



OBJEKT

Monitoring flankierende Massnahmen - Umwelt (MfM-U)



TITEL

160755 B 02

Entwicklung der akustischen Merkmale von LKW



AUFTRAGGEBER

Bundesamt für Umwelt BAFU
Klaus Kammer
Abt. Ökonomie und Forschung
CH - 3007 Bern



ORT UND DATUM

Rivera, 15. Februar 2012



VERFASSTER



Dr. Angelo Bernasconi



Dr. Dario Bozzolo

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	3
2. METHODISCHES VORGEHEN	4
2.1. EINLESEN DER DATEN	4
2.2. BEREINIGEN DER DATEN.....	4
2.3. SELEKTION DER ZEITRÄUME	4
2.4. SCHRITT 1	8
2.5. SCHRITT 2	9
2.6. ITERATIONS-PROZESS	9
3. ERGEBNISSE.....	11
3.1. TEST MIT DEN DATEN VON 2003	11
3.2. AKUSTISCHE MERKMALE IM JAHR 2010.....	14
3.2.1. IMMISSIONSSPEKTREN EINES REFERENZWAGENS (RW)	14
3.2.2. IMMISSIONSSPEKTREN EINES LASTWAGENS (LKW)	15
3.3. ENTWICKLUNG DER AKUSTISCHEN MERKMALE (2003 - 2010)	17
4. SCHLUSSFOLGERUNGEN	21
5. ANHÄNGE	22

1. Einführung

Mit dem Projekt „Monitoring Flankierende Massnahmen – Umwelt (MfM-U) Teil Strassenlärm“ verfolgt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) die Entwicklung der akustischen Belastung längs der Nord-Süd-Achse seit mehr als 10 Jahren.

Für das Monitoring werden an insgesamt sechs Standorten entlang der A2 und A13 akustische Immissionen des Strassenverkehrs nahe der Quelle messtechnisch kontinuierlich erfasst. Dabei werden je zwei Mikrophone auf beiden Seiten der Autobahn in einem Abstand von 6,5 m von der Mitte der Normalspur und in einer Höhe von 3,2 m über der Belagsoberfläche eingesetzt.

Im Zusammenhang mit dem Landesverkehrsabkommen mit der EU ist die von den Lastkraftwagen (LKW) verursachte Strassenlärmbelastung von zentraler Bedeutung. Diese Entwicklung hängt nicht nur von der Anzahl verkehrender Lastwagen ab (d.h. von der effektiv erreichten Verlagerung des LKW-Verkehrs von der Strasse auf die Schiene), sondern wird auch von einer Reihe anderer Faktoren beeinflusst, wie z.B. technische Fortschritte im Fahrzeugpark (Motor, Reifen), Belagsveränderungen (Abnutzung, Einbau von lärmarmen Belägen), effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten, LKW-Verkehrsregelung (erlaubte Fahrzeiten) und -Steuerung, usw..

Im Sinne der Beobachtung der Entwicklung ist es sinnvoll, periodisch auch spezifische Auswertungen zu wiederholen und die Ergebnisse mit denjenigen von früheren Untersuchungen zu vergleichen.

Dies ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Im Bericht „Untersuchung auf LKW-sensible Merkmale“ vom März 2005 wurde ein methodologisches Vorgehen vorgestellt und auf die während des Herbsts 2003 gemessenen Daten angewendet, um Merkmale herauszufinden, welche besonders stark auf den LKW-Verkehr reagieren. Mit diesem Verfahren wurden sowohl Aspekte berücksichtigt, welche mit den Emissionen der LKW zusammenhängen als auch Lärmbelastungen, welche eher mit der LKW-Verkehrsregelung verknüpft sind.

In dieser Arbeit wurde die mathematische Methode weiter verfeinert und an den während des Herbsts 2010 gemessenen Daten angewendet. Damit ist es möglich, durch Vergleiche mit den Daten von 2003 Erkenntnisse über die Entwicklung der akustischen Merkmale von LKW's zu gewinnen.

2. Methodisches Vorgehen

Das methodologische Vorgehen ist detailliert im Bericht „Untersuchung auf LKW-sensible Merkmale“ von März 2005 beschrieben. An dieser Stelle wird es nur der Vollständigkeit halber kurz beschrieben. Die getroffenen Optimierungen werden dabei vorgestellt.

Das Vorgehen basiert im Wesentlichen auf der Feststellung, dass sich die aufgenommenen Lärmspektren während der LKW-Fahrperiode (Werktage, von 5.00 bis 22.00 Uhr) deutlich von denjenigen während des nächtlichen Fahrverbots (22.00 bis 5.00 Uhr) oder am Sonntag unterscheiden. Die letztgenannten Spektren sehen praktisch gleich aus, was vermuten lässt, dass das Vorhandensein bzw. die Abwesenheit der LKW für diesen Sachverhalt verantwortlich ist.

Um die Merkmale des LKW-Verkehrs besser zu charakterisieren, wurden die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien (nach Swiss 7) auf die folgende unkonventionelle Art zusammengefasst:

- Die Kategorien 5 bis 7 stellen die **LKW** dar (*Lastwagen, Lastenzüge und Sattelzüge*);
- Alle anderen Kategorien zusammen wurden den übrigen, als **Referenzwagen RW** bezeichneten Fahrzeugen zugeordnet, welche sowohl leise (PW) als auch lärmige Fahrzeuge (Busse, Cars und Motorräder) enthalten.

Diese Definitionen (LKW und RW) stellen die Basis des methodologischen Vorgehens dar, welches im Flussdiagramm nach Abbildung 1 schematisch beschrieben ist.

2.1. Einlesen der Daten

Während der ersten Phase werden die gesamten benötigten Daten eingelesen: Verkehrsmengen, mittlere Geschwindigkeiten und akustische Grössen. Diese Werte stehen in halbstündiger Auflösung zur Verfügung. Für die vorliegende Studie wurden die Daten des ganzen Monats September 2010 verwendet.

Damit mit der echten analytischen Phase begonnen werden kann, müssen die aufgenommenen Daten bereinigt werden.

2.2. Bereinigen der Daten

Es werden hauptsächlich zwei Kriterien angewendet, um die Daten zu bereinigen:

- **Fehlerhafte Aufnahmen:** Bei den Verkehrsdaten kam es vor, dass die Zähler während bestimmter Zeitintervalle keine Werte aufgenommen haben. Diese Zeitintervalle werden gesucht und aus den Daten gelöscht.
- **Nasser Belag:** Als Kriterium für einen nassen Belag wird die Pegeldifferenz bei 1 kHz und 10 kHz herangezogen: ist sie kleiner als 15 dB, werden die entsprechenden Daten als „nasser“ Zustand interpretiert und für die Auswertungen nicht verwendet.

2.3. Selektion der Zeiträume

Für die Berechnung des RW-Spektrums wird nach Zeitintervallen gesucht, wo die Anzahl von LKW's auf der *Normalspur* der betrachten Richtung (Nord-Süd oder Süd-Nord) kleiner oder gleich 0.5% ist. Das kommt in der Regel nur während der Fahrsperrung für LKW, d.h. nachts von 22.00 bis 05.00 und Sonntags vor.

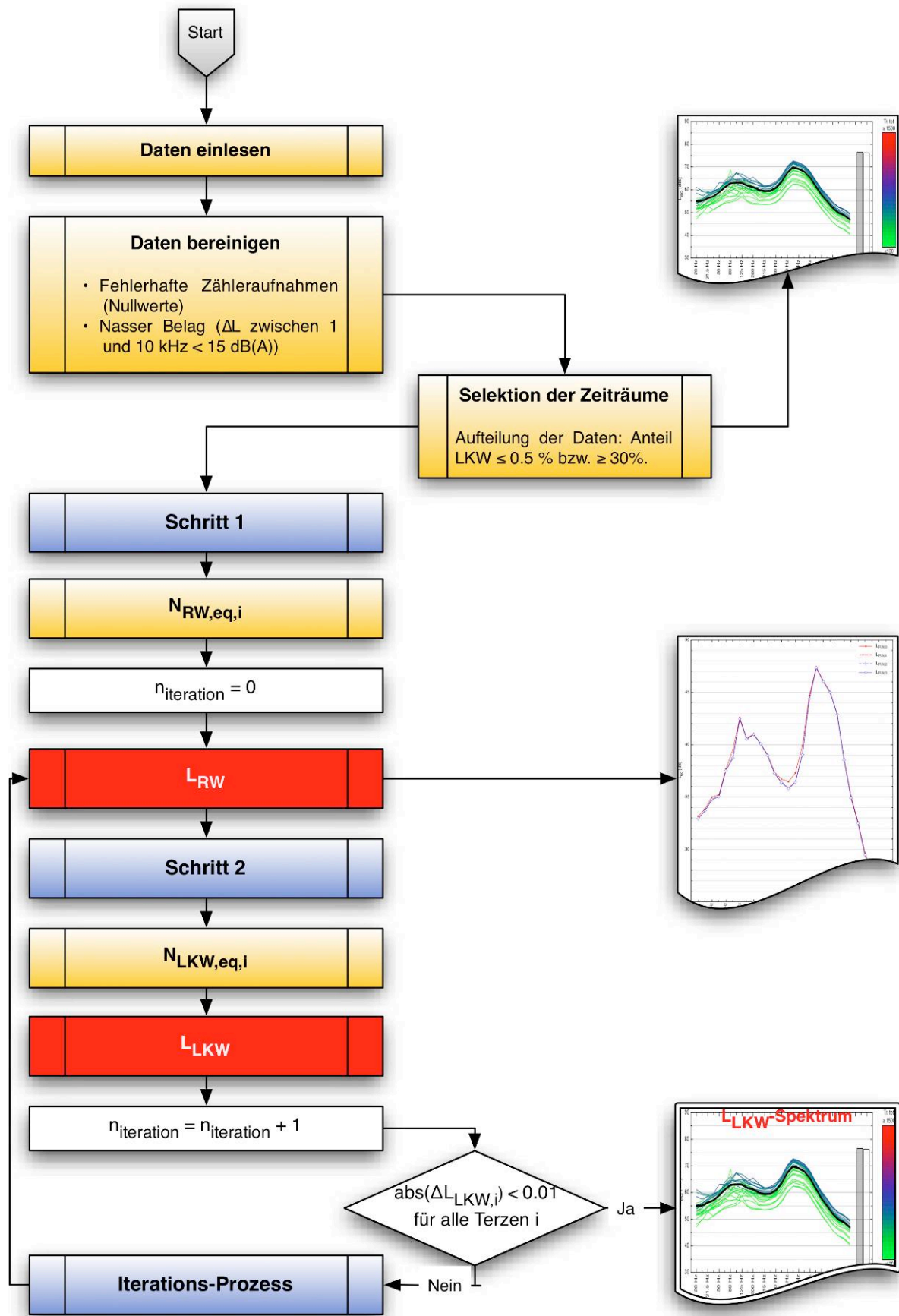


Abbildung 1: Vereinfachtes Flussdiagramm des methodologischen Vorgehens.

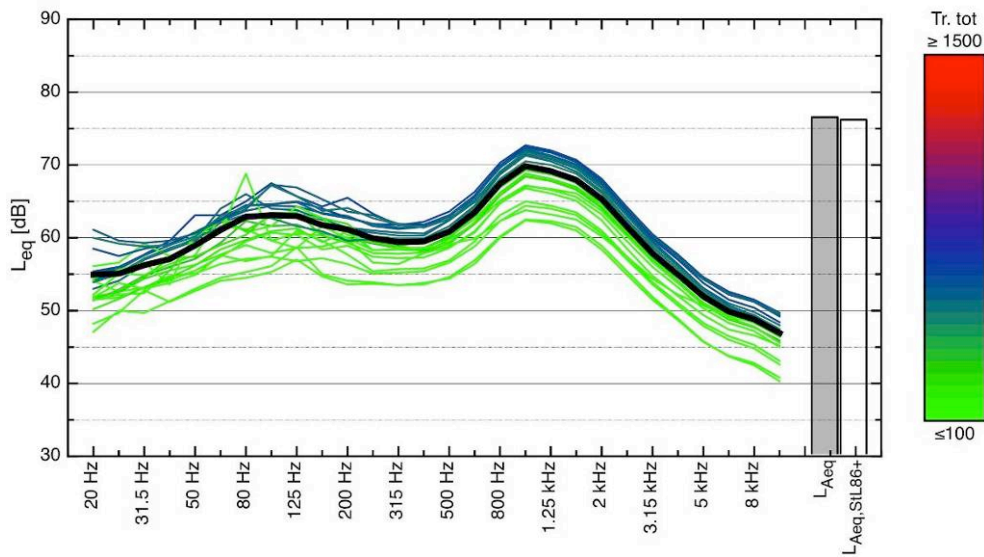


Abbildung 2: Gemessene Spektren (Halbstunden-Mittelwerte) in Camignolo (Süd-Nord, September 2010) während den Perioden mit LKW-Anteil auf der Normalspur $\leq 0.5\%$. Die Farbe der Kurven hängt vom Gesamtverkehr ab (nach der Farbskala auf der rechten Seite). Die zwei Säulen rechts zeigen den mittleren gemessenen L_{Aeq} (für eine halbe Stunde) und den auf der Basis der Verkehrsdaten mit dem Modell STL86+ berechneten Wert (s. Text).

In Abbildung 2 ist das Ergebnis der Anwendung dieses Verfahrens für die in Camignolo erhobenen Daten dargestellt (Richtung Süd-Nord, September 2010). Die gemessenen Spektren beziehen sich auf die Perioden mit LKW-Anteil auf der Normalspur $\leq 0.5\%$. Die Farbe der Kurven hängt vom Gesamtverkehr gemäss der Farbskala ab. Es kann festgestellt werden, dass die höher liegenden Kurven – wie erwartet – den Halbstunden mit höherem Gesamtverkehr entsprechen. Um die Qualität dieser Daten weiter zu untersuchen, welche als Ausgangspunkt für die Berechnung des RW-Spektrums dienen, wurde der gemessene Lärmpegel L_{Aeq} mit demjenigen verglichen, welcher nach dem Modell STL86+ berechnet wurde ($L_{Aeq,STL86+}$).

Dazu wurden die Lärmemissionen von RW und LKW gemäss folgender Gleichungen berechnet:

$$L_{Aeq,RW,j} = 43 + 10 \cdot \log\left(1 + \left(v_j/50\right)^3\right) + 10 \cdot \log(N_{RW,j}) \quad (1a)$$

$$L_{Aeq,LKW,j} = 43 + 10 \cdot \log\left[\left(1 + \left(v_j/50\right)^3\right) \cdot \left(1 + 20 \cdot \left(1 - v_j/150\right)\right)\right] + 10 \cdot \log(N_{LKW,j}) \quad (1b)$$

Dabei sind $v_{RW,j}$ und $v_{LKW,j}$ die mittleren RW- und LKW-Geschwindigkeiten während der betrachteten Halbstunde auf der Fahrspur j und $N_{RW,j}$ und $N_{LKW,j}$ die entsprechenden Verkehrsmengen. Daraus kann man den Gesamtlärm unter Berücksichtigung der geometrischen Divergenz ($A_{d,j}$), der Luftabsorption ($A_{a,j}$) und des Bodeneffektes ($A_{g,j}$) berechnen:

$$L_{Aeq,STL86+,j} = L_{Aeq,RW,j} \oplus L_{Aeq,LKW,j} + A_{d,j} + A_{a,j} + A_{g,j} \quad (2)$$

wobei \oplus die energetische Summe bedeutet. Schlussendlich muss man die Berechnungsergebnisse der einzelnen Fahrspuren energetisch addieren.

Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen L_{Aeq} -Werten und den berechneten Lärmpegeln gilt nicht nur für das Mittel aller ausgewählten Zeiträume (s. Abbildung 2), sondern auch für die einzelnen ausgewählten Halbstunden, wie dies in Abbildung 3 gezeigt wird. In dieser Abbildung sind so-

wohl die Ergebnisse für die Halbstunden mit vorherrschenden RW-Lärmemissionen (rote Punkte) wie auch diejenigen für die Halbstunden mit hohem LKW-Anteil auf der Normalspur (d.h. grösser gleich als 30%) dargestellt (blaue Punkte). Die letzteren stellen den Startpunkt für die Berechnung des LKW Spektrums dar und sind im Detail in Abbildung 4 dargestellt. Die gleichen graphischen Darstellungen sind für alle Standorte in den Anhängen 1 und 2 zusammengetragen. Die leichten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten bei den Halbstunden mit vorherrschenden RW-Lärmemissionen (rote Punkte) sind auf die Input-Verkehrsdaten der Berechnung zurückzuführen, welche den Beitrag von Car, Bus und Motorräder am Anteil der „lärmige“ Fahrzeuge nicht berücksichtigen.

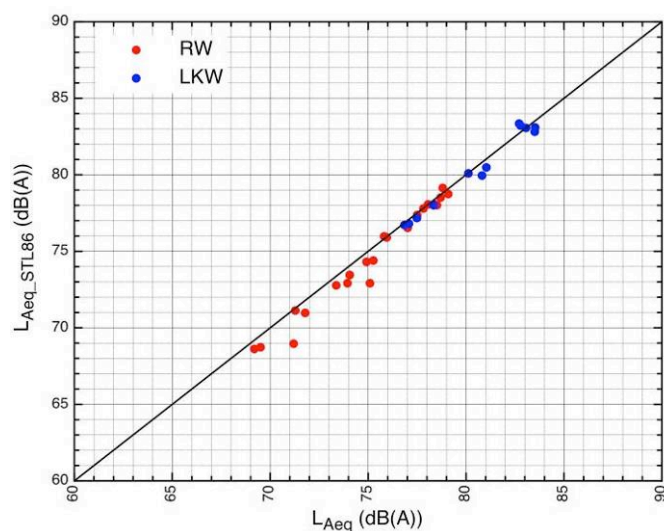


Abbildung 3: Die nach dem Modell STL86+ berechneten Werte (s. Text) sind als Funktion der gemessenen Halbstunden-Mittelwerte graphisch dargestellt (rot: Halbstunden mit LKW-Anteil $\leq 0.5\%$, blau: Halbstunden mit LKW-Anteil $\geq 30\%$). Die Gerade stellt die Achsenhalbierende (Identitätsfunktion) dar. Die Daten wurden in Camignolo (Süd-Nord Richtung, September 2010) gemessen.

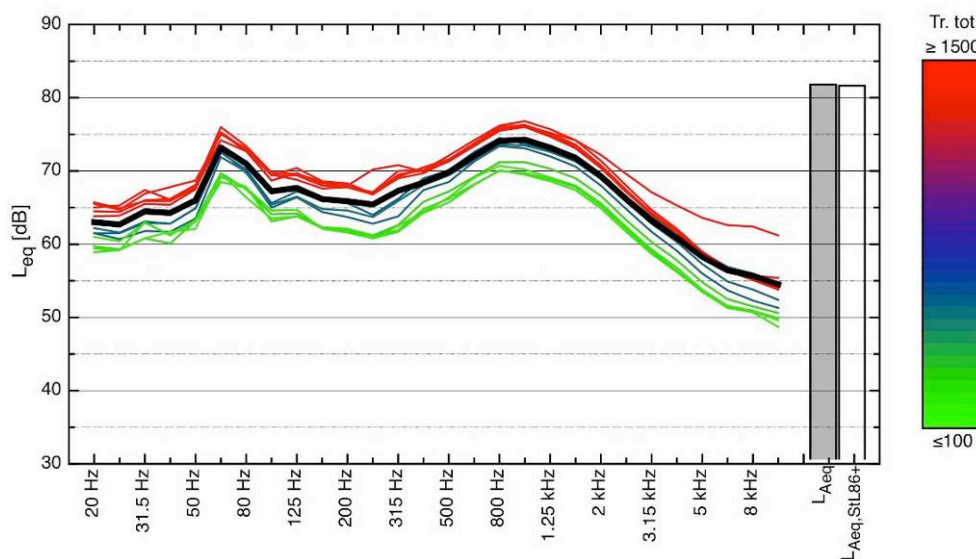


Abbildung 4: Gemessene Spektren (Halbstunden-Mittelwerte) in Camignolo (Süd-Nord, September 2010) während den Perioden mit LKW-Anteil auf der Normalspur $\geq 30\%$. Die Farbe der Kurven hängt vom Gesamtverkehr ab

(nach Farbskala auf der rechten Seite). Die 2 Säulen rechts zeigen den mittleren gemessenen L_{Aeq} (für eine Halbstunde) und den auf der Basis der Verkehrsdaten mit dem Modell STL86+ berechneten Wert (s. Text).

2.4. Schritt 1

Aus den halbstündigen Lärmspektren mit sehr kleinen LKW-Beiträgen (LKW-Anteil $\leq 0.5\%$) kann ein Immissionsspektrum für die Vorbeifahrt eines Referenzwagens RW auf der Normalspur pro Stunde mit einer klar definierten Fahrgeschwindigkeit ($v_{RW,ref} = 120$ km/h) hergeleitet werden. Man erreicht dies, indem man aus dem Pegel in der i-ten Terz den Einfluss der auf den einzelnen Fahrspuren mit verschiedenen Verkehrsmengen und gefahrenen Geschwindigkeiten subtrahiert:

$$L_{RW,ref,i} = L_{mit\ LKW\ Anteil \leq 0.5\%,i} - 10 \cdot \log(N_{RW,eq,i}) + \Delta L_{RW\ Geschw.}, \quad (3)$$

wobei

$L_{RW,ref,i}$ Immissionspegel am Mikrophon von 1 RW pro Stunde auf Normalspur und einer vorgegebenen Referenzgeschwindigkeit $v_{RW,ref}$ in der Terz i;

$N_{RW,eq,i}$ „akustisch äquivalente“ Anzahl von Referenzwagen (in der Terz i) auf der Normalspur in Fahrtrichtung mit der Fahrgeschwindigkeit v_{ns} ;

$\Delta L_{RW,Geschw.}$ Korrektur-Term, um den Immissionspegel von der Geschwindigkeit v_{ns} auf die Geschwindigkeit $v_{RW,ref}$ zu beziehen (hergeleitet durch SonRoad, zirka 1 dB/10 km/h);

$v_{RW,ref}$ Referenz-Geschwindigkeit für RW, auf 120 km/h (Tempo-Limite) festgelegt.

Die „akustisch äquivalente“ Anzahl von Referenzwagen auf der Normalspur (in Fahrtrichtung) mit der Fahrgeschwindigkeit v_{ns} wird mit Hilfe der Ausbreitungsdämpfungen A_j (s. EMPA, Untersuchungsbericht Nr. 432309 "MfM-U: Ermittlung der akustischen Ausbreitungsdämpfungen", 14 April 2004) und des Korrektur-Terms ΔL_j abgeschätzt, wobei die Fahrgeschwindigkeit auf der Überholspur berücksichtigt wird. Da die Ausbreitungsdämpfungen auch in Abhängigkeit der Terzen zur Verfügung stehen, wurde in dieser Studie – im Gegensatz zu derjenigen von März 2005 – die „akustisch äquivalente“ Anzahl von Referenzwagen für jede Terz i berechnet:

$$N_{RW,eq,i} = N_{RW,ns} + N_{RW,us} \cdot 10^{\frac{A_{ns,i} - A_{us,i} + \Delta L_{RW,us-ns}}{10}} + N_{RW,fns} \cdot 10^{\frac{A_{fns,i} - A_{ns,i} + \Delta L_{RW,fns-ns}}{10}} + N_{RW,fus} \cdot 10^{\frac{A_{fus,i} - A_{ns,i} + \Delta L_{RW,fus-ns}}{10}}, \quad (4)$$

wobei:

$\Delta L_{RW,j-ns}$ Korrektur-Termen, um den Immissionspegel von der Geschwindigkeit v_j (der Fahrspur j) auf der Geschwindigkeit v_{ns} zu beziehen

$A_{j,i}$ A-bewertete Ausbreitungsdämpfungen von der Spur j zum Mikrophon für die Terz i;

$N_{RW,ns}$ Anzahl der Referenzwagen auf der Normalspur in Fahrtrichtung (Messwerte);

$N_{RW,us}$ Anzahl der Referenzwagen auf der Überholspur in Fahrtrichtung (Messwerte);

$N_{RW,fns}$ Anzahl der Referenzwagen auf der Normalspur in der Gegenrichtung (Messwerte);

$N_{RW,fus}$ Anzahl der Referenzwagen auf der Überholspur in der Gegenrichtung (Messwerte).

Eine weitere Optimierung gegenüber der früheren Studie besteht darin, dass die Geschwindigkeitskorrektur (bezüglich der Normalspur) für alle Spuren durchgeführt wird.

2.5. Schritt 2

Der nächste Schritt besteht darin, aus den während der LKW-Fahrperiode (LKW Anteil $\geq 30\%$) gemessenen Immissionspektren ein mittleres Spektrum (LKW+RW) zu bilden und dann den Beitrag der RW energetisch zu subtrahieren:

$$L_{LKW,ref,i} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{mit\ LKW\ Anteil \geq 30\%,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{RW,ns,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{RW,us,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{RW,fs,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{RW,fus,i}}{10}} \right) - 10 \cdot \log(N_{LKW,eq,i}) + \Delta L_{LKW\ Geschw.}, \quad (5)$$

wobei

- $L_{LKW,ref,i}$ Immissionspegel am Mikrophon von 1 LKW pro Stunde auf Normalspur und einer vorgegebenen Referenzgeschwindigkeit $v_{RW,ref}$ in der Terz i;
- $L_{mit\ LKW\ Anteil \geq 30\%,i}$... mittlerer Immissionspegel in der Terz i, nur Messdaten mit LKW-Anteil $\geq 30\%$ berücksichtigt (Messwerte);
- $L_{RW,j,i}$ berechnete Immissionspegel der RW von der j-ten Fahrbahn in der Terz i (für Normal- und Überholspur werden nicht nur die Verkehrsmengen sondern auch die effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten berücksichtigt);
- $N_{LKW,eq,i}$ „akustisch äquivalente“ Anzahl von LKW (in der Terz i) auf der Normalspur in Fahrtrichtung mit der Fahrgeschwindigkeit v_{ns} (wurde ähnlich wie $N_{RW,eq,i}$ berechnet, s. Gleichung (4));
- $\Delta L_{LKW,Geschw}$ Korrektur-Term, um den Immissionspegel von der Geschwindigkeit v_{ns} auf die Geschwindigkeit $v_{LKW,ref}$ zu beziehen (hergeleitet durch SonRoad, zirka 1 dB/10 km/h;
- $v_{LKW,ref}$ Referenz-Geschwindigkeit für LKW, auf 80 km/h (Tempo-Limite) festgelegt.

2.6. Iterations-Prozess

Schritt 1 mit Berücksichtigung des LKW-Beitrags, d.h.

$$L_{RW,ref,i} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{mit\ LKW\ Anteil \geq 0,5\%,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{LKW,ns,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{LKW,us,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{LKW,fs,i}}{10}} - 10^{\frac{L_{LKW,fus,i}}{10}} \right) - 10 \cdot \log(N_{RW,eq,i}) + \Delta L_{RW\ Geschw.}, \quad (6)$$

und Schritt 2 durchlaufen einen iterativen Optimierungsprozess. Die Konvergenz ist erreicht, wenn die Pegeldifferenz in den Terzen von 2 aufeinander folgenden Iterationen kleiner als 0.01 dB beträgt. Wie in der Abbildungen 5 anhand der Messdaten von Camignolo (Süd-Nord, September 2010) ersichtlich ist, wird die Konvergenz der berechneten Referenz-Spektren normalerweise mit 3 bis 4 Berechnungsdurchgängen erreicht. Es muss beachtet werden, dass sich die Referenz-Spektren in der Abbildung am RW beziehen. Die grösste Korrektur findet beim ersten Durchgang des Iterations-Prozesses statt, wenn der LKW-Beitrag zum ersten Mal subtrahiert wird.

Da die Referenz-Spektren für LKW im Iterations-Prozess allein durch Subtraktion der RW-Beiträge berechnet werden, müssen sie ebenso schnell konvergieren.

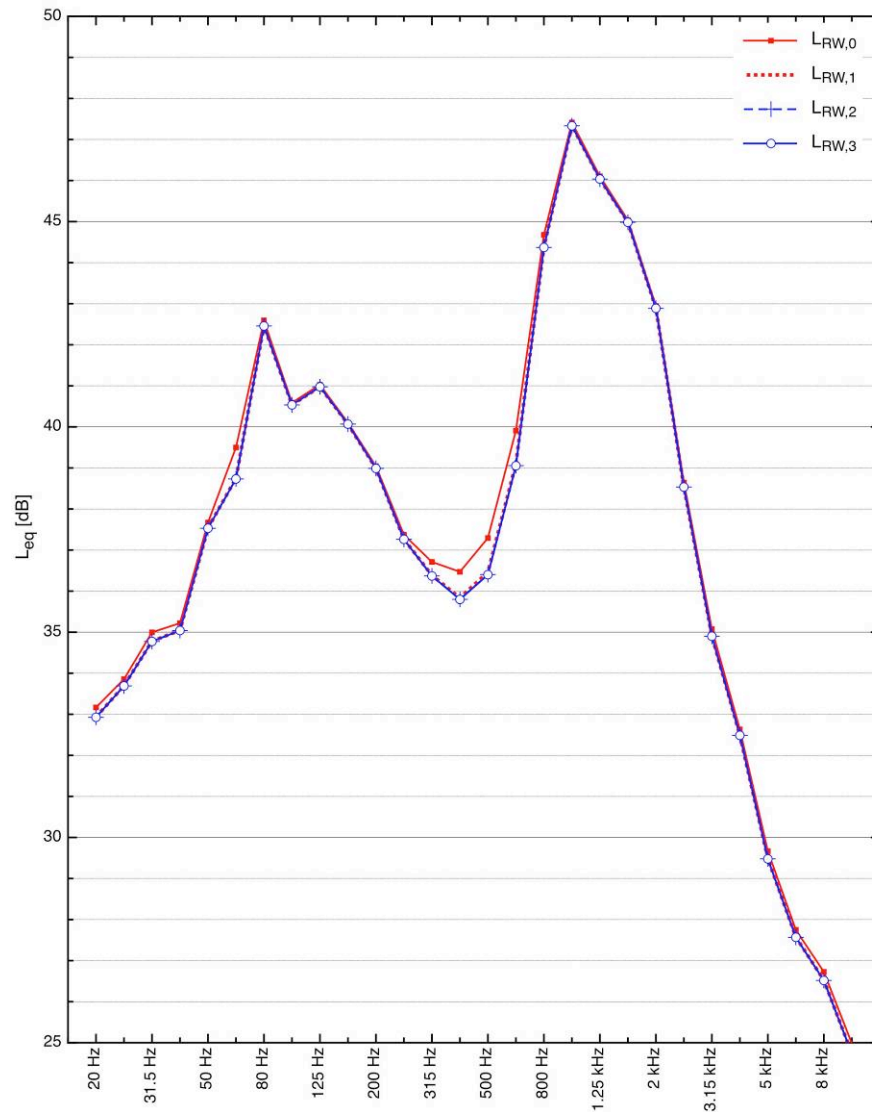


Abbildung 5: Berechnete Referenzspektren für RW während des Iterations-Prozesses. Die Daten sind diejenigen von Camignolo in der Süd-Nord Richtung (September 2010) und auf eine halbe Stunden bezogen.

3. Ergebnisse

3.1. Test mit den Daten von 2003

Da die Berechnungsmethode optimiert wurde, wird sie mit Hilfe der Daten aus dem Jahr 2003 getestet und die Ergebnisse mit denjenigen des Berichts aus dem Jahr 2005 verglichen. Dies wurde für die Messstation Camignolo gemacht. Die neu berechneten Terzspektren (für 2003) sind in den Abbildungen 6 (RW) und 7 (LKW) für beide Fahrtrichtungen (Süd-Nord und Nord-Süd) graphisch dargestellt. Zwischen den zwei Richtungen beobachtet man sowohl für RW wie auch für LKW die gleichen Unterschiede wie in der vorhergegangenen Studie. Insbesondere sind die Immissionsspektren bei hohen Frequenzen in der Nord-Richtung deutlich höher als in der Süd-Richtung. Die Asymmetrie ist für LKW besonders ausgeprägt und kann mit der Neigung der Strasse (1.7%) erklärt werden.

Bei tiefen Frequenzen (zwischen 63 und 80 Hz) – wo das Motorengeräusch massgebend ist – sind die LKW-Immissionsspektren in den zwei Richtungen sehr ähnlich. Auch dieses Ergebnis wurde bereits in der ersten Studie nachgewiesen.

In den Abbildungen 8 und 9 werden die (energetischen) Mittelwerte aus beiden Fahrtrichtungen mit den entsprechenden Mittelwerten aus der Studie vom März 2005 für RW und LKW verglichen. Für beide Fahrzeug-Klassen sind die berechneten Spektren (für das Jahr 2003) den alten sehr ähnlich. Auch der Verlauf der Kurven ist sehr ähnlich (die lokalen Maxima und Minima liegen praktisch am gleichen Ort) und auch die absoluten Werte in den einzelnen Terzen liegen sehr nahe beisammen: die Differenz ist für RW bei 2 kHz am grössten (1.6 dB), für LKW bei 1 kHz am grössten (1.7 dB). Für beide Fälle (RW und LKW) liegen die neu berechneten Immissionsspektren tendenziell höher.

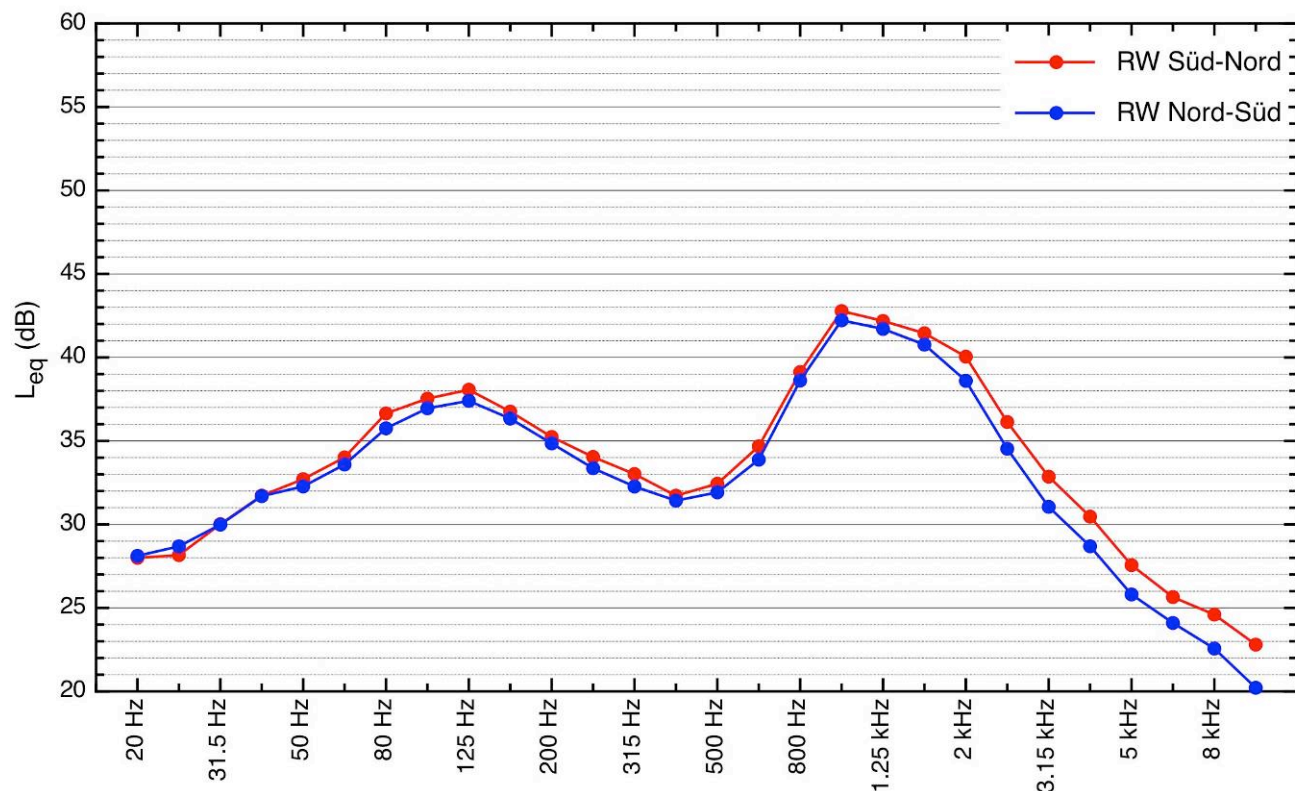


Abbildung 6: Ergebnisse mit optimierter Berechnungsmethode Camignolo (2003) – Referenzspektrum RW normalisiert auf 1 Fahrzeug pro Stunde, das auf der Normalspur mit der Referenzgeschwindigkeit von 120 km/h fährt.

