

# Das Terzspektrum

## Analyse und Vergleich gängiger Auswerteprogramme für Erschütterungsuntersuchungen des Schienenverkehrs

Mag. **Karoline Alten**, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien  
Dr. **Adrian Egger**, TROMBIK Ingenieure AG, Zürich

### 1. Einleitung

Die Messung und Beurteilung von Schallimmissionen auf Grund von Schienenverkehr werden in Österreich in den Normen [1] und [2] sowie in der Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung (SchIV) [3] behandelt. In Deutschland gibt es hierzu das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [4]. Für Erschütterungen aufgrund von Schienenverkehr findet man im deutschsprachigen Raum die Normen [5], [6] und die Weisung [7], die zum Teil auch den damit assoziierten Sekundärschall behandeln.

Um in weiterer Folge eine Prognose für derartige Immissionen durchführen zu können, wie es beispielsweise für Neubaustrecken oder bei betrieblichen Änderungen an Bestandsstrecken erforderlich ist, wird in den meisten Fällen ein spektrales Prognoseverfahren gemäss [8] angewandt. Hierin wird die gesamte Übertragungskette in Teilsysteme gegliedert, die jeweils durch ein Schmal- oder Terzbandspektrum aus theoretischen oder messtechnischen Erkenntnissen beschrieben werden können. Die Ermittlung eines derartigen Terzspektrums soll im vorliegenden Beitrag genauer betrachtet werden, um darzulegen, welche Pegeldiskrepanzen selbst bei scheinbar identischen Bearbeitungsschritten zwischen verschiedenen Softwarepaketen entstehen können.

### 2. Definition Fahrzeugvorbeifahrt

Zur Beurteilung der Schallimmissionen aufgrund von Strassenverkehr wird beim statistischen Vorbeifahrtverfahren gemäss [9] ein Abklingen des A-bewerteten Schallpegels einer Vorbeifahrt um jeweils 6 dB vor und nach dem Maximalpegel gefordert, um als ungestörte Vorbeifahrt zu gelten. Unter diesen Bedingungen kann angenommen werden, dass die vorhergehenden und folgenden Fahrzeuge den Maximalpegel nicht beeinflussen und dieser folglich in der Beurteilung verwendet werden kann.

Bei der Beurteilung von Schallimmissionen durch Schienenverkehr bedient man sich in der Akustik des sogenannten Vorbeifahrtspegels  $L_V$  gemäß [1], der dem energieäquivalenten Schallpegel, in Dezibel (dB), während der Zugvorbeifahrt entspricht, siehe Gleichung (1).

$$L_V = L_E - 10 \cdot \log_{10} \frac{l \cdot 3.6}{s \cdot T_0} \quad (1)$$

wobei:

$T_0$ : Bezugszeit (1 Sek)

s: Zuggeschwindigkeit (in km/h)

l: Zuglänge (in m)

$L_E$ : Schallereignispegel gemäß Gleichung (2)

Beim Schallereignispegel (SEL), siehe Gleichung (2), wird die Energie eines Ereignisses beliebiger Länge auf eine Zeitdauer von 1 Sekunde normiert. Die Mittelungsdauer wird dabei durch die Dauer der Zugvorbeifahrt (Zuglänge durch Zuggeschwindigkeit) begrenzt.

$$L_E = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2)$$

Substituiert man Gleichung (2) in (1) und ersetzt die Schalldruckwerte gegen Schwinggeschwindigkeiten, ergibt sich der energieäquivalente Schnellepegel  $L_{eq}$  der Zugvorbeifahrt als

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{v(t)^2}{v_0^2} dt \right) \quad (3)$$

wobei

$v(t)$ : Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit (in m/s)

$v_0$ : Referenzschnelle  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

Im Erschütterungswesen gibt es hingegen keine einheitliche und vor allem keine eindeutige Definition für die Dauer einer Zugvorbeifahrt. Laut [10] sollte der massgebende Signalbereich „der Durchfahrtsdauer des Zuges durch einen gedachten Messquerschnitt entsprechen und kann aus dem Zeitverlauf der Schwingungsgrößen entnommen werden, in dem die Schwingungsamplituden relativ groß sind.“ Der hierdurch eröffnete Interpretationsspielraum führt meist zu subjektiv gewählten Start- und Endzeitpunkten,  $t_1$  bzw.  $t_2$ . Zusätzlich zur Problematik der mangelhaften Definition kommt die Tatsache, dass einige kommerzielle Softwarepakete nur bestimmte Fensterlängen für die im Folgenden beschriebene Signalverarbeitung zulassen. Während diese Umstände theoretisch keine Auswirkung auf den Maximalpegel einer Vorbeifahrt haben, kann das Spektrum des energieäquivalenten Dauerschnellepegels bei anderer Fensterwahl erheblichen Abweichungen unterliegen.

