

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 58 765 11 11  
F +41 58 765 11 22  
www.empa.ch

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Abt. Lärmbekämpfung  
z.Hd. Herr K. Köstli  
Postfach  
CH-3003 Bern

## **Validierung sonX-Ausbreitungsmodell: Ergänzende Messungen zur Bestimmung der Modellunsicherheiten**

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5211.00381.100.01-1, int. 510.2571  
Ihr Auftrag vom: 30. Oktober 2012  
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 49

### **Inhaltsverzeichnis**

- 1 Auftrag
- 2 Einführung
- 3 Referenzschallquellen Messungen 2013
- 4 Vorgehensweise
- 5 Validierungsmessungen
- 6 Übersicht aller Resultate und Abschätzung der Modellunsicherheit
- 7 Diskussion

---

Dübendorf, 12. Juli 2013

Die Projektleiterin:



Barbara Locher

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Der Abteilungsleiter:



Kurt Eggenschwiler

## Zusammenfassung

Im Hinblick auf einen Einsatz des *sonX*-Ausbreitungsmodells in der Praxis wurde eine abschliessende Kontrolle der Leistungsfähigkeit und der Genauigkeit des Modells gemacht. Das Ziel ist herauszufinden wie genau Einzelsituationen reproduziert werden. Dafür wurden Situationen welche bereits beim *sonRAIL*-Projektabschluss berücksichtigt worden waren neu berechnet. Zusätzlich wurden unter Verwendung von Referenzschallquellen ergänzende Messungen für verschiedene Situationen durchgeführt und mit Berechnungen verglichen. Insgesamt wurden 101 Quellen-Empfänger-Kombinationen aus Messungen an sieben Standorten spektral ausgewertet. Getestet wurde der Direktschall inklusive Meteorologieeinfluss sowie Reflexionen an Gebäuden.

Im Mittel über alle Datenpunkte weist *sonX* rund 0.3 dB(A) zu hohe Immissionspegel aus. Es wurden keine systematischen Über- oder Unterschätzungen des Modells ausgemacht. Die Standardabweichung der Pegeldifferenzen zwischen Messungen und Berechnungen beträgt 2.4 dB(A) und der mittlere Fehler 2.5 dB(A). Die mittlere Abweichung (Median) relativ zur Ausbreitungsdämpfung beläuft sich auf 2.8%. Diese Resultate erfüllen die an das Modell gestellten Anforderungen und sind besser als im *sonRAIL*-Pflichtenheft vorgegeben. Die Validierungsfälle haben gezeigt, dass das Modell die grundlegenden Phänomene der Schallausbreitung richtig abbildet. Eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen wurde in den Situationen mit Hindernissen sowie mit relevanten Reflexionen erreicht. Etwas grössere Unsicherheiten wurden bei Ausbreitungssituationen mit freier Sicht über grössere Distanzen festgestellt, wo Wettereinflüsse und Bodenreflexionen einen massgeblichen Einfluss auf die resultierenden Immissionen haben. Es wird vermutet, dass dies am mangelnden Detaillierungsgrad der Eingangsparameter bzw. an lokalen Abweichungen im Vergleich zu Standard-Parameterstellungen liegt (komplexe Windfelder, lokale Variationen des Strömungswiderstandes des Bodens aufgrund unterschiedlicher Verdichtung, Korngrößenverteilung und Wassersättigung). Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen *sonX* und den Messresultaten sowohl spektral als auch in Bezug auf die resultierenden A-bewerteten Summenpegel als gut einzuschätzen.

## 1 Auftrag

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) wurde in den Jahren 2007 bis 2009 ein Berechnungsmodell für Eisenbahnlärm mit der Bezeichnung *sonRAIL* entwickelt. Das im Rahmen von *sonRAIL* entwickelte Ausbreitungsmodell, nachfolgend als *sonX* bezeichnet, ist in seiner Anwendung nicht auf Eisenbahnlärm beschränkt sondern wurde zwischenzeitlich bereits in ein Schiesslärmmodell integriert. Zum Schiesslärmmodell mit der Bezeichnung *sonARMS* wurde auch eine Benutzerumgebung entwickelt, so dass das Gesamtmodell als Stand-Alone-Anwendung zur Verfügung steht.

Als weitere Anwendungen für das *sonX*-Ausbreitungsmodell ist ein Einsatz im neu geplanten Fluglärmmodell (*sonAIR*) vorgesehen. Im Bereich Strassenlärm sind Vorgespräche für die Entwicklung eines neuen Strassenlärm-Emissionsmodells im Gange, welches ebenfalls mit dem *sonX*-Ausbreitungsmodell kombiniert werden soll. Somit ist eine Programmfamilie in Entstehung, welche für verschiedene Lärmarten Lösungen bietet und dabei eine einheitliche Ausbreitungsmodellierung sowie eine einheitliche Schnittstelle zur Quellenmodellierung aufweist.

Im Rahmen der Modellentwicklung von *sonRAIL* wurden verschiedene Validierungen durchgeführt. Da der Fokus bei den Validierungen auf den neu entwickelten Modellkomponenten lag, wurden jedoch nur wenige Situationen untersucht, welche in Bezug auf Grenzwertüberschreitungen relevant sind. So wurden die Modelle namentlich nur punktuell in Situationen mit kurzen Ausbreitungsdistanzen angeschaut. Für das abgeleitete Schiesslärmmodell wurden bisher keine zusätzlichen Validierungsmessungen vorgenommen. Allerdings wurden umfangreiche Validierungen im Vergleich zu vorhandenen Messdaten durchgeführt (siehe Empa-Bericht Nr. 5211.00381.100.01-2).

Im Hinblick auf einen Einsatz der Modelle in der Praxis ist eine abschliessende Kontrolle der Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der Modelle noch ausstehend. Neben einer Neuevaluation existierender Validierungsdaten sollen ergänzende Messungen für Ausbreitungssituationen in Distanzen zwischen 30 und 300 m gemacht werden. Es sollen für grenzwertrelevante Situationen an verschiedenen Standorten mit dichter und lockerer Bebauung, Ausbreitung über Grasland, hartem Untergrund und gemischten Verhältnissen sowie unterschiedlichen Empfangspunkthöhen Messungen durchgeführt werden. Als Emissionssignal sollen dabei eine Referenzschallquelle, entweder ein Lautsprecher oder ein Impulsgeber, eingesetzt werden, so dass der Einfluss der Quelle auf die resultierende Unsicherheit unterdrückt werden kann.

In vorliegendem Dokument sind die Neuevaluation existierender Validierungsdaten sowie die ergänzend durchgeführten Messungen und der Vergleich mit den Simulationsberechnungen dokumentiert. Die Dokumentation des *sonX*-Ausbreitungsmodells ist auf der Website der Abteilung Akustik / Lärminderung der Empa zu finden ([www.empa.ch/akustik](http://www.empa.ch/akustik)).

## 2 Einführung

In der *sonRAIL*-Basisdokumentation wurden bereits einige Beispiele zur Validierung des Modells berechnet. In der Zwischenzeit wurde der Berechnungsalgorithmus mit dem Ziel einer Beschleunigung der Berechnungen optimiert. Weiter wurden einige Änderungen bei der Terrainsegmentierung gemacht. Deshalb wurden drei dieser Validierungsfälle mit dem neuen Rechenkern nachgerechnet (Kap. 2.1, 2.2 und 2.3).

Wie die nachfolgenden Resultate zeigen, stimmen die Berechnungen immer noch sehr gut mit den Referenzdaten überein. Auch sind die Resultate der *sonRAIL*-Berechnungen konsistent mit den anderen Modellen (Harmonoise und Nord2000).

Die hauptsächlichen Herausforderungen sind die korrekte Modellierung des Bodeneffekts und der meteorologischen Einflüsse bei grossen Ausbreitungsdistanzen sowie Reflexionen bei abgeschirmten Situationen.

Um zu überprüfen wie gut das Modell diese Effekte abbildet, wurden weitere Validierungsmessungen durchgeführt.

## 2.1 Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und flachem Boden

Die Validierung der Bodeneffektberechnung in kurzen Abständen bei flachem homogenem Boden prüft die korrekte Bestimmung des Kugelwellenreflexionskoeffizienten und die Implementierung der Interferenzberechnung. Als Referenz wird hier die Berechnung für den Testfall 1005 herangezogen aus:

- Jonsson, G.B.; Jacobsen, F.: A Comparison of Two Engineering Models for Outdoor Sound Propagation: Hamonoise and Nord2000. Acta Acustica united with Acustica, 94: 282-289, 2008.
- Jonsson, G.B.: A comparison of two numerical models for outdoor sound propagation. Master Thesis, Acoustic Technology Ürsted, DTU, 2007.

Quellen-Empfänger-Abstand	20 m
Quellenhöhe	0.5 m
Empfängerhöhe	1.5 m
Bodengeometrie	flach
Strömungswiderstand	100'000 Rayl

Tabelle 1: Geometrie für den Test Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und flachem Boden

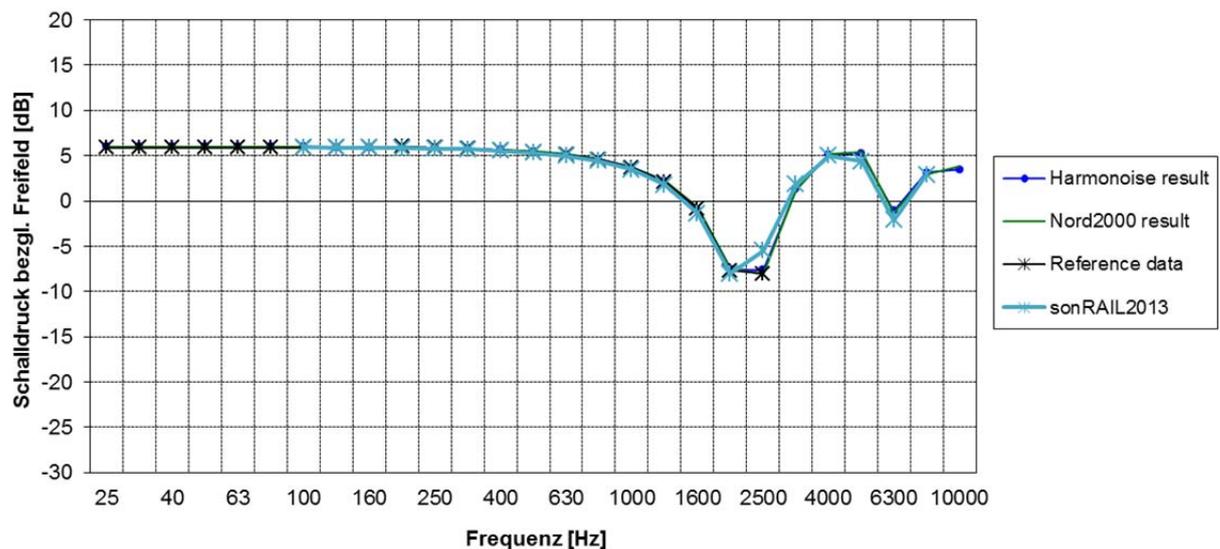


Abbildung 1: Vergleich der Bodeneffektrechnung mit Referenzdaten für Ausbreitung über flachem Boden.

Der Vergleich in Abbildung 1 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung im Bodeneffekt-Interferenzmuster.

## 2.2 Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und unebenem Boden

Reales Gelände mit unebenem Boden hat zur Folge, dass die reflektierenden Bodenflächen nicht mehr in jedem Fall gross sind. Als Folge davon ergeben sich Reflexionspfade, die je nur noch unvollständige, von

einer Fresnelzonengewichtung abhängige Reflexionen erzeugen. Als Referenz wird der auf einer Messung basierende Testfall 1 herangezogen aus:

- Jonsson, G.B.; Jacobsen, F.: A Comparison of Two Engineering Models for Outdoor Sound Propagation: Hamonise and Nord2000. Acta Acustica united with Acustica, 94: 282-289, 2008.
- Jonsson, G.B.: A comparison of two numerical models for outdoor sound propagation. Master Thesis, Acoustic Technology Ürsted, DTU, 2007.

Quellen-Empfänger-Abstand	200 m
Quellenhöhe	1 m
Empfängerhöhe	1.5 m
Bodengeometrie	Uneben, mit mehreren reflektierenden Segmenten
Strömungswiderstand	500 Rayl

Tabelle 2: Geometrie für den Test unebener Boden

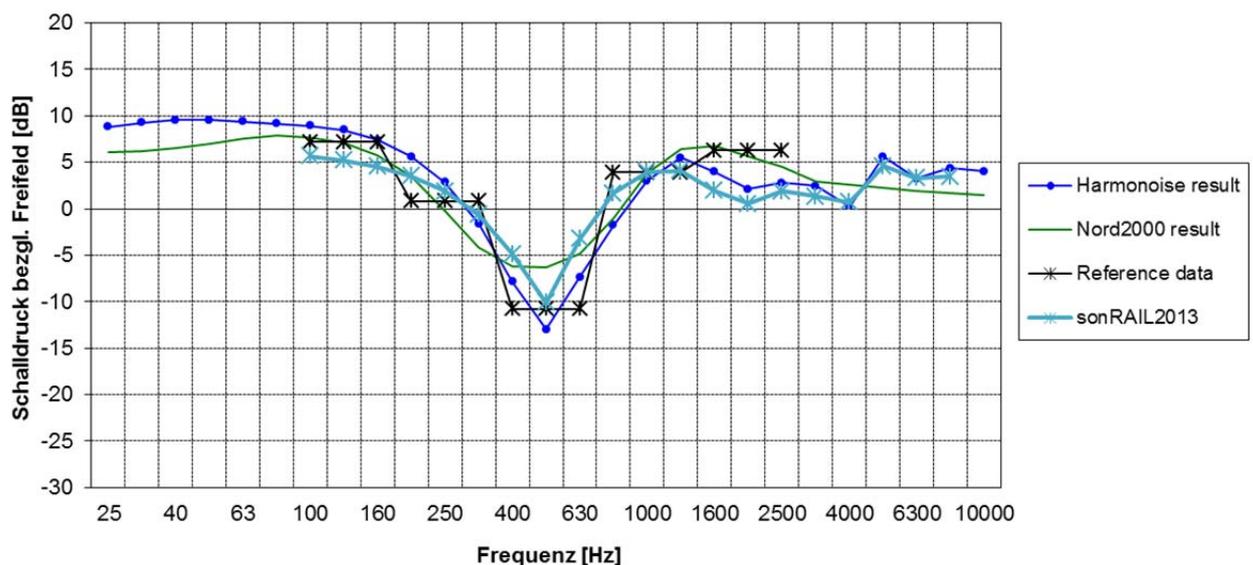


Abbildung 2: Vergleich der Bodeneffektrechnung mit Referenzdaten für Ausbreitung über unebenem Boden.

Die Gegenüberstellung in Abbildung 61 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen sonRAIL-Rechnung und Messung.

### 2.3 Hindernisberechnung bei homogener Atmosphäre

Hier wird eine Ausbreitungssituation mit sperrendem Hindernis untersucht. Als Referenz wird die Berechnung für den Testfall 2024 herangezogen aus:

- Jonsson, G.B.; Jacobsen, F.: A Comparison of Two Engineering Models for Outdoor Sound Propagation: Hamonise and Nord2000. Acta Acustica united with Acustica, 94: 282-289, 2008.

- Jonsson, G.B.: A comparison of two numerical models for outdoor sound propagation. Master Thesis, Acoustic Technology Ürsted, DTU, 2007.

Quellen-Empfänger-Abstand	20 m
Quellenhöhe	1.25 m
Empfängerhöhe	1.25 m
Bodengeometrie	Flach mit 2 m hohem Hindernis ab Laufmeter 14 bis 15
Strömungswiderstand	100'000 Rayl

Tabelle 3: Geometrie für den Test Hindernis

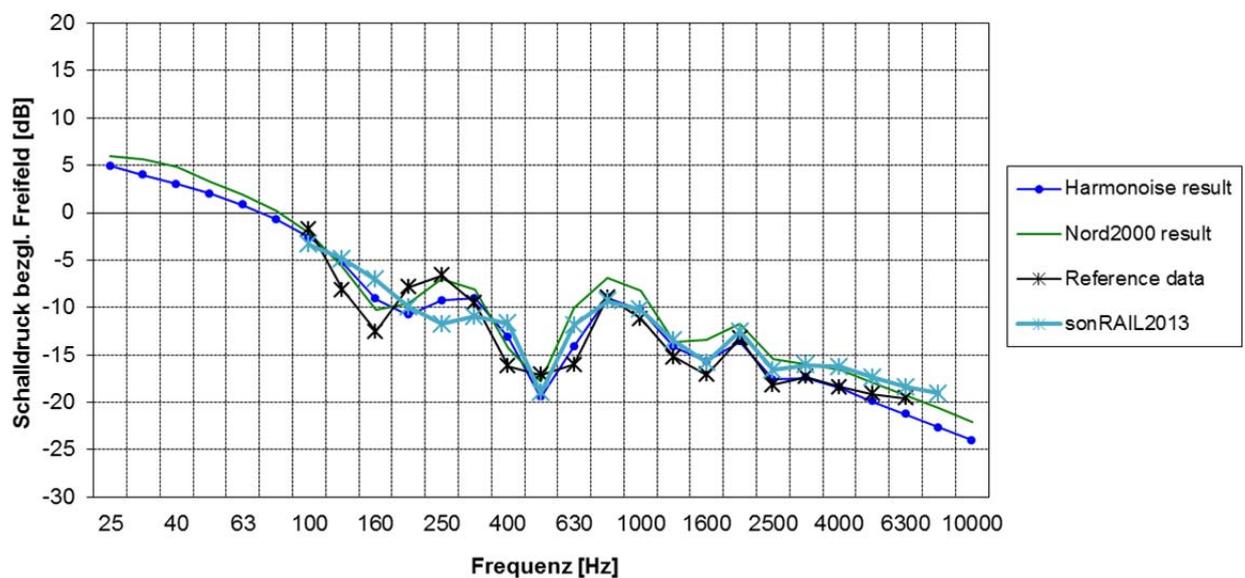


Abbildung 3: Vergleich der Zusatzdämpfung (Ausbreitungsdämpfung ohne geometrische Verdünnung) mit Referenzdaten im Fall mit Hindernis.

Der Vergleich zwischen *sonRAIL*-Berechnung und Referenz in Abbildung 3 zeigt eine gute Übereinstimmung.

### 3 Referenzschallquellen Messungen 2013

Als Referenzschallquellen für die Messungen im März 2013 wurden zwei verschiedene Lautsprecher eingesetzt. Bei beiden Lautsprechern wurde ein mit einem Hochpass- und Tiefpass-Filter modifiziertes rosa Rauschen abgespielt. Pro Messposition wurde 1 Minute Rauschen und Stille alternierend im 2s-Takt abgespielt. Die Quellenstärken bzw. Schallleistungen wurden bei Referenzmessungen ermittelt. Die Spektren der beiden Lautsprecher sind in der Beilage B.1 dargestellt. Für Messungen von kürzeren Distanzen kam der Lautsprecher Typ Giotto (Abbildung 4) und für längere Distanzen der Typ Electrovoice Sx325 (Abbildung 5) zum Einsatz. Mit der in Abbildung 4 gezeigten Anordnung hat der Lautsprecher Typ Giotto in Richtung Messpunkt eine kugelförmige Abstrahlung. Der Lautsprecher Typ Electrovoice Sx325 hat eine gerichtete Abstrahlung. Dies wurde berücksichtigt indem die Referenzmessungen zur Bestimmung der Quellenstärke an Positionen gemacht wurden, welche für die Ausbreitung in Richtung der Messpunkte repräsentativ sind.

Parallel zu den Lautsprechermessungen wurde eine modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen eingesetzt (Spektrien siehe Beilage B.1). Die Signalpistole wurde so gehalten, dass der Lauf 90° zur Ausbreitungsrichtung steht (Abbildung 5). Pro Messposition wurden 5 Schüsse abgegeben. Der Vorteil der Signalpistole sind die im Vergleich zu den Lautsprechern etwas höheren Pegel.



Abbildung 4: Anordnung Lautsprecher Giotto, 0,5 m über Boden



Abbildung 5: Quellenpositionen: links Signalpistole, rechts Lautsprecher Electrovoice Sx325; beide auf 0,5 m über Boden

## 4 Vorgehensweise

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Messsituationen thematisch geordnet aufgeführt. Bei den Messungen wurden Situationen mit bedeutenden Wettereffekten auf die Schallausbreitung sowie Reflexionen an Gebäuden erfasst. Der Rechenkern wird deshalb mit den Varianten BASIC, METEO und

REFLECT betrieben. Situationen mit bedeutenden diffusen Reflexionen an Waldrändern und Felswänden wurden nicht gemessen. Entsprechend kann auf Basis dieser Messungen keine Validierung des Moduls FOREST vorgenommen werden.

Die Vergleichsberechnungen wurden mit dem *sonRAIL* Rechenkern Version 3.0 vom 17. Mai 2013 und für Situationen mit relevanten Reflexionen mit dem *sonARMS* Rechenkern Version 2.0 vom 17. Mai 2013 durchgeführt. Bei den Berechnungen mit *sonRAIL* sind die Resultate in Terzen angegeben und bei den Berechnungen mit *sonARMS* in Oktaven.

Als Eingangsgrößen für die Simulationen wurden folgende Grundlagendaten verwendet:

- Topographie: Digitales Terrain Modell von Swisstopo in einem 5 m Raster
- Landnutzung: Primärflächendatensatz des Vektor25-Modells von Swisstopo
- Gebäude: Als Basis wurde der Gebäudedatensatz des Vektor25-Modells von Swisstopo verwendet. Die Gebäudehöhen wurden dabei aus der Differenz des digitalen Oberflächenmodells mit dem digitalen Terrainmodell ermittelt.

Die Meteorologie wurde während den Messungen basierend auf Beobachtungen und punktuellen Messungen mittels Temperatur-/Feuchtefühler sowie eines Handwindmessgerätes (nur Windstärke) in ca. 1 – 2 m über Boden erfasst. Bei der Zuordnung zu den 15 Meteoklassen, welche in *sonX* verwendet werden, bzw. der genauen Windrichtung besteht also ein gewisser Interpretationsspielraum. Wenn mehrere Optionen für die Definition der Meteobedingungen möglich waren, wurde die Variante mit der besten Übereinstimmung verwendet.

Die Berechnungen wurden mit den Bodeneigenschaften, die im Modell gegeben sind, gemacht. Es erfolgten keine situationsspezifischen Anpassungen des Strömungswiderstandes oder der kleinräumigen Topographie.

Bei den Lautsprechermessungen wurde eine Grundgeräuschkorrektur gemacht. Das Grundgeräusch wurde in den 2-Sekunden-Intervallen zwischen eingeschaltetem Lautsprecher ermittelt (Auswertung von jeweils 1.5 Sekunden). Messpegel die eine Differenz von weniger als 3 dB zum Grundgeräusch hatten, wurden weggelassen. Der Lautsprecher erzeugt in diesen Fällen nicht genügend Leistung, so dass das Grundgeräusch die Pegel massgeblich beeinflusst. In den folgenden Grafiken fehlen deshalb häufig Messwerte bei den tiefen Frequenzen und teilweise auch bei den höchsten Frequenzen (4 – 5 kHz). Bei den Signalpistolenmessungen wurde keine Grundgeräuschkorrektur vorgenommen, das heisst auch keine Messwerte weggelassen, die zu nahe am Grundgeräusch sind.

Die emissionsseitigen Schwankungen haben sich bei den Lautsprechern als kleiner und besser kontrollierbar erwiesen. In Kombination mit der Grundgeräuschkorrektur ergeben sich so stabilere und verlässlichere Resultate, weshalb mit wenigen Ausnahmen nur diese gezeigt werden.

Bei den Messungen wurden Terzspektren (25 bis 5000 Hz) und A-bewertete Pegel erfasst. Als Vergleichsgrösse werden deshalb für alle Beispiele spektrale und A-bewertete Ereignispegel verwendet. Für jede Berechnungssituation werden die mittlere Abweichung  $\mu$  (Messung – Berechnung), die Standardabweichung  $\sigma$  und der mittlere Fehler  $m$  ausgewiesen. Der mittlere Fehler berechnet sich dabei gemäss nachfolgender Formel aus der mittleren Abweichung und der Standardabweichung.

$$m = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$$

Als weitere Grösse wird ein prozentualer Fehler berechnet. Dieser berechnet sich als Mittelwert der absoluten Differenzen zwischen Messung und Berechnung, geteilt durch die Ausbreitungsdämpfung. Die Ausbreitungsdämpfung bestimmt sich als Differenz der berechneten Ereignispegel und des Schallleistungs- bzw.