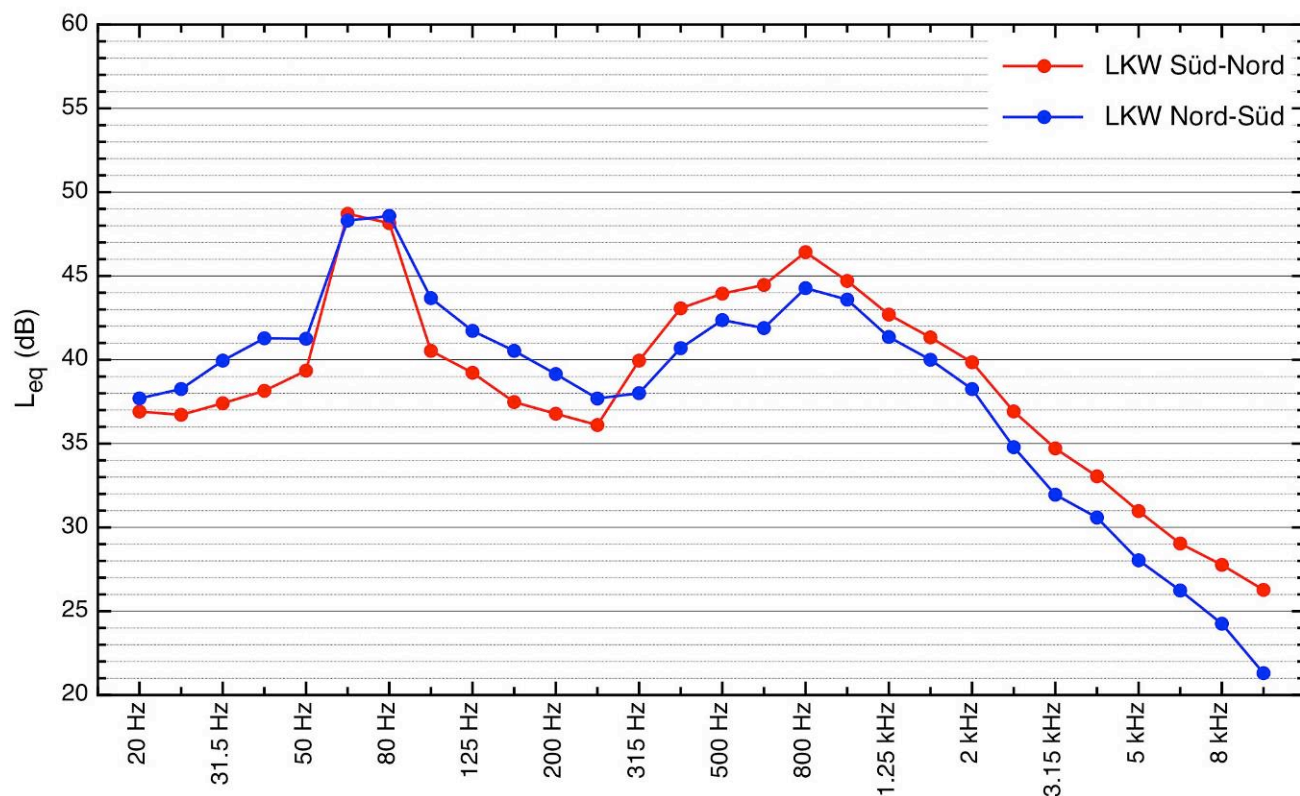


Abbildung 7: Ergebnisse mit optimierter Berechnungsmethode Camignolo (2003) – Referenzspektrum LKW normalisiert auf 1 Fahrzeug pro Stunde, das auf der Normalspur mit der Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h fährt.

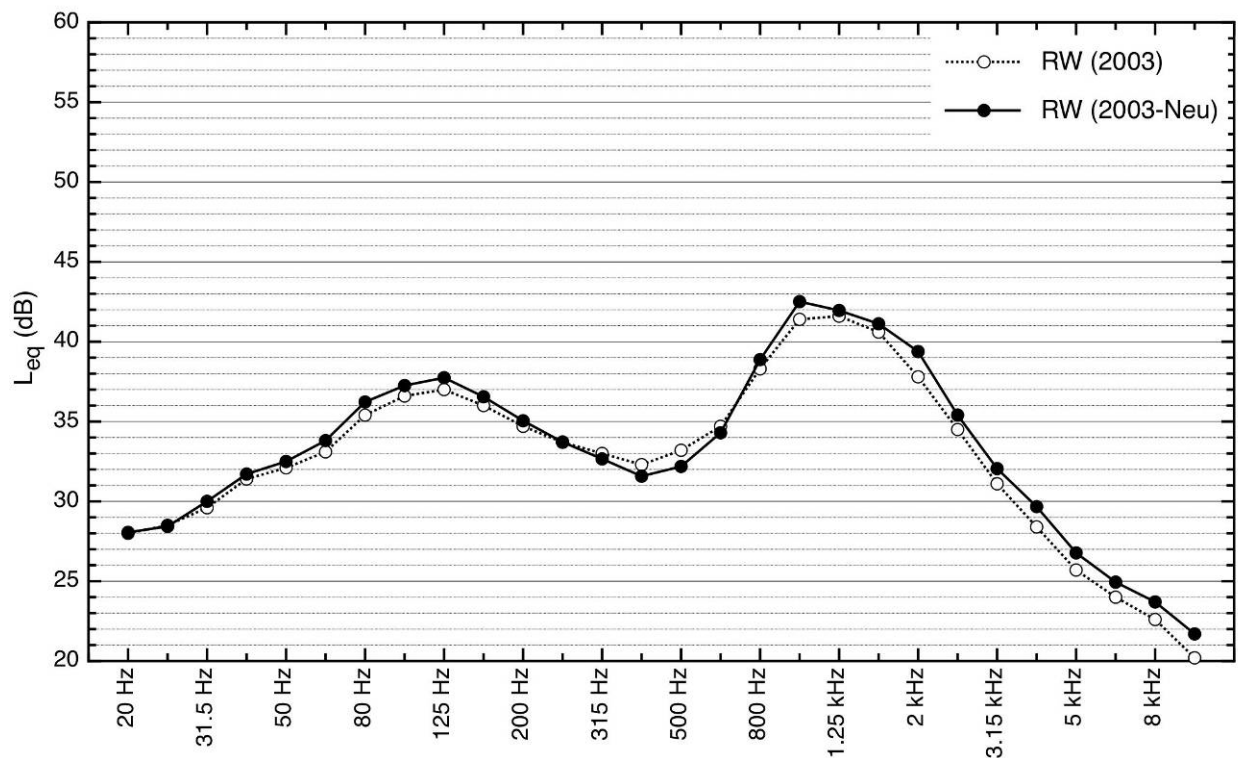


Abbildung 8: Immissionsspektrum eines RW (1 Fz/Std.; 120 km/h; Normalspur): Mittelwerte aus beiden Fahrtrichtungen beim Standort Camignolo im Jahr 2003. Die Ergebnisse aus der Studie von März 2005 (weisse Punkte) sind mit denjenigen der optimierten Berechnungsmethode (schwarze Punkte) verglichen.

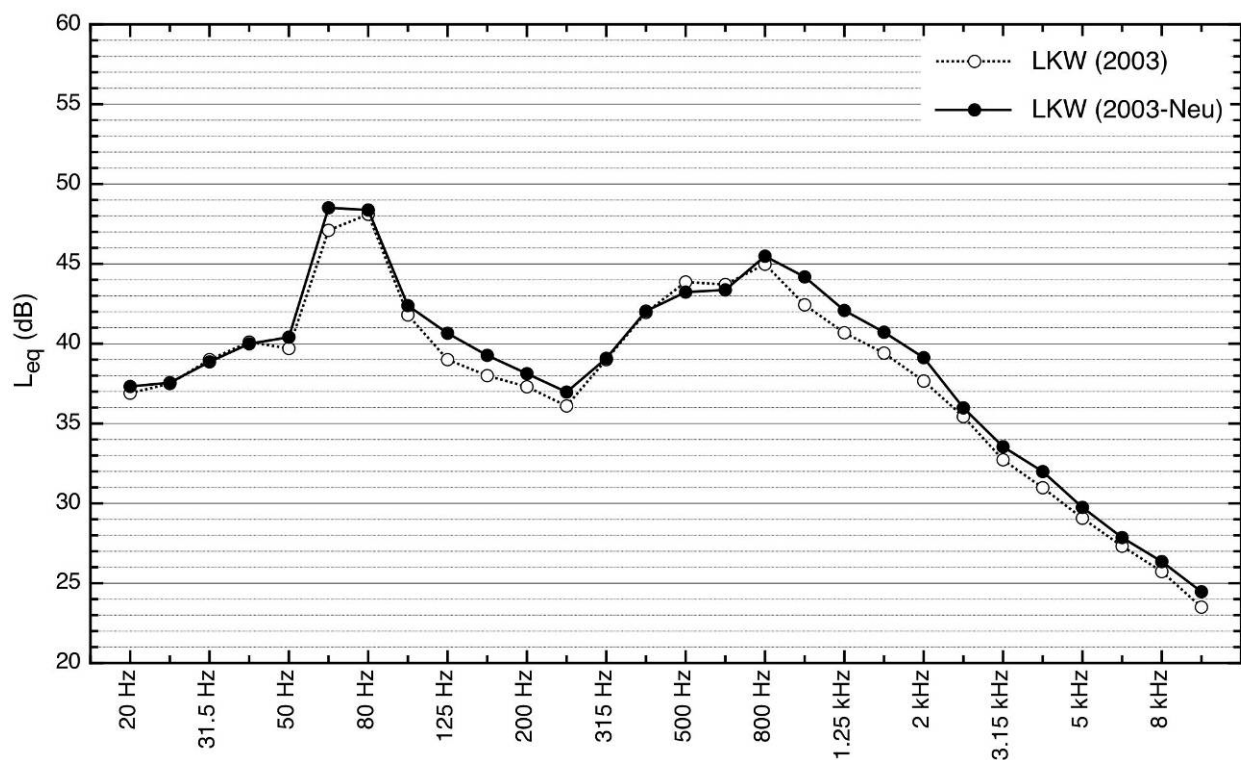


Abbildung 9: Immissionsspektrum eines LKW (1 Fz/Std.; 80 km/h; Normalspur): Mittelwerte aus beiden Fahrtrichtungen beim Standort Camignolo im Jahr 2003. Die Ergebnisse aus der Studie von März 2005 (weisse Punkte) sind mit denjenigen der optimierten Berechnungsmethode (schwarze Punkte) verglichen.

3.2. Akustische Merkmale im Jahr 2010

3.2.1. Immissionsspektren eines Referenzwagens (RW)

Die Immissionsspektren eines Referenzwagens (Gleichung 3) sind für alle 4 Standorte (Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen) in der Abbildung 10 graphisch dargestellt. Die Details für die zwei Richtungen sind im Anhang 3 zusammengestellt.

In allen Spektren beobachtet man **zwei Maxima**: das erste Maximum (bei tiefen Frequenzen zwischen 80 und 125 Hz) wird durch das **Motorengeräusch** dominiert, das zweite (bei hohen Frequenzen, ca. 1 kHz) wird vom **Rollgeräusch** verursacht.

Die höchsten Werte für die RW-Spektren wurden für Camignolo und Rothenbrunnen berechnet, die auch einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Obwohl der Beitrag von Car, Bus und Motorräder möglicherweise die RW-Spektren beeinflussen kann, widerspiegeln diese Ergebnisse diejenigen vom Bericht „Bestimmung der Belagsgüte an den MfM-U Standorten“ (31. Januar 2010), wo die höchsten Lärmemissionen für PW ebenfalls in Camignolo und in Rothenbrunnen beobachtet wurden. Die tiefsten Werte, für Moleno berechnet, liegen bei hohen Frequenzen (oberhalb 1 kHz) entsprechend den Ergebnissen der einzelnen Vorbeifahrten und hängen mit der schallabsorbierenden Wirkung des im Jahre 2004 eingebauten LECA-Belags zusammen. Weiter kann festgestellt werden, dass die tiefsten Werte in Moleno in der Nord-Süd Richtung beobachtet wurden.

In Moleno und Reiden scheint das erste Maximum (Motorengeräusch) nach höheren Frequenzen hin (125 Hz) verschoben zu sein.

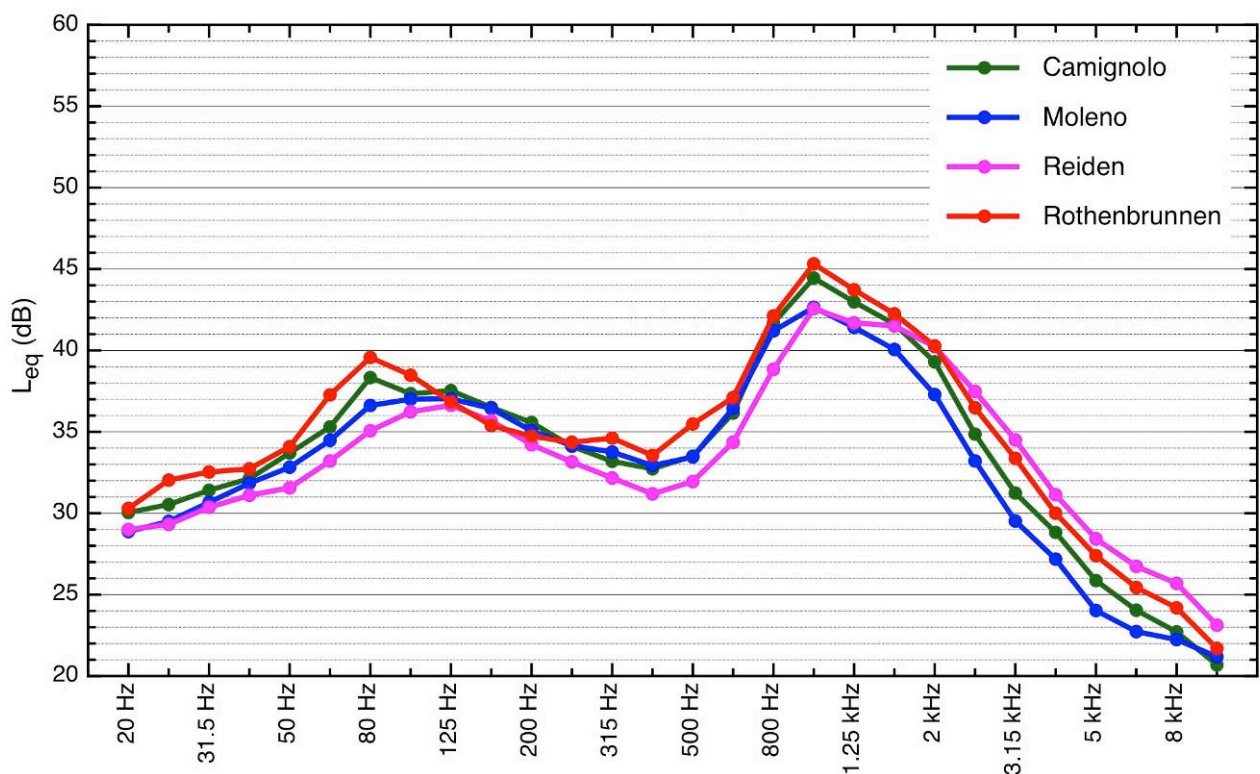


Abbildung 10: Immissionsspektren eines RW (1 Fz/Std.; 120 km/h; Normalspur): Mittelwerte aus beiden Fahrrichtungen bei den Standorten Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen im Jahr 2010.

3.2.2. Immissionsspektren eines Lastwagens (LKW)

Die Immissionsspektren eines LKW bei den vier Standorten (Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen) sind für jede Fahrtrichtung in der Abbildung 10 graphisch dargestellt.

Ganz allgemein kann festgestellt werden, dass auch die LKW-Immissionsspektren durch **zwei Maxima** charakterisiert sind. Das erste Maximum (Motorengeräusch) ist sehr schmalbandig, während das zweite (Rollgeräusch) eher breitbandig ist.

Auffallend ist dabei, dass:

- die Immissionen eines LKW diejenigen des RW in zwei Frequenzbereichen (< 100 Hz und 400 - 800 Hz) deutlich übertreffen;
- die zwei Maxima der LKW wegen der niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten gegen tiefere Frequenzen verschoben erscheinen;
- das erste Maximum der LKW bei 63 Hz viel ausgeprägter als bei den RW erscheint;
- an allen Standorten die Höhe des ersten Maximums unabhängig von der Fahrtrichtung – mit einer kleinen Ausnahme für Rothenbrunnen (s. unten) – ist;
- der Pegel beim ersten Maximum in Moleno, Reiden und Rothenbrunnen sehr ähnlich ist und zwischen 46.4 und 47.0 dB (im Mittel aus beiden Fahrtrichtungen) liegt;
- in Camignolo das erste Maximum rund 1 dB höher ist als an den anderen drei Standorten;
- in Camignolo das zweite Maximum (und ganz allgemein das ganze Spektrum oberhalb 600 Hz) in der Süd-Nord Richtung höher liegt als in der Nord-Süd Richtung, was auf die Neigung der Strasse (1.7 %) zurückzuführen ist;
- in Moleno oberhalb 400 Hz das Immissionsspektrum in der Süd-Nord Richtung höher ist als in der Nord-Süd Richtung, was mit den Charakteristiken des im Jahre 2004 eingebauten Belages an diesem Ort erklärt werden kann.

Wichtig ist der Hinweis, dass sich die gewonnenen LKW-Immissionsspektren für die Ergebnisse in Rothenbrunnen, Fahrtrichtung Süd-Nord, auf nur vier gültige Halbstundenmittelwerte stützen.

