

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



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)  
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)  
Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)  
Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

## Vergleich Lärmimmissionsmessungen im offenen Fenster mit Grenzflächenmikrophanordnung

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5214.006.704-V2  
Ihr Auftrag vom: 11.08.2014  
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 12

### Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage und Auftrag
- 2 Messungen
- 3 Diskussion

---

Dübendorf, 30. September 2014

Die Projektleiterin:

A handwritten signature in blue ink that reads "B. Locher".

B. Locher

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:

A handwritten signature in blue ink that reads "K. Eggenschwiler".

K. Eggenschwiler

## Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern
- Auftragnehmer:** Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Abteilung Akustik / Lärminderung
- Autoren:** Barbara Locher, Kurt Heutschi
- Begleitung BAFU:** Kornel Köstli
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Zusammenfassung

In der 1995 vom BUWAL publizierten Mitteilung zur Lärmschutzverordnung Nr. 7 wird für die Umrechnung einer Messung in Grenzflächenmontage auf das offene Fenster ein Wert von 5 dB angegeben. Zur Klärung dieses Zuschlags wurden eine Messung an einer Eisenbahnlinie und drei Messungen an Strassen durchgeführt.

Die vier Messungen ergeben für die Grenzflächenmontage im Vergleich zum offenem Fenster im Mittel einen um 5.4 dB(A) höheren Wert, mit relativ grossen Differenzen zwischen den vier Messungen (4.8 bis 5.9 dB(A)). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass der Zuschlag im offenen Fenster gegenüber Freifeld eher unter 1 dB(A) liegt, was mit der Studie Empa-Nr. 5214.00313.0 übereinstimmt (darin wurde ein 0.5 dB(A) Zuschlag offenes Fenster – Freifeld ermittelt). Die Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und dem Mikrophon im offenen Fenster variieren im Terzbandspektrum stark.

## 1 Ausgangslage und Auftrag

Die Lärmschutzverordnung verlangt, dass Lärmimmissionen in der Mitte des offenen Fensters lärmempfindlicher Räume ermittelt werden. In der 1995 vom BUWAL publizierten Mitteilung zur Lärmschutzverordnung Nr. 7 wird eine Messmethodik mit einer Mikrofonposition direkt auf dem geschlossenen Fenster oder der Gebäudefassade beschrieben. Hierbei wird von einer Schalldruckverdoppelung, also 6 dB höheren Pegeln als unter Freifeldbedingungen ausgegangen. Für die Umrechnung einer Messung mit Grenzflächenmikrofonanordnung auf das offene Fenster wird aber lediglich ein Wert von 5 dB angegeben. Entsprechend ergibt sich eine Differenz Mitte offenes Fenster gegenüber Freifeld von 1 dB. Im Rahmen von zwei Untersuchungen der Empa im Auftrag des BAFU wurde diese Relation zwischen dem Schalldruck im Freifeld und im offenen Fenster neu geklärt (Empa-Nr. 5214.00035.9 und Empa-Nr. 5214.00313.0). Exemplarische Messungen haben dabei gezeigt, dass das offene Fenster einen tendenziell schalldruckerhöhenden Effekt gegenüber einer Freifeldsituation hat. Da die Untersuchung dieses Fenstereffekts in realen Geometrien schwierig ist, wurden Massstabsmodellexperimente im Labor sowie wellentheoretische Simulationen durchgeführt. Dabei wurde für typische Geometrien und Raumnachhallzeiten eine mittlere Pegelerhöhung im offenen Fenster gegenüber Freifeld zwischen 0.4 und 0.5 dB(A) ermittelt (Empa-Nr. 5214.00313.0).

Mit Vertrag vom 11.8.2014 beauftragte das BAFU, Abteilung Lärmbekämpfung und NIS die Empa, Abteilung Akustik / Lärmminderung mit der Vergleichsuntersuchung von Lärmimmissionsmessungen im offenen Fenster mit Grenzflächenmikrofonanordnung. Im Rahmen dieser Untersuchung soll der Zuschlag von 5 dB für eine Messung mit Grenzflächenmikrofonanordnung gegenüber dem offenen Fenster neu geklärt werden. Dazu wurden auf dem Empa-Areal eine Fenstersituation an der Bahnlinie (analog Bahnlärmmessung 14.5.2013, sh. Bericht Empa-Nr. 5214.00035.9) sowie drei weitere Situationen mit typischen Wohnfenstern an einer Strasse gewählt.

## 2 Messungen

### 2.1 Allgemeines

Die Messungen wurden jeweils bei zwei identischen Fenstern nebeneinander durchgeführt. Bei einem der zwei Fenster wurde die Messung in der Mitte des offenen Fensters gemacht, und beim anderen Fenster wurde das Mikrophon an der gleichen Position in Grenzflächenmontage installiert. Bei einem zweiflügligen Fenster der Strassenlärmmessungen war dies aufgrund des Fensterbalkens nicht möglich, weshalb das Mikrophon leicht nach rechts verschoben auf der Scheibe montiert wurde. Für die Grenzflächenmontage wurde der Mikrophonkörper plan auf die Scheibe aufgeklebt, sodass eine Schalleinfallrichtung senkrecht zur Scheibe mit der Mikrophonachse einen Winkel von  $90^\circ$  bildete. Die beiden Mikrophonsignale wurden simultan mit dem zweikanaligen Norsonic Analysator 121 erfasst und als 1 Sekunden und 100 ms Leq-Terzbandpegelschriebe abgespeichert.