Schallenergiepegels<sup>1</sup> der Quelle. Die Ausbreitungsdämpfung wurde anhand der Berechnungen und nicht der Messungen ermittelt.

## 5 Validierungsmessungen

Eine Übersicht über alle durchgeführten Messungen ist in der Beilage B.2 zu finden. Nachfolgend werden die verschiedenen Situationen einzeln vorgestellt und die Resultate diskutiert.

### 5.1 EMPA/EAWAG, Dübendorf

Auf dem Areal der EMPA und EAWAG in Dübendorf wurden Messungen durchgeführt mit dem Ziel den Einfluss von Überbauungen zu testen. Es wurden zwei verschiedene Situationen gewählt: 1. Die Empfangspunkte sind abgeschirmt, aber durch relevante Reflexionen betroffen. 2. Die Empfangspunkte sind abgeschirmt und nicht von relevanten Reflexionen betroffen.

#### 5.1.1 Angaben zu Messungen

Datum, Uhrzeit:	22. März 2013, 8 – 9 Uhr und 13 – 14 Uhr
Wetter:	Messung EMPA (8 – 9 Uhr): Nordostwind 1 - 2 m/s (auf ca. 2.5 m gemessen); trocken, sonnig; 3.5 - 4 °C (Temperatur-/Feuchtefühler bei Messpunkt 1 in ca. 1.5 m Höhe) Messung EAWAG (13 – 14 Uhr): Ostwind (Stärke nicht gemessen); trocken, sonnig; 9 °C (Temperatur-/Feuchtefühler bei Quelle)
Quellen:	Lautsprecher Giotto und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe
Horizontale Ausbreitungsdistanzen:	Messung EMPA: 31.5 m Messung EAWAG: 49 m
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	Messung EMPA: flach Messung EAWAG: flach
Untergrund:	Messung EMPA: harter Untergrund Messung EAWAG: Gebäude, Gras
Bemerkungen:	Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

<sup>1</sup> Der Schallenergiepegel entspricht dem Schallleistungspegel für Dauergeräusche. Im Vergleich zu Schalldruckpegeln in einem Referenzabstand von einem Meter weist der Schallenergiepegel 11 dB höhere Pegel auf.

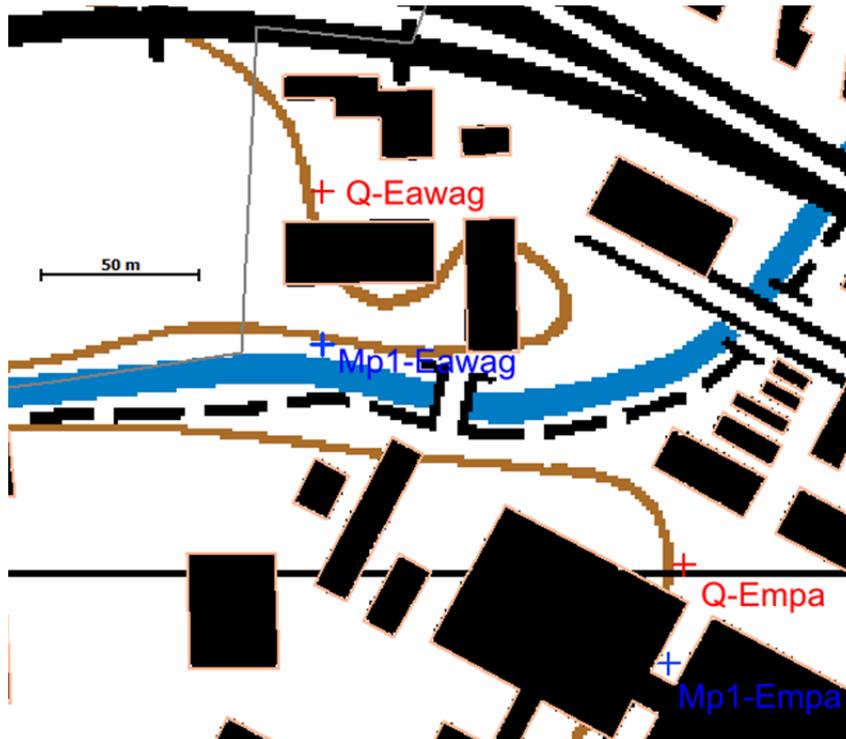


Abbildung 6: Messsituation EMPA / EAWAG Dübendorf gemäss Modellierung

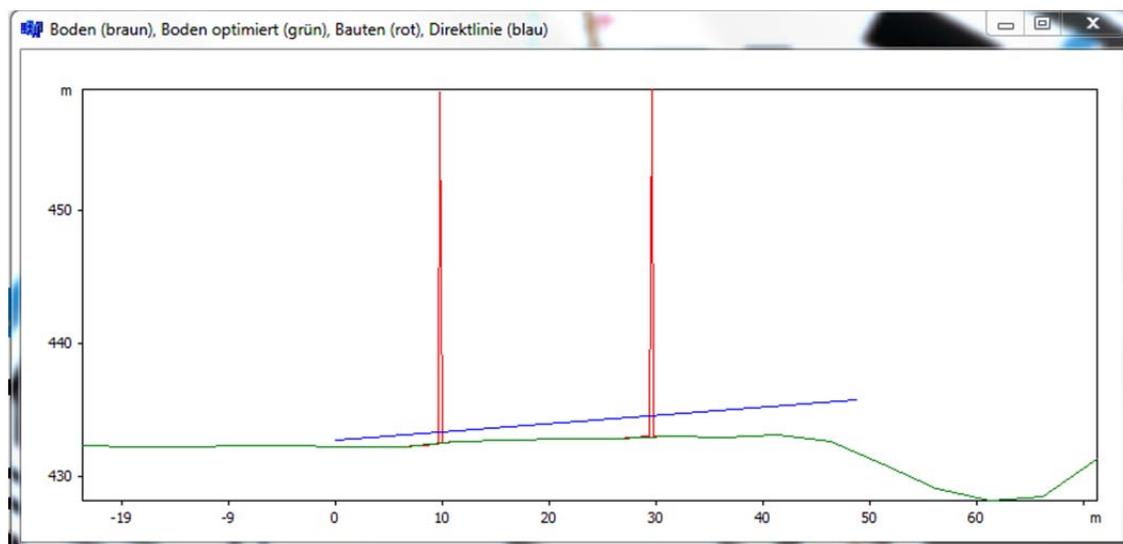


Abbildung 7: EAWAG: Schnitt Quelle – Messpunkt 1 hoch (4 m ü.G.).

### 5.1.2 Resultate

Bei kurzen Ausbreitungsdistanzen wie hier mit maximal 49 m können Meteeffekte vernachlässigt werden. Deshalb wurden die Berechnungen ohne Berücksichtigung der Meteorologie gemacht.

Die Übereinstimmung im A-Pegel fällt bei den Messungen am Standort EMPA gut aus, die mittlere Abweichung zwischen Lautsprechermessungen resp. Signalpistolenmessungen und Berechnungen beträgt 1.7 dB(A) resp. 1.1 dB(A).

Die Messpunkte der Messung EAWAG sind stark abgeschirmt, weshalb der Grundgeräuschpegel dominant wird. Bei den Messungen an der EAWAG beträgt die mittlere Abweichung - 4.3 dB(A) bei den Lautsprechermessungen und - 7.3 dB(A) bei den Signalpistolenmessungen.

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
EMPA Lautsprechermessungen	1.7 dB(A)	0.7 dB(A)	1.9 dB(A)	2.2 dB(A)
EMPA Signalpistolenmessungen	1.1 dB(A)	0.1 dB(A)	1.1 dB(A)	1.1 dB(A)
EAWAG Lautsprechermessungen	- 4.3 dB(A)	0.5 dB(A)	4.3 dB(A)	- 4.7 dB(A)
EAWAG Signalpistolenmessungen	- 7.3 dB(A)	0.5 dB(A)	7.3 dB(A)	- 7.7 dB(A)

In der Abbildung 8 sind die A-bewerteten Immissionspegel der Signalpistolenmessungen an der EMPA und EAWAG grafisch dargestellt.

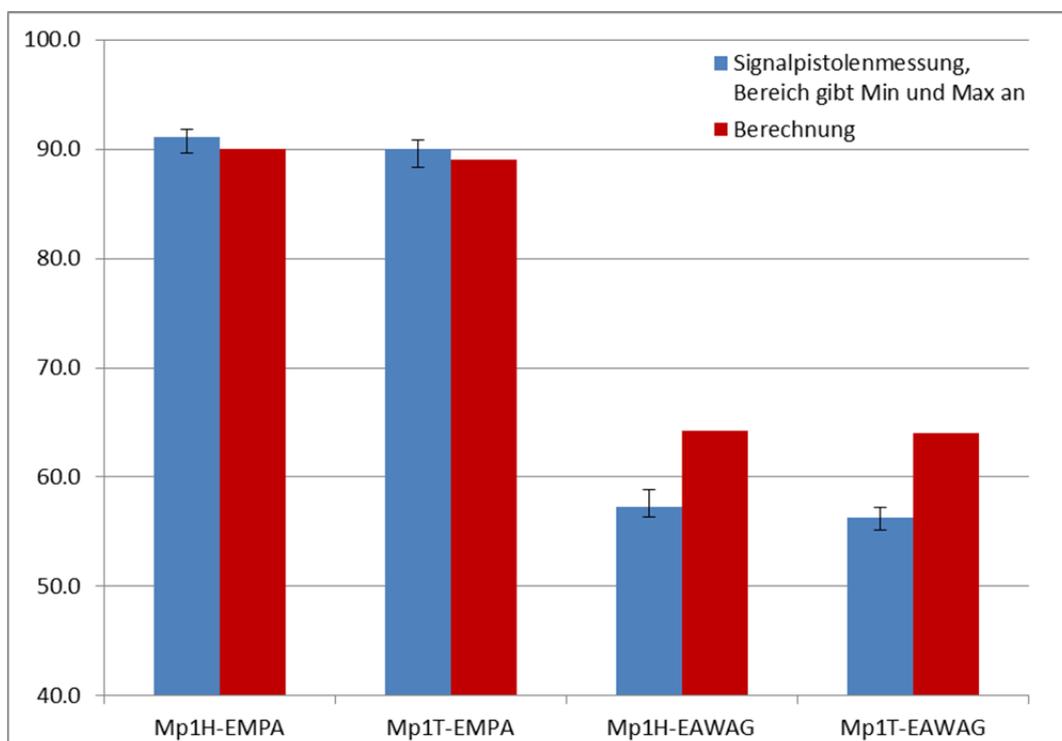


Abbildung 8: Immissionspegel an den Messpunkten EMPA (blau: Signalpistolenmessung, rot: Berechnung sonARMS V2.0 Modus Reflect, ohne Meteo).

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel der Messung EMPA. Das Modell prognostiziert den spektralen Verlauf mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Bei den Signalpistolenmessungen (Abbildung 10) sind die grösseren Abweichungen bei 63 Hz vermutlich auf den relevanten Einfluss des Grundgeräuschs zurückzuführen, da hier keine Grundgeräuschkorrektur vorgenommen wurde.

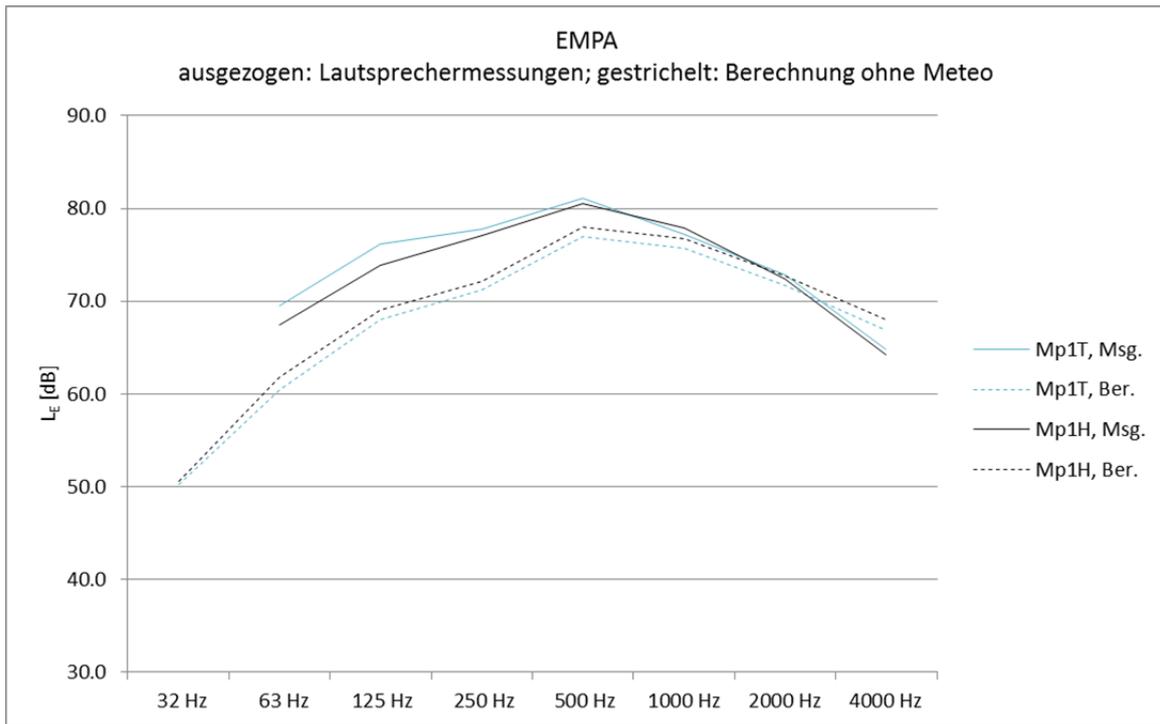


Abbildung 9: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen an der EMPA. Ausgezogene Linien: Messungen, Gestrichelt: Berechnungen sonARMS V2.0 Modus Reflect, ohne Meteo

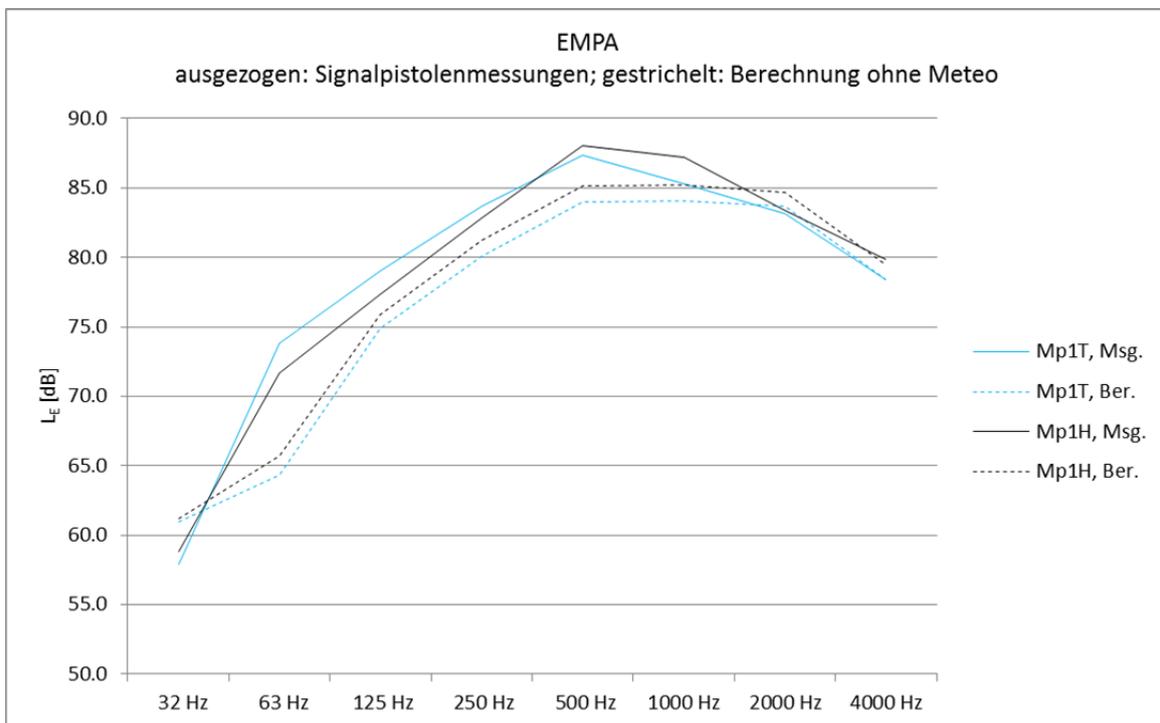


Abbildung 10: Terzbandspektren der Signalpistolenmessungen an der EMPA. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen sonARMS V2.0 Modus Reflect, ohne Meteo.

Die Abbildung 11 zeigt die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel der Lautsprechermessungen EAWAG. Der vom Modell prognostizierte spektrale Verlauf in einem Bereich von 1000 bis 4000 Hz überschätzt die Messungen um bis zu ca. 8 dB. Dies ist auf die Limitierung der Hinderniswirkung zurückzuführen (siehe Erklärungen zu Abbildung 12).

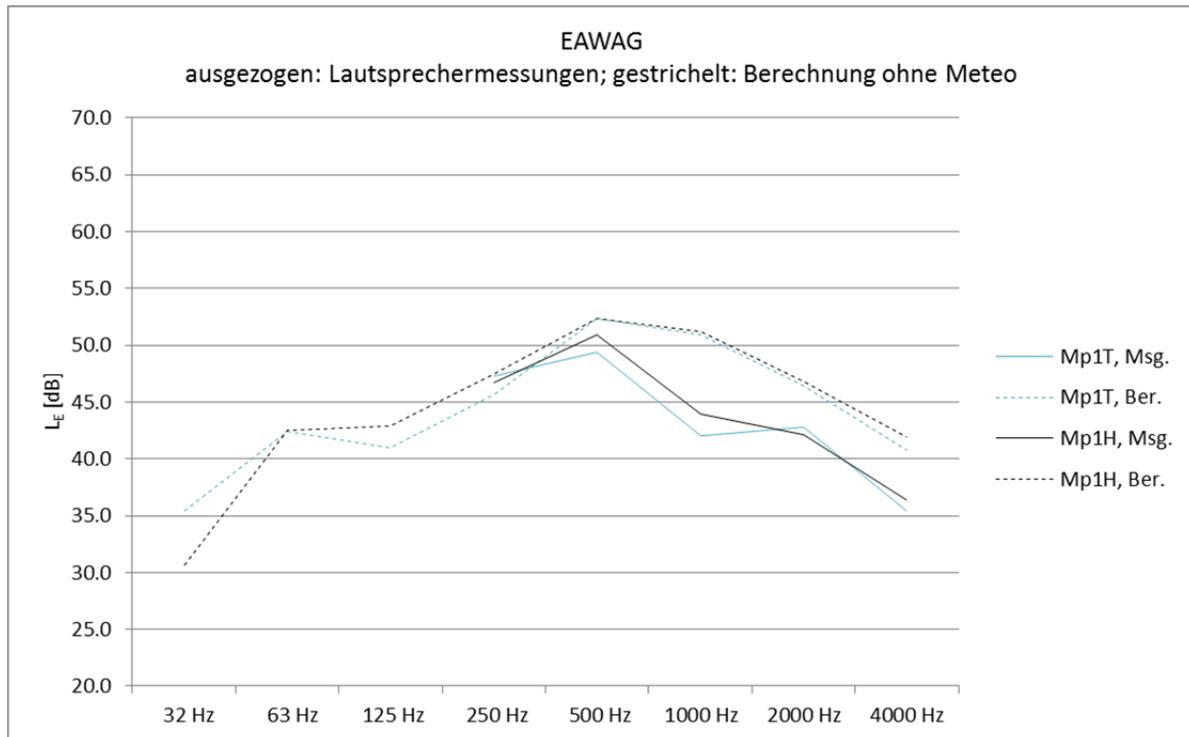


Abbildung 11: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen an der EAWAG. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen sonARMS V2.0 Modus Reflect, ohne Meteo.

Wie der Abbildung 12 entnommen werden kann, überschätzen die Berechnungen die Messpegel der Signalpistolenmessungen deutlich (bis 8.6 dB bei 1000 Hz). Dies ist auf die Limitierung der Hinderniswirkung auf maximal 25 dB zurückzuführen. Vergleichsrechnungen mit einer auf 40 dB angehobene Limitierung der Hinderniswirkung ergeben deutlich bessere Resultate (1.4 dB Abweichung bei 1000 Hz). Gleichwohl wird empfohlen die Limitierung der Hinderniswirkung auf 25 dB zu belassen. Der Berechnungsalgorithmus berücksichtigt die Beugung an Kanten. Bei grossen Ausbreitungsdistanzen wird die Hinderniswirkung jedoch durch Streuung reduziert, was im Modell nicht abgebildet wird.

Die Abweichungen sind somit nicht ein Modellfehler sondern die Folge einer – in diesem Fall – zu konservativen Parametersetzung.

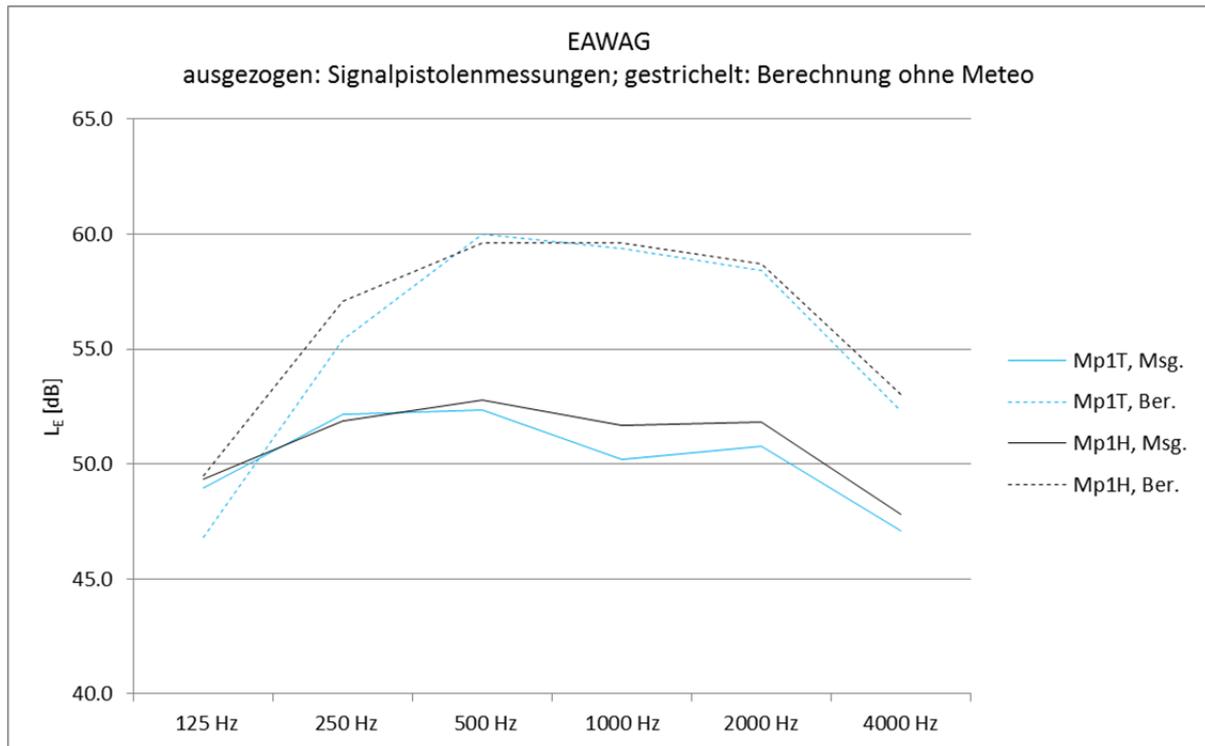


Abbildung 12: Terzbandspektren der Signalpistolenmessungen an der EAWAG. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen sonARMS V2.0 Modus Reflect, ohne Meteo.

## 5.2 Wohnquartier, Schwamendingen

Im Gebiet Probstei in Schwamendingen (ZH) wurden Messungen in einer realen Wohnüberbauung (zweigeschossige Wohnzone W2) gemacht. Um die Anwohner möglichst von Lärmimmissionen zu verschonen wurden die Messungen am äussersten Haus durchgeführt.