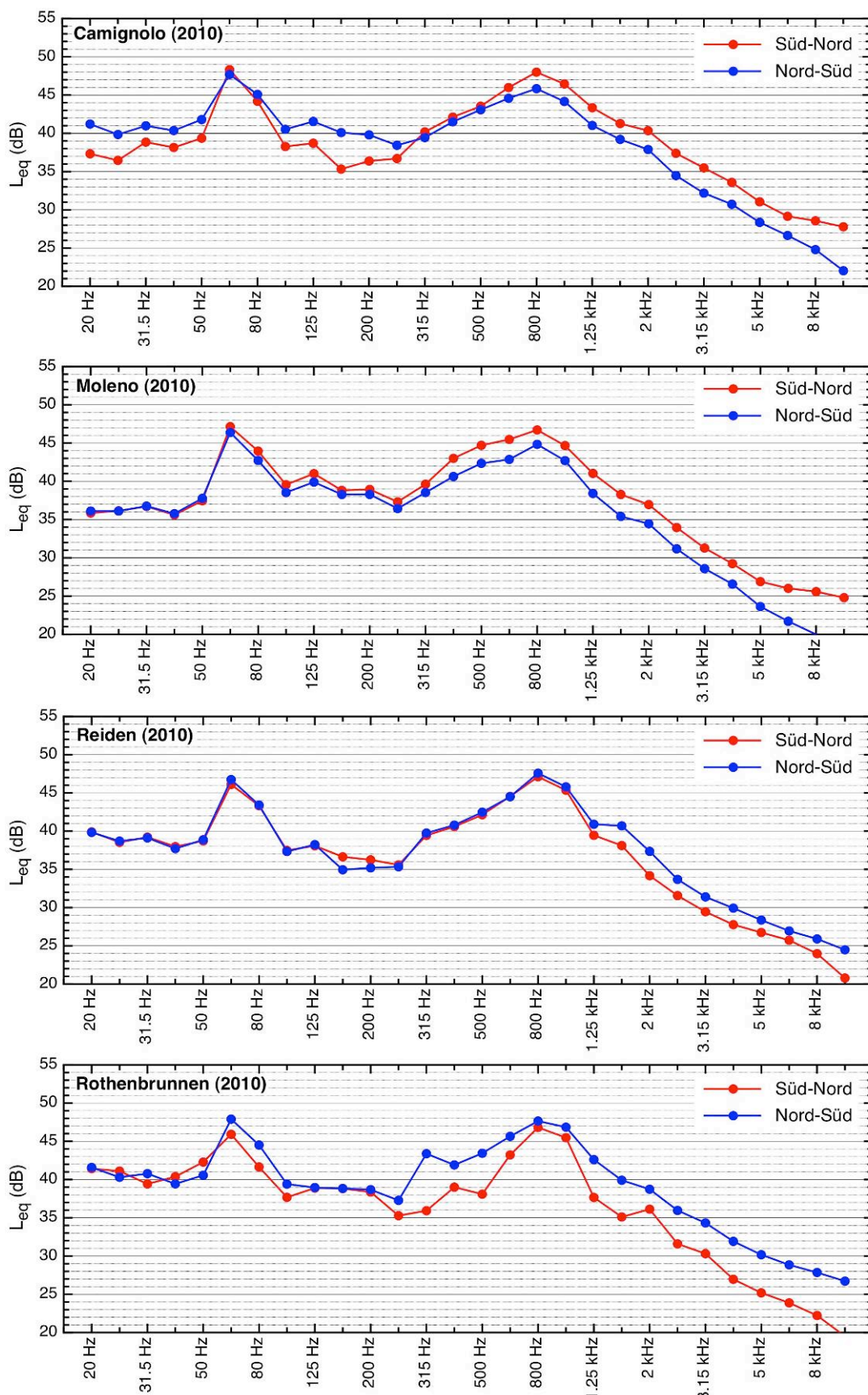


Abbildung 11: Immissionsspektren eines LKW (1 Fz/Std.; 80 km/h; Normalspur) für jede Fahrtrichtung bei den Standorten Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen im Jahr 2010.

3.3. Entwicklung der akustischen Merkmale (2003 - 2010)

Die Entwicklung der Immissionsspektren ist in den Abbildungen 12 bis 14 für die Standorte Camignolo, Moleno und Reiden¹ dargestellt. In jeder Abbildung werden in den oberen graphischen Darstellungen die RW-Spektren für das Jahr 2003 (weisse Punkte) und das Jahr 2010 (schwarze Punkte) und in den unteren graphischen Darstellungen die entsprechenden LKW-Spektren gezeigt.

Besonders interessant sind folgende Feststellungen:

- Das Immissionsspektrum eines RW im Bereich des ersten Maximums (80 bis 125 Hz) ist praktisch unverändert geblieben.
- Das erste Maximum des LKW-Immissionsspektrums hat sich nach tieferen Frequenzen hin verschoben: 2010 übersteigt der Pegel in der Terz 63 Hz deutlich denjenigen bei 80 Hz, während 2003 die zwei Pegel praktisch gleich hoch waren.
- Im Bereich des zweiten Maximums hat das Immissionsspektrum eines RW tendenziell zugenommen und sich nach tieferen Frequenzen hin (800 Hz) verschoben. Dieses Ergebnis könnte auf eine unterschiedliche Zusammensetzung eines Referenzwagens (s. Anteil von Car, Bus und Motorräder) hinweisen. Es könnte aber auch eine Folge von neuen Tendenzen bei den Reifen sein (immer sportlicher und breiter).
- In Moleno hat das Immissionsspektrum eines LKW bei hohen Frequenzen (≥ 315 Hz) im Vergleich zu Camignolo und Reiden deutlich abgenommen. Der Rückgang dieser Immissionen bei hohen Frequenzen kann mit den Eigenschaften des 2004 (d.h. nach 2033!) an diesem Ort eingebauten Belags erklärt werden.

¹ Für Rothenbrunnen stehen keine Daten für das Jahr 2003 zur Verfügung.

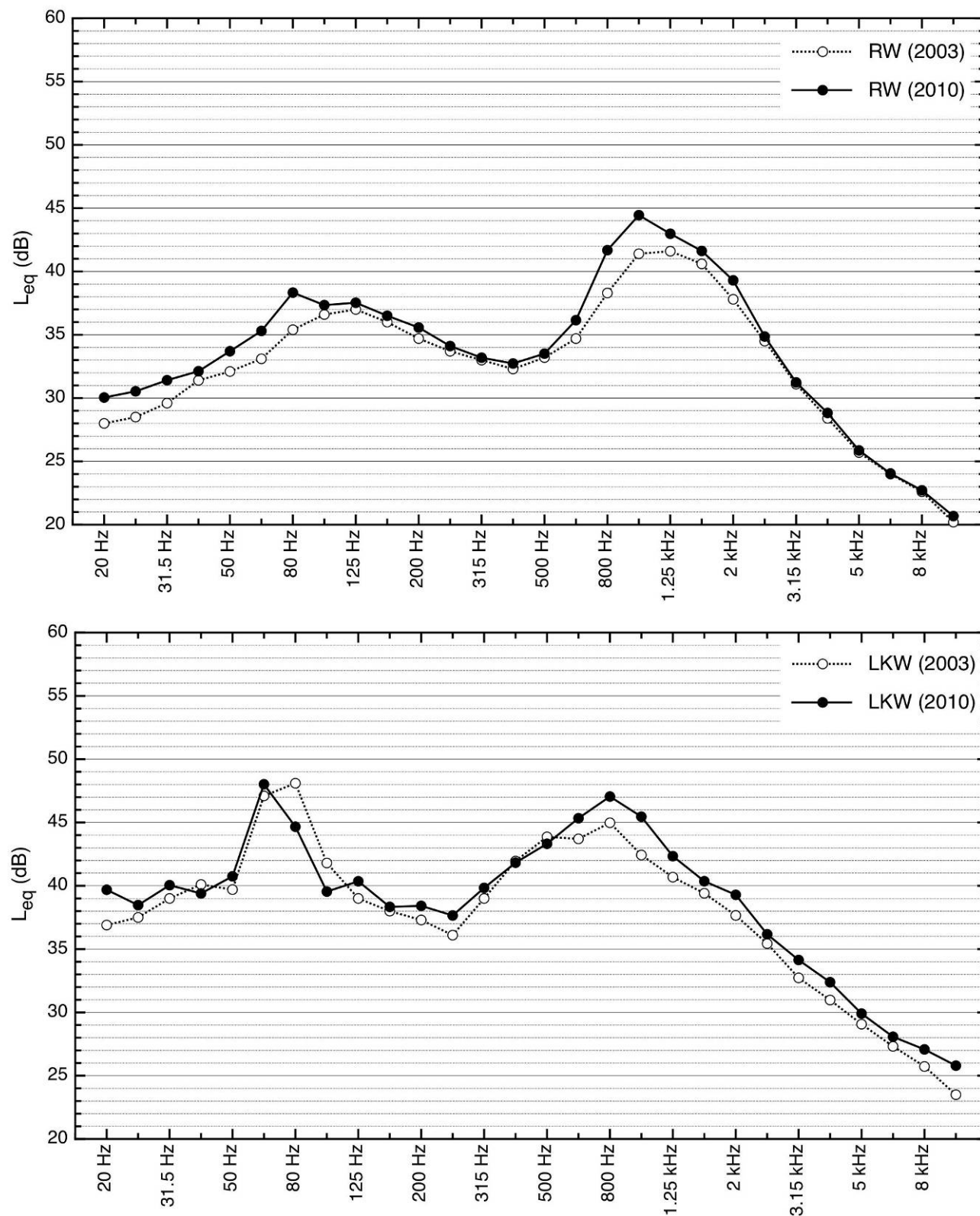


Abbildung 12: Entwicklung der Immissionsspektren (Mittelwerte aus beiden Fahrtrichtungen) in Camignolo: oben die Spektren eines RW (1 Fz/Std.; 120 km/h; Normalspur) und unten die Spektren eines LKW (1 Fz/Std.; 80 km/h; Normalspur) für 2003 (weisse Punkte) und 2010 (schwarze Punkte).

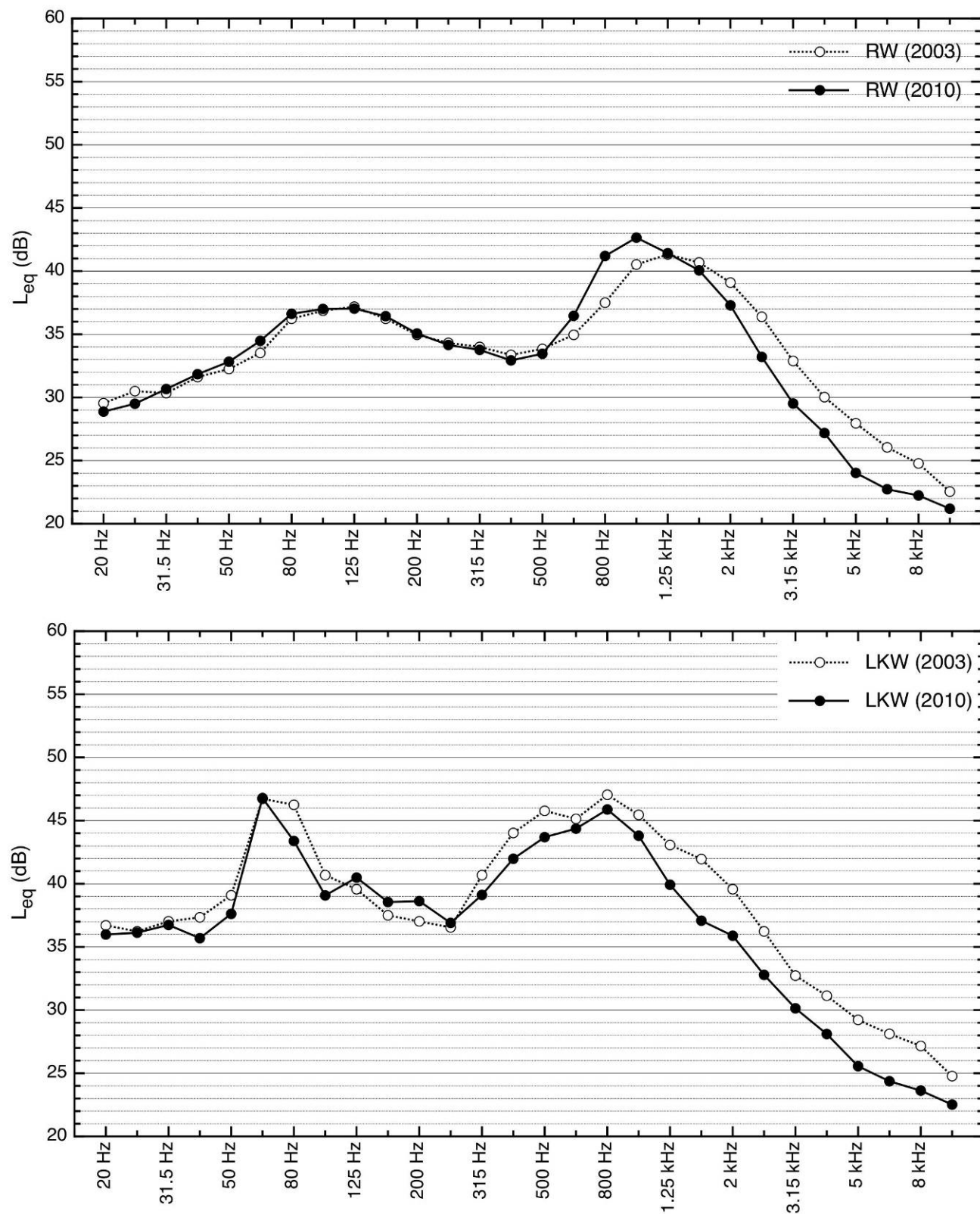


Abbildung 13: Entwicklung der Immissionsspektren (Mittelwerte aus beiden Fahrtrichtungen) in Moleno: oben die Spektren eines RW (1 Fz/Std.; 120 km/h; Normalspur) und unten die Spektren eines LKW (1 Fz/Std.; 80 km/h; Normalspur) für 2003 (weisse Punkte) und 2010 (schwarze Punkte).

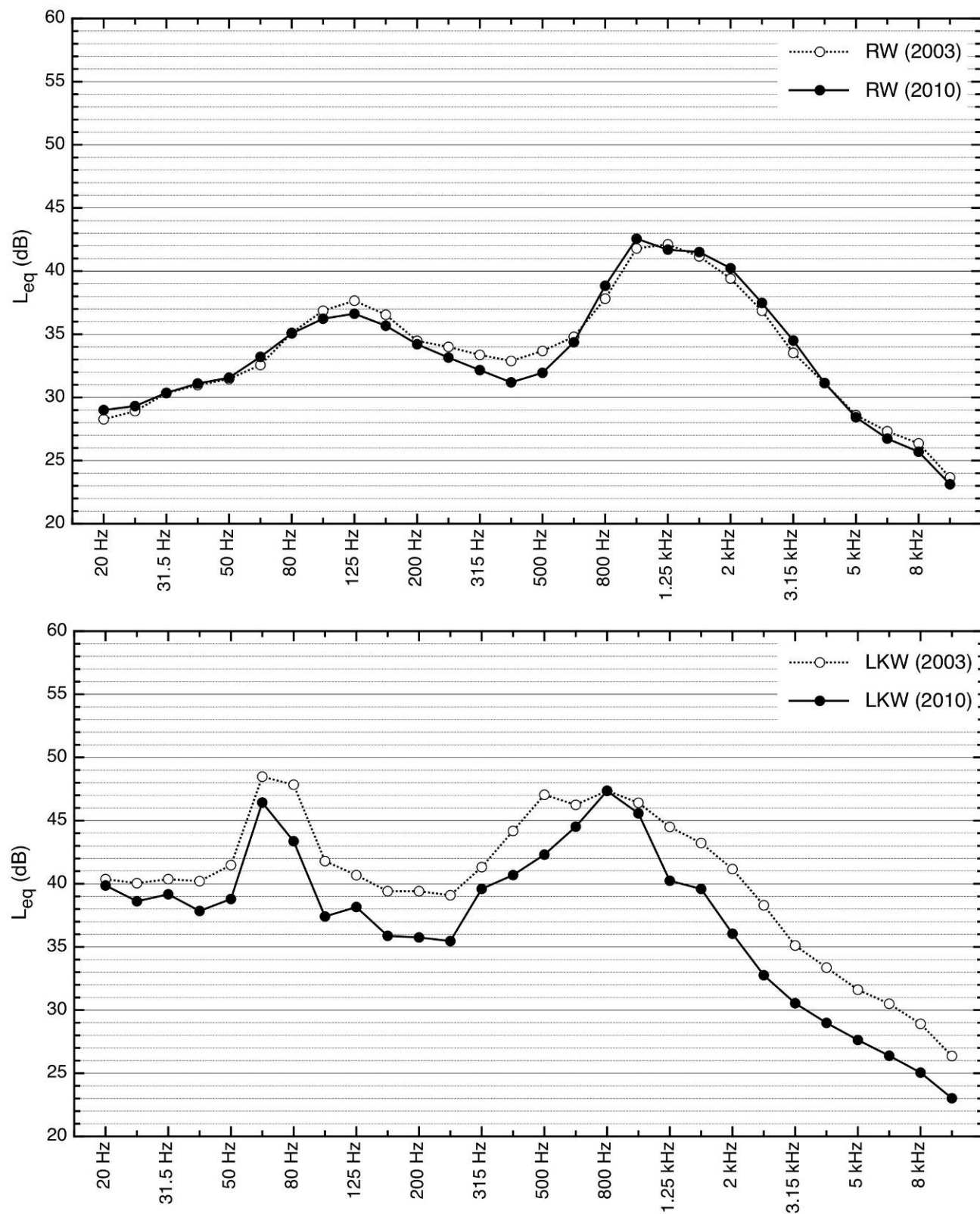


Abbildung 14: Entwicklung der Immissionsspektren (Mittelwerte aus beiden Fahrrichtungen) in Reiden: oben die Spektren eines RW (1 Fz/Std.; 120 km/h; Normalspur) und unten die Spektren eines LKW (1 Fz/Std.; 80 km/h; Normalspur) für 2003 (weisse Punkte) und 2010 (schwarze Punkte).

4. Schlussfolgerungen

Mit dieser Studie wurde es möglich, einen früher entwickelten Iterations-Prozess (s. „Untersuchung auf LKW-sensible Merkmale“, März 2005) zur Bestimmung von LKW-Immissionsspektren zu verfeinern und an den im September 2010 an vier MfM-U Standorten (Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen) gemessenen Daten anzuwenden.

Insbesondere war es von Interesse, die gegenüber den Immissionsspektren vom Herbst 2003 eingetretenen Änderungen zu analysieren, weil sie Rückschlüsse auf die Lärm-Entwicklung vom Fahrzeugpark, von Reifen und vom Belag bezüglich eines Referenz-Zustands erlauben.

Eine wichtige Änderung im LKW-Immissionsspektrum wurde bei allen Standorten beobachtet. Diese besteht in einer Verschiebung des Motorengeräusches nach tieferen Frequenzen hin (von 63 - 80 Hz auf 63 Hz). Beim Referenzwagen kann eine ähnliche Entwicklung festgestellt werden. Dies könnte eine Folge der Entwicklung des LKW-Fahrzeugparks sein.

Ein weiterer Trend wurde für Referenzwagen festgestellt und betrifft das Rollgeräusch, welches sich bei hohen Frequenzen ändert. Tendenziell ist das entsprechende Maximum im Immissionsspektrum höher geworden und es hat sich nach tieferen Frequenzen hin (800 Hz) verschoben. Dieses Ergebnis könnte durch die neuen Tendenzen bei den Reifen (immer sportlicher und breiter) beeinflusst sein.