Bei jedem Messstandort wurden zehn auswertbare Vorbeifahrten oder Zeitfenster mit dauerndem Verkehr gemessen. Für jede Vorbeifahrt resp. jedes Zeitfenster mit Verkehr wurden aus beiden Mikrophonpegelschrieben die Ereignispegel als Terzbandspektren berechnet (exemplarisch sind die mittleren Terzspektren der Mikrophone in Grenzflächenmontage im Anhang dargestellt). Von den beiden Terzbandspektren eines Ereignisses wurde anschliessend die Pegeldifferenz bestimmt. Die zehn so erhaltenen Differenzspektren wurden schliesslich arithmetisch gemittelt.

### 2.2 Bahnlärmmessung

Am 24. Juli 2014 wurden im Büro FE 203 des Feuerhauses der Empa zehn Bahnvorbeifahrten gemessen. Das Mikrophon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 3 wurde im offenen Fenster und das Mikrophon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 2 in Grenzflächenmontage installiert. Das offene Fenster hat die Dimensionen: 0.5 m (Breite) x 1.0 m (Höhe), die Mikrophonhöhe über Boden beträgt 6.2 m. In Abbildung 1 ist die Situation dargestellt.



Abbildung 1: Bahnlärmmessung im offenen Fenster (roter Kreis) und in Grenzflächenmontage (grüner Kreis).

In der Abbildung 2 sind die ermittelten mittleren Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrofon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster grafisch dargestellt.

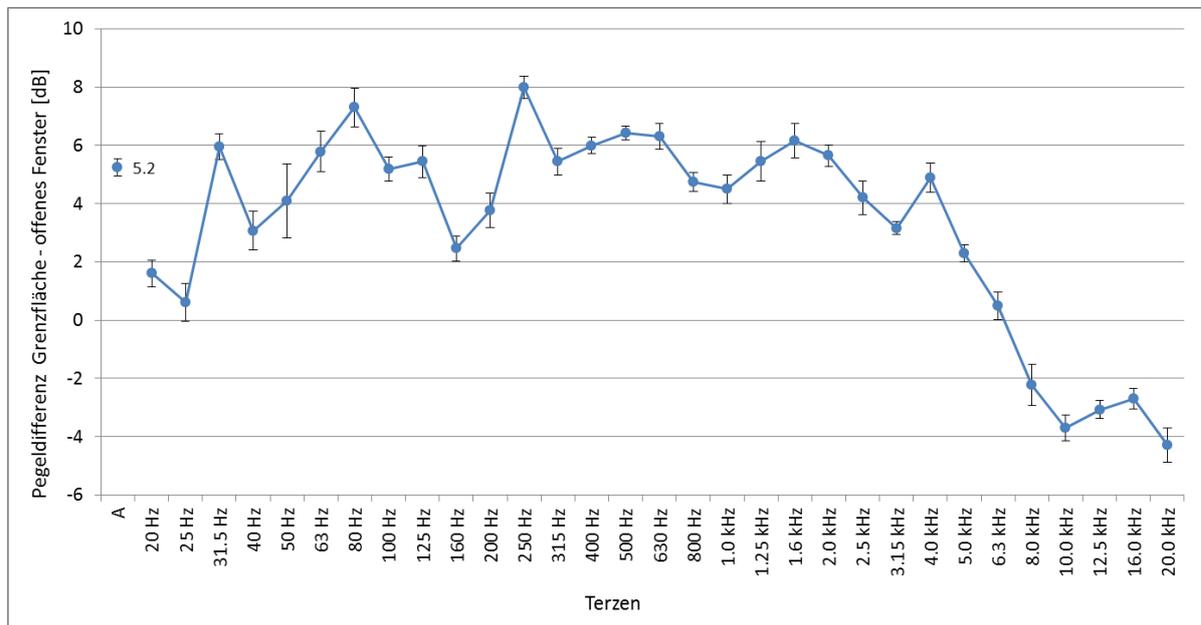


Abbildung 2: Mittlere Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrofon in Grenzflächenmontage und dem Mikrofon im offenen Fenster. Die Fehlerbalken geben plus/minus eine Standardabweichung der zehn gemittelten Ereignisse an.