### 5.2.1 Angaben zu Messungen

Datum, Uhrzeit:	22. März 2013, 10 – 11 Uhr
Wetter:	Leichter Südostwind 1 – 2 m/s; trocken, sonnig; 9 – 10 °C (Temperatur-/Feuchtefühler bei Messpunkten 1 und 2 bodennah)
Quellen:	Lautsprecher Giotto und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe; 10 m von Haus entfernt
Ausbreitungsdistanzen:	ca. 45 und 71 m (24 und 50 m von Haus entfernt)
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	leicht abfallend
Untergrund:	mehrheitlich Gras
Bebauung:	W2, Gebäudehöhe 9.6 m
Bemerkungen:	Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

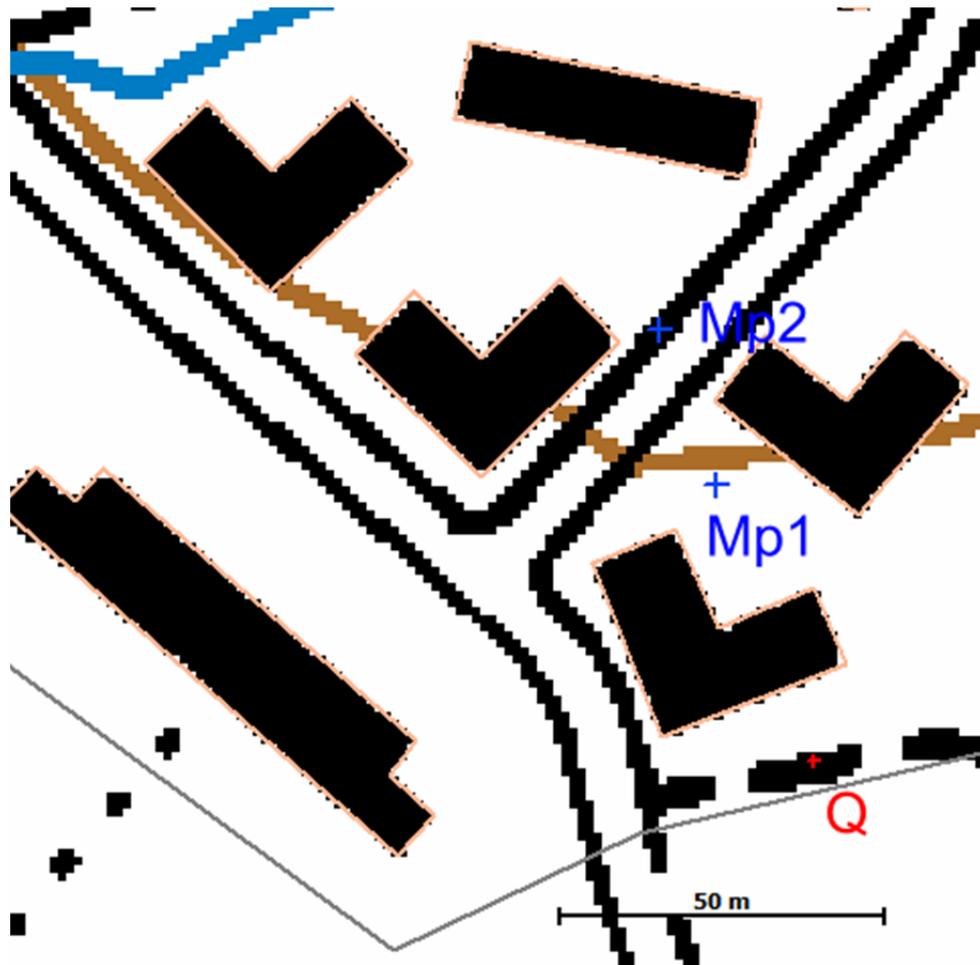


Abbildung 13: Messsituation Probstei Schwamendingen gemäss Modellierung

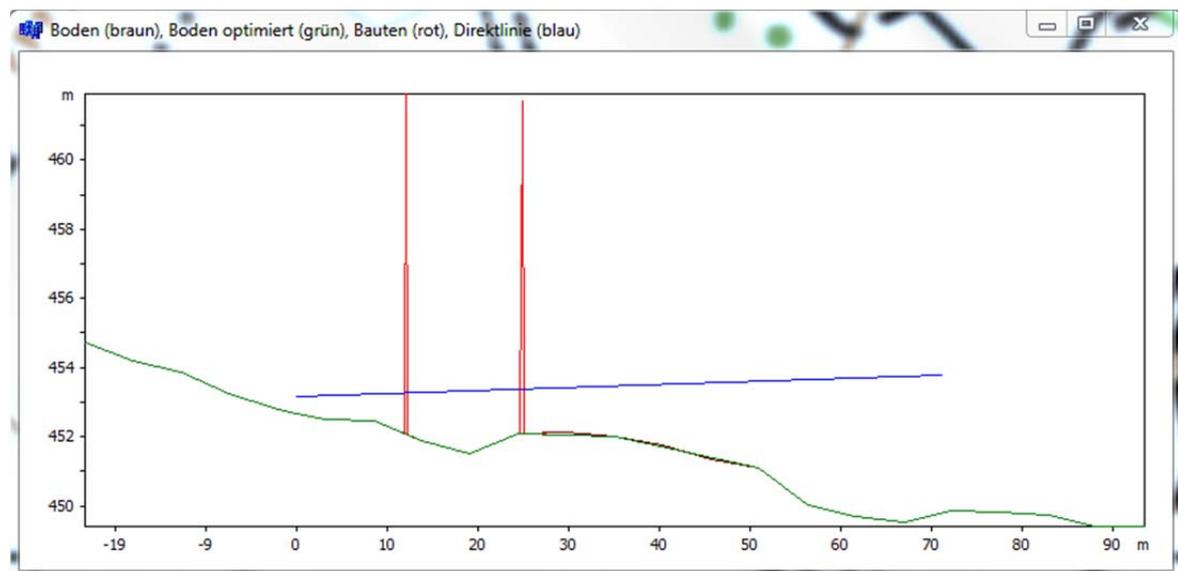


Abbildung 14: Probstei Schwamendingen: Schnitt Quelle – Messpunkt 2 hoch (4 m ü.G.).



Abbildung 15: Quelle und Wohnhaus (Hindernis) in Schwamendingen, Blick Richtung Westen



Abbildung 16: Messpunkt 1 (links) und Messpunkt 2 (rechts), Blick Richtung Quelle resp. Süd-Südost

### 5.2.2 Resultate

Bei kurzen Ausbreitungsdistanzen wie hier mit maximal ca. 70 m können Meteeffekte vernachlässigt werden. Deshalb wurden die Berechnungen ohne Berücksichtigung der Meteorologie gemacht. Bei den Messungen im Wohnquartier in Schwamendingen stimmen die Signalpistolenmessungen besser mit den Berechnungen überein als die Lautsprechermessungen (siehe folgende Tabelle). Es werden die Resultate beider Messungen gezeigt.

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Schwamendingen, Signalpistolenmessungen	- 1.0 dB(A)	0.7 dB(A)	1.2 dB(A)	- 2.0 dB(A)
Schwamendingen, Lautsprechermessungen	2.6 dB(A)	1.5 dB(A)	3.0 dB(A)	4.7 dB(A)

### Signalpistolenmessungen

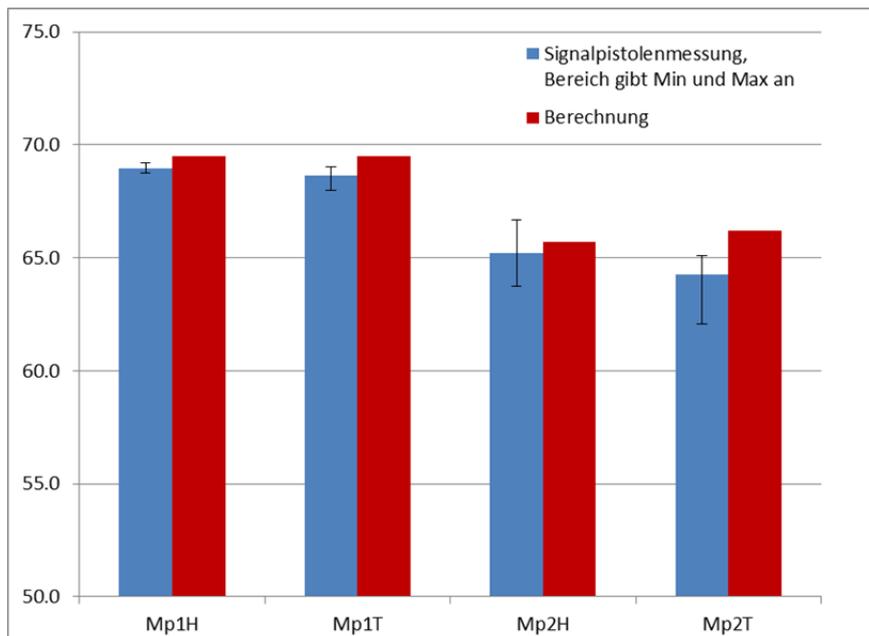


Abbildung 17: Probstei Schwamendingen: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Signalpistolenmessung, rot: Berechnung sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT.)

Die Übereinstimmung im A-Pegel fällt gut aus (Abbildung 17), die mittlere Abweichung zwischen Messungen und Berechnungen beträgt - 1.0 dB(A).

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Das Modell prognostiziert den spektralen Verlauf mehrheitlich in relativ guter Übereinstimmung mit den Messungen. Die grössten Abweichungen befinden sich bei den tieferen Frequenzen (32 und 63 Hz). Diese Abweichungen sind vermutlich auf den relevanten Einfluss des Grundgeräuschs resp. Störgeräusche zurückzuführen.

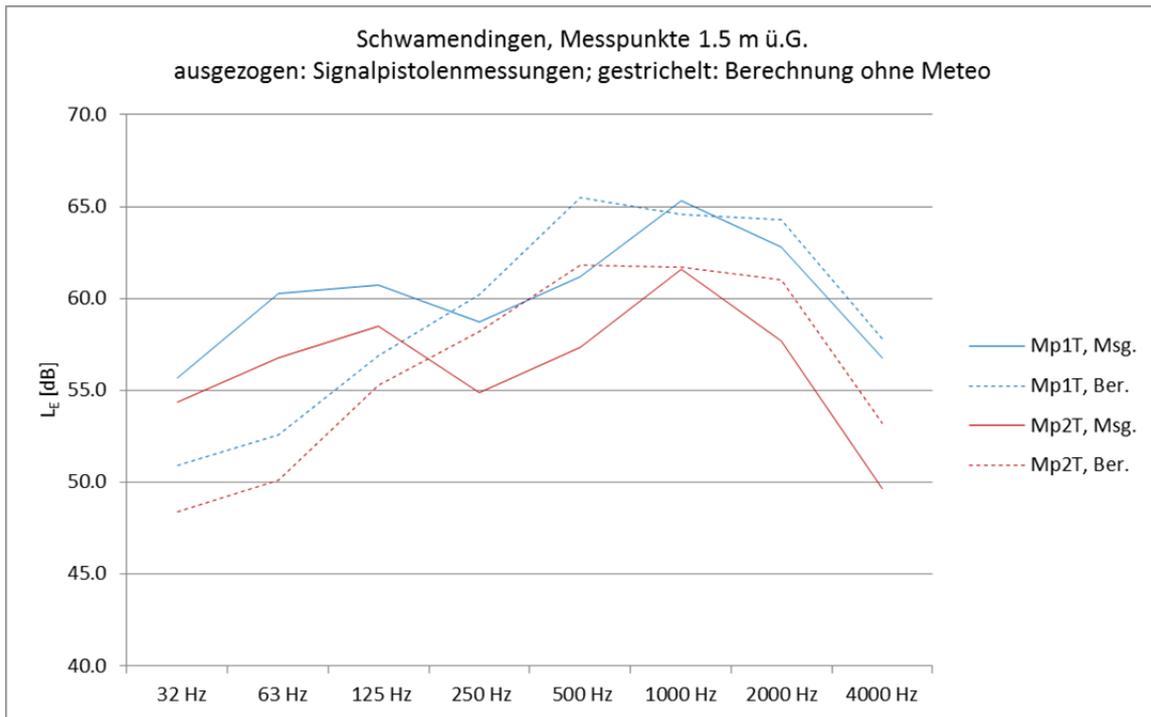


Abbildung 18: Terzbandspektren der Signalpistolenmessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT.

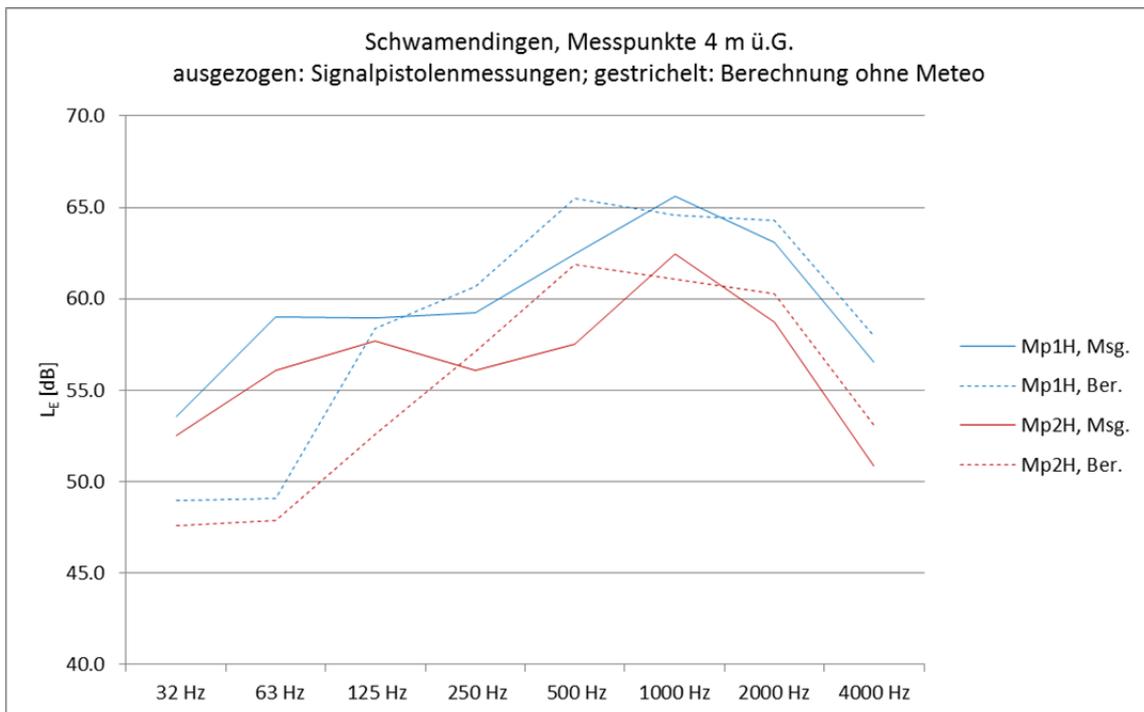


Abbildung 19: Terzbandspektren der Signalpistolenmessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT.

**Lautsprechermessungen**

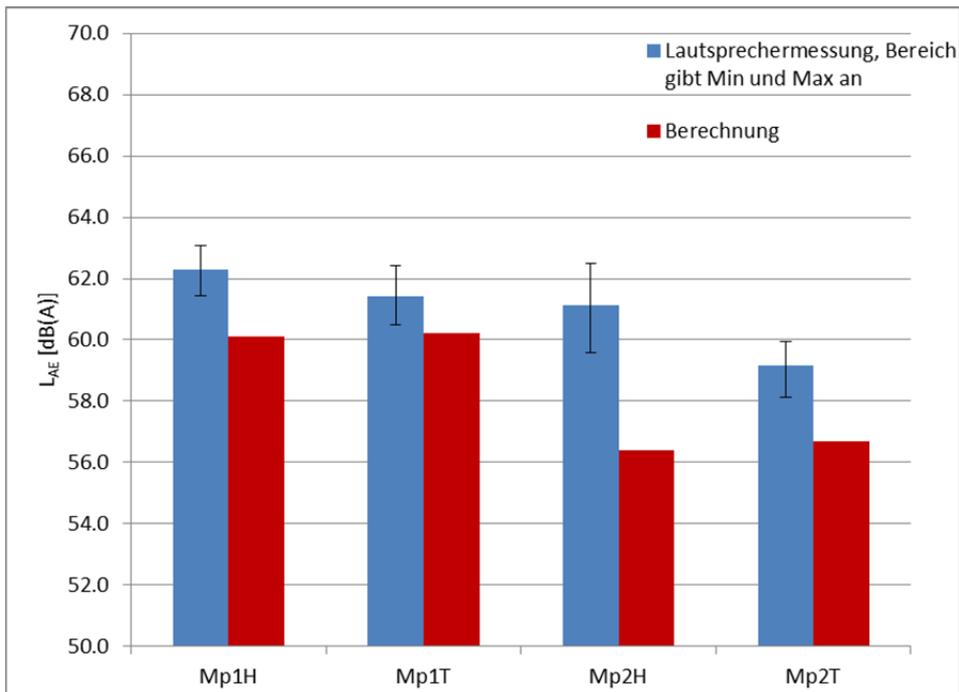


Abbildung 20: Probstei Schwamendingen: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT).

Die mittlere Abweichung zwischen Lautsprechermessungen und Berechnungen beträgt im A-Pegel 2.6 dB(A) (Abbildung 20). Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Tendenziell unterschätzt das Modell die Pegel im Vergleich zu den Messungen um durchschnittlich ca. 3 dB.

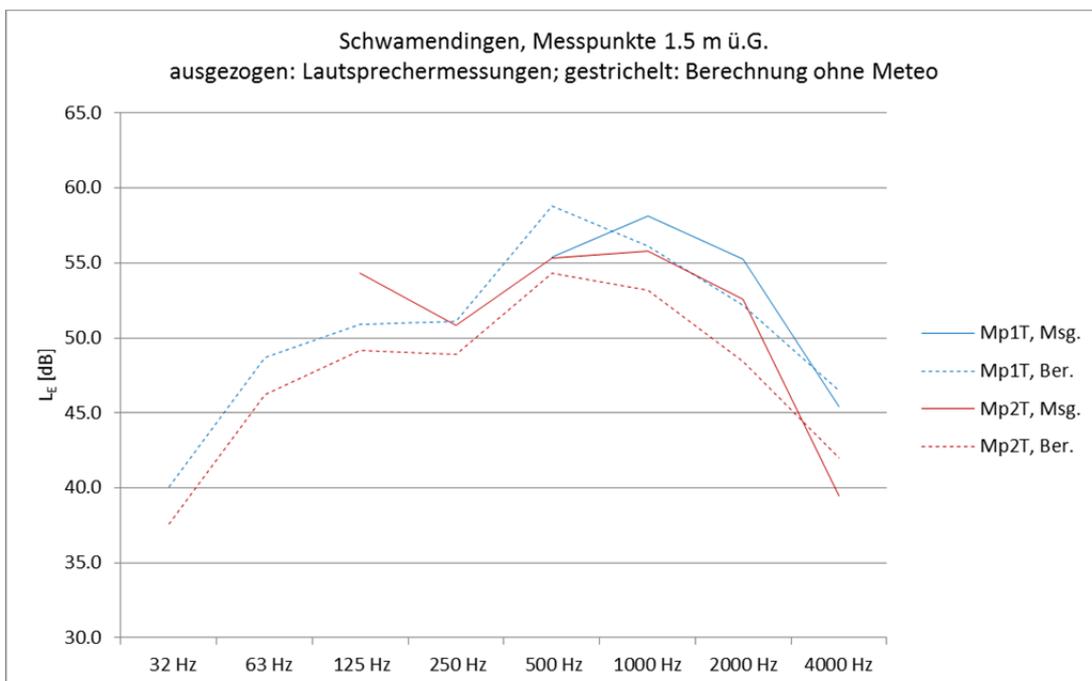


Abbildung 21: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT.

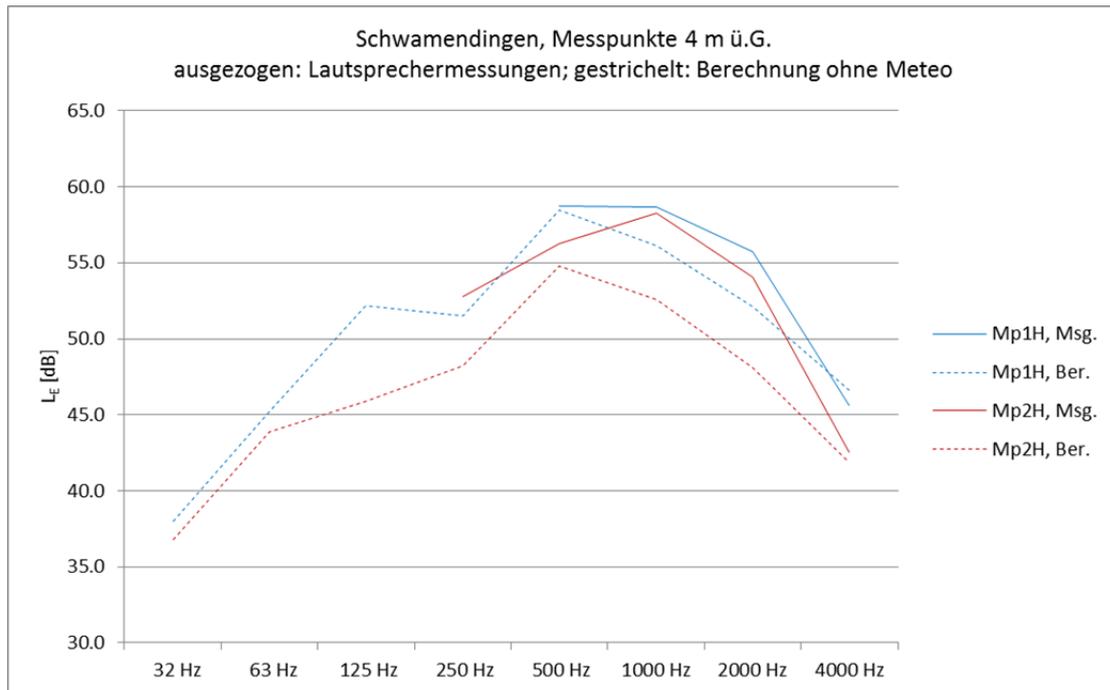


Abbildung 22: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonARMS V2.0 Modus BASIC und REFLECT.

### 5.3 Schiessstand Rohracher, Buchs ZH

Der Schiessstand Rohracher, Buchs ZH verfügt über eine ca. 36 m lange und 4.5 m hohe Lärmschutzwand. Das Ziel dieser Messungen ist es die Berechnung der Hinderniswirkung zu validieren.