Für LKW's kann für den Standort Camignolo für das Rollgeräusch (≥ 600 Hz) eine deutliche Zunahme der Lärmimmissionen nachgewiesen werden, was mit einer Alterung des Belages erklärt werden könnte. Im Gegensatz dazu hat das Immissionsspektrum eines LKW in Moleno bei hohen Frequenzen zwischen 2003 und 2010 deutlich abgenommen. Dieser Rückgang der Immissionen bei hohen Frequenzen kann mit den Charakteristiken des 2004 an diesem Ort eingebauten Belages erklärt werden.

5. Anhänge

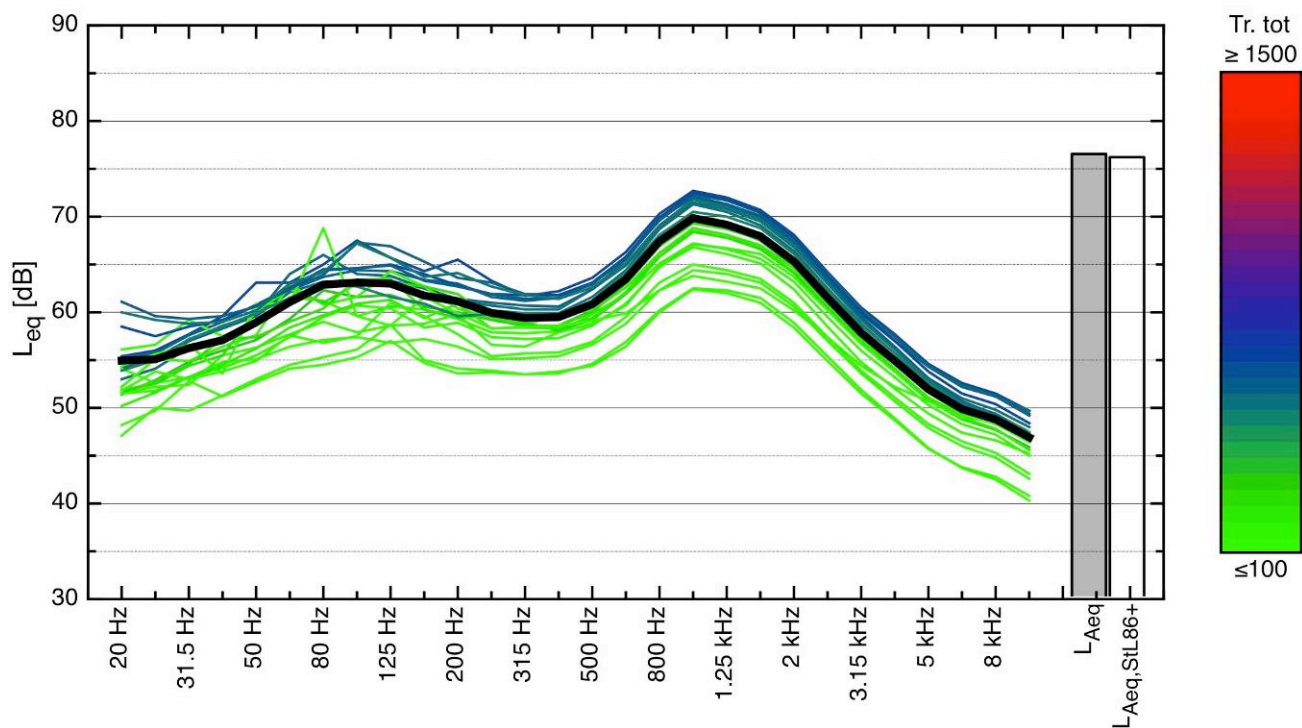
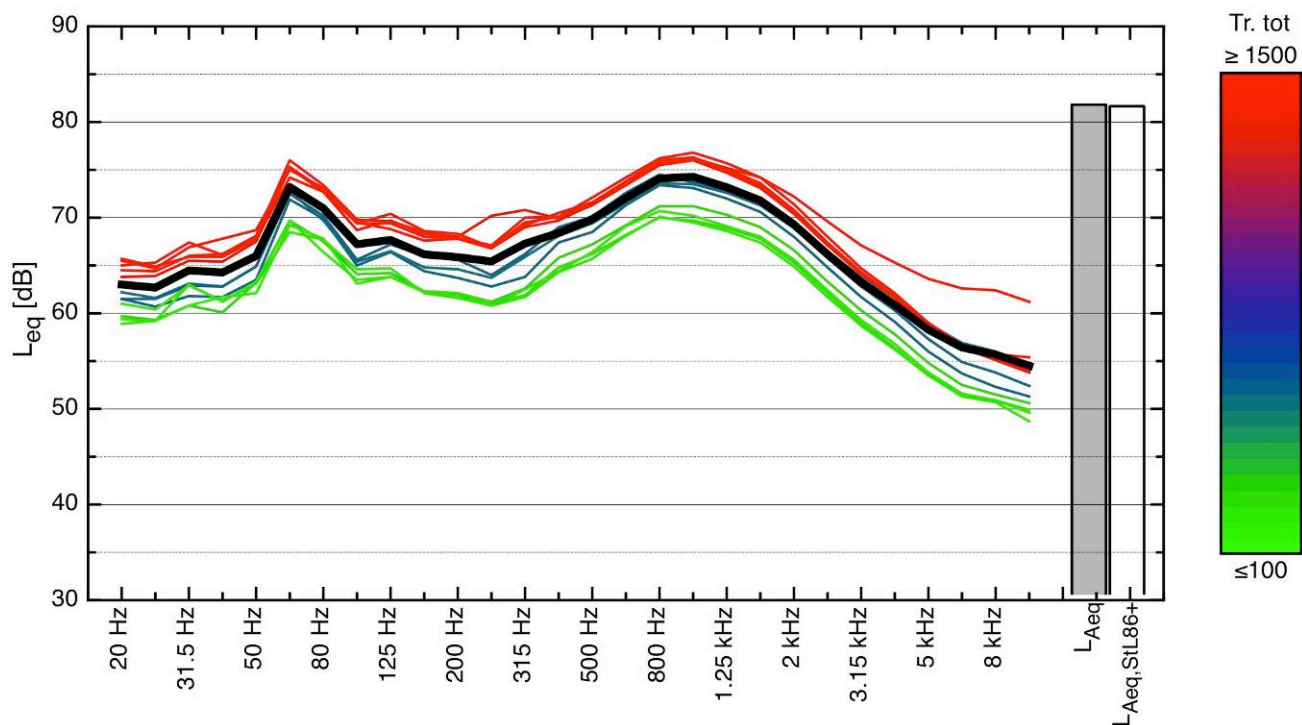
ANHANG 1

Terzspektren für die ausgewählten Zeiträume in September 2010

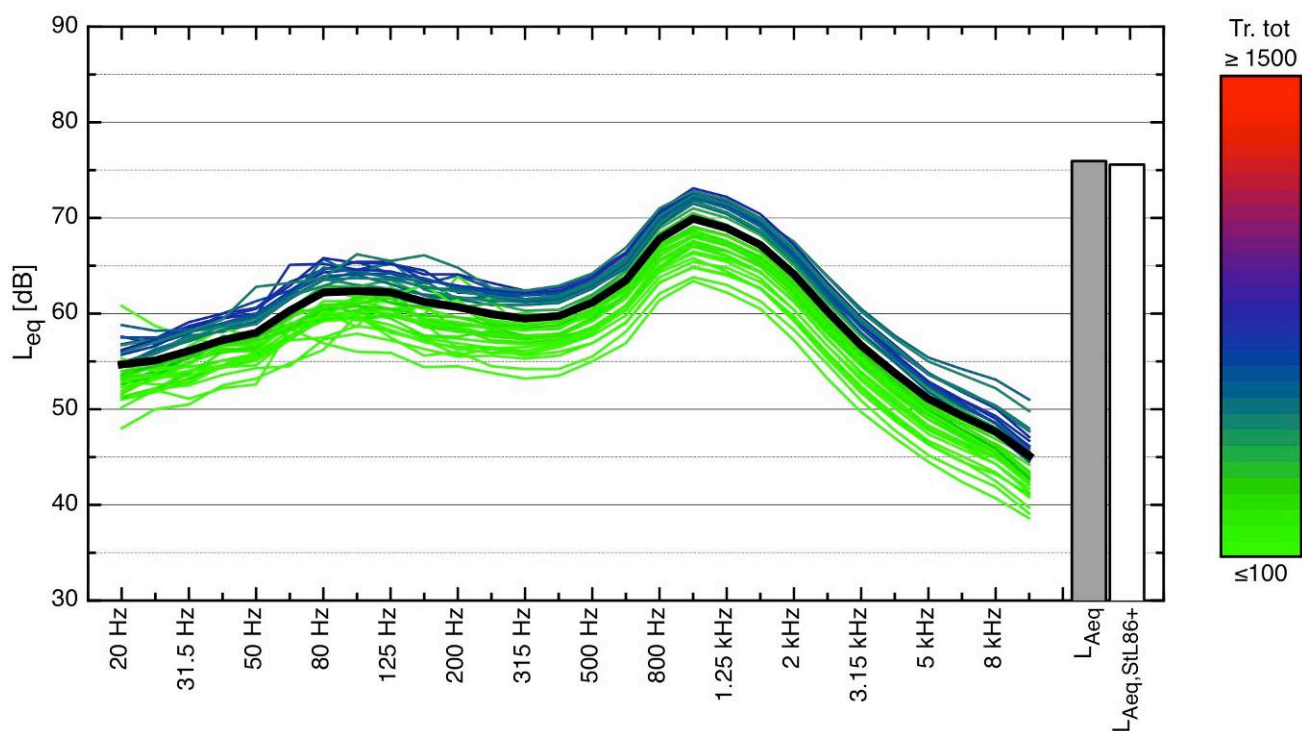
Für jeden Messstandort und für jede Fahrtrichtung wird jeweils eine A4-Seite mit zwei graphischen Darstellungen gezeigt: die obere bezieht sich auf die Zeiträume mit kleinem LKW-Anteil auf der Normalspur ($\leq 0.5\%$, RW-Spektren) und die untere an den Perioden mit hohem LKW-Anteil auf der Normalspur ($\geq 30\%$, LKW-Spektren).

Die Farbe der Kurven hängt vom Gesamtverkehr ab (s. Farbskala).

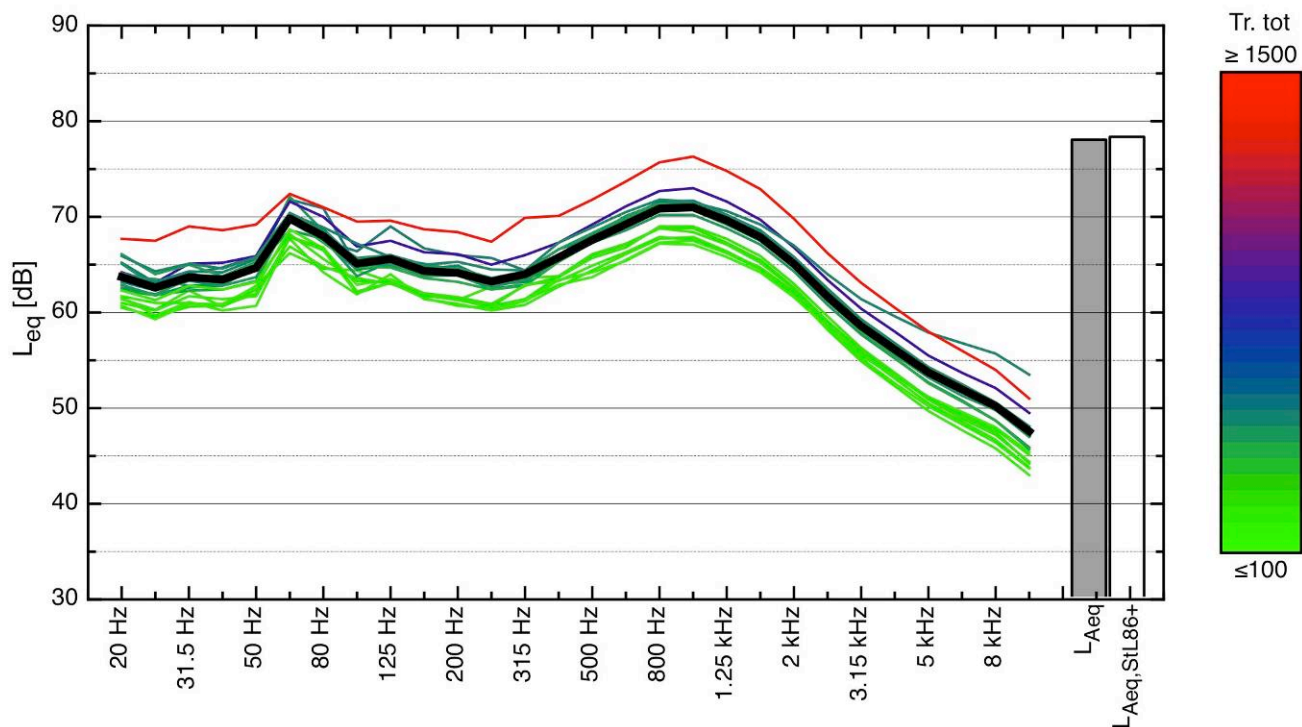
Die zwei Säulen rechts zeigen den mittleren gemessenen L_{Aeq} (für eine Halbstunde) und den auf der Basis der Verkehrsdaten mit dem Modell STL86+ berechneten Wert (Cars, Busse und Motorräder sind nicht als „lärmige“ Fahrzeuge berücksichtigt worden).

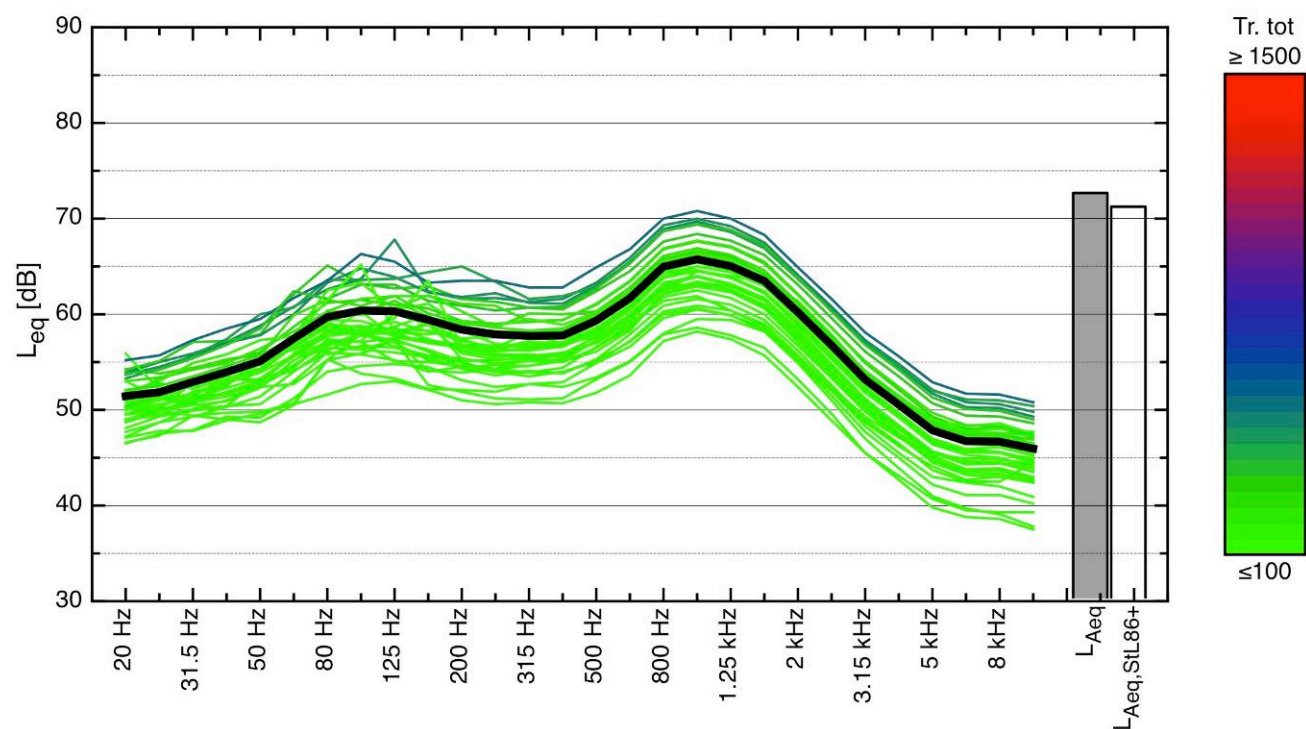
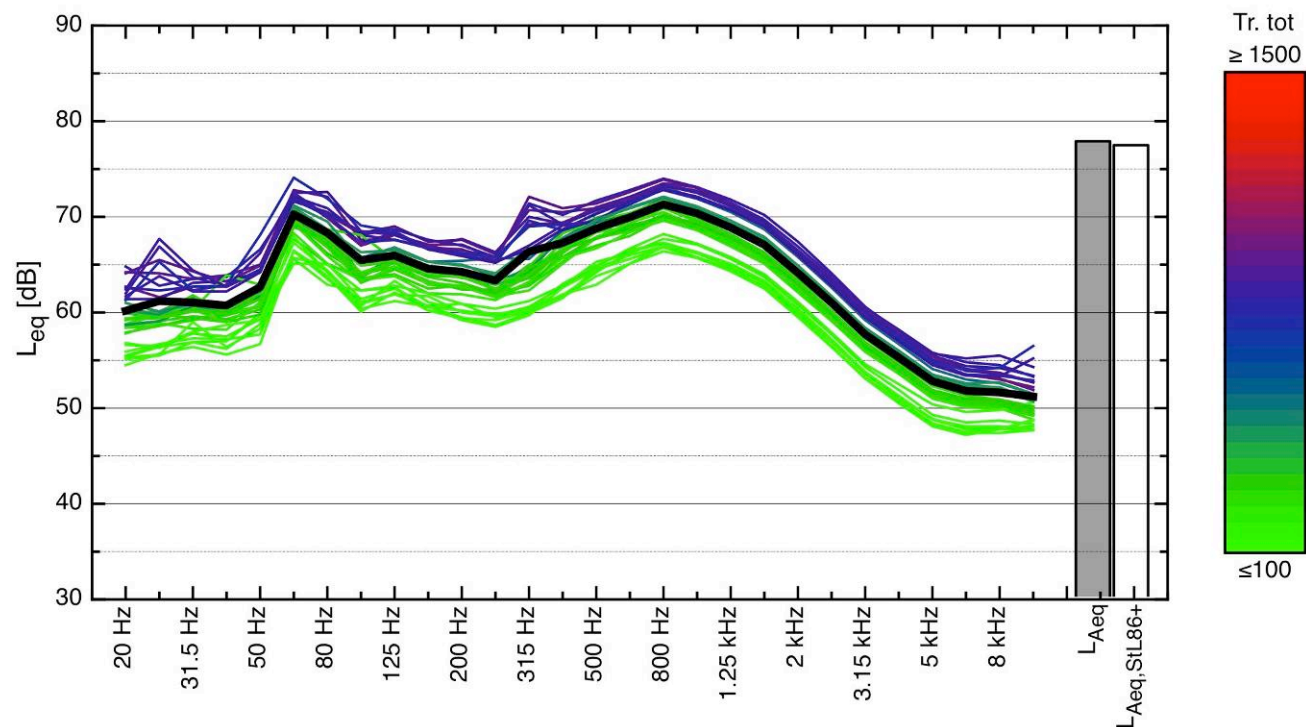
Camignolo Süd-Nord - RW**Camignolo Süd-Nord - LKW**