Die Grenzflächenanordnung führt gegenüber Freifeld zu einer Schalldruckverdopplung, d.h. zu einer Pegelerhöhung um 6 dB. Für Frequenzen oberhalb von 4 kHz gilt dies nicht mehr, da die Mikrofonempfindlichkeit unter 90° abzunehmen beginnt und die Wellenlängen eine Grössenordnung erreichen, die nicht mehr sehr gross ist bzgl. des Mikrophondurchmessers. Zwischen 40 Hz und 4 kHz variiert die Pegeldifferenz zwischen dem Mikrofon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster zwischen 2 und 8 dB (Abbildung 2). A-bewertet beträgt die Differenz im Mittel 5.2 dB(A). Unter der Annahme, dass die Grenzflächenanordnung zu einer Erhöhung um 6 dB gegenüber Freifeld führt, entspricht dies einem Zuschlag für Messungen im offenen Fenster gegenüber Freifeld zwischen -2 und 4 dB, und A-bewertet 0.8 dB(A).

### 2.3 Strassenverkehrslärmmessungen 30er Zone

Am 29. Juli 2014 wurden an der Freie Strasse 4 und 6 in Trimbach (SO) je zehn Autovorbeifahrten gemessen. Die Freie Strasse 4 und 6 befinden sich in einer Wohnzone mit Tempo 30. Westlich in ca. 50 m Distanz befindet sich senkrecht dazu die Baslerstrasse mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 km/h. Während den zehn Autovorbeifahrten auf der Freie Strasse wurde darauf geachtet, dass auf der Baslerstrasse nicht gleichzeitig Verkehr war.

Das Mikrofon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 3 wurde im offenen Fenster und das Mikrofon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 2 in Grenzflächenmontage installiert.

Bei den Fenstern an der Freie Strasse 4 handelt es sich um relativ schmale, einflügelige Fenster mit Doppelverglasung (Isolierverglasung). Die Fenster sind 44 cm breit und 127 cm hoch. Die Mikrofonhöhe beträgt ca. 5.7 m über Boden. In Abbildung 3 ist die Situation dargestellt.



Abbildung 3: Freie Strasse 4: Strassenverkehrsmessung (30er-Zone) im offenen Fenster (roter Kreis) und in Grenzflächenmontage (grüner Kreis).

Bei den Fenstern an der Freie Strasse 6 handelt es sich um zweiflügelige Fenster mit alter Doppelverglasung (keine Isolierverglasung). Die Fenster sind 88 cm breit und 144 cm hoch. Die Mikrofonhöhe beträgt ca. 5.8 m über Boden. Das Mikrofon in Grenzflächenmontage wurde bezüglich horizontaler Lage nicht in die Mitte (auf den Rahmen) montiert, sondern ca. 20 cm versetzt davon auf dem Glas. Dies entspricht dann gerade der Mitte eines Flügels (je 18 cm vom Rahmen entfernt). Beim offenen Fenster wurde das Mikrofon trotzdem in der Mitte des offenen Fensters aufgestellt, um die Situationen so zu messen, wie dies in realen Situationen gemacht würde. Abbildung 4 zeigt die Situation.



Abbildung 4: Freie Strasse 6: Strassenverkehrsmessung (30er-Zone) im offenen Fenster (roter Kreis) und in Grenzflächenmontage (grüner Kreis).

### 2.3.1 Resultate Freie Strasse 4

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, ist bei hohen Frequenzen die Umrechnung auf Freifeld (minus 6 dB) nicht mehr gültig, weshalb die Resultate nur bis 4 kHz angeschaut werden. Zwischen 40 Hz und 4 kHz variiert die Pegeldifferenz zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster zwischen 4.1 und 7.6 dB (Abbildung 5). A-bewertet beträgt die Differenz im Mittel 5.5 dB(A). Dies entspricht einem Zuschlag für Messungen in der Mitte des offenen Fensters gegenüber Freifeld zwischen -1.6 und 1.9 dB.