#### 5.3.1 Angaben zu Messungen

Datum, Uhrzeit:	7. März 2013, ca. 14.00 – 15.00 Uhr
Wetter:	Teilweise leichter Südwest- bis Nordwestwind (1 – 2 m/s); trocken, sonnig mit dünnen Schleierwolken; 14°C (Temperatur-/Feuchtefühler nahe Quelle in ca. 1 m Höhe)
Quellen:	Lautsprecher Giotto und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe; 10 m von Lärmschutzwand entfernt
Ausbreitungsdistanzen:	20 und 40 m
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	leicht abfallend (ca. 1 m)
Untergrund:	Gras, Acker
Bemerkungen:	Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

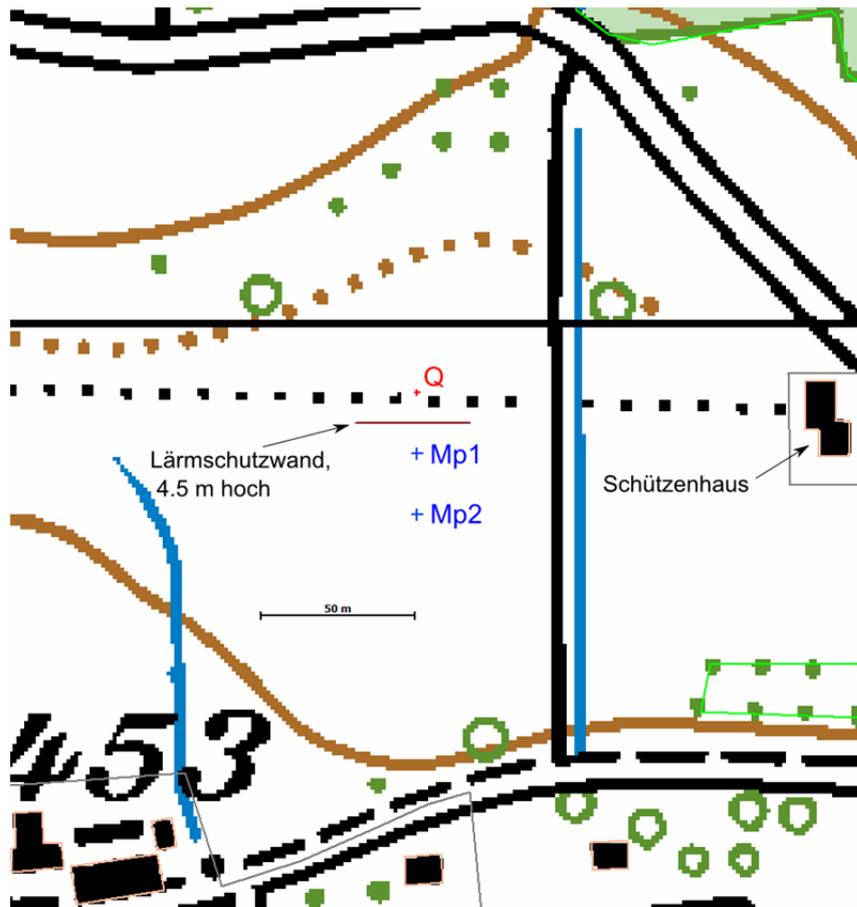


Abbildung 23: Messsituation Schiessstand Rohracher, Buchs ZH gemäss Modellierung (Q = Quelle, Mp = Messpunkt)



Abbildung 24: Quelle und Messpunkt 1 beim Schiessstand Rohracher in Buchs ZH, Blick Richtung Westen.

### 5.3.2 Resultate

Die Ausbreitungsdistanzen sind mit maximal 40 m kurz, weshalb die meteorologischen Effekte in den Berechnungen nicht berücksichtigt sind. Im Folgenden sind nur die Resultate der Lautsprechermessungen aufgezeigt. Die Resultate der Signalpistolenmessungen zeigen ein ähnliches Bild. Die Übereinstimmung im A-Pegel fällt gut aus, die mittlere Abweichung zwischen Lautsprechermessungen und Berechnungen beträgt 0.7 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Buchs, Lautsprechermessungen	0.7 dB(A)	0.8 dB(A)	1.1 dB(A)	1.7 dB(A)

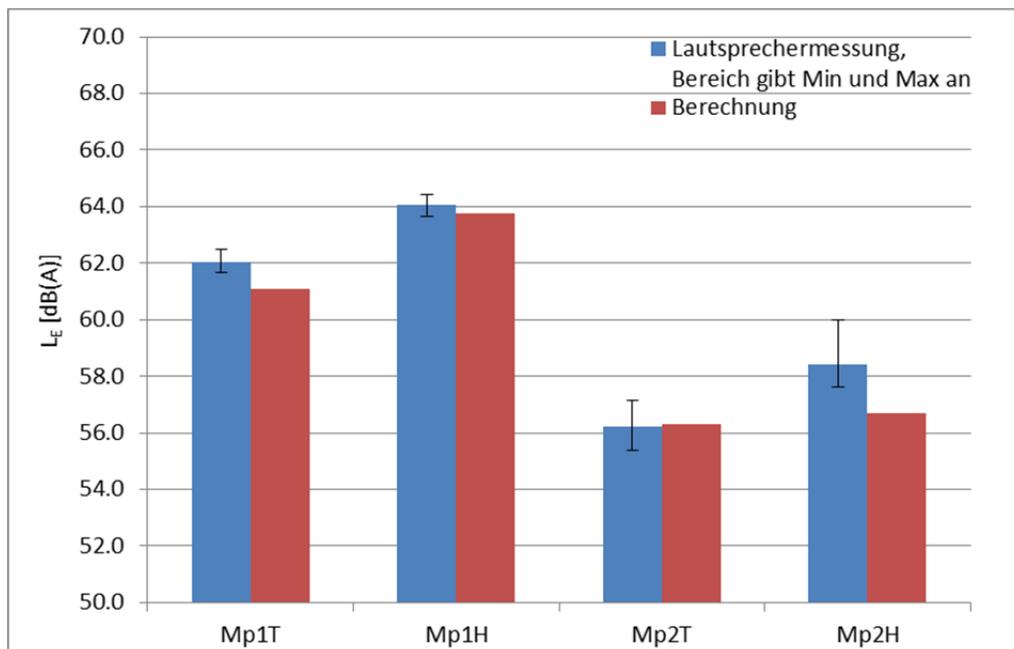


Abbildung 25: Buchs: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung mit sonRAIL V3.0)

Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Wie zu erkennen ist, prognostiziert das Modell den spektralen Verlauf mit Ausnahme einiger Ausreisser in relativ guter Übereinstimmung mit den Messungen.

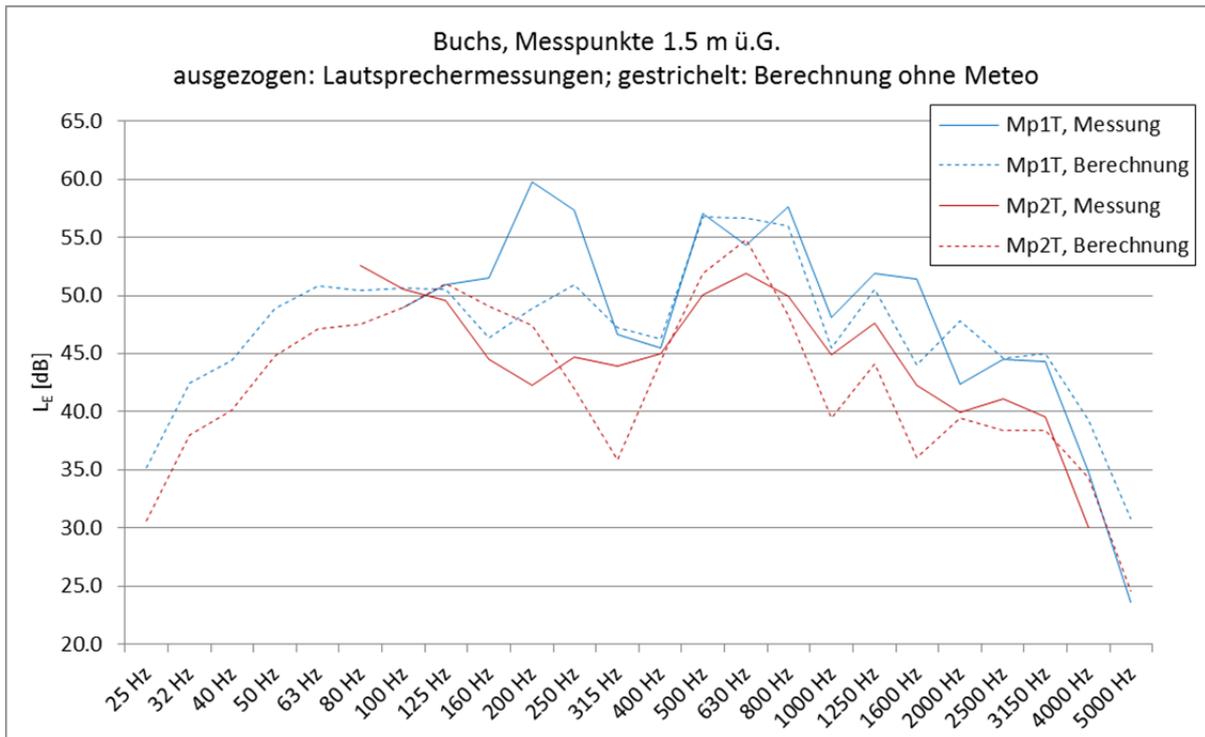


Abbildung 26: Terzbandspektrn der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 ohne Meteo.

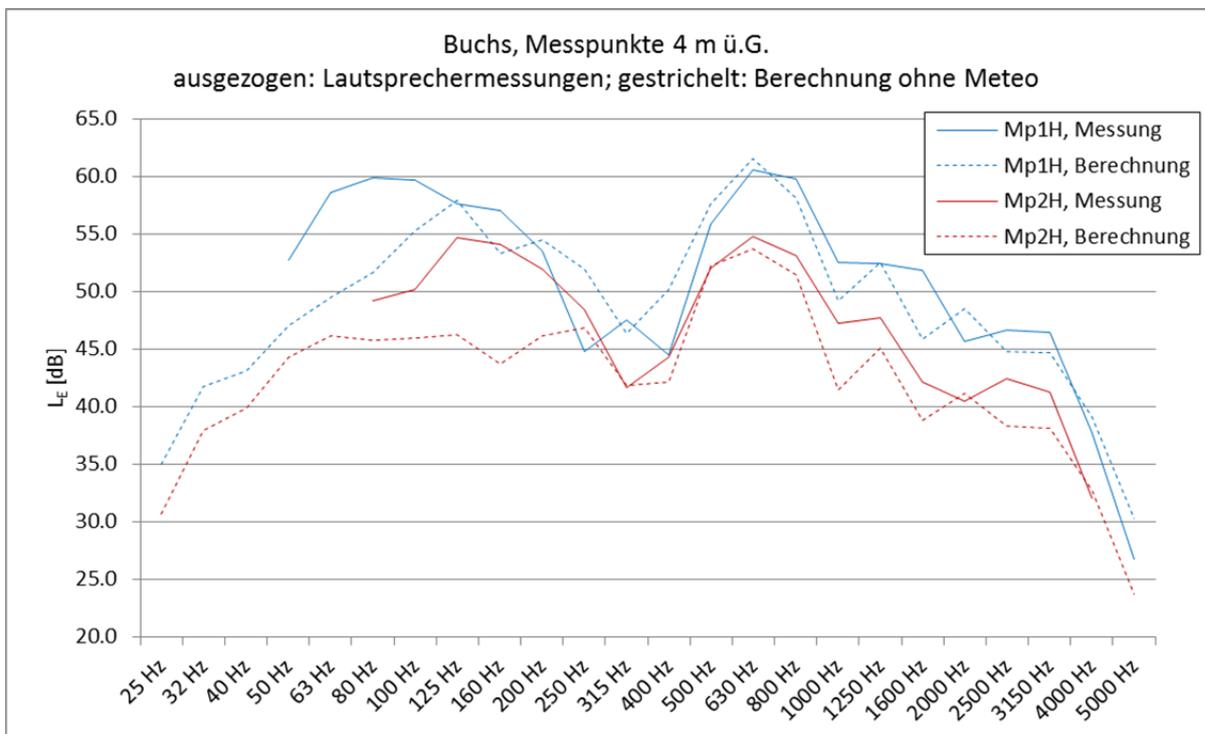


Abbildung 27: Terzbandspektrn der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 ohne Meteo.

## 5.4 Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden

Der Schiessstand Wiesengrund in Glattfelden verfügt über einen ca. 195 m langen, ca. 20 m breiten und ca. 4.5 m hohen Lärmschutzwall. Das Ziel der Messungen ist es die Berechnung der Hinderniswirkung zu validieren.

### 5.4.1 Angaben zu Messungen

Datum, Uhrzeit:	6. März 2013, ca. 14.00 – 15.00 Uhr
Wetter:	Windstill; trocken, bedeckt (Stratus); 13 °C (Temperatur-/Feuchtefühler nahe Quelle in ca. 1 m Höhe)
Quellen:	Lautsprecher Giotto und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe; 10 m von Wall entfernt
Ausbreitungsdistanzen:	40 und 50 m
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	Wall, ansonsten flach
Untergrund:	Gras, Acker, Feldweg
Bemerkungen:	Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

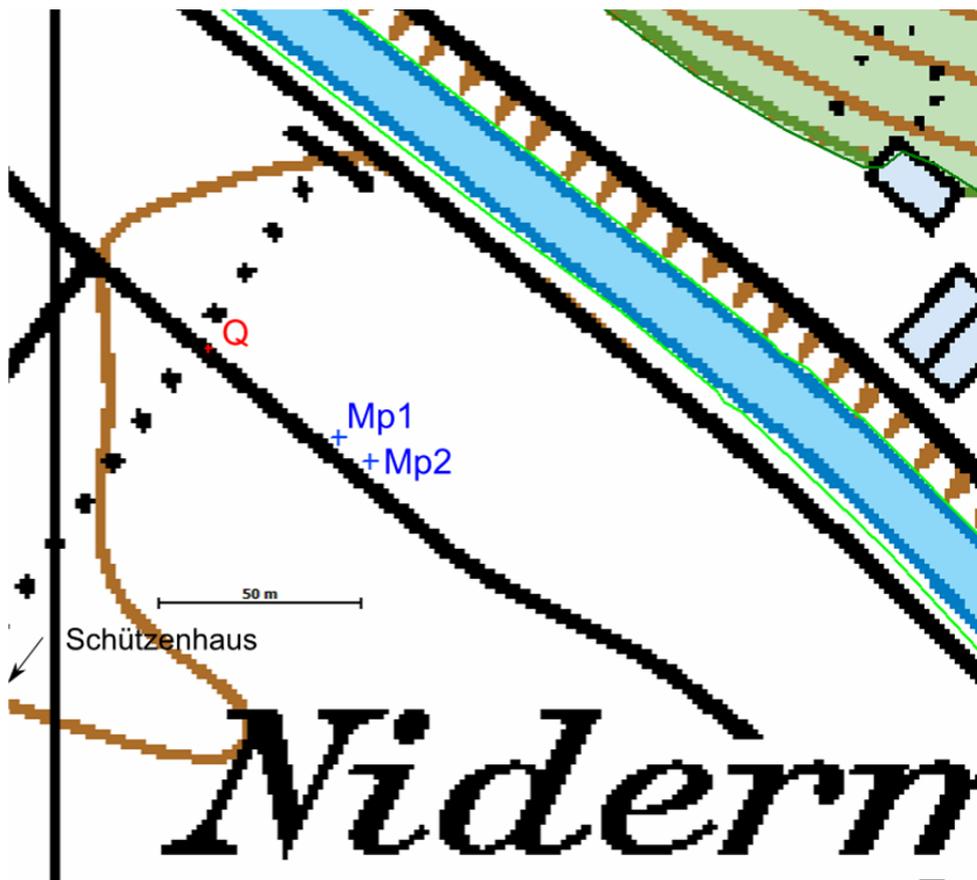


Abbildung 28: Messsituation Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden gemäss Modellierung (Q = Quelle, Mp = Messpunkt)

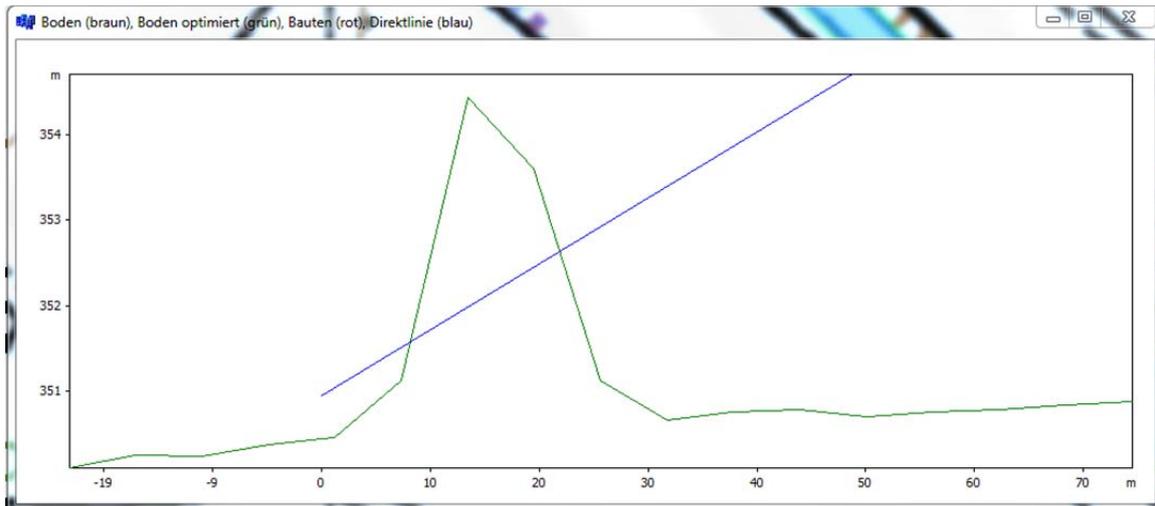


Abbildung 29: Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden: Schnitt Quelle – Messpunkt 2 hoch (4 m ü.G.).



Abbildung 30: Quelle beim Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden; Blick Richtung Nordnordost.



Abbildung 31: Messpunkt 1 beim Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden; Blick Richtung Südsüdwest.

### 5.4.2 Resultate

Die Ausbreitungsdistanzen sind mit maximal 50 m kurz, weshalb die meteorologischen Effekte in den Berechnungen nicht berücksichtigt sind. Im Folgenden sind nur die Resultate der Lautsprechermessungen aufgezeigt. Die Resultate der Signalpistolenmessungen zeigen ein ähnliches Bild, jedoch fällt der Vergleich mit den Berechnungen etwas schlechter aus.

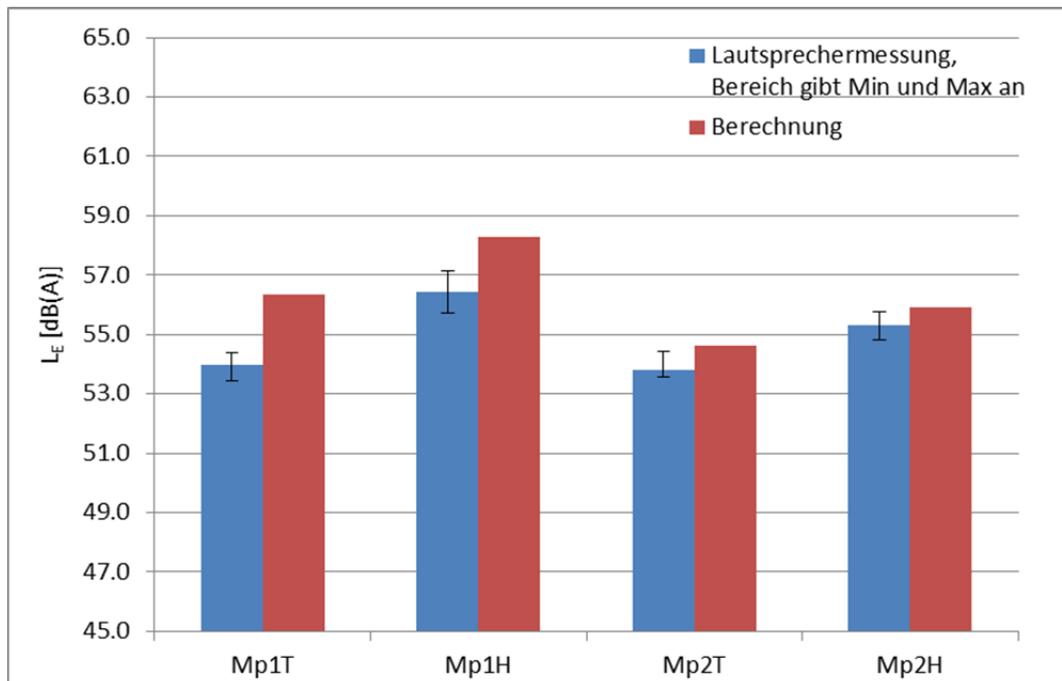


Abbildung 32: Glattfelden: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung mit sonRAIL V3.0 Modus Basic, ohne Meteo).

Wie der Abbildung 32 entnommen werden kann, fällt die Übereinstimmung im A-Pegel gut aus. Die mittlere Abweichung zwischen Berechnung und Messung beträgt - 1.4 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Glattfelden, Lautsprechermessung	- 1.4 dB(A)	0.8 dB(A)	1.6 dB(A)	- 2.3 dB(A)

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Bei den tieferen Frequenzen bis ca. 200 Hz liegen die prognostizierten Werte unter den Messwerten. Das Modell prognostiziert bei den Messpunkten auf 1.5 m über Grund einen Pegelabfall bei 400 Hz aufgrund des Bodeneffekts. Die Messungen zeigen diesen Pegelabfall etwas weniger stark und schon bei 250 resp. 315 Hz. Bei den oberen Messpunkten (4 m ü.G.) sind die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung etwas kleiner.

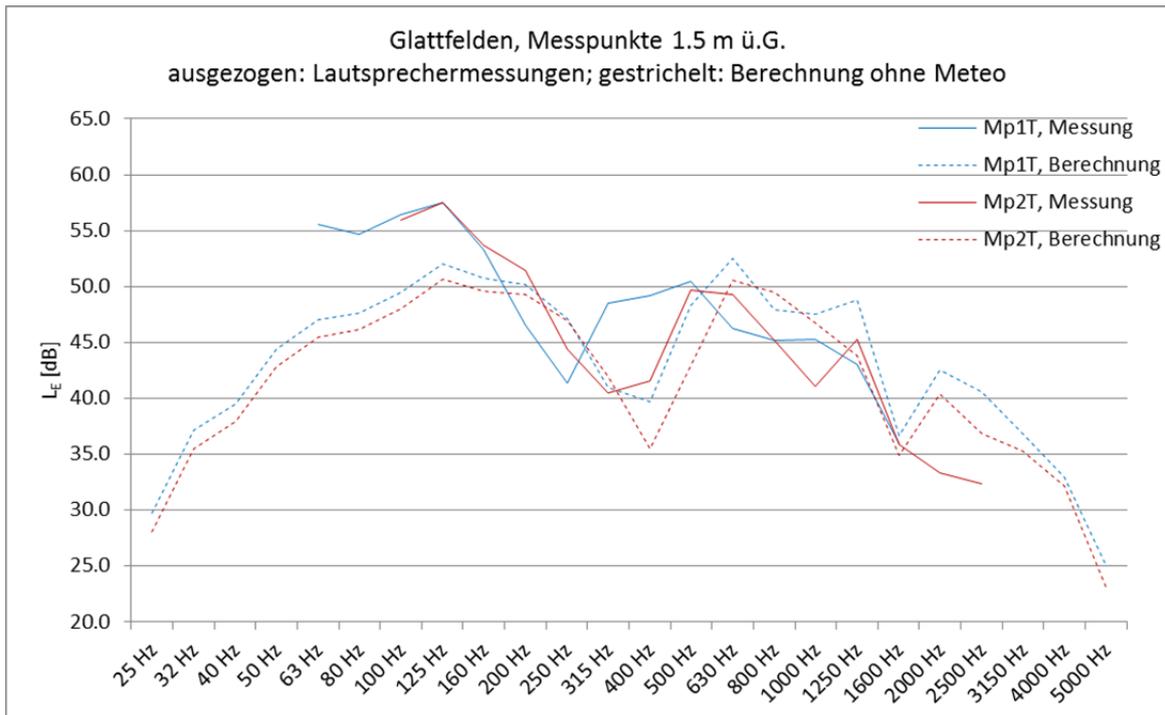


Abbildung 33: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 ohne Meteo.