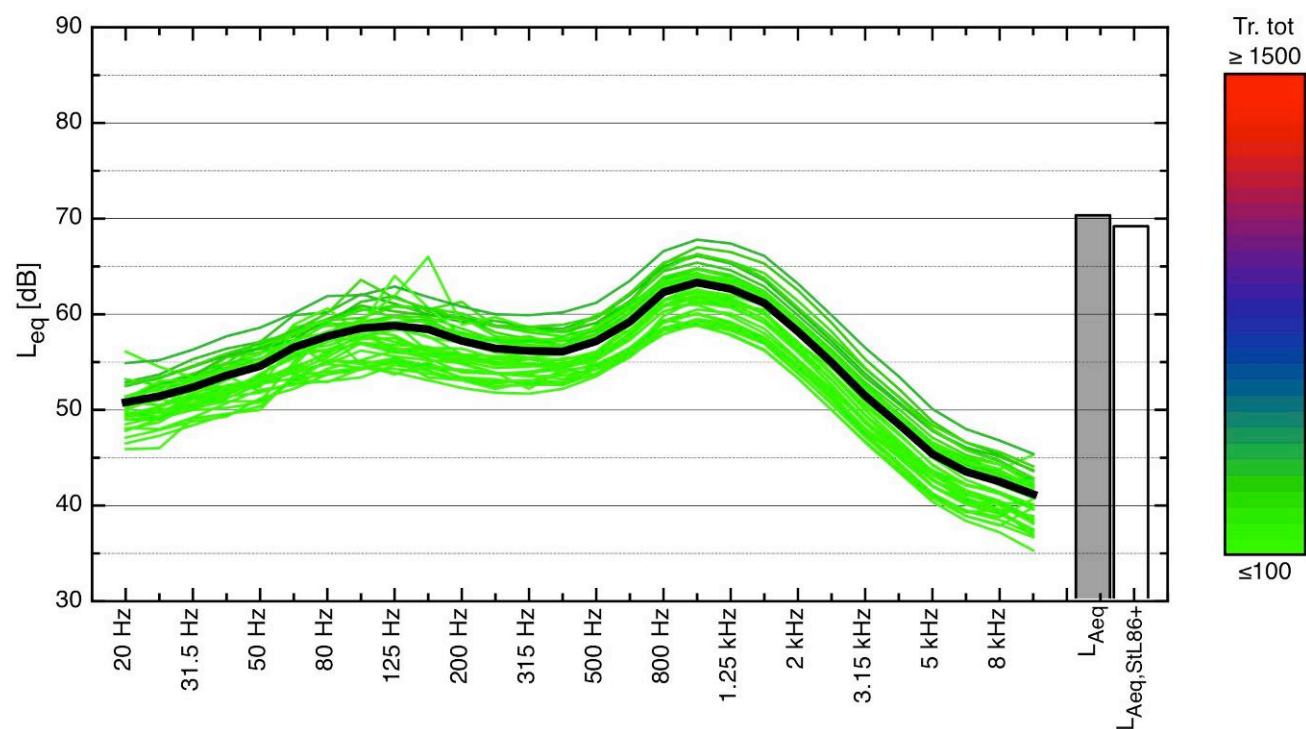
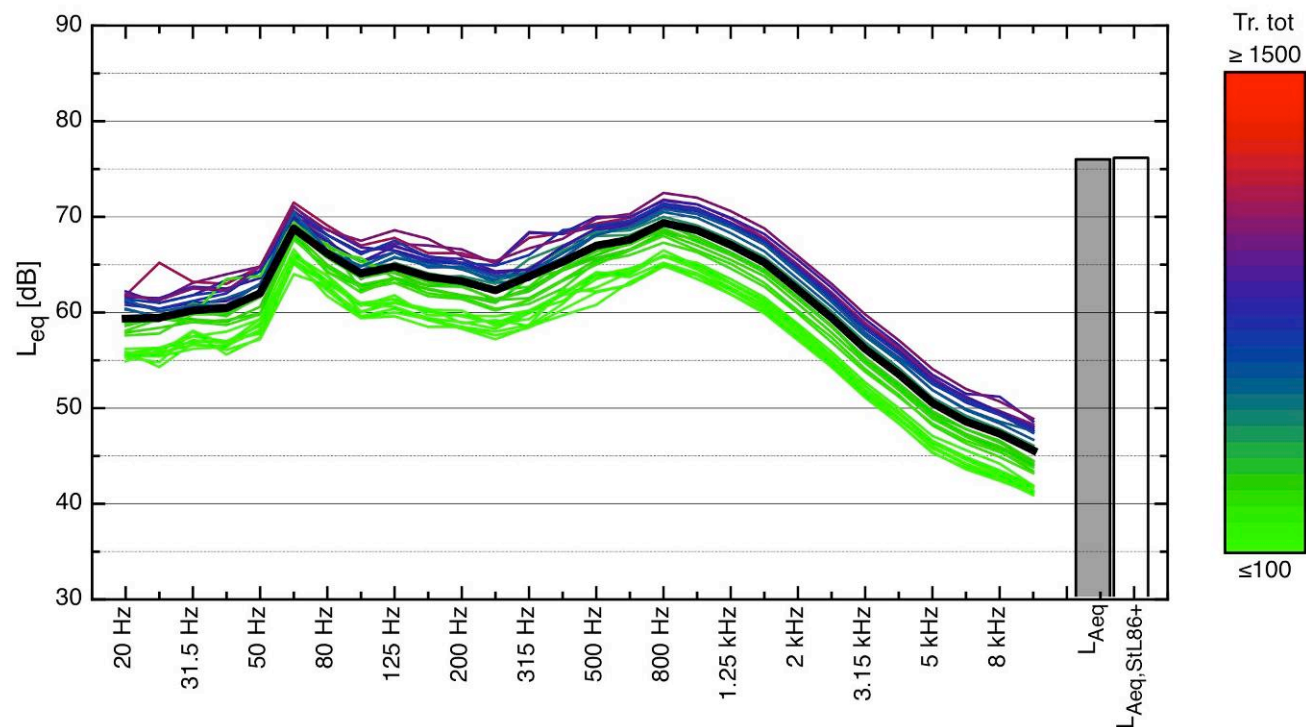
Camignolo Nord-Süd - RW

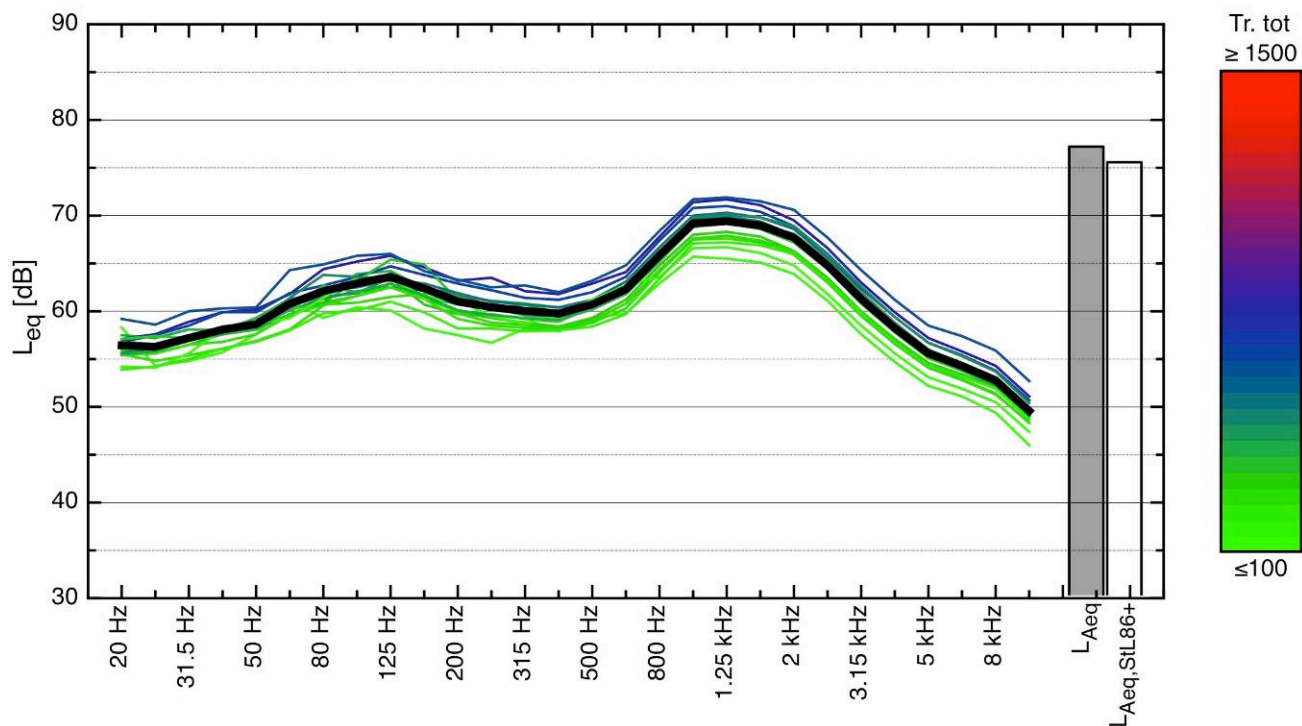
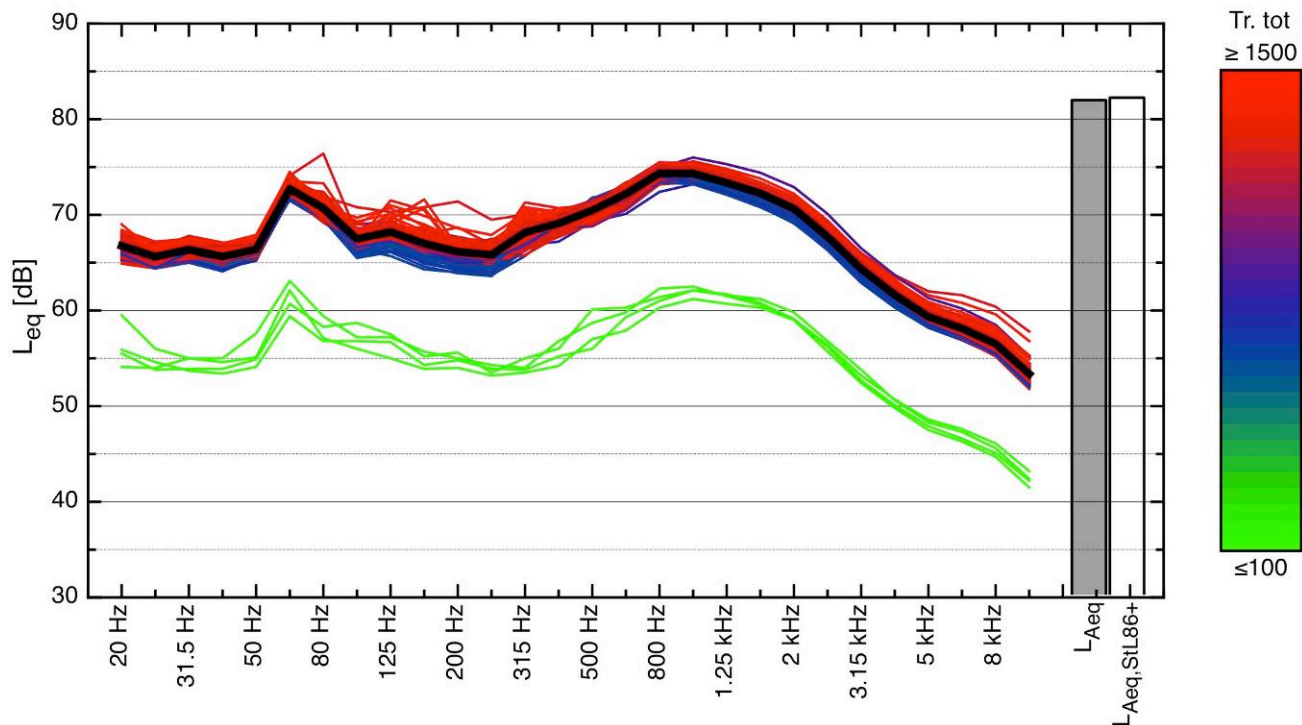


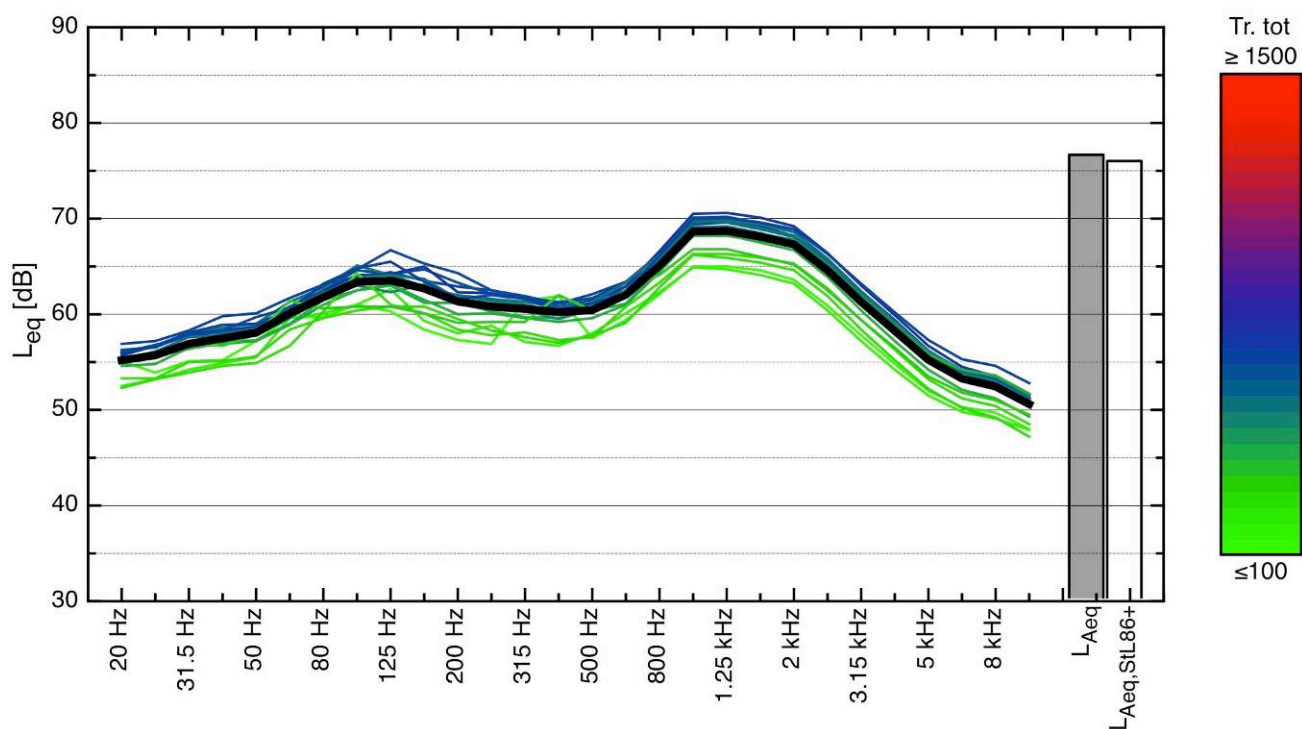
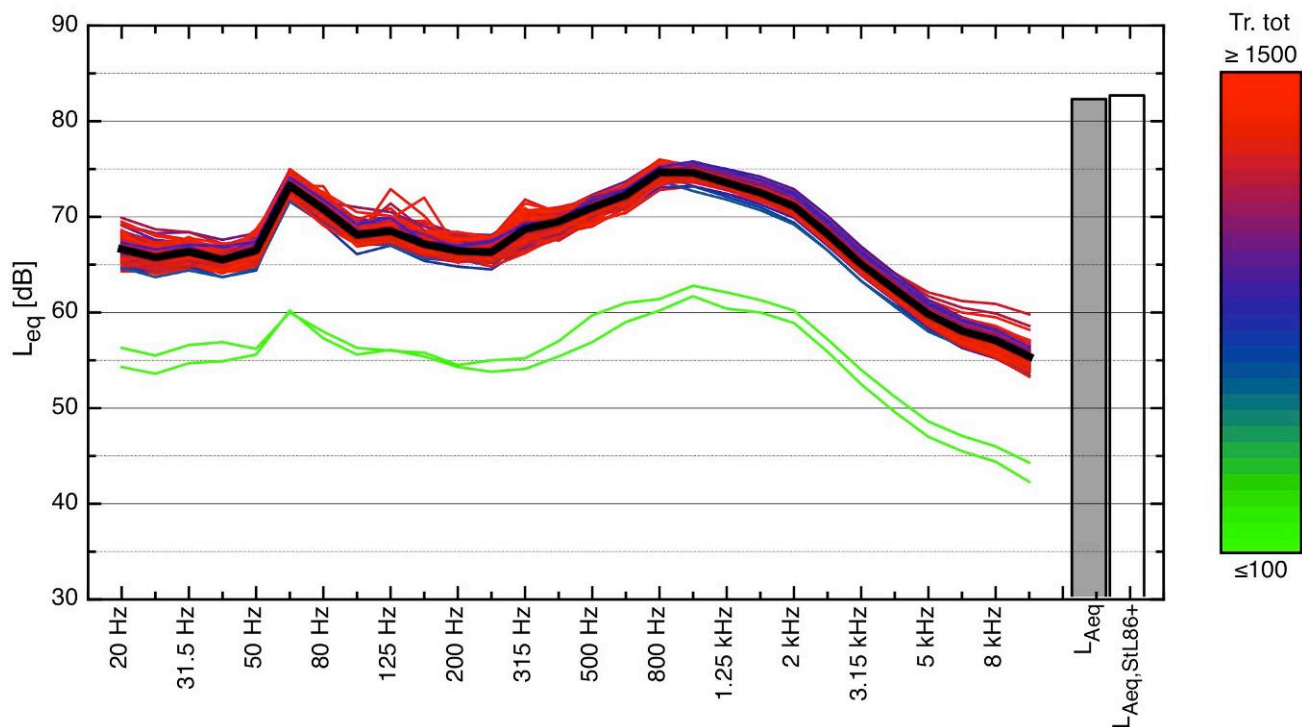
Camignolo Nord-Süd - LKW