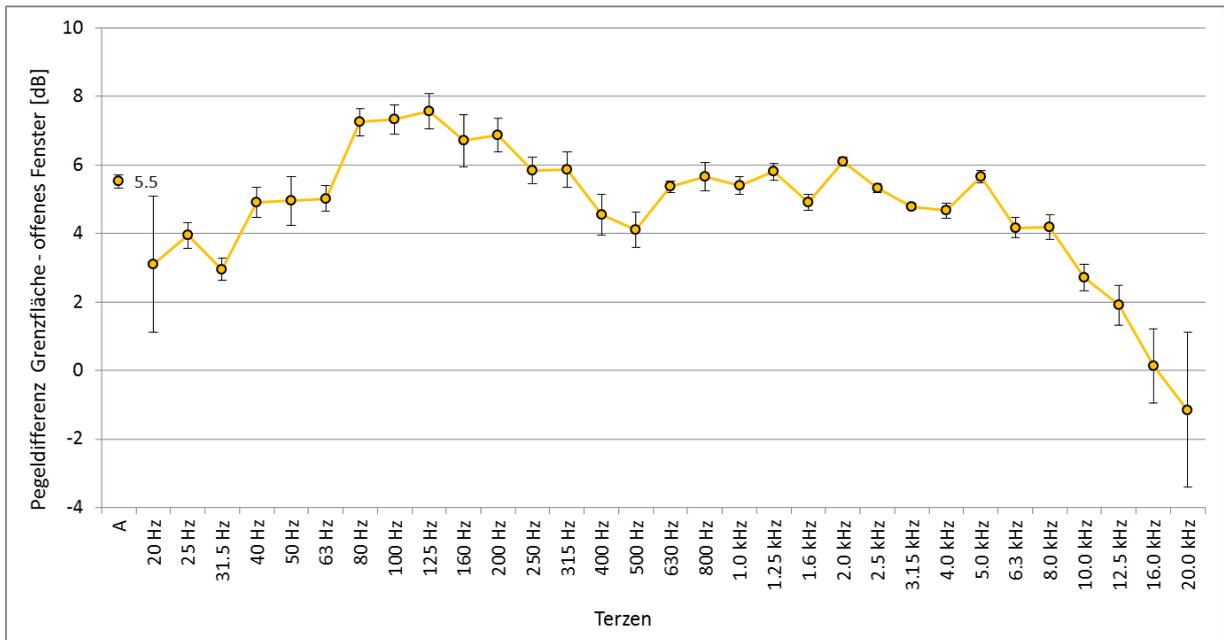


Abbildung 5: Freie Strasse 4: Mittlere Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und dem Mikrophon im offenen Fenster. Die Fehlerbalken geben plus/minus eine Standardabweichung der zehn gemittelten Ereignisse an.

### 2.3.2 Resultate Freie Strasse 6

Der Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass zwischen 40 Hz und 4 kHz die Pegeldifferenz zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster zwischen 2 und 8.5 dB variiert. A-bewertet beträgt die Differenz im Mittel 5.9 dB(A). Dies entspricht einem Zuschlag für Messungen im offenen Fenster gegenüber Freifeld zwischen -2.5 und 4 dB. Allerdings ist bei dieser Situation zu berücksichtigen, dass das Mikrophon in Grenzflächenmontage nicht genau an der gleichen Position (Mitte Fenster) befestigt werden konnte. Das Mikrophon befindet sich also auf einer Seite näher an der Fassade, was einerseits stärkere Reflexionen von der Laibung bedeuten könnte, andererseits aber auch eine grössere Abschirmung in die eine Richtung.

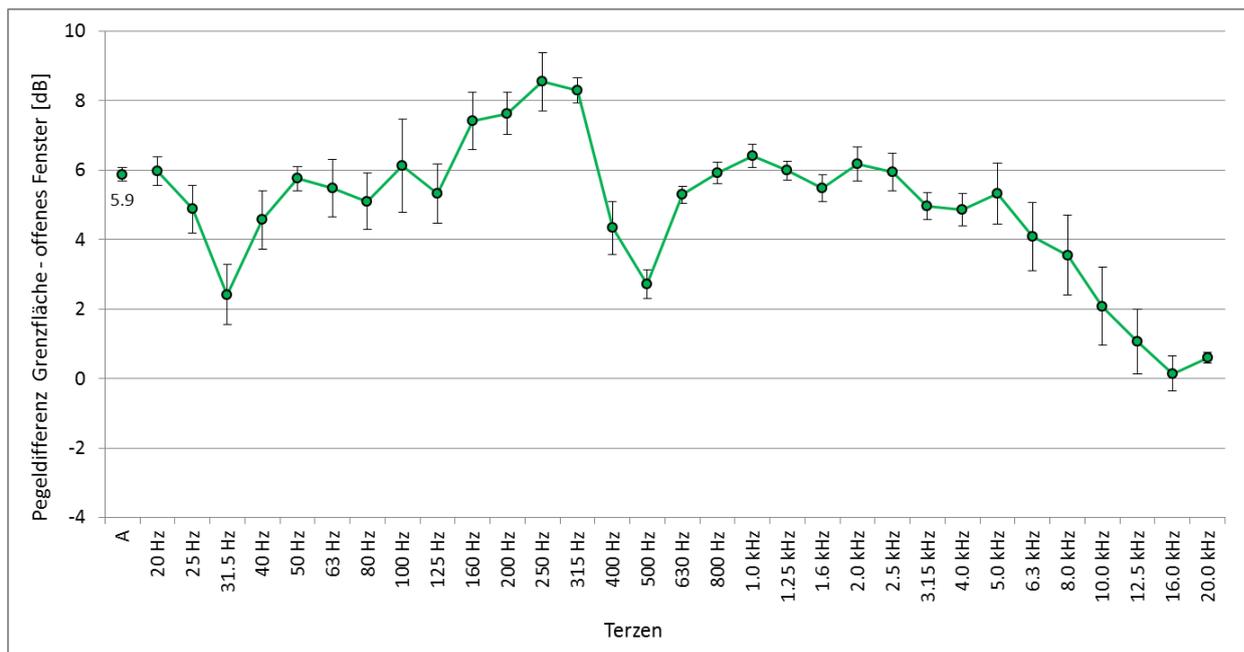


Abbildung 6: Freie Strasse 6: Mittlere Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und dem Mikrophon im offenen Fenster. Die Fehlerbalken geben plus/minus eine Standardabweichung der zehn gemittelten Ereignisse an.