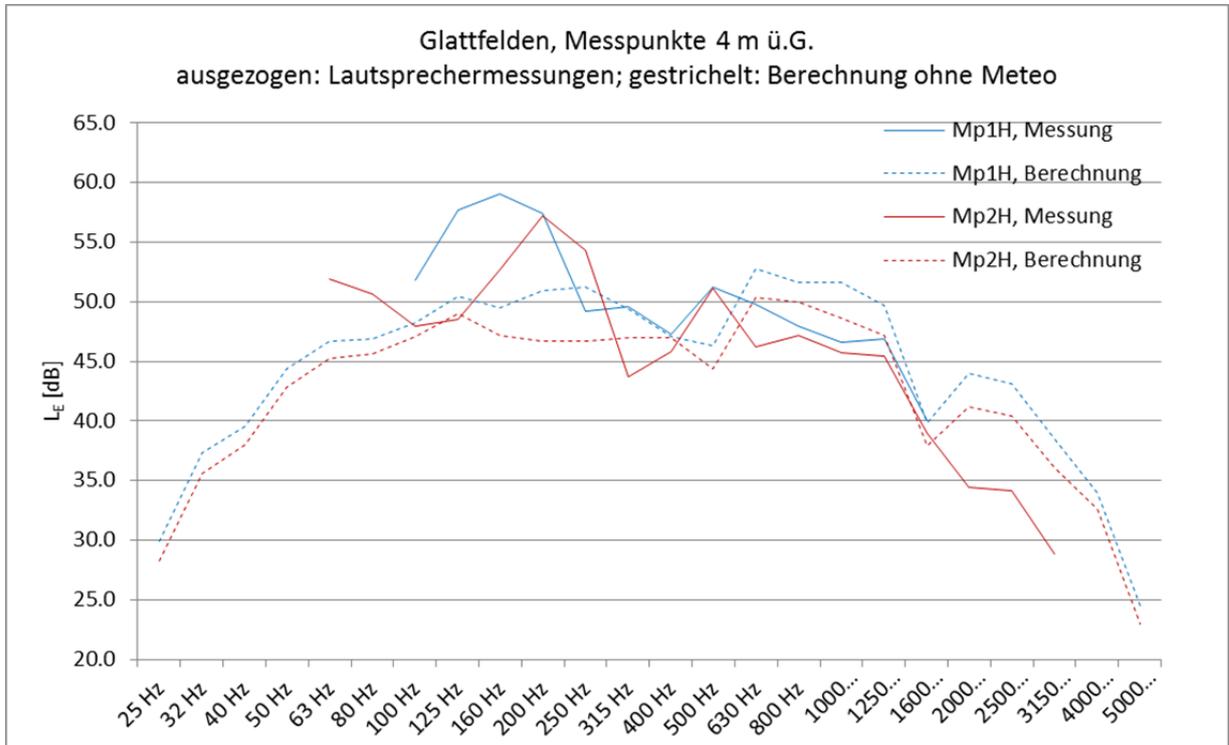


Abbildung 34: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 ohne Meteo.

## 5.5 Flugplatz Dübendorf

Auf dem Flugplatz Dübendorf wurden Messungen über hartem Untergrund (Piste), Grasland und bei gemischten Verhältnissen durchgeführt, mit dem Ziel den Einfluss des Bodeneffektes zu messen.

### 5.5.1 Angaben zu Messungen

Datum, Uhrzeit:	6. März 2013, ca. 9.30 bis 12.00 Uhr
Wetter:	Teilweise Windstill, zwischendurch leichter Nordwestwind (1 – 2 m/s auf ca. 2 m über Boden); trocken, zu Beginn Schleierwolken, dann sonnig; 8 – 14 °C (Temperatur-/Feuchtefühler nahe Quelle 1 (Messungen auf Piste) in ca. 1 m Höhe)
Quellen:	Lautsprecher Electrovoice Sx325 und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe
Ausbreitungsdistanzen:	30, 50, 100, 200 und 300 m
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	flach
Untergrund:	nur harter Untergrund (Piste), nur Grasland, gemischt: ca. 100 m harter Untergrund und 100 m Grasland (nur 1 Ausbreitungsdistanz: 200 m)
Bemerkungen:	Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

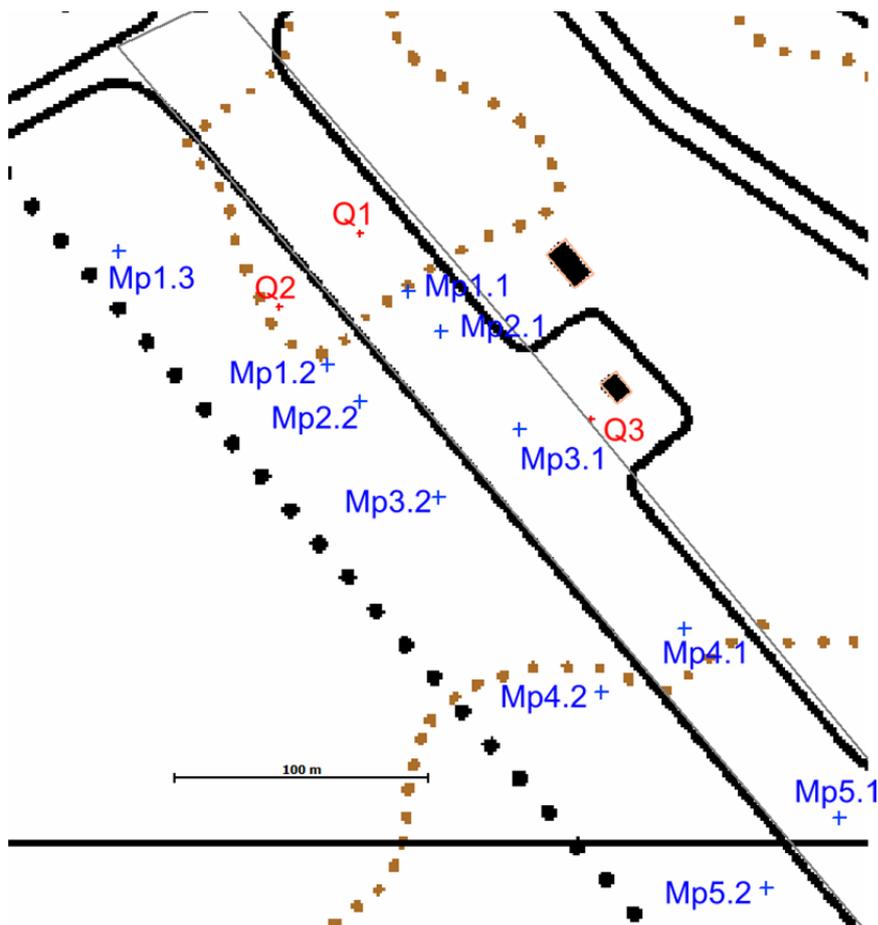


Abbildung 35: Messsituation Flugplatz Dübendorf gemäss Modellierung (Q = Quelle, Mp = Messpunkt)



Abbildung 36: Blick von der Quelle in Richtung Messpunkt 1.1 (Piste), Blick Richtung Südost



Abbildung 37: Messpunkt 5.1 (Piste), Blick Richtung Quelle (Nordwest)



Abbildung 38: Messpunkt 5.2 (Gras), Blick Richtung Quelle (Nordwest)

## 5.5.2 Resultate

Im Folgenden sind nur die Resultate der Lautsprechermessungen aufgezeigt. Die Resultate der Signalpistolenmessungen zeigen ein ähnliches Bild.

### Messungen Piste

Während den Messungen auf der Piste war in Bodennähe kein Wind zu spüren resp. zu messen. Es wird angenommen, dass in 10 m Höhe ein leichter Wind geweht hat. Da dieser nicht gemessen wurde und deshalb nicht klar ist wie stark dieser genau war, wurden die Berechnungen für beide am ehesten zutreffenden Meteosituationen L1 (starke Einstrahlung, Wind in 10 m Höhe 1 – 2 m/s) und L2 (starke Einstrahlung, Wind in 10 m Höhe 2 – 3 m/s) gemacht.

Bei der Berechnung mit der Meteosituation L2 fällt die Übereinstimmung im A-Pegel gut aus, die mittlere Abweichung beträgt 0.9 dB(A) (siehe Abbildung 39). Mit der Meteosituation L1 beträgt die mittlere Abweichung zwischen Berechnung und Messung im A-Pegel 2.8 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Flugplatz Piste, mit Meteo L1	2.8 dB(A)	2.4 dB(A)	3.6 dB(A)	5.9 dB(A)
<b>Flugplatz Piste, mit Meteo L2</b>	<b>0.9 dB(A)</b>	<b>1.0 dB(A)</b>	<b>1.3 dB(A)</b>	<b>2.9 dB(A)</b>

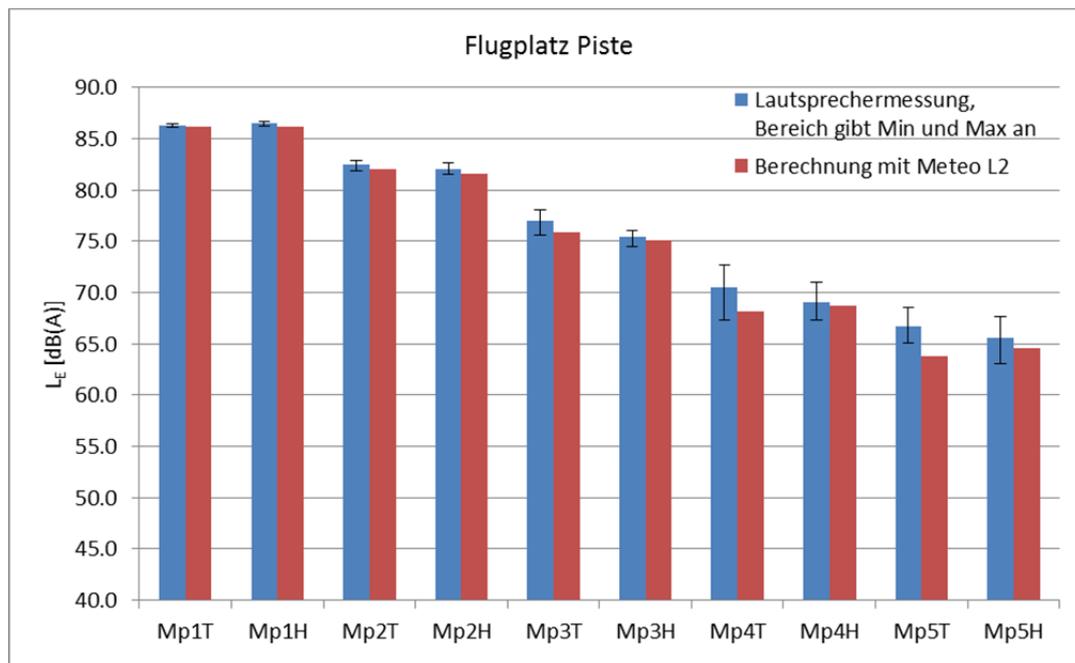


Abbildung 39: Flugplatz Piste: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung sonRAIL V3.0)

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel mit der Meteosituation L2. Wie zu erkennen ist, prognostiziert das Modell den spektralen Verlauf in einem Bereich von 40 bis 5000 Hz mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Im Bereich von 1000 bis 1250 Hz zeigt das Modell einen kleinen Einbruch der Pegel. Hier unterschätzt das Modell die Pegel um bis zu ca. 9 dB beim Messpunkt 5 in 300 m Distanz.

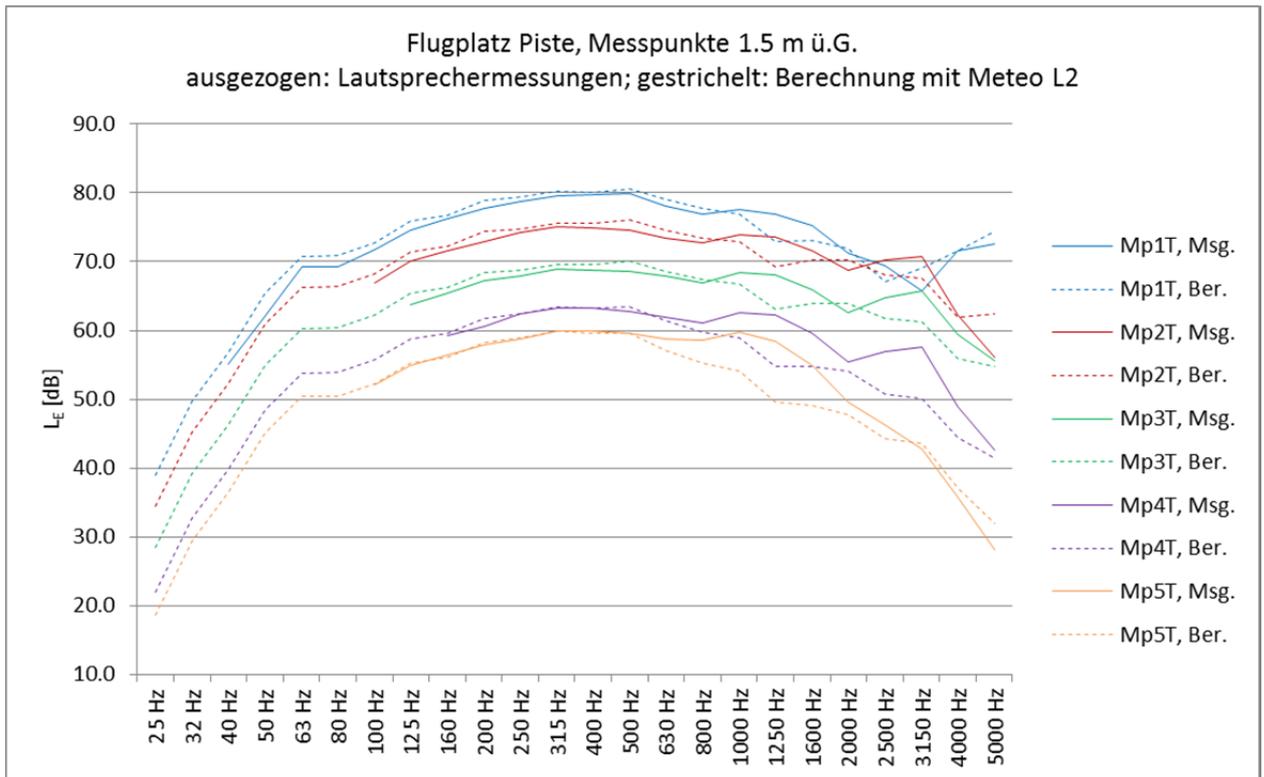


Abbildung 40: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation L2.

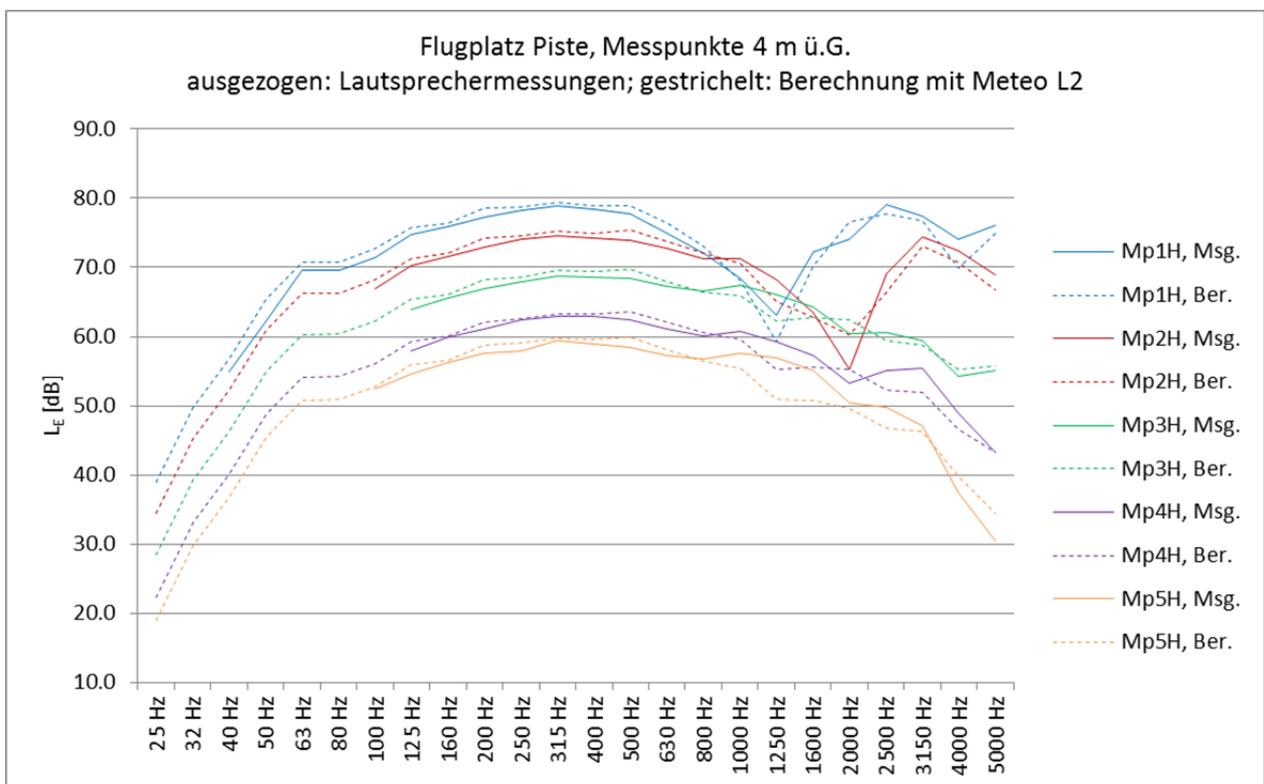


Abbildung 41: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation L2.

## Messungen Gras

Während den Messungen über Gras (parallel zur Piste) waren bodennah auf 1.5 bis 2 m Höhe zwischendurch einzelne leichte und kurze Windstösse auszumachen. Wie genau die Windverhältnisse während den einzelnen Messungen auf 10 m Höhe waren ist unklar, weshalb die Berechnungen wiederum für die beiden am ehesten zutreffenden Meteosituationen L1 und L2 gemacht wurden. Berechnungen mit der Meteosituation L1 ergeben dabei die besseren Übereinstimmungen. In der Abbildung 42 sind die A-bewerteten Immissionspegel der Berechnungen mit der Meteosituation L1 (1 – 2 m/s Wind) im Vergleich zu den Messungen dargestellt. Die mittlere Abweichung zwischen Messungen und Berechnung mit der Meteosituation L1 beträgt im A-Pegel -1.9 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
<b>Flugplatz Gras, Meteo L1</b>	<b>- 1.9 dB(A)</b>	<b>3.0 dB(A)</b>	<b>3.6 dB(A)</b>	<b>- 7.5 dB(A)</b>
Flugplatz Gras, Meteo L2	- 4.0 dB(A)	5.1 dB(A)	6.5 dB(A)	- 11.9 dB(A)

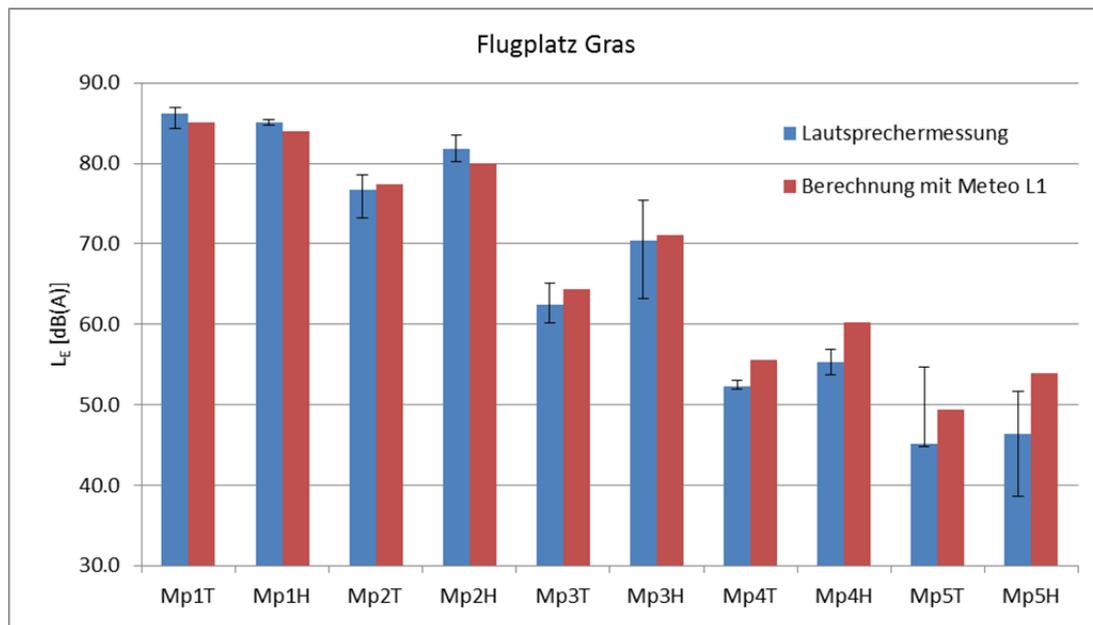


Abbildung 42: Flugplatz Gras: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung sonRAIL V3.0)

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel mit der Meteosituation L1. Wie zu erkennen ist, prognostiziert das Modell den spektralen Verlauf in einem Bereich von 40 bis 315 Hz mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Zwischen 400 und 800 Hz sinken die Messpegel aufgrund des Bodeneffekts (Interferenzeffekt) ab, was vom Modell weniger stark prognostiziert wird. Zwischen 1000 bis 3150 Hz unterschätzen die Berechnungen hingegen die Messungen teilweise. Bei höheren Frequenzen von 4 bis 5 kHz liegen die prognostizierten Pegel bei grösseren Ausbreitungsdistanzen (200 und 300 m) etwas höher als die Messpegel. Die Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen dürften im mittleren Frequenzbereich primär auf Unsicherheiten beim Bodeneffekt und im höheren Frequenzbereich auf Ungenauigkeiten bei der Abbildung des Wetters zurückzuführen sein.

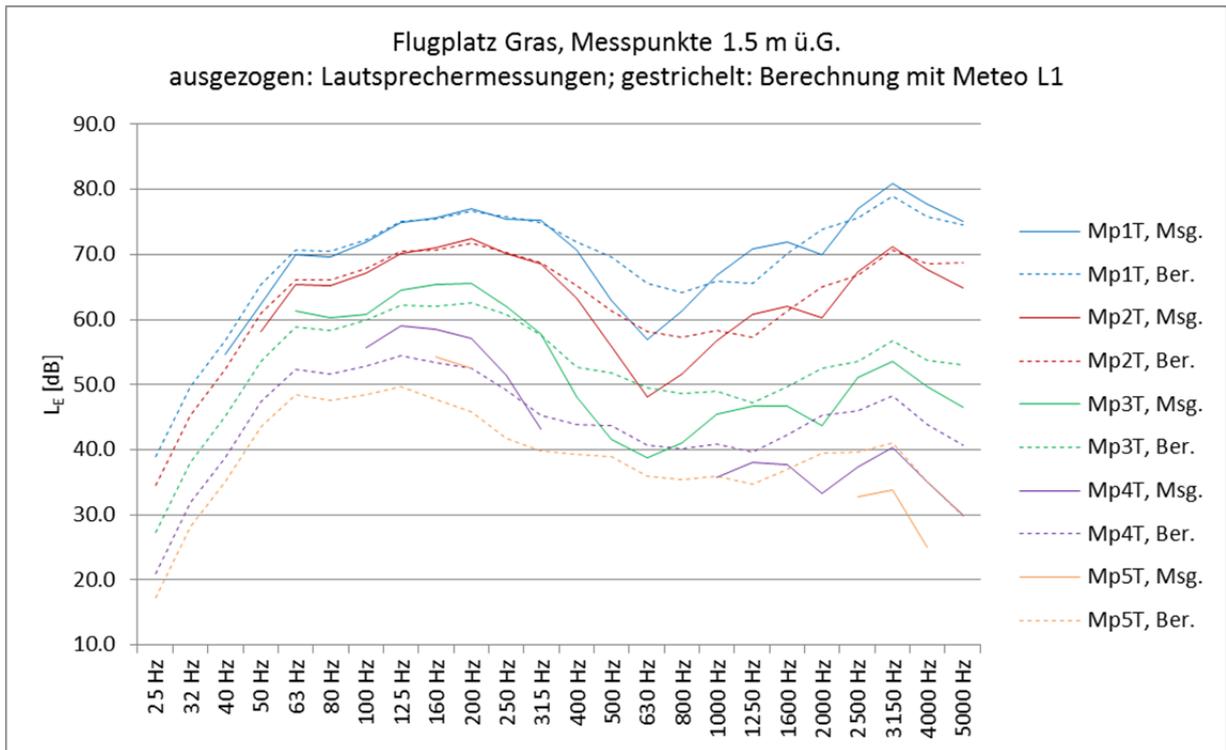


Abbildung 43: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation L1.