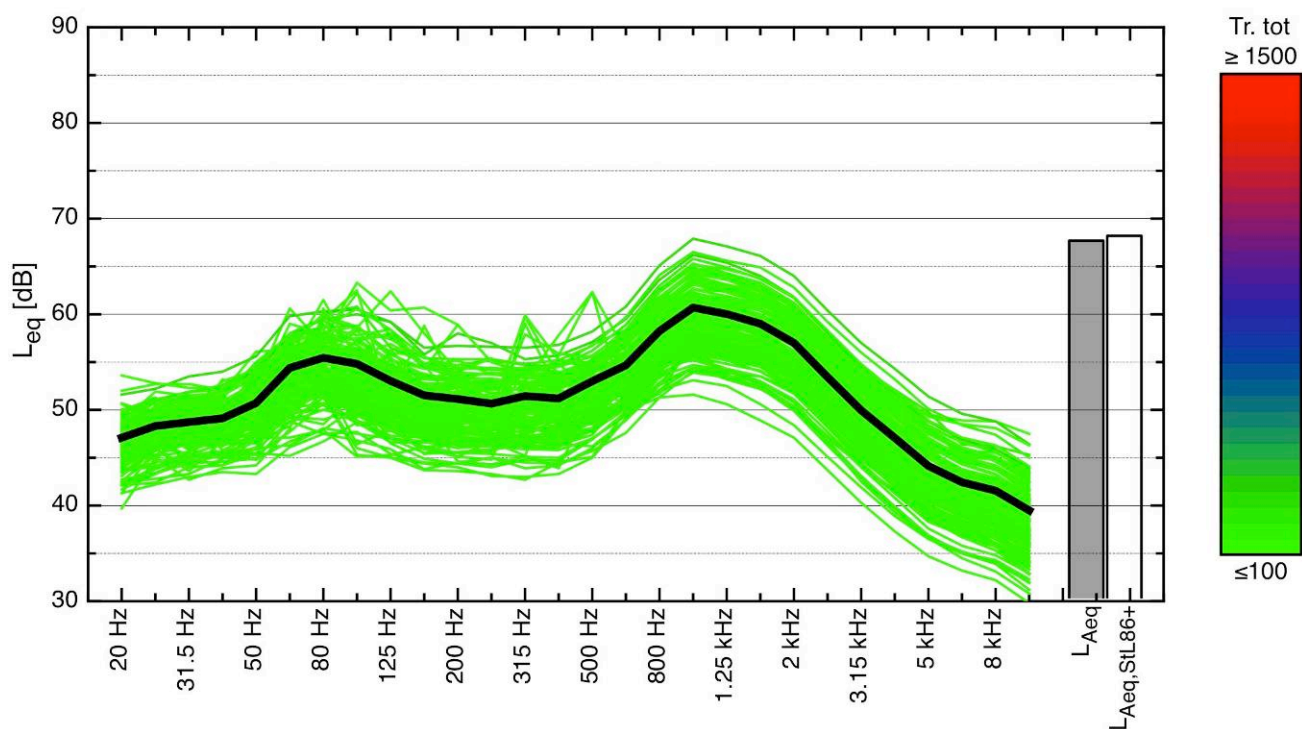
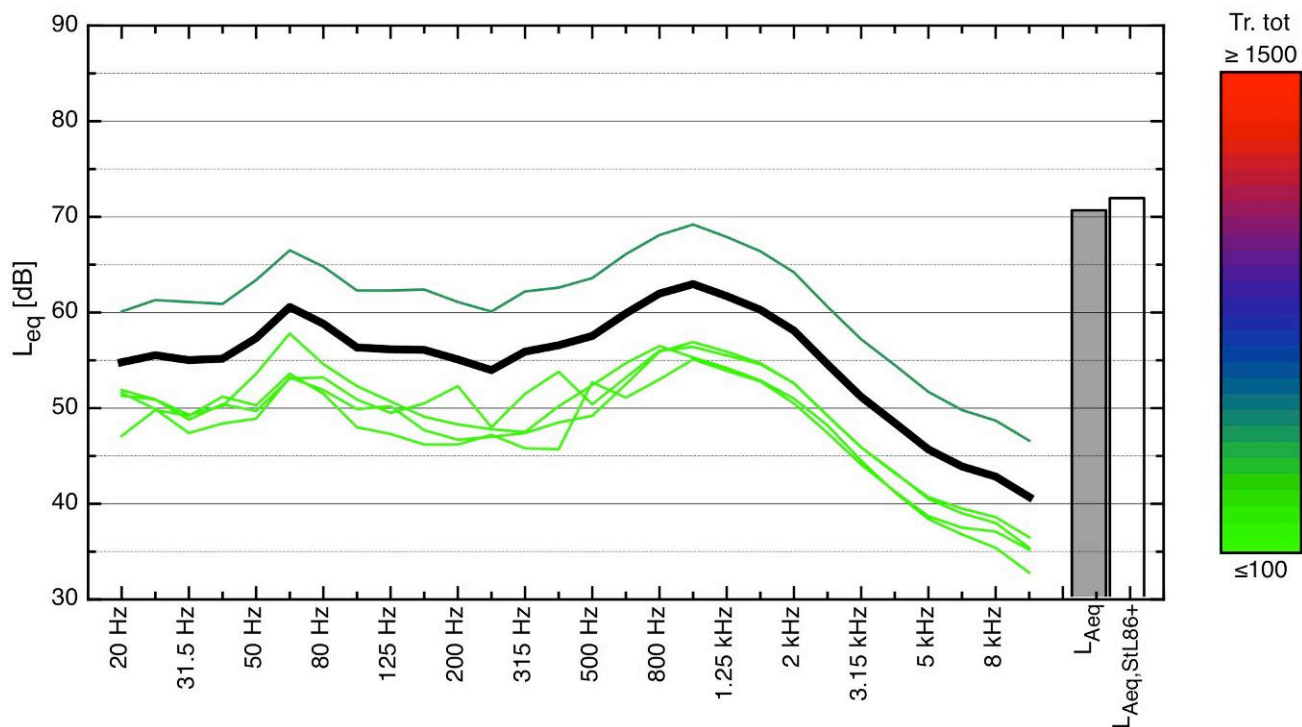


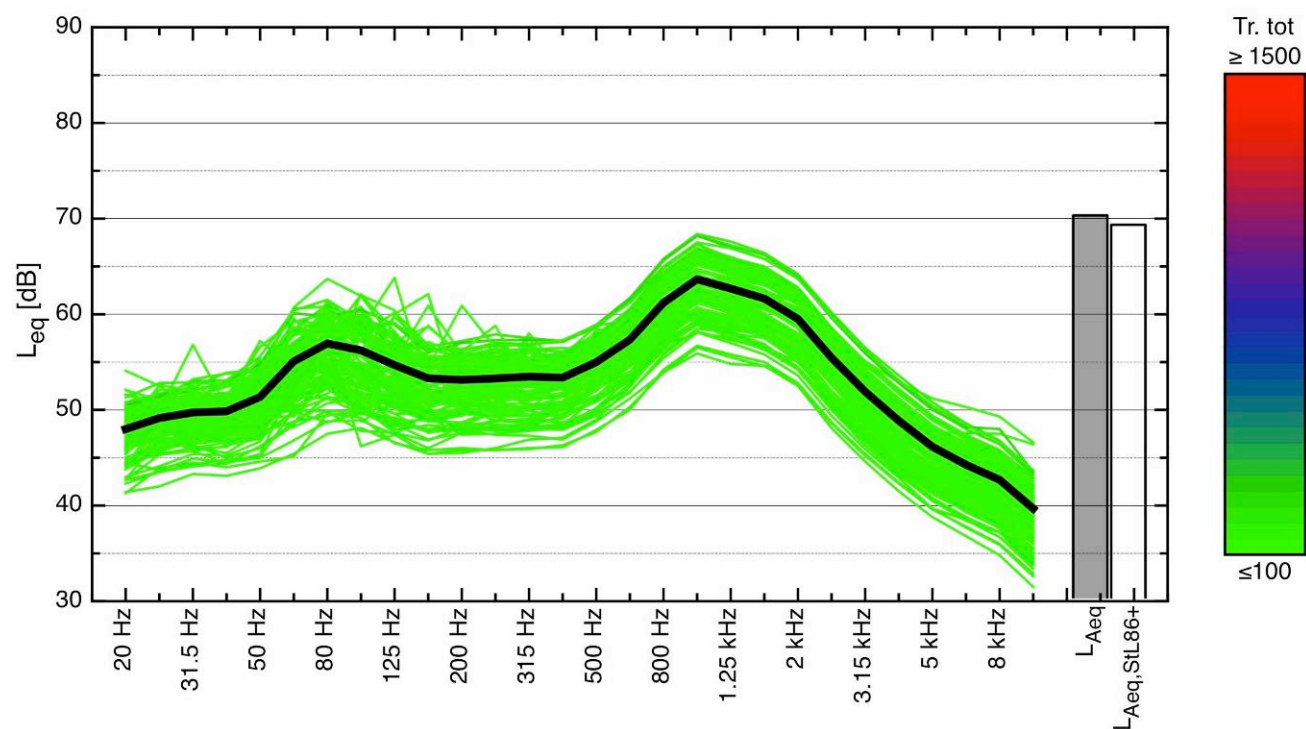
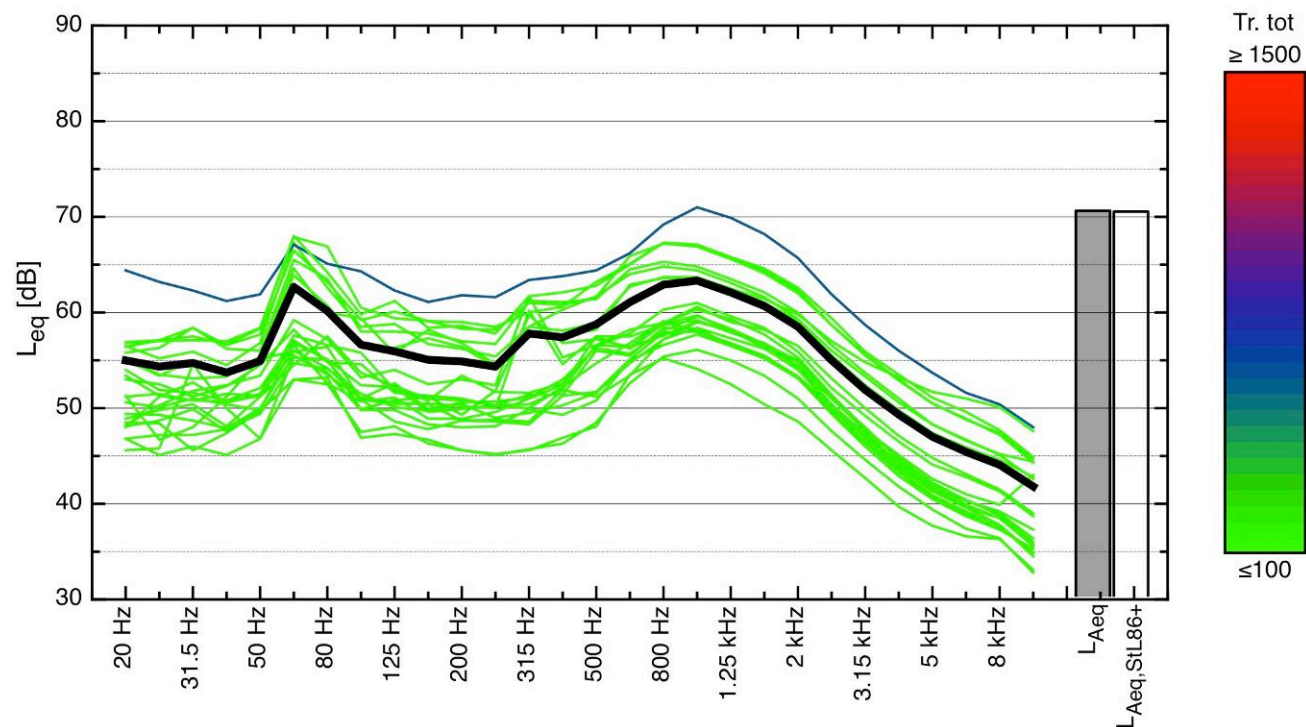
Moleno Süd-Nord - RW**Moleno Süd-Nord - LKW**

Moleno Nord-Süd - RW**Moleno Nord-Süd - LKW**

Reiden Süd-Nord - RW**Reiden Süd-Nord - LKW**

Reiden Nord-Süd - RW**Reiden Nord-Süd - LKW**

Rothenbrunnen Süd-Nord - RW**Rothenbrunnen Süd-Nord - LKW**

Rothenbrunnen Nord-Süd - RW**Rothenbrunnen Nord-Süd - LKW**

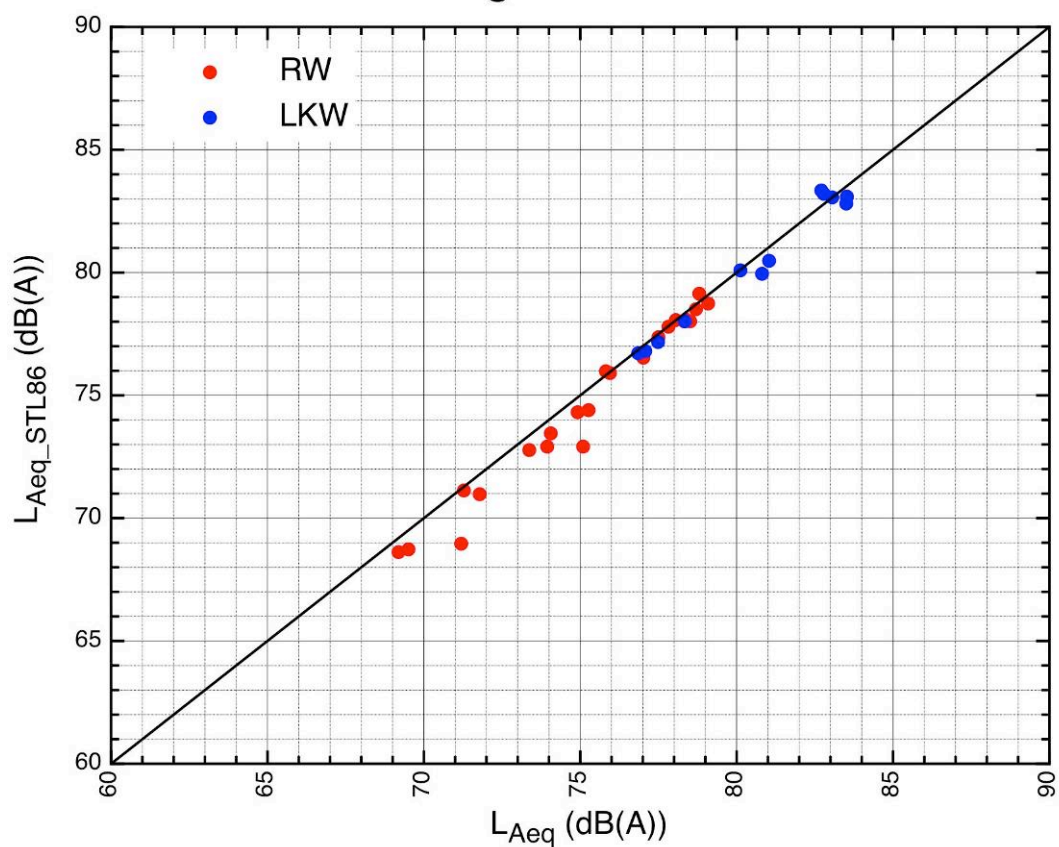
ANHANG 2

Vergleich zwischen den während den ausgewählten Zeiträumen gemessenen L_{Aeq} (Halbstundenwerten) und den nach STL86+ berechneten Werten.

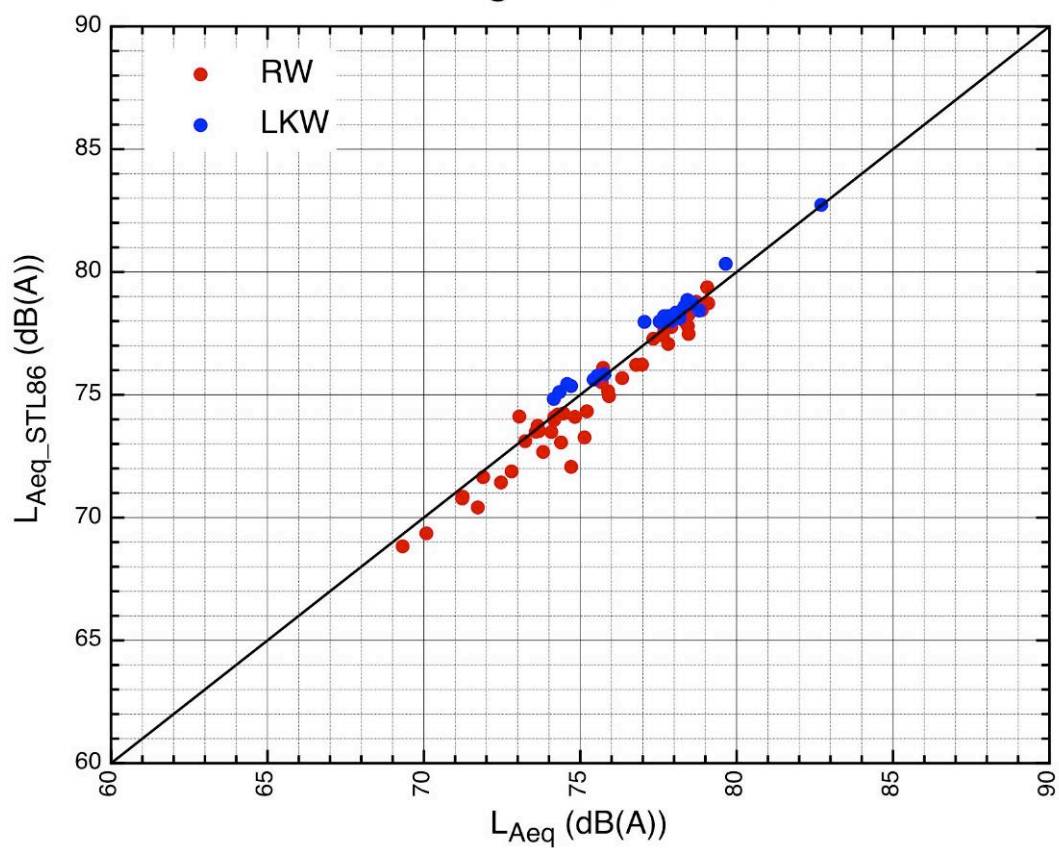
Rot: Halbstunden mit LKW-Anteil $\leq 0.5\%$; blau: Halbstunden mit LKW-Anteil $\geq 30\%$).