## 2.4 Strassenverkehrslärmmessung Überlandstrasse (60 km/h)

Am 27. August 2014 wurden Strassenverkehrslärmmessungen der Überlandstrasse (60 km/h) im Dienstgebäude (Büro DG 228 und DG 230) der Empa gemacht. Da die Überlandstrasse relativ viel Verkehr hat, wurden nicht einzelne Vorbeifahrten, sondern 10 Zeitabschnitte von je ca. 20 bis 70 Sekunden gemessen. Das Dienstgebäude befindet sich nahe bei einer Kreuzung mit Ampel. Die ausgewerteten Zeitabschnitte wurden so gewählt, dass während der gesamten Zeit fließender Verkehr war.

Das Mikrophon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 2 wurde im offenen Fenster des Büros DG 228 und das Mikrophon B&K 4189, zugehörig zu 121 Nr. 3 in Grenzflächenmontage des Büros DG 230 installiert.

Die beiden Büros sind identisch in ihrer Grösse und haben die gleichen Fenster. Bei den Fenstern handelt es sich um zweiflügelige Fenster mit Doppelverglasung (Isolierverglasung), welche 157 cm breit und 120 cm hoch sind. Die Mikrophonhöhe beträgt ca. 4.4 m über Boden. In Abbildung 7 ist die Situation dargestellt.



Abbildung 7: Dienstgebäude Empa: Strassenverkehrsmessung im offenen Fenster (roter Kreis) und in Grenzflächenmontage (grüner Kreis).

In der Abbildung 8 sind die ermittelten mittleren Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster grafisch dargestellt. Zwischen 40 Hz und 4 kHz variieren die Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und im offenen Fenster zwischen 1.6 und 9.9 dB. A-bewertet beträgt die Differenz im Mittel 4.8 dB(A). Dies entspricht einem Zuschlag für Messungen im offenen Fenster gegenüber Freifeld zwischen -3.9 und 4.4 dB.

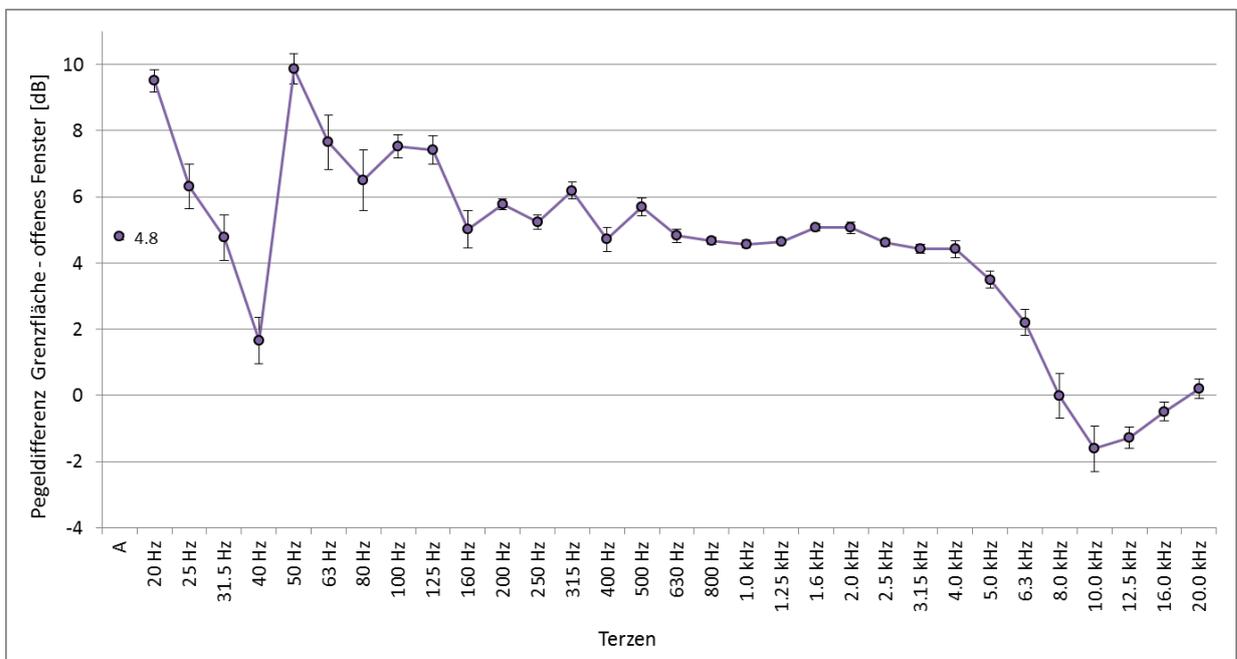


Abbildung 8: Mittlere Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und dem Mikrophon im offenen Fenster. Die Fehlerbalken geben plus/minus eine Standardabweichung der zehn gemittelten Ereignisse an.

### 3 Diskussion

Die vier Messungen ergeben für die Grenzflächenmontage im Vergleich zum offenem Fenster im Mittel um 4.8, 5.2, 5.5 und 5.9 dB(A) höhere Werte. Die Pegeldifferenzen zwischen dem Mikrophon in Grenzflächenmontage und dem Mikrophon im offenen Fenster variieren im Terzbandspektrum stark und sind bei einzelnen Terzen auch grösser als 6 dB (Schalldruckverdopplung). Diese Abweichungen der Terzbänder von den zu erwartenden 6 dB sind grösser als die Standardabweichungen der gemittelten Ereignisse. Für hohe Frequenzen (ca. > 4kHz) ist die Umrechnung auf Freifeld (minus 6 dB) nicht mehr gültig, da die Mikrophonempfindlichkeit unter 90° abzunehmen beginnt und die Wellenlängen eine Grössenordnung erreichen, die nicht mehr sehr gross ist bzgl. des Mikrophondurchmessers. Die entsprechende Grenzfrequenz kann aber nicht eindeutig angegeben werden. Bei den sehr tiefen Frequenzen (< 40 Hz) mit entsprechend flachem Einfallswinkel ist die Fenstergrösse nicht genügend gross um von einer Schalldruckverdoppelung ausgehen zu können. Im tiefen und mittleren Frequenzbereich (ca. 40 Hz bis 4 kHz) dürften die Variationen auf verschiedene Einflüsse des Fensters zurückzuführen sein. So können Beugungen am Fenster im Vergleich zu Reflexionen aus dem Raum zu solchen Variationen führen. In Abhängigkeit der Dimensionen des Fensters (endlicher Reflektor) und der Wellenlänge sind unterschiedliche destruktive oder konstruktive Reflexionsmuster möglich, was ebenfalls zu solchen Variationen im Terzspektrum führen kann. Weitere Variationen sind auf Beugungen, Reflexionen oder auch Abschirmungen an der Fensterlaibung und/oder dem Fensterahmen zurückzuführen. Diese Effekte dürften insbesondere bei Situationen wo die Mikrophonposition nicht genau an der gleichen Stelle gewählt werden konnte und bei zweiflügligen Fenstern mit Fensterrahmen in der Mitte relevant sein.

Bei den durchgeführten Messungen wurden sich vorbeibewegende Quellen (Bahn, Strassenverkehr) untersucht, weshalb eine Unsicherheit bezüglich der Referenzsituation entsteht.

Die vorliegenden Resultate deuten darauf hin, dass der Zuschlag von 5 dB für eine Messung mit Grenzflächenmikrophonanordnung gegenüber dem offenen Fenster etwas zu tief ist. Im Mittel ergeben die Messungen einen Zuschlag von 5.4 dB(A). Dieses Ergebnis beruht jedoch nur auf vier Messungen und die Differenzen von Messung zu Messung sind relativ gross. Der resultierende mittlere Zuschlag von 5.4 dB(A) deutet darauf hin, dass der Zuschlag im offenen Fenster gegenüber Freifeld eher unter 1 dB(A) liegt. Dieses Resultat bestärkt den in der Studie Empa-Nr. 5214.00313.0 ermittelten 0.5 dB(A) Zuschlag im offenen Fenster gegenüber Freifeld.