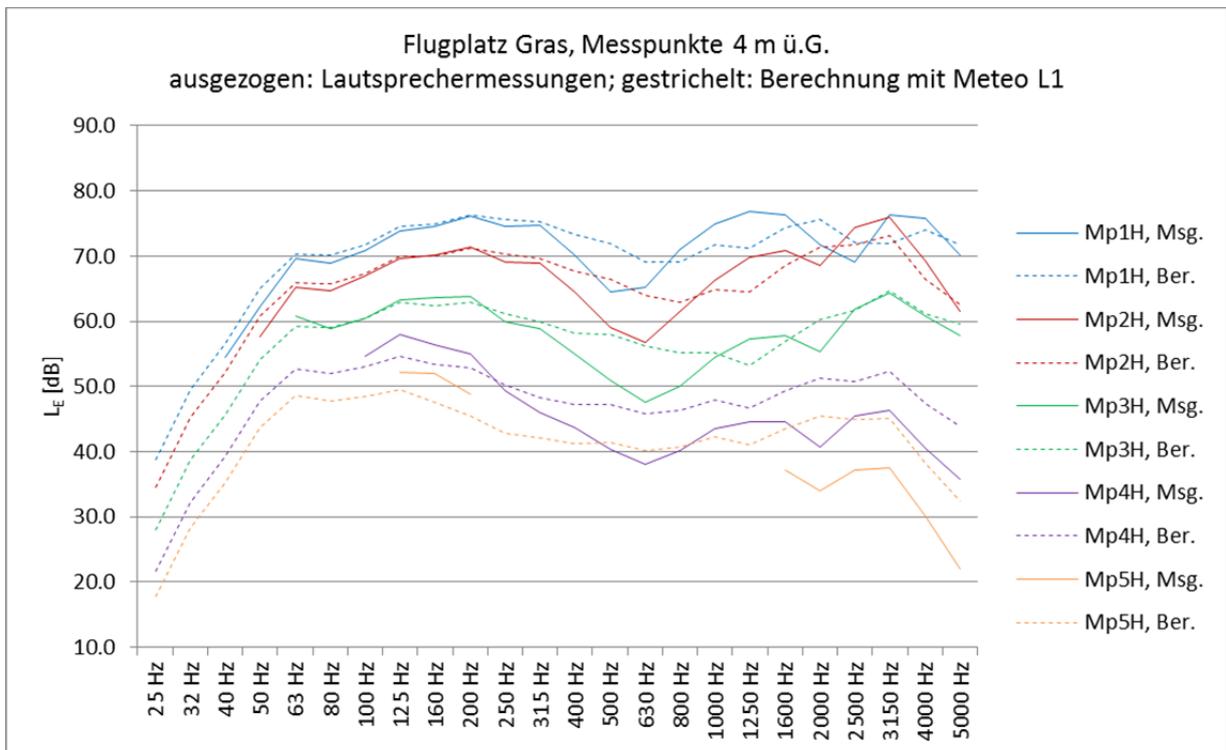


Abbildung 44: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation L1.

### **Messungen Piste/Gras gemischt**

Während den Messungen bei gemischten Verhältnissen 100 m Piste und 100 m Gras war es bodennah praktisch windstill. Die genauen Windverhältnisse auf 10 m Höhe wurden nicht aufgezeichnet: Es wird angenommen, dass der Wind auf 10 m Höhe schwach gewesen sein muss. Die Berechnungen wurden analog den Messungen über Gras mit der Meteosituation L1, d.h. starker Einstrahlung und Wind in 10 m Höhe von 1 - 2 m/s gemacht.

Die mittlere Abweichung zwischen Berechnung und Messung beträgt im A-Pegel 0.3 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Flugplatz Gras/Piste gemischt, Meteo L1	0.3 dB(A)	5.2 dB(A)	5.2 dB(A)	4.0 dB(A)

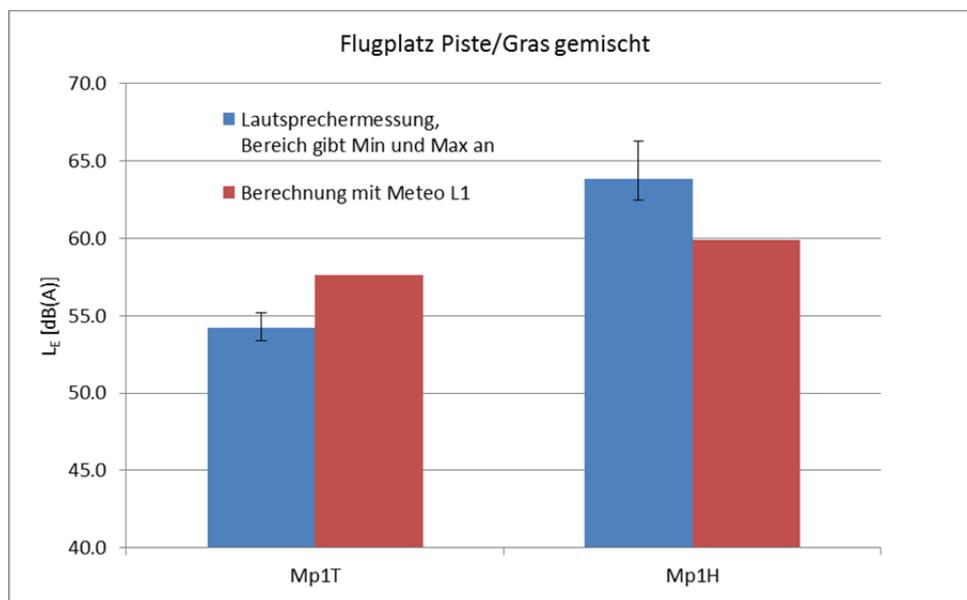


Abbildung 45: Flugplatz Piste/Gras gemischt: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung sonRAIL V3.0 mit Meteo L1).

Abbildung 46 zeigt die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Wie zu erkennen ist, liegen die prognostizierten Pegel beim hohen Messpunkt (4 m ü.G.) zwischen 250 und 500 Hz etwas höher und ab 630 Hz deutlich tiefer als die gemessenen Pegel (bis zu 13 dB). Einen Vergleich mit den Berechnungen ohne Meteo zeigt (siehe Abbildung 48, rote Kurven), dass der prognostizierte Verlauf ohne Meteo gut mit den Messungen übereinstimmt. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass dieser Messpunkt im Modell fälschlicherweise in eine Schallschattenzone fällt.

Beim tiefen Messpunkt (1.5 m ü.G.) prognostiziert das Modell zwischen 315 und 800 Hz deutlich höhere Pegel als die gemessenen Pegel. Es scheint, dass der Pegelabfall im Modell verglichen mit den Messungen erst bei höheren Frequenzen eintritt. Ab 1000 Hz stimmen die Berechnungen nicht schlecht mit den Messungen überein.

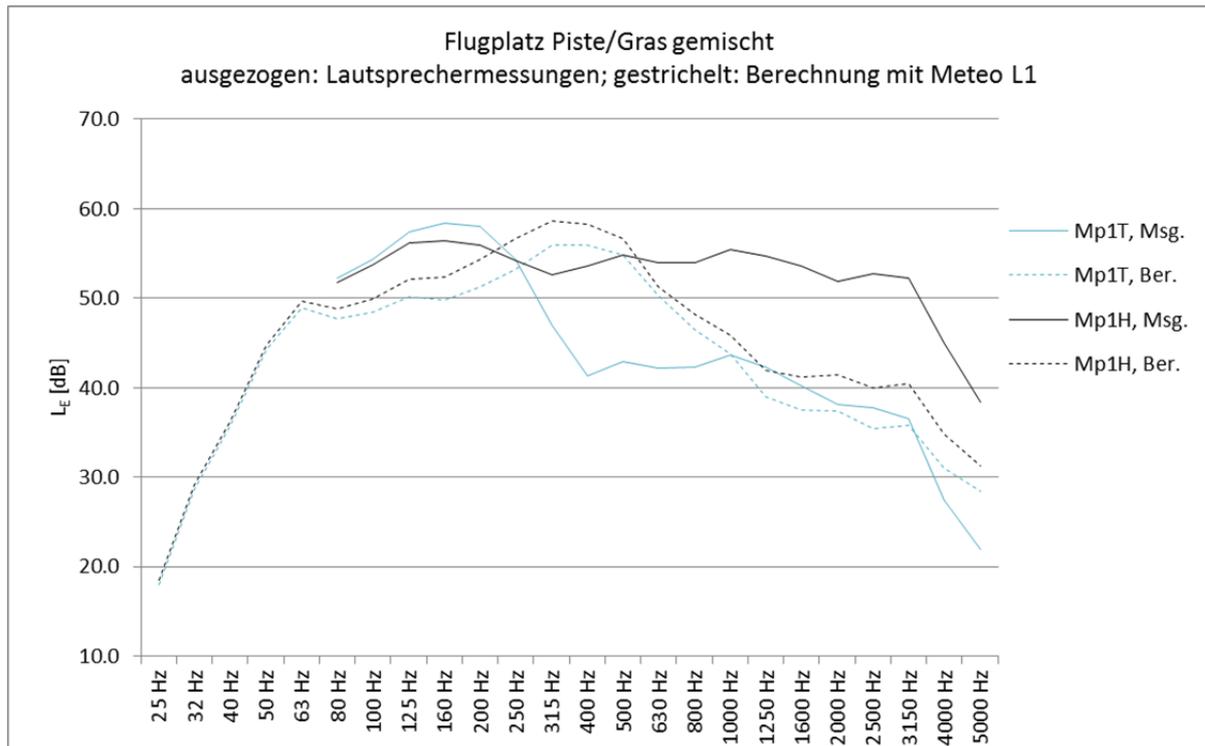


Abbildung 46: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen *sonRAIL* V3.0 mit Meteo L1.

### **Vergleich Piste, Gras und gemischte Verhältnisse**

Da es im Falle gemischter Verhältnisse (Piste – Gras) teilweise grössere Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen gab, wird im Folgenden eine detailliertere Analyse der Resultate gemacht.

Im Folgenden wird die Ausbreitung über Piste, Gras und bei gemischten Verhältnissen am Messpunkt in 200 m Abstand zur Quelle verglichen. Diese Berechnungen wurden ohne Berücksichtigung der Meteorologie durchgeführt. Auf 1.5 m über Boden sind die Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen bei einer Ausbreitung über der Piste bei allen Terzen relativ klein. Über Gras sowie bei den gemischten Verhältnissen fallen die Messungen ab ca. 200 Hz wesentlich stärker ab als die Berechnungen (Abbildung 47). Dabei handelt es sich um den Meteeffekt, welcher in dieser Berechnungsversion nicht berücksichtigt wurde. Einen Vergleich mit Berücksichtigung der Meteorologie zeigt für die Situation über Gras (Abbildung 43 und Abbildung 44) deutlich, dass das Modell diesen Meteeffekt relativ gut abbildet.

Auf 4 m über Boden (Abbildung 48) ist der gleiche Meteeffekt bei der Situation über Gras noch vorhanden. Bei den gemischten Verhältnissen sind die berechneten Werte nur zwischen 200 und 1000 Hz deutlich höher. Diese Differenz kann nicht durch den Meteeffekt erklärt werden.

Bei den gemischten Verhältnissen scheint der obere Messpunkt (4 m über Boden) mehr durch die quellennahen 100 m Piste dominiert zu sein, und der untere Messpunkt (1.5 m über Boden) mehr durch die empfangspunktnahen 100 m Gras. Die Berechnungen bilden dies nicht nach, sondern zeigen eine ähnliche Situation für beide Messpunkthöhen, nämlich dass auf beiden Höhen die quellennahen 100 m Piste dominieren.

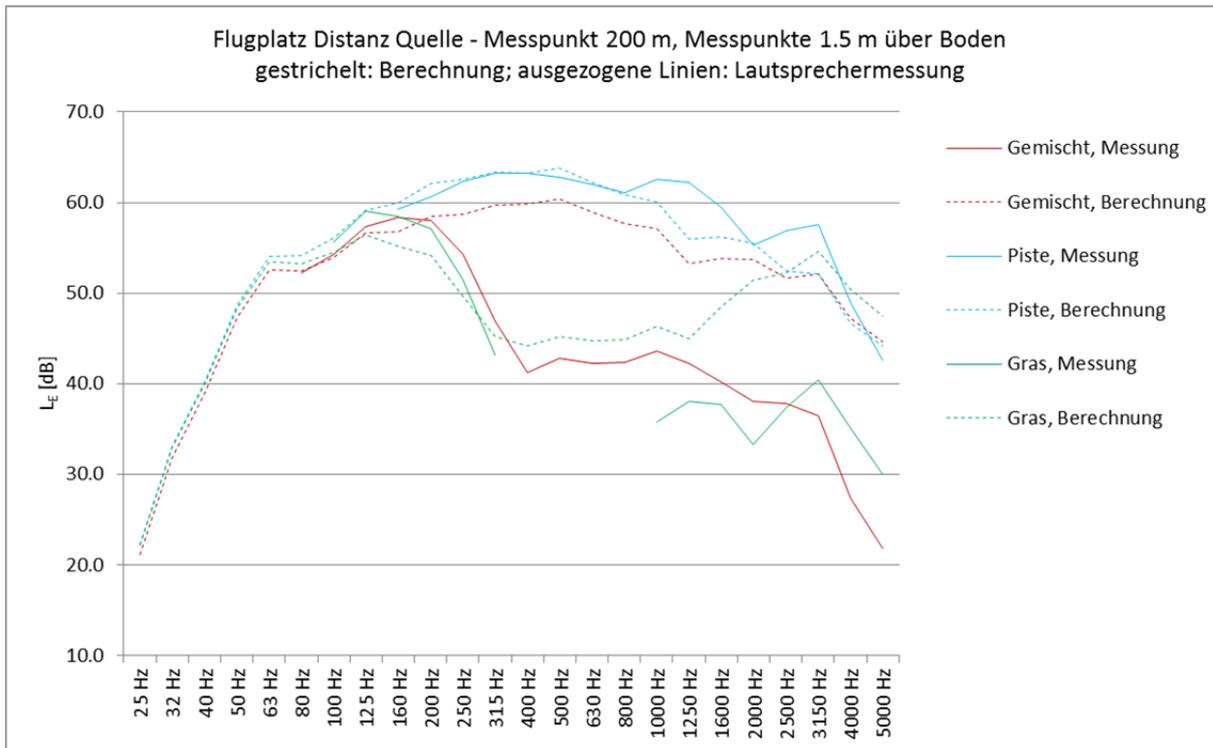


Abbildung 47: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen des Messpunkts in 200 m. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen *sonRAIL* V3.0 ohne Meteo.

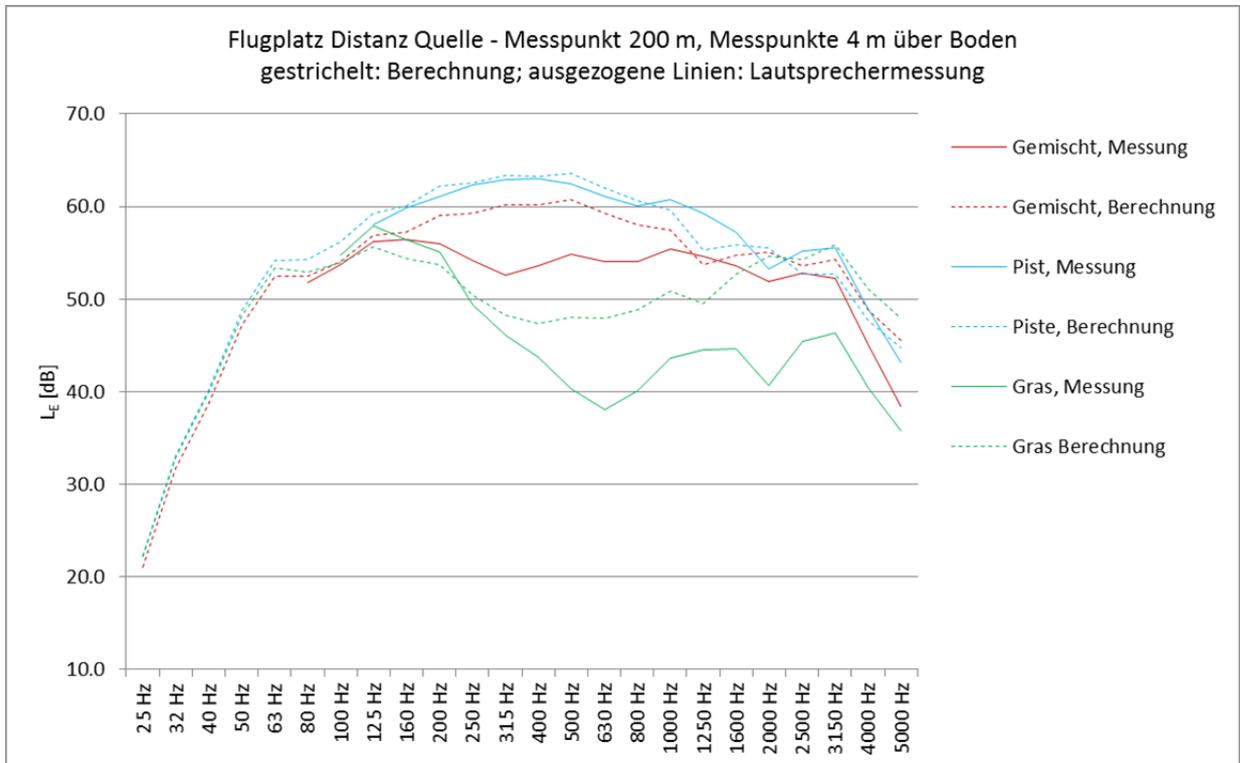


Abbildung 48: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen des Messpunkts in 200 m. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen *sonRAIL* V3.0 ohne Meteo.

## **Kommentare**

Die Messungen sind mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet:

- Die Messungen fanden bei den verschiedenen Punkten nicht gleichzeitig statt, sondern über einen Vormittag verteilt.
- Die Windsituation auf 10 m Höhe wurde nicht aufgezeichnet. Bodennah (ca. 2 m Höhe) waren die Winde zeitlich und räumlich sehr variabel. Auch in Bodennähe wurde der Wind nicht kontinuierlich aufgezeichnet.

Der Vergleich zwischen den Berechnungen mit verschiedenen Meteosituationen zeigt, dass der Einfluss der meteorologischen Effekte auch in nicht abgeschirmten Situationen mit leichtem Mitwind relevant sein kann. Bei den vorliegenden Testfällen mussten die Pegel einzelner kurzer Ereignisse von einem bestimmten Ort unter Berücksichtigung der momentan herrschenden Wetterbedingungen nachgebildet werden. Die böigen und somit zeitlich und räumlich sehr variablen Windverhältnisse machen eine klare Zuteilung zu einer der definierten Meteokategorien schwierig.

## **5.6 Allmend Thun**

Auf der Allmend in Thun wurden Messungen über Grasland durchgeführt, mit dem Ziel, den Einfluss des Bodeneffektes und der Meteorologie zu messen.

### **5.6.1 Angaben zu Messungen**

Datum, Uhrzeit:	27. Juni 2002, 8.00 bis 13.00 Uhr und 31. Oktober 2002, 8.00 bis 11.30 Uhr
Wetter:	27. Juni 2002: nahezu wolkenloser Himmel, labile bis stark labile Schichtung, wenig Wind. Insgesamt kann von hinderlichen Bedingungen ausgegangen werden. Temperatur: 20 – 23 °C. 31. Oktober 2002: sonnig mit Schleierwolken, anfänglich Inversion, später neutral bzw. labile Schichtung, wenig Wind. Anfänglich förderliche, später neutrale bis hinderliche Bedingungen. Temperatur: 10 °C.
Quellen:	Lautsprecher Horn mit University Treiber, auf 1.0 m Höhe
Ausbreitungsdistanzen:	102, 199 und 376 m
Messpunkthöhen:	1.5 und 4 m
Gelände:	flach
Untergrund:	Grasland



Abbildung 49: Allmend Thun: Lautsprecher Horn mit University Treiber.

### 5.6.2 Resultate

Die Messungen am 27. Juni 2002 fanden bei klarem Himmel und starker Einstrahlung statt. Der Wind wurde auf 4 m Höhe erfasst und blies im Mittel mit 0.7 m/s aus 80°, was einer Gegenwindsituation entspricht. In Kombination mit der sehr labilen Schichtung resultieren stark hinderliche Messbedingungen. Für die Berechnungen wurde das Meteoprofil L0 eingesetzt.

Während den Messungen am 31. Oktober 2002 variierten die meteorologischen Bedingungen relativ stark. Anfänglich herrschte eine Inversionslage, später eine neutrale und dann labile Schichtung der Atmosphäre. Der Wind variierte über den Vormittag zwischen keinem Wind bis zu Windgeschwindigkeiten von über 3 m/s. Meistens herrschte wenig Wind. Die Bedingungen waren anfänglich förderlich, später neutral und hinderlich. Die Streuungen der Messresultate, der über den ganzen Vormittag verteilten Messungen, sind entsprechend gross. Der Mittelwert der Messresultate wird durch die förderlichen Bedingungen dominiert, weshalb die vorliegenden Berechnungen mit der Meteosituation S1 gemacht werden.

Abbildung 50 und Abbildung 52 zeigen den Vergleich der A-bewerteten Immissionspegel zwischen Messungen und Berechnungen. Die mittlere Abweichung zwischen Messungen und Berechnungen beträgt 0.0 resp. 2.1 dB(A) für die Messungen am 27.6.2002 resp. 31.10.2002.

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Thun Lautsprechermessungen 27.06.2002, mit Meteo L0	0.0 dB(A)	2.5 dB(A)	2.5 dB(A)	3.4 dB(A)
Thun Lautsprechermessungen 31.10.2002, mit Meteo S1	2.1 dB(A)	1.8 dB(A)	2.7 dB(A)	3.8 dB(A)

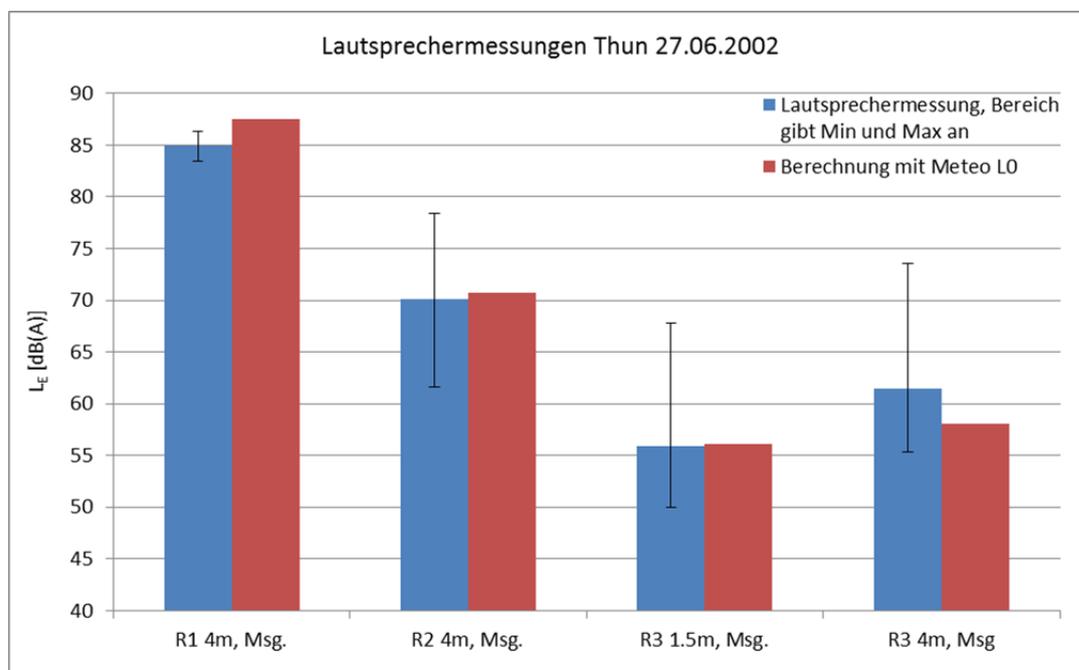


Abbildung 50: Allmend Thun 27.06.2002: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung mit sonRAIL V3.0 mit Meteo L0)

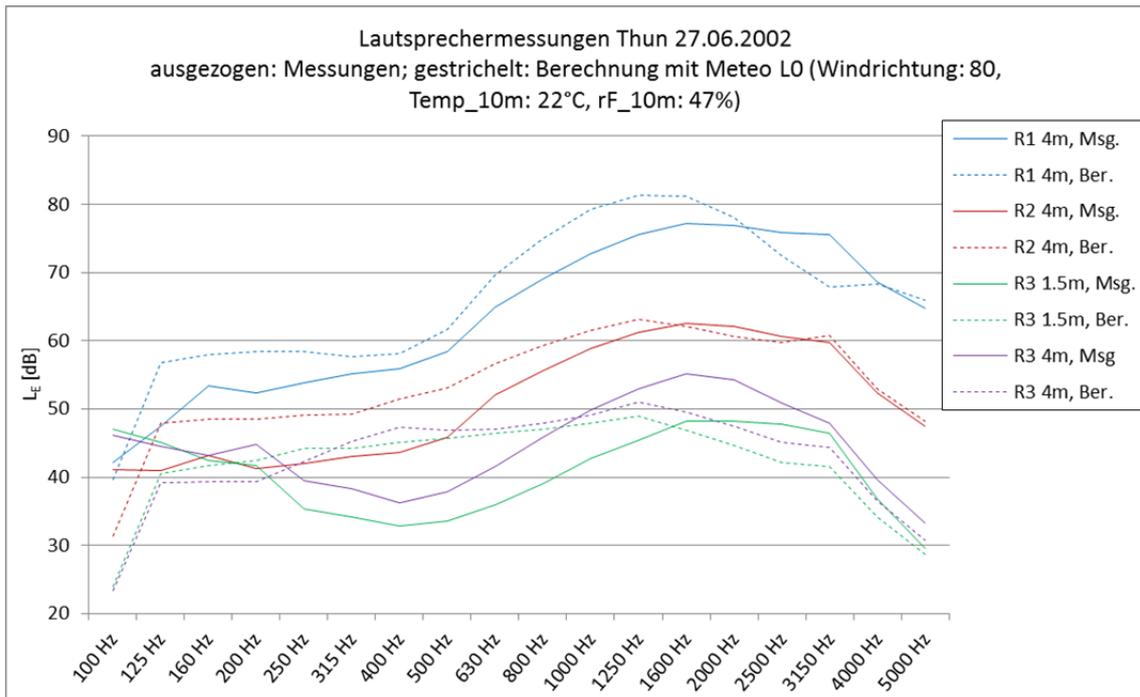


Abbildung 51: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen Allmend Thun 27.06.2002. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation L0.