### 3. Ermittlung der Terzbandspektren

Für Prognoseverfahren wird der energieäquivalente Dauerschwingpegel in Form eines Terzbandspektrums benötigt. Hierfür stehen grundsätzlich zwei Vorgehensweisen zur Verfügung: Die Summation der gewünschten Frequenzbänder im Fourierbereich oder die Applikation einer Filterbank im Zeitbereich. Bei der Berechnung im Frequenzbereich erfolgt die geometrische Addition der Schmalbandwerte und die anschließende Pegelberechnung. Beim Zeitbereichsfilter wird die Filterbank als Serie von Butterworth-Filtern definiert, deren Filterkoeffizienten durch die Abtastfrequenz, die jeweiligen Eckfrequenzen und die Filterordnung bestimmt werden.

Um das Messsignal in den Frequenzbereich zu transformieren, erfolgt eine diskrete Fourier Transformation (DFT). Deren gängigste Implementierung basiert auf den Arbeiten von Cooley und Tukey [11] und verwendet aus Gründen der Recheneffizienz eine Samplezahl  $N = 2^n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Dieser schnelle Algorithmus, auch als Radix-2 bekannt, wird als Fast Fourier-Transformation (FFT) bezeichnet. In der Praxis erfordert Radix-2 das Abschneiden eines Signals (Engl.: Truncation) oder das Verlängern durch Nullen (Engl.: Zero-padding), um  $N$  Stützstellen zu erhalten.

#### 3.1 Testdaten

Um aufzuzeigen, welche Divergenzen in den  $L_{eq}$ -Terzspektren trotz scheinbar gleich gewählter Zeitausschnitte mit verschiedener Software entstehen können, werden zehn Zeitverläufe, davon neun typische Zugvorbeifahrten und ein reines Sinussignal untersucht. Das Sinussignal ist ein künstlich generiertes 10-Hz-Signal mit Betragsspitze 1 mm/s und dient als Kontrollsignal. Bei den Zugsignalen handelt es sich um vertikale Schwinggeschwindigkeiten in Gebäuden, aufgezeichnet mit einer Samplingrate von 800 Hz. Eine detaillierte Beschreibung der Daten befindet sich in Tabelle 3-1. Für jede Zugaufnahme stehen drei synchron aufgezeichnete Kanäle in drei verschiedenen Geschoßen desselben Gebäudes zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung des eventuellen Ein- und Ausschwingverhaltens der Decken wird für jedes Signal eine sogenannte *dynamische Vorbeifahrtdauer* definiert. Diese stellt den von den Autoren subjektiv gewählten Zeitausschnitt dar, der für alle Messkanäle innerhalb desselben Gebäudes ideal wäre und auch der Definition einer Zugvorbeifahrt gemäß [10] genügt. Es wird dadurch jene Vorgehensweise simuliert, die üblicherweise bei Dauermessungen über mehrere Stunden oder Tage zum Einsatz kommt: Selbst beim Einsatz von Messtriggern kann es zu unterschiedlich langen Vor- oder Nachlaufzeiten in der Aufnahme kommen und die Vorbeifahrten müssen manuell nacheditiert werden. Das direkt aus der dynamischen Vorbeifahrt

ermittelte  $L_{eq}$ -Terzspektrum (ohne Anpassung auf eine  $2^n$ -Samplezahl) stellt für jede Zugvorbeifahrt in den nachfolgenden Kapiteln das Referenzspektrum dar.

*Tabelle 3-1: Beschreibung der Testdaten: Signalinhalt, Länge und prozentuelle Längenänderung gegenüber der dynamischen Vorbeifahrt nach Bearbeitung*

| Originalsignal |   |                        |                | Signal nach Abschneiden |                              | Signal nach Auffüllen mit Nullen |                              |
|----------------|---|------------------------|----------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
|                | Beschreibung                            | Totale Signallänge [s] | Dyn. Länge [s] | Länge [s]               | Änderung ggü. dyn. Länge [%] | Länge [s]                        | Änderung ggü. dyn. Länge [%] |
| 01             | Güterzug, starke Lok zu Beginn          | 28.17250               | 22.60          | 20.48                   | -9                           | 40.96                            | +81                          |
| 02             | Personenzug, Lok & Wagen gleich stark   | 12.10000               | 7.40           | 10.24                   | +38                          | 20.48                            | +177                         |
| 03             | Güterzug, Zug weit entfernt             | 11.12000               | 10.00          | 10.24                   | +2                           | 20.48                            | +105                         |
| 04             | Personenzug, Zug über Weiche            | 20.61500               | 10.24          | 10.24                   | 0                            | 40.96                            | +300                         |
| 05             | Güterzug, Zug mit Flachstellen          | 35.03375               | 32.00          | 20.48                   | -36                          | 40.96                            | +28                          |
| 06             | Einzellok, kurzes Signal                | 8.06250                | 5.12           | 5.12                    | 0                            | 10.24                            | +100                         |
| 07             | Güterzug, langes Signal                 | 29.20000               | 24.60          | 20.48                   | -17                          | 40.96                            | +67                          |
| 08             | Personenzug, Zug mit großen Amplituden  | 13.33500               | 7.70           | 10.24                   | +33                          | 20.48                            | +166                         |
| 09             | Personenzug, Zug mit kleinen Amplituden | 7.16250                | 4.60           | 5.12                    | +11                          | 10.24                            | +123                         |

### 3.2 Bearbeitungsschritte

Alle Vorbeifahrten werden mit der Software MEDA von Wölfel Monitoring Systems, VIEW 2002 von Ziegler Consultants, METRIS von SEMEX-EngCon und einer von den Autoren in Python programmierten Routine ausgewertet. Zur Charakterisierung der Schwingungen werden  $L_{eq,i}$  sowie das Max-Hold-Spektrum  $L_{max,i}$  pro Terzband  $i = 3.15, \dots, 315$  Hz ermittelt. Dieser Frequenzbereich deckt den üblichen Frequenzumfang von Schwingungen bzw. Sekundärschall in der Umgebung von Schienenverkehrswegen ab [10], [12], [13]. Im Rahmen des Vergleichs soll der Effekt folgender Bearbeitungsschritte in unterschiedlicher Analysesoftware untersucht werden:

- a)  $L_{eq}$ -Spektrum auf FFT-Basis nach Abschneiden des Originalsignals auf die nächstkleinere  $2^n$  Sampleanzahl
- b)  $L_{eq}$ -Spektrum auf FFT-Basis nach Auffüllen des Originalsignals auf die nächstgrößere  $2^n$  Sampleanzahl
- c)  $L_{eq}$ -Spektrum auf FFT-Basis gemäß Schritt a) und b) jeweils mit und ohne Hanning Fenster
- d)  $L_{eq}$ -Spektrum via Zeitbereichsfilter (Filterbank) über die dynamische Vorbeifahrtsdauer ohne Hanning Fenster

Eine Darstellung der Zeitverläufe im Original sowie eine Kennzeichnung der Signallängen nach Schritt a) und b) befindet sich in Abbildung 3-1. In den erwähnten Softwaresystemen werden beim Zero-padding Nullen ans Signalende gehängt und beim Abschneiden wird der entsprechende Zeitausschnitt aus der Mitte des Originalfiles entnommen. Die Multiplikation mit dem Hanning Fenster erfolgt im Falle von Schritt a) nach dem Abschneiden und im Falle von Schritt b) vor dem Auffüllen mit Nullen. Für die Berechnung des Max-Hold-Spektrums kann in allen Softwarepaketen außer VIEW ein beliebig langes Signal mit oder ohne Zeitgewichtung verwendet werden, da die Pegelberechnung über Zeitbereichsfilter und nicht via FFT erfolgt. Die hierfür ausgewählte Signallänge entspricht der Gesamtdauer des jeweiligen Originalsignals. Für die Ermittlung des  $L_{eq}$ -Spektrums mittels Filterbank wird die bereits erwähnte dynamische Vorbeifahrtlänge, siehe Tabelle 3-1, verwendet.

Die Applikation eines Hanning Fensters erfolgt in der Signalanalyse üblicherweise zur Vermeidung des Leakage-Effekts. Dieses Phänomen tritt bei der Spektralanalyse eines zeitlich begrenzten Signals auf. Im Gegensatz zur Fourier Transformation eines theoretisch unendlich langen Signals liegen in der Praxis der digitalen Signalverarbeitung ausschließlich begrenzte Beobachtungszeiträume vor. Ohne entsprechende Fensterung als Gegenmaßnahmen kommt es folglich immer zu spektralen Lecks, bei denen die Energie einer Frequenzspitze auf benachbarte Frequenzbins verschmiert wird. Ein Nachteil derartiger Fensterung ist allerdings, dass die Amplitude und damit auch die Energie des Signals reduziert werden und das Frequenzspektrum niedrigere Werte aufweist. Im Falle eines stationären Sinus gibt es je nach Fensterform einen Korrekturfaktor für die Amplitude oder die Energie. Auf die Notwendigkeit einer derartigen Korrektur wird auch in [10] für das Beispiel eines monofrequenten Signals hingewiesen. Im Falle von Zugvorbeifahrten, die ein transientes Signal darstellen und manche Frequenzanteile nur zu bestimmten Zeiten auