeführt. Hierbei ergeben sich Unterschiede zwischen Messung und Berechnung von bis zu rd. 3 dB.

In einer dritten Berechnungsvariante wurden an die Beugekante herangerückte gerade Wände mit gleichen Höhen wie die Wände komplexer Geometrie berechnet. Hier ergeben sich Unterschiede zwischen Messung und Berechnung von bis zu rd. 1,5 dB.

Somit zeigt sich für die Berechnungen mit den neu implementierten Korrekturfaktoren in der gegenständlichen Situation die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung.

9 REFERENZEN

- [1] M. Monazzam, M. Naderzadeh, P. Nassiri, and S. Fard, "Performance of Environmental T-shape Noise Barriers Covered with Primitive Root Diffusers," *Archives of Acoustics*, vol. 35, no. 4, pp. 565–578, Jan. 2010.
- [2] T. Ishizuka and K. Fujiwara, "Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions," *Applied Acoustics*, vol. 65, no. 2, pp. 125–141, Feb. 2004.
- [3] D. Hothersall, D. Crombie, and S. Chandler-Wilde, "The performance of T-profile and associated noise barriers," *Applied Acoustics*, vol. 32, pp. 269–287, 1991.
- [4] M. Bérengier, M. Stinson, G. Daigle, and J. Hamet, "Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, no. 1, pp. 155–162, 1997.
- [5] K. Attenborough, I. Bashir, and S. Taherzadeh, "Outdoor ground impedance models.," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, no. 5, pp. 2806–19, May 2011.
- [6] Y. Champoux and M. Stinson, "On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, no. 2, pp. 1120–1131, 1992.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, "EN 1793-3: Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Normalized traffic noise spectrum," 1998.
- [8] K. Heutschi, "Sound propagation over ballast surfaces," *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 95, pp. 1006–1012, 2009.
- [9] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, "EN 16272-3-1: Normalized railway noise spectrum and single number ratings for diffuse field applications," 2012.
- [10] C. Kirisits, H. Meidl, G. Dinhobl, H. Gutschelhofer, J. Punk, and H. Kirisits, "Comparison of measurements and calculations to investigate the effect of multiple-reflections between absorptive noise barriers and trains," in *Proceedings of Internoise*, 2013.

10 ANHANG A: MESSBERICHT „MESSUNGEN IM MODELL“

11 ANHANG B: MESSBERICHT „MESSUNGEN AN EINER VERKEHRSSTRECKE“