Abbildung 51 zeigt die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Wie zu erkennen ist, prognostiziert das Modell den spektralen Verlauf mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Grössere Abweichungen zwischen Berechnungen und Messungen gibt es beim Messpunkt 3 (376 m) bei Frequenzen von 400 bis 630 Hz, wobei die Berechnungen höhere Pegel als die Messungen ergeben. Grund dafür ist, dass diese Messpunkte in eine Schallschattenzone fallen. Dieser Effekt ist bei den tiefen Messpunkten auf 1.5 m über Boden ausgeprägter als auf 4 m über Boden.

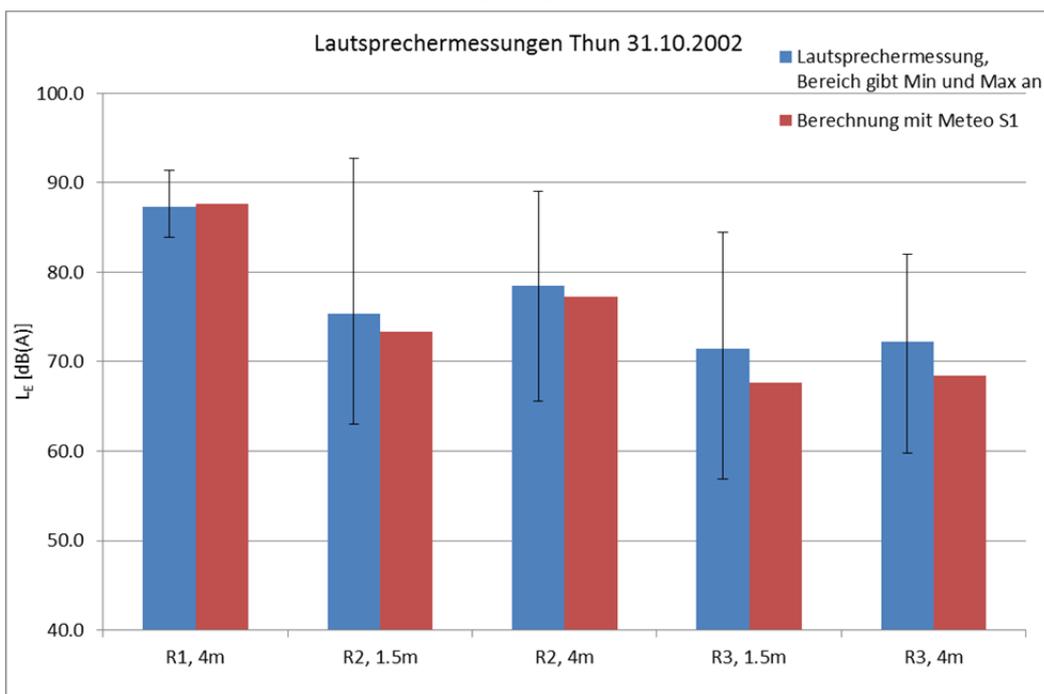


Abbildung 52: Allmend Thun 31.10.2002: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung mit sonRAIL V3.0 mit Meteo S1)

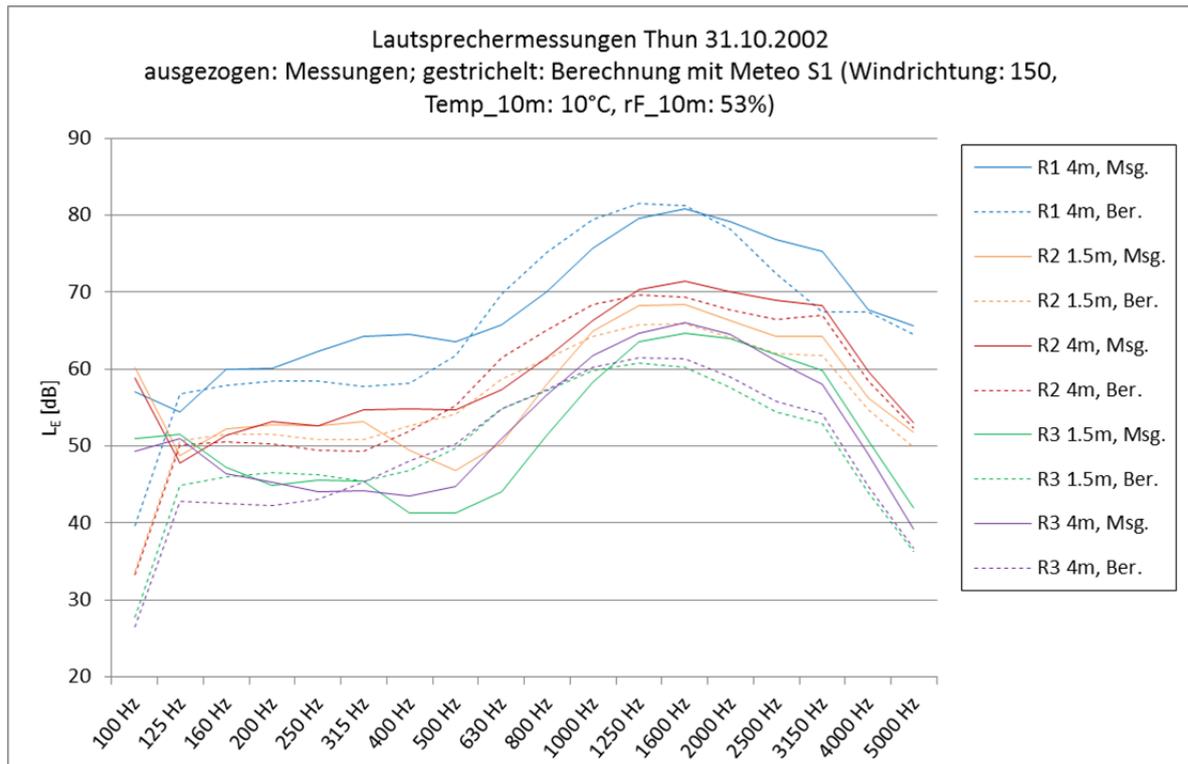


Abbildung 53: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen Allmend Thun 31.10.2002. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation S1.

Abbildung 53 zeigt die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Das Modell prognostiziert den spektralen Verlauf mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Grössere Abweichungen zwischen Berechnungen und Messungen gibt es bei den Messpunkten 2 und 3 auf 1.5 m Höhe bei Frequenzen von 500 bis 630 Hz, wobei die Berechnungen höhere Pegel als die Messungen ergeben. Bei Frequenzen ab 1600 Hz liegen die berechneten Pegel beim Messpunkt 3 (376 m) tiefer als die Messungen. Bei den in Abbildung 53 dargestellten Messresultaten handelt es sich um gemittelte Werte von verschiedenen Messungen verteilt über einen ganzen Vormittag. Wie bereits erwähnt, waren die meteorologischen Bedingungen sehr variabel und die Streuungen der Messresultate entsprechen gross. Für eine Übersicht über die Bandbreite der Messresultate resp. detailliertere Resultate der einzelnen Messungen sei auf das Dokument „Strassenlärm in grossen Abständen“, EMPA, Juni 2006 verwiesen.

## 5.7 Stettbach, Chämmeten

Bei Stettbach, Chämmeten wurden Messungen an einem Hang gemacht um den Einfluss einer unebenen Topografie zu prüfen.

### 5.7.1 Angaben zu den Messungen

Datum, Uhrzeit: 7. März 2013, ca. 9 – 10.30 Uhr  
 Wetter: Meist Windstill, leichter Ost-Südostwind bei Messpunkt 4 (1 – 2m/s); trocken, stark bewölkt; 7 – 8 °C (Temperatur-/Feuchtefühler nahe Quelle in ca. 1 m Höhe)  
 Quellen: Lautsprecher Electrovoice Sx325 und Signalpistole (modifizierte Smith&Wesson 0.38 mit Schwarzpulver Knallpatronen), beide auf 0.5 m Höhe  
 Ausbreitungsdistanzen: 30, 50, 100, 182 m

Messpunkthöhen: 1.5 und 4 m  
 Gelände: Hang, ca. 9° Steigung  
 Untergrund: Grasland  
 Bemerkungen: Die Messungen wurden nicht bei allen Empfangspunkten gleichzeitig durchgeführt.

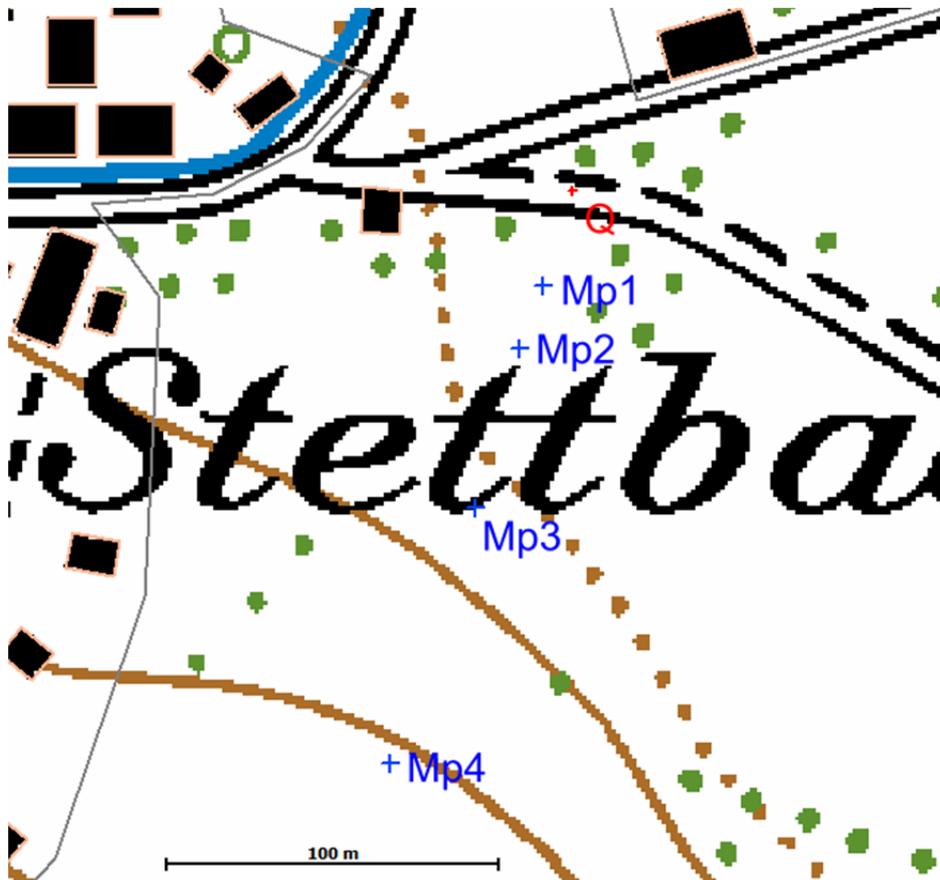


Abbildung 54: Messsituation Stettbach, Chämneten gemäss Modellierung (Q = Quelle, Mp = Messpunkt).

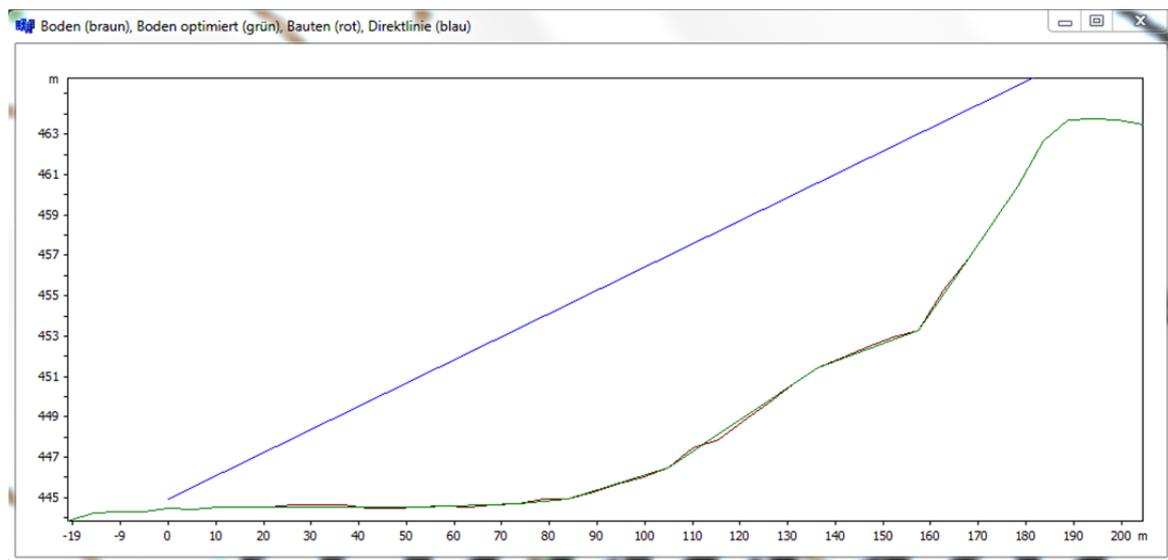


Abbildung 55: Stettbach: Schnitt Quelle – Messpunkt 4 hoch (4 m ü.G.).



Abbildung 56: Blick von Messpunkt 4 in Richtung Quelle, Blick Richtung Norden

### 5.7.2 Resultate

Im Folgenden sind nur die Resultate der Lautsprechermessungen aufgezeigt. Die Resultate der Signalpistolenmessungen zeigen ein ähnliches Bild.

Während den Messungen in Stettbach war es mehrheitlich stark bewölkt und zwischendurch wehte ein leichter Ost-Südostwind. Für die Berechnungen wurde das Meteoprofil N1 (schwache Einstrahlung, 1 – 2 m/s Wind) eingesetzt. Wie der Abbildung 57 zu entnehmen ist, fällt die Übereinstimmung im A-Pegel zufriedenstellend aus. Die mittlere Abweichung zwischen Messungen und Berechnungen beträgt 0.7 dB(A).

Situation	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Mittlerer Fehler	Max. Abweichung
Stettbach Lautsprechermessungen, mit Meteo N1	0.7 dB(A)	2.0 dB(A)	2.1 dB(A)	-3.8 dB(A)

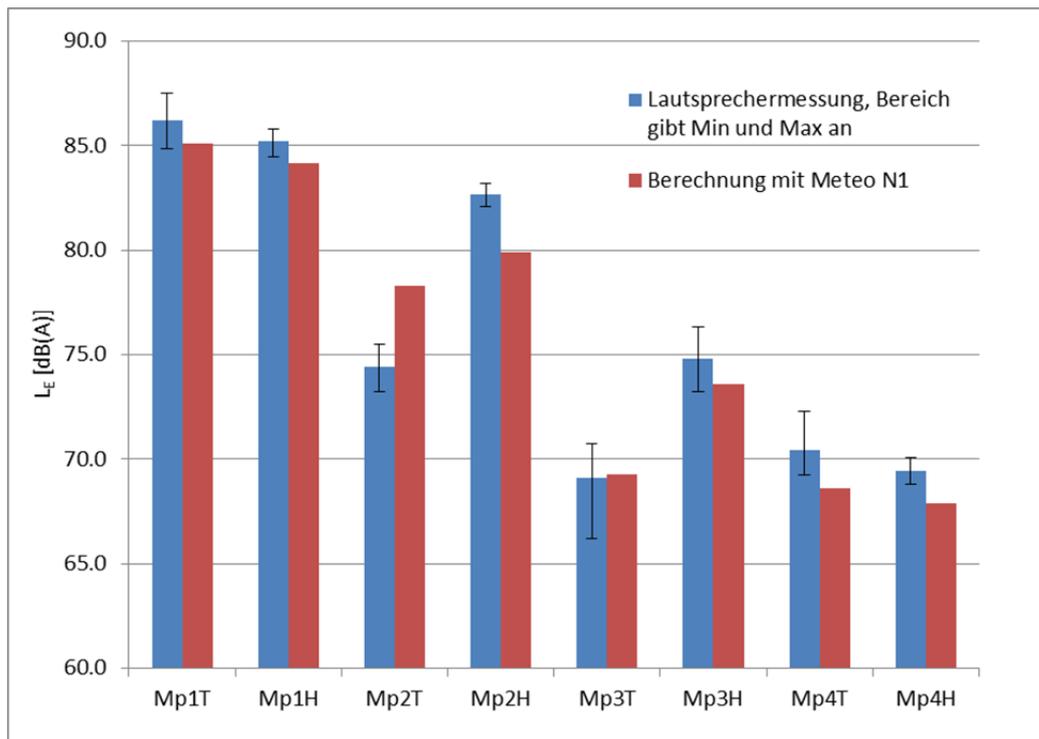


Abbildung 57: Stettbach: Immissionspegel an den Messpunkten (blau: Lautsprechermessung, rot: Berechnung mit sonRAIL V3.0 mit Meteo N1)

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die Terzbandspektren der gemessenen und berechneten Pegel. Wie zu erkennen ist, prognostiziert das Modell den spektralen Verlauf mehrheitlich in guter Übereinstimmung mit den Messungen. Grössere Abweichungen zwischen Berechnungen und Messungen gibt es bei Frequenzen von 500 und 630 Hz, wobei die Berechnungen höhere Pegel als die Messungen ergeben. Die Messungen zeigen hier einen Pegelabfall aufgrund des Bodeneffekts (Interferenzeffekt), was vom Modell weniger stark prognostiziert wird. Dieser Effekt ist bei den tiefen Messpunkten auf 1.5 m über Boden ausgeprägter als auf 4 m über Boden.

Die Berechnungen unterschätzen die Immissionspegel im Allgemeinen, durchschnittlich um 0.7 dB(A). Einzig bei den Messpunkten 2 (50 m Distanz) und 3 (100 m Distanz) auf 1.5 m über Boden, welche sich noch im Flachen resp. gerade am Hangfuss befinden, überschätzt das Modell die Pegel. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Messpunkte bei den Berechnungen in eine Schallschattenzone fallen. Einen Vergleich mit der Meteosituation L1 bestätigt dies.

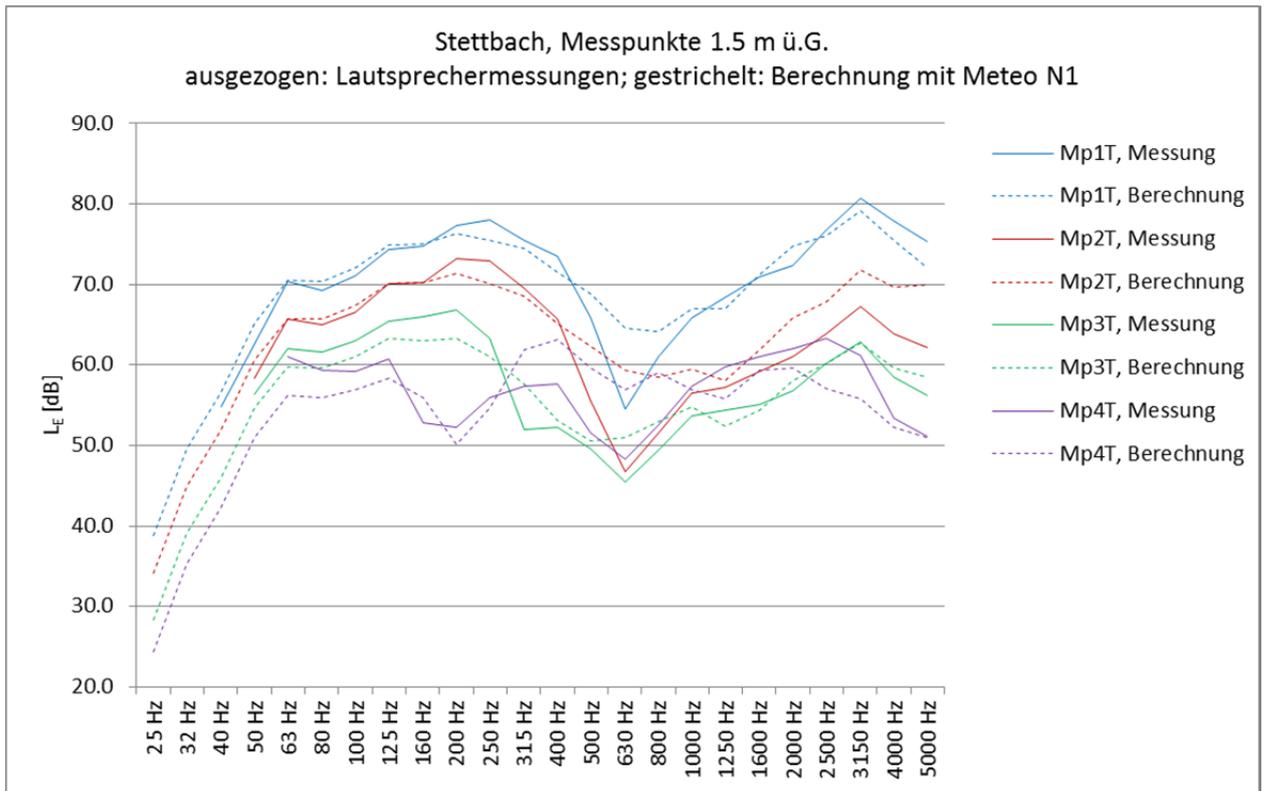


Abbildung 58: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 1.5 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation N1.