## Anhang

### Terzspektren der Ereignispegel der Mikrophone in Grenzflächenmontage

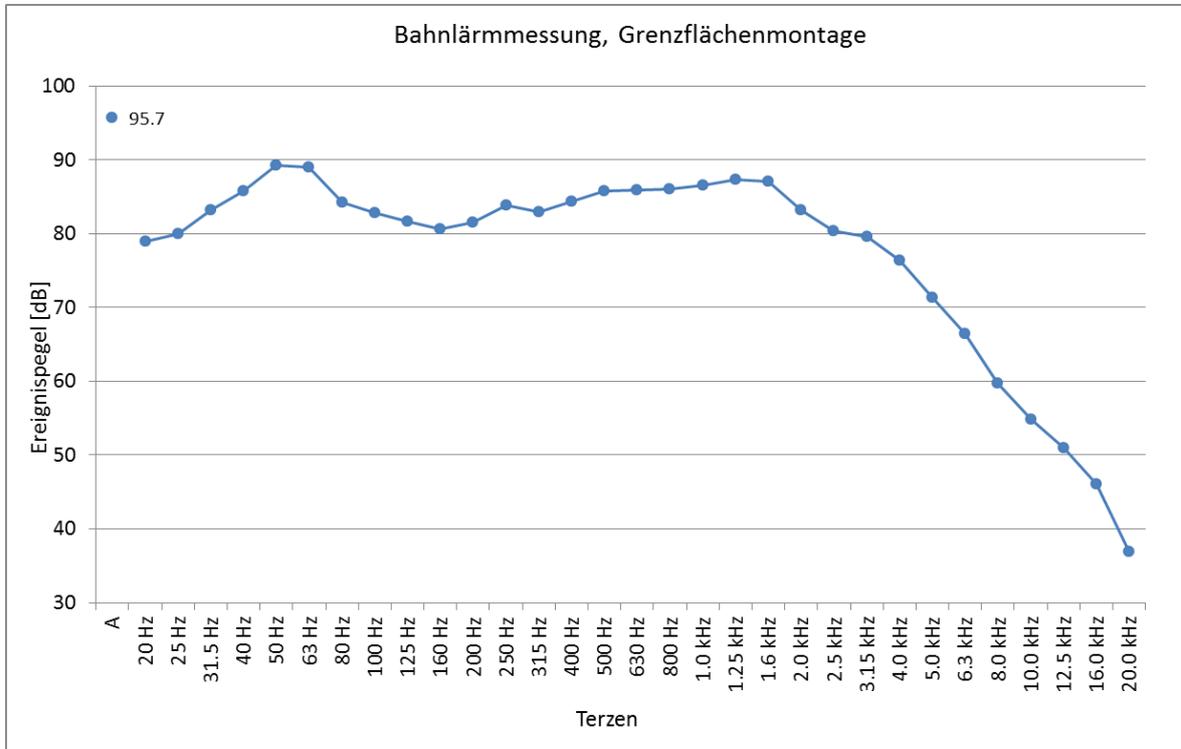


Abbildung 9: Mittlere Ereignispegel der Mikrophone in Grenzflächenmontage für die Bahnlärmmessung.

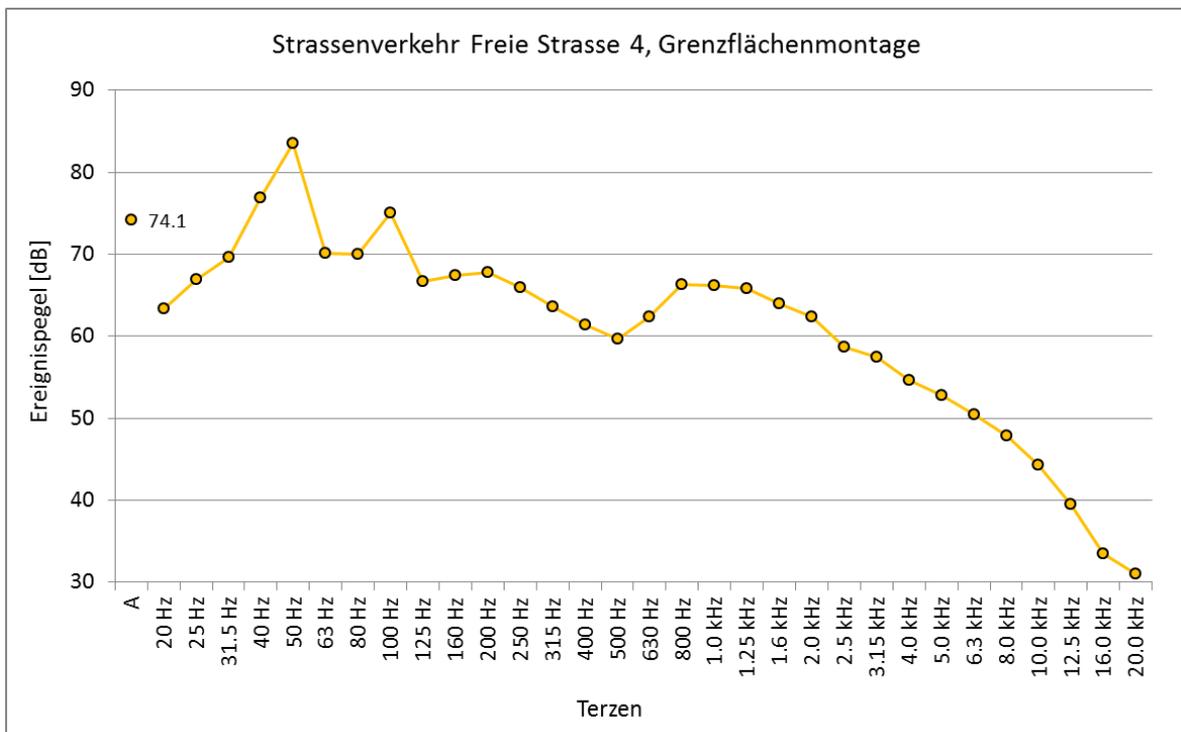


Abbildung 10: Mittlere Ereignispegel der Mikrophone in Grenzflächenmontage für die Strassenverkehrslärm-messung (30er-Zone) an der Freie Strasse 4.

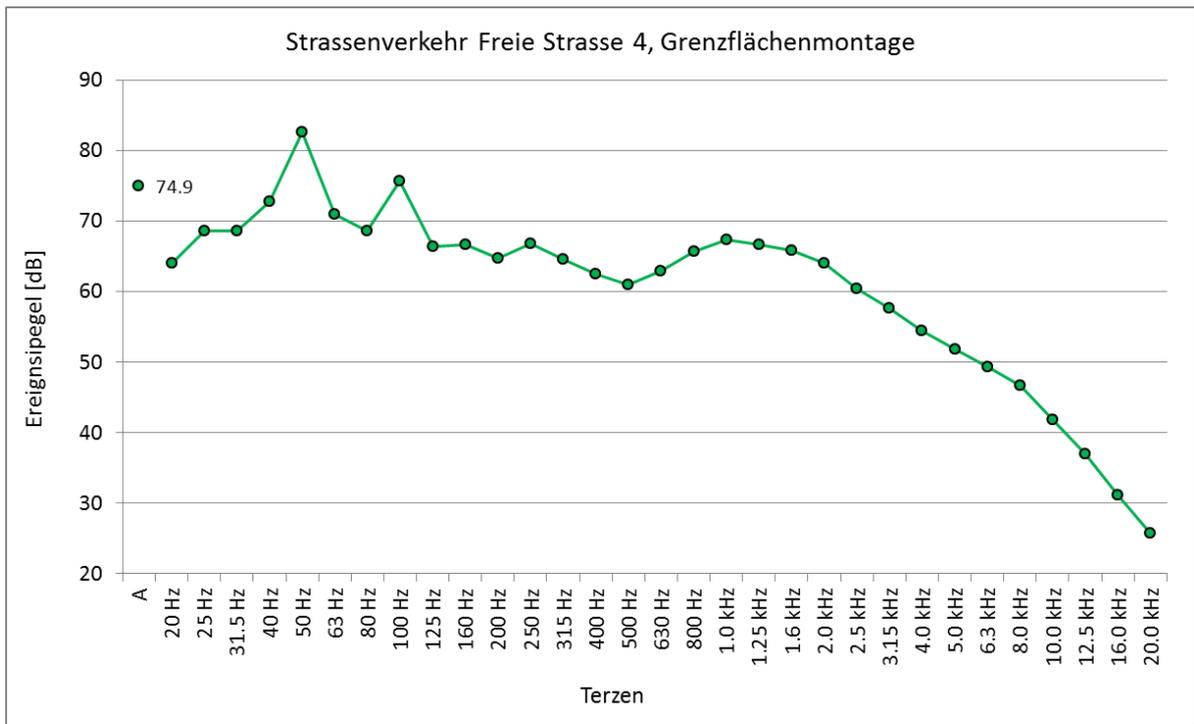


Abbildung 11: Mittlere Ereignispegel der Mikrophone in Grenzflächenmontage für die Strassenverkehrslärm-messung (30er-Zone) an der Freie Strasse 6.

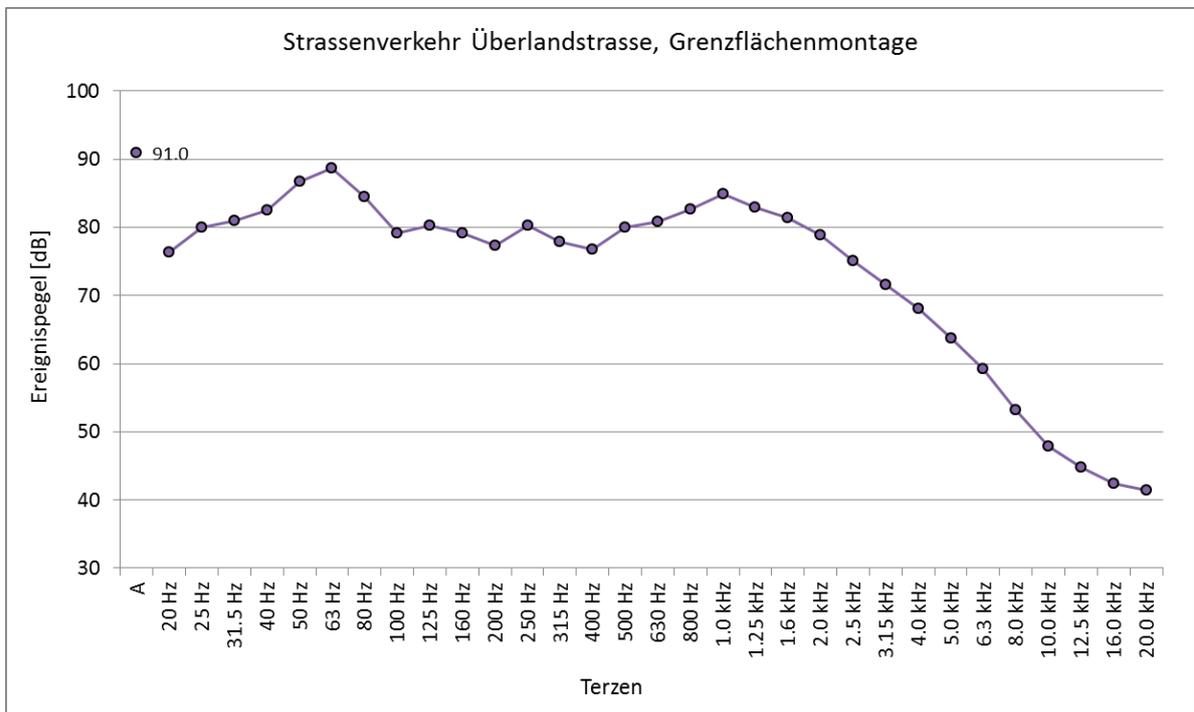


Abbildung 12: Mittlere Ereignispegel der Mikrophone in Grenzflächenmontage für die Strassenverkehrslärm-messung an der Überlandstrasse (60 km/h).