Die Gerade stellt die Achsenhalbierende dar.

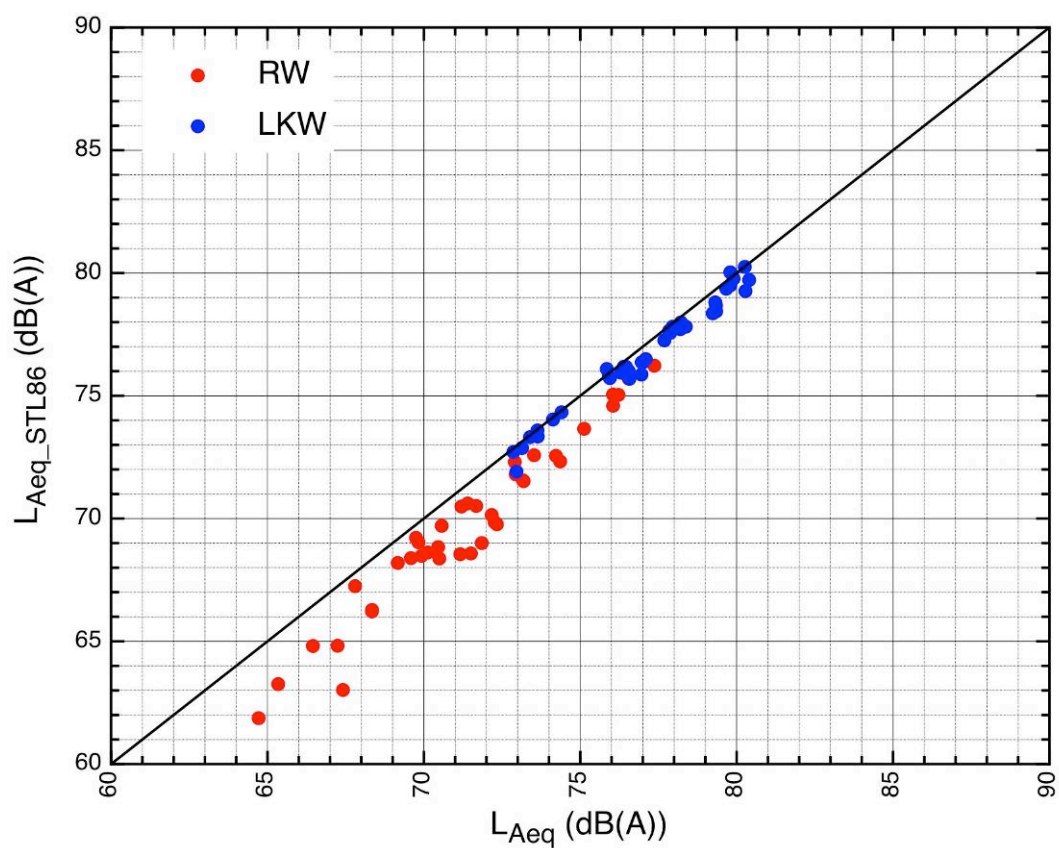
Camignolo Süd-Nord



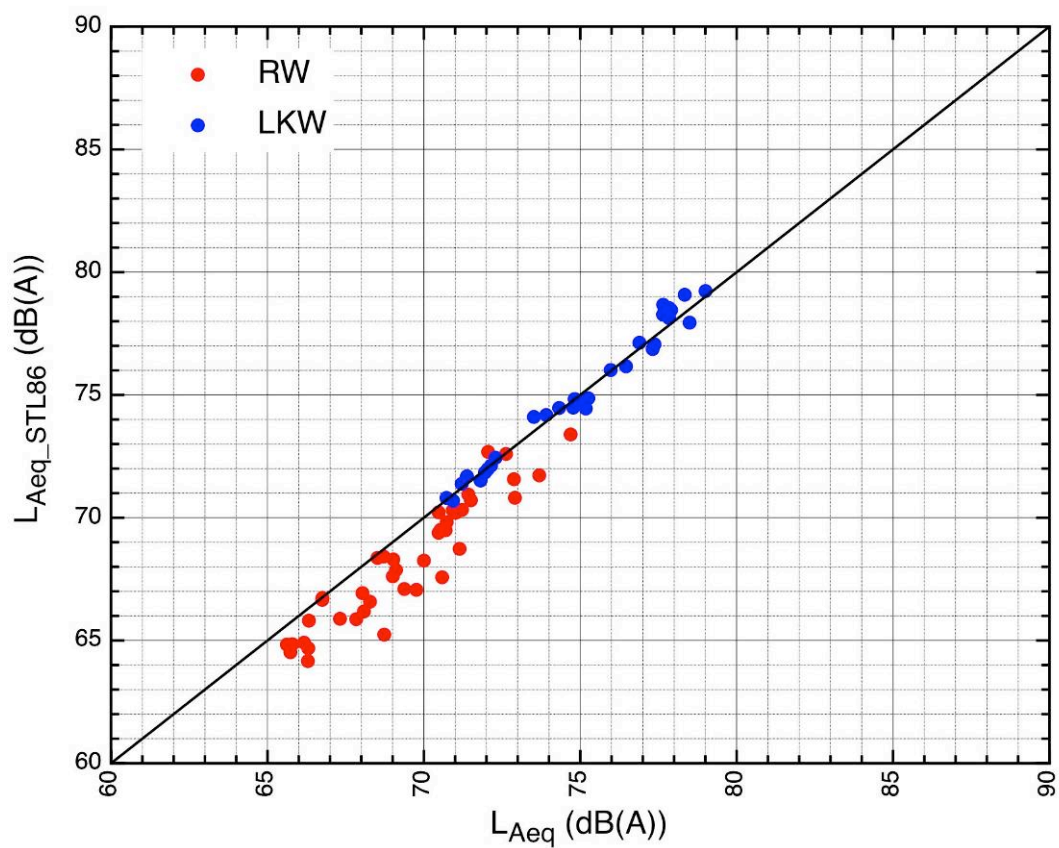
Camignolo Nord-Süd

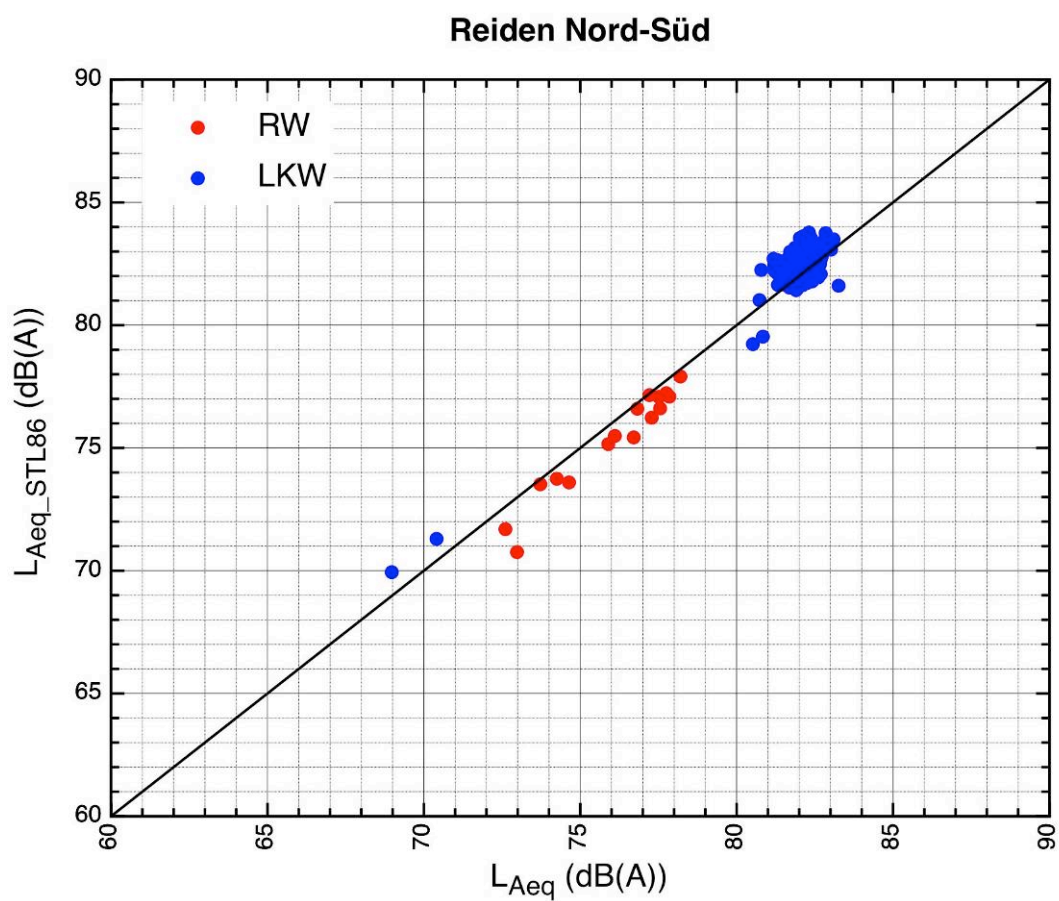
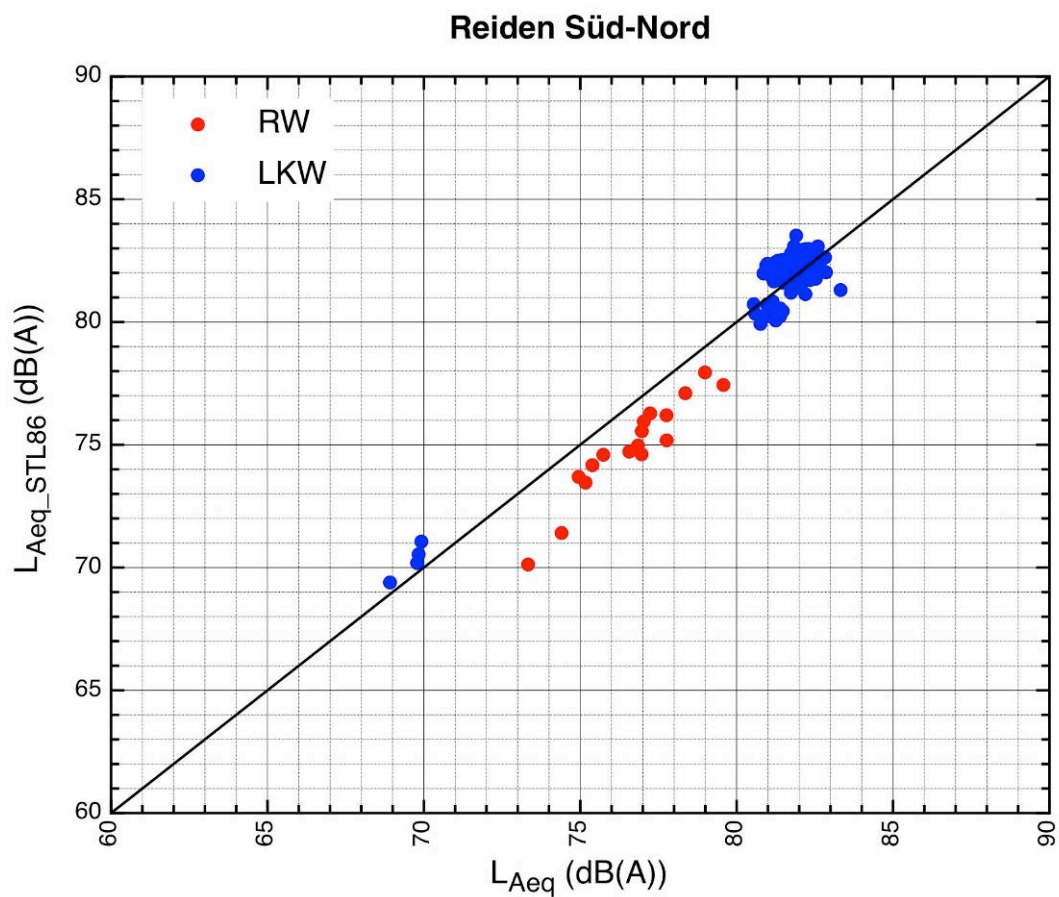


Moleno Süd-Nord

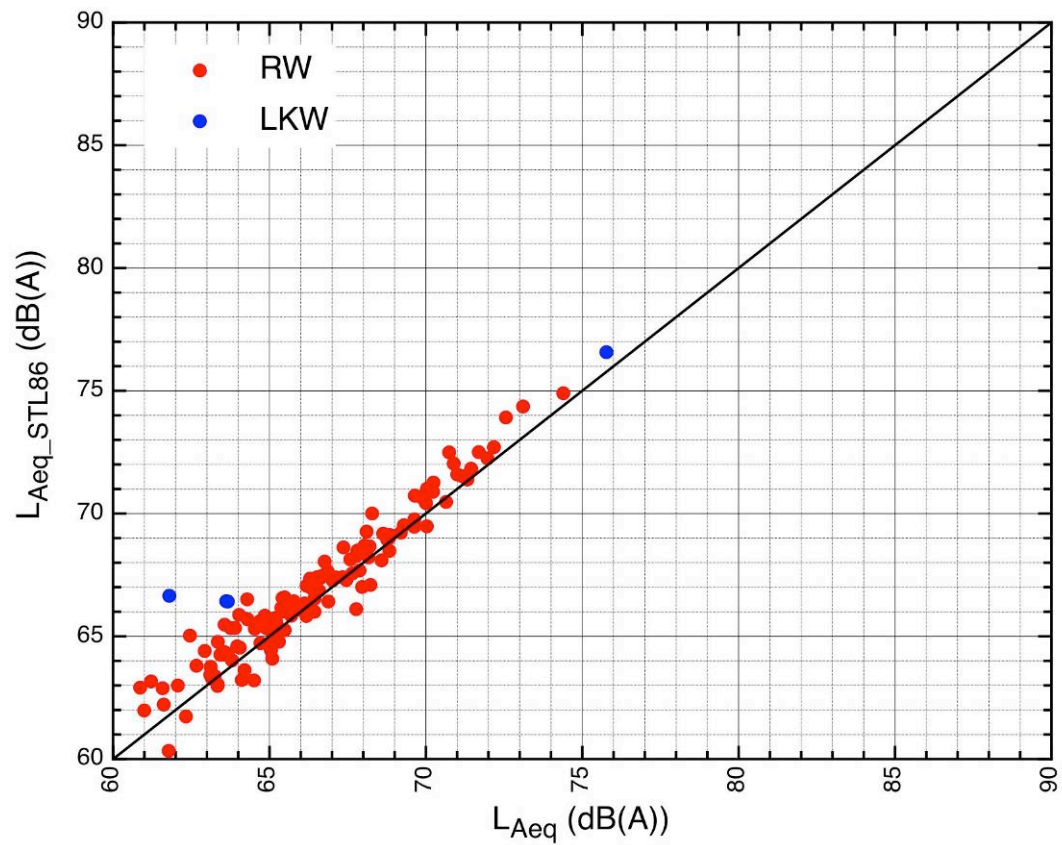


Moleno Nord-Süd

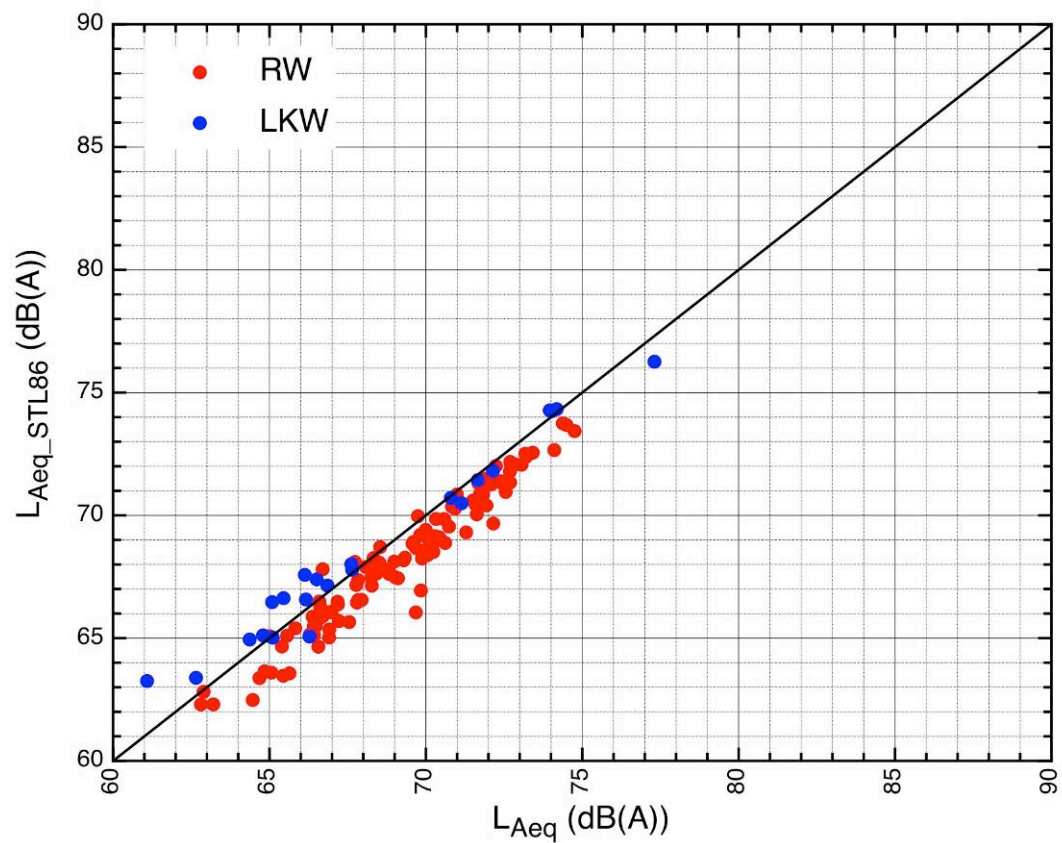




Rothenbrunnen Süd-Nord



Rothenbrunnen Nord-Süd



ANHANG 3

Immissionsspektren eines Referenzwagens (1 Fz/Std.) für jede Fahrtrichtung
bei den Standorten Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunen