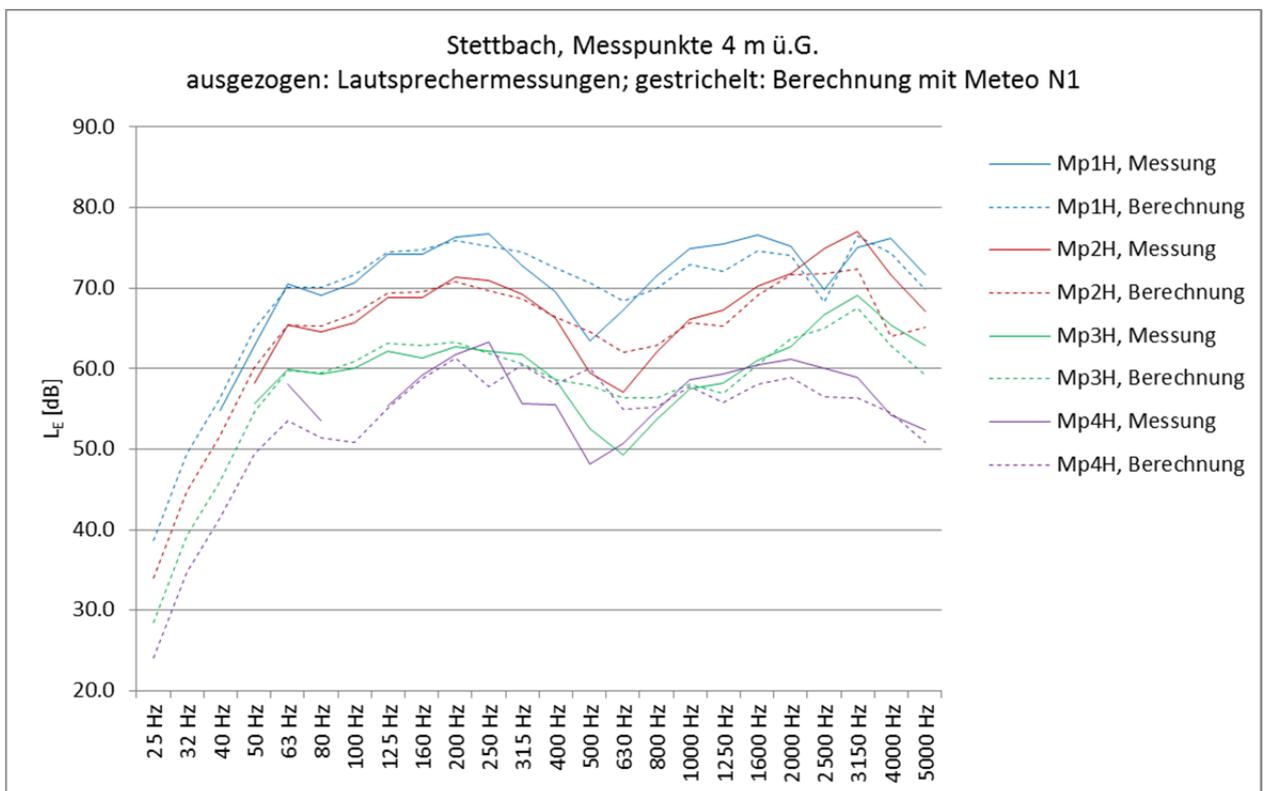


Abbildung 59: Terzbandspektren der Lautsprechermessungen aller Messpunkte 4 m über Grund. Ausgezogene Linien: Messungen, gestrichelt: Berechnungen mit sonRAIL V3.0 mit Meteosituation N1.

## 6 Übersicht aller Resultate und Abschätzung der Modellunsicherheit

In den nachfolgenden Abbildungen sind für alle Messsituationen die Pegeldifferenzen zwischen den Messwerten und den Berechnungen mit *sonX* dargestellt. Die Pegeldifferenzen sind in Abbildung 60 gegen die absoluten Messpegel aufgetragen. Allenfalls kann eine leichte Zunahme der Prognoseunsicherheit bei tiefen Immissionspegeln angenommen werden. Es zeigt sich aber kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Pegelabweichung und Messpegel.

Im Mittel über alle Datenpunkte weist *sonX* rund 0.3 dB(A) zu hohe Immissionspegel aus. Die Standardabweichung der Pegeldifferenzen zwischen Messungen und Berechnungen beträgt 2.4 dB(A) und der mittlere Fehler 2.5 dB(A). Einzelne Ereignisse weisen Abweichungen von bis zu 7.7 dB(A) auf. Bei den zwei Signalpistolenmessungen mit den grössten Abweichungen (- 6.9 und - 7.7 dB(A)) handelt es sich um die Messungen an der EAWAG. Diese Messpunkte sind so stark abgeschirmt, dass sich die Messpegel nahe dem Grundgeräusch bewegen. Die Unsicherheiten dieser Messwerte sind entsprechend gross.

In Abbildung 61 sind die prozentualen Pegelabweichungen zwischen Messungen und Berechnungen relativ zur Ausbreitungsdämpfung dargestellt. Zusätzlich ist der Median sowie das 1. und 3. Quartil eingetragen. In 25% der Fälle beträgt die prozentuale Abweichung weniger als 1.2% der Ausbreitungsdämpfung und in 50% weniger als 2.8% der Ausbreitungsdämpfung. Abweichungen von mehr als 4.2% wurden in 25% der Fälle festgestellt. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 3.2% der Ausbreitungsdämpfung. Der Datensatz umfasst einige Ausreisser, weshalb der Median die aussagekräftigere mittlere Abweichung wiedergibt als der Mittelwert. Je grösser die Ausbreitungsdämpfung ist, umso komplexer ist die Situation zu modellieren (grosse Distanz, Abschirmungen ...). Der Abbildung 61 kann entnommen werden, dass die relativen Abweichungen tendenziell mit grösserer Ausbreitungsdämpfung zunehmen. Bei den zwei grössten relativen Abweichungen (> 10%) handelt es sich um die Signalpistolenmessungen der stark abgeschirmten Messpunkte bei der Eawag, welche grosse Unsicherheiten in den Messwerten aufweisen.

Da diese Validierungsmessungen mit Referenzschallquellen sowie Messpunkten im Freifeld durchgeführt wurden, umfasst die mittlere Abweichung (Median) von 2.8% der Ausbreitungsdämpfung im wesentlichen Unsicherheiten während der Schallausbreitung ohne relevante quellen- oder empfängerseitige Unsicherheiten. Die Standardabweichung von 2.4 dB(A) resp. 2.8% der Ausbreitungsdämpfung kann somit als mittlere Unsicherheit des Ausbreitungsmodells bei der Prognose eines einzelnen Ereignisses unter bestimmten Ausbreitungsbedingungen interpretiert werden.

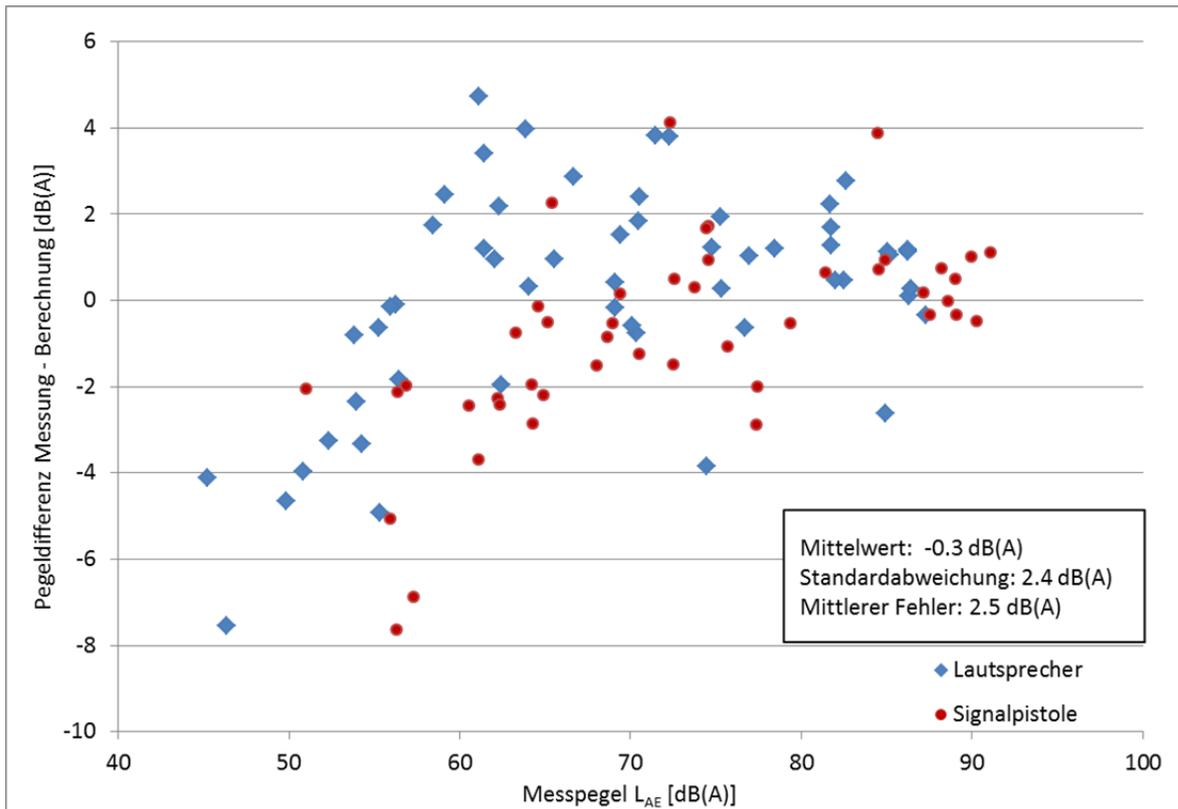


Abbildung 60: Vergleich aller Messungen mit den sonX-Berechnungen. Dargestellt sind die Pegelabweichungen als Funktion der Messpegel ( $L_{AE}$ ).

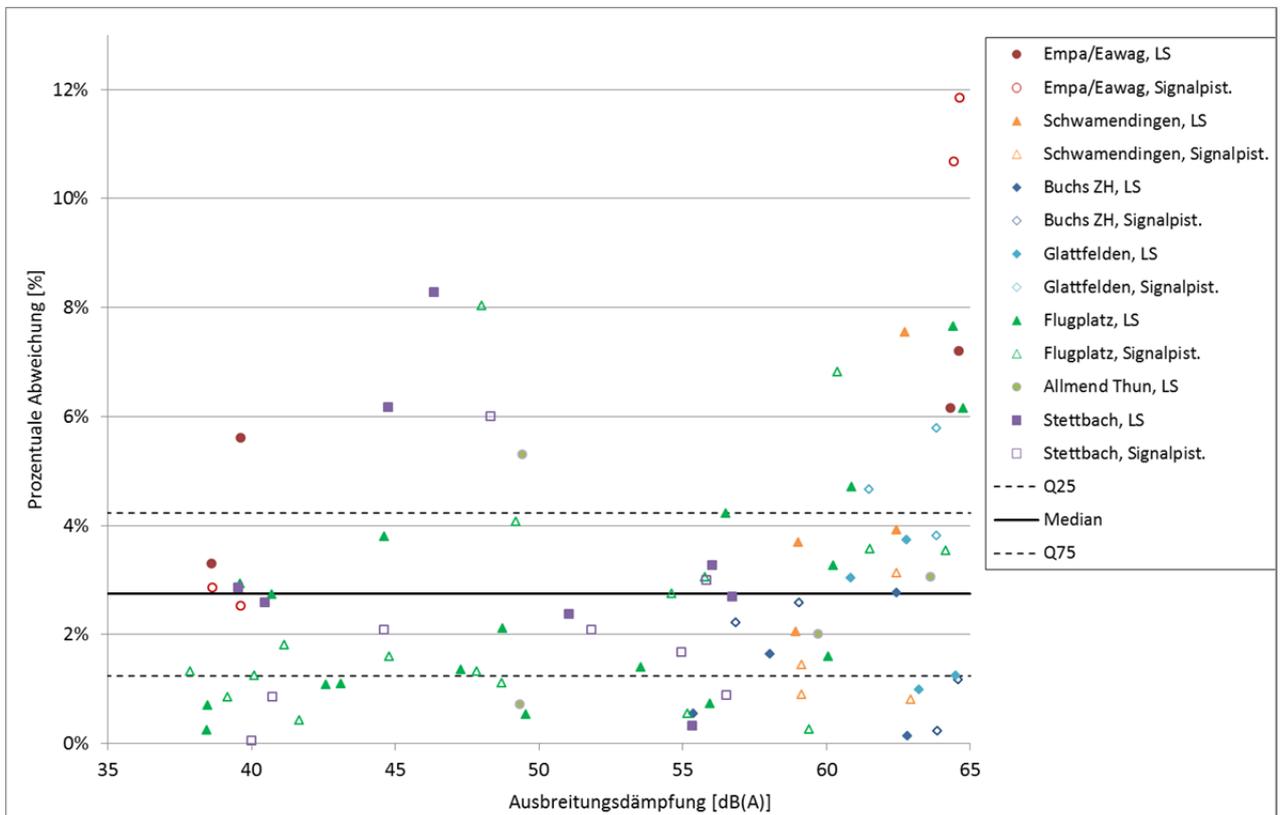


Abbildung 61: Vergleich aller Messungen mit den sonX-Berechnungen. Dargestellt sind die prozentualen Pegelabweichungen in Abhängigkeit der Ausbreitungsdämpfung.

## 7 Diskussion

In vorliegendem Dokument wurden Validierungsmessungen für das *sonX*-Ausbreitungsmodells in folgenden Situationen gemacht: zwei Überbauungen mit relevanten Reflexionen, zwei Situationen mit Hindernissen (Wand und Wall), eine Situation mit unterschiedlichem Untergrund (harter Untergrund, Gras) zur Validierung des Bodeneffekts, eine Situation mit grossen Ausbreitungsdistanzen und eine Situation mit einer unebenen Topographie. Insgesamt wurden 101 Quellen-Empfänger-Kombinationen ausgewertet.

Im Mittel über alle Datenpunkte weist *sonX* rund 0.3 dB(A) zu hohe Immissionspegel aus. Die Standardabweichung der Pegeldifferenzen zwischen Messungen und Berechnungen beträgt 2.4 dB(A) und der mittlere Fehler 2.5 dB(A). In 50% der Fälle (Median) beträgt die Abweichung weniger als 2.8% der Ausbreitungsdämpfung. Bei diesen Zahlen handelt es sich um die mittleren Unsicherheiten bei der Prognose eines einzelnen Ereignisses bei bestimmten Ausbreitungsbedingungen. Schlussendlich interessiert jedoch die Unsicherheit des Jahresmittelwertes. Dieser ergibt sich aus der Mittelung einer Vielzahl von Ereignissen, welche über das Jahr verteilt bei unterschiedlichen Bedingungen stattfinden. Diese Mittelung führt zu einer Reduktion des statistischen Fehlers. Es kann deshalb gefolgert werden, dass mit *sonX* berechnete Jahresmittelwerte durchschnittlich eine Standardabweichung resp. relative Abweichung von weniger als 2.4 dB(A) resp. 2.8% der Ausbreitungsdämpfung aufweisen.

Eine Überprüfung der berechneten Reflexionsbeiträge kann an den zwei Situationen mit relevanten Reflexionen gemacht werden (EMPA und Wohnquartier Schwamendingen). Für diese Situationen prognostiziert das Modell Ergebnisse, die gut mit den Messwerten übereinstimmen. In den Situationen mit Hindernissen (Lärmschutzwand und -wall) wird ebenfalls eine ansprechende Übereinstimmung zwischen prognostizierten Pegeln und Messwerten erzielt. Grössere Abweichungen gibt es bei den Situationen mit relevantem Meteorologieeinfluss, also bei grösseren Distanzen.

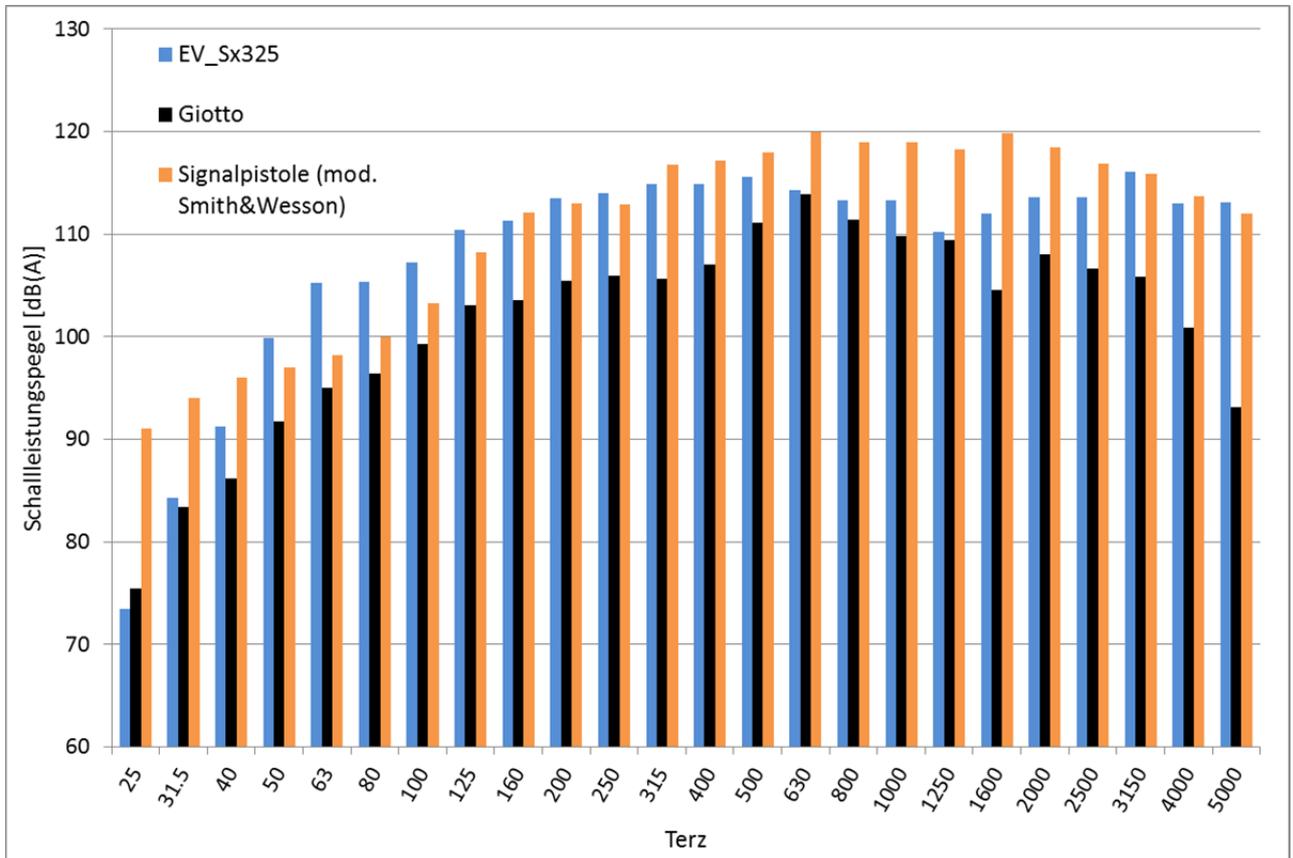
Die Berechnungen der dargestellten Situationen waren mit zwei wesentlichen Herausforderungen verbunden: die Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse und der Bodeneffekt. Am Beispiel des Flugplatzes Dübendorf zeigt der Vergleich zwischen Berechnungen mit verschiedenen Meteosituationen, dass der Einfluss der meteorologischen Effekte auch in nicht abgeschirmten Situationen mit leichtem Mitwind relevant sein kann. Allgemein kann festgehalten werden, dass die Nachbildung der Pegel von Einzelereignissen an einem bestimmten Ort mit den momentan herrschenden Wetterbedingungen schwierig ist. Die Meteoklassierung, wie in *sonX* verwendet, wurde für die Bestimmung von Jahresmittelwerten optimiert. Für die Berechnung von spezifischen Einzelsituationen, wie das bei vorliegenden Validierungsmessungen der Fall ist, ist die Klassierung teilweise zu grob. Die Abweichungen resultieren deshalb auch aufgrund von zu wenig genauen bzw. detaillierten Eingangsdaten. Für die Prognose von Jahresmittelwerten sind solche zeitlich und räumlich variablen Wettereinflüsse weniger relevant bzw. findet eine Ausmittelung über eine Vielzahl von Einzelereignissen statt, so dass sich die Unsicherheit der Prognose entsprechend reduziert.

Die Berechnungen wurden mit den Bodeneigenschaften, die im Modell als Standardwerte vorgegeben sind, gemacht. Das heisst es erfolgten keine situationsspezifischen Anpassungen, was eine weitere Quelle von Unsicherheiten bei der Modellierung darstellt. So waren die unversiegelten Böden mehrheitlich ziemlich nass, und nasse Böden haben einen anderen Strömungswiderstand als trockene. Die kleinräumige Topographie des Bodens kann zudem eine weitere Unsicherheitsquelle für den Bodeneffekt darstellen.

Unter Berücksichtigung der obigen Herausforderungen ist die insgesamt gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungen mit *sonX* und den Messresultaten positiv zu werten.

# Beilagen

## B.1 Spektren der Lautsprecher Giotto und Sx325 sowie der Signalpistole



EV_Sx325				Giotto				Signalpistole (mod. Smith&Wesson)	
Terz	L 2m	L 1m	Lw	Terz	L 2m	L 1m	Lw	Terz	Lw
25	57.0	62.5	73.5	25	59.3	64.5	75.5	25	91.0
31.5	65.1	73.3	84.3	31.5	65.5	72.4	83.4	31.5	94.0
40	73.4	80.3	91.3	40	69.1	75.2	86.2	40	96.0
50	83.4	88.9	99.9	50	76.1	80.7	91.7	50	97.0
63	88.6	94.3	105.3	63	79.4	84.0	95.0	63	98.3
80	86.5	94.4	105.4	80	77.9	85.4	96.4	80	100.0
100	90.8	96.3	107.3	100	83.7	88.3	99.3	100	103.3
125	92.6	99.5	110.5	125	85.6	92.1	103.1	125	108.3
160	94.5	100.3	111.3	160	87.4	92.6	103.6	160	112.2
200	96.4	102.5	113.5	200	88.7	94.4	105.4	200	113.1
250	96.8	103.0	114.0	250	89.5	95.0	106.0	250	112.9
315	97.9	103.9	114.9	315	88.6	94.6	105.6	315	116.8
400	98.1	103.9	114.9	400	91.0	96.0	107.0	400	117.2
500	98.6	104.6	115.6	500	94.6	100.1	111.1	500	118.0
630	97.3	103.3	114.3	630	97.3	102.9	113.9	630	120.0
800	96.9	102.4	113.4	800	95.1	100.4	111.4	800	119.0
1000	96.7	102.3	113.3	1000	92.9	98.8	109.8	1000	119.0
1250	94.3	99.2	110.2	1250	92.6	98.5	109.5	1250	118.3
1600	96.2	101.1	112.1	1600	87.8	93.5	104.5	1600	119.9
2000	97.3	102.6	113.6	2000	91.2	97.0	108.0	2000	118.5
2500	97.5	102.6	113.6	2500	90.4	95.7	106.7	2500	116.9
3150	99.8	105.1	116.1	3150	89.0	94.8	105.8	3150	115.9
4000	97.0	102.0	113.0	4000	82.4	89.8	100.8	4000	113.8
5000	94.7	102.1	113.1	5000	75.5	82.1	93.1	5000	112.0

## B.2 Übersicht Testfälle

„Thema“	Ort	Quellenhöhe	Ausbreitungsdistanzen	Empfangspunkthöhe	Positionen Empfangspunkte	Gelände	Untergrund	Bebauung
Überbauung	EMPA / EAWAG Dübendorf	0.5 m	31.5 m 49 m	1.5 m 4 m	1. Abgeschirmt; mit Reflexionen 2. Abgeschirmt; ohne relevante Reflexionen	1. flach 2. flach	1. harter Untergrund 2. Gras/Gebäude	Industrie-/ Bürogebäude
Reale Wohnüberbauung	Schwamendingen, Probstei / Im Leimbach	0.5 m	2 Distanzen: 45, 71 m	1.5 m 4 m	Abgeschirmt	Flach - leicht abfallend	Mehrheitlich Gras	Wohngebäude (W2)
Lärmschutzwand (4.5 m hoch)	Schiessstand Rohracher, Buchs ZH	0.5 m	2 Distanzen: 20, 40 m	1.5 m 4 m	10 und 30 m von LS- Wand entfernt	Leicht abfallend	Grasland	Keine Gebäude
Lärmschutzwand (ca. 20 m breit, 4.5 m hoch)	Schiessstand Wiesengrund, Glattfelden	0.5 m	2 Distanzen: 40, 50 m	1.5 m 4 m	10 und 20 m von LS- Wall entfernt	flach	Grasland	Keine Gebäude
Bodeneffekt	Flugplatz Dübendorf	0.5 m	30, 50, 100, 200, 300 m	1.5 m 4 m	Nicht abgeschirmt	flach	Grasland harter Untergrund gemischt (nur 1 Distanz: 200 m)	keine
Bodeneffekt	Allmend Thun	1 m	102, 199, 376 m	1.5 m 4 m	Nicht abgeschirmt	flach	Grasland	keine
Unebene Topografie	Stettbach, Chäm- meten	0.5 m	30, 50, 100, 182 m	1.5 m 4 m	Nicht abgeschirmt	Hang, ca. 9° Steigung	Grasland	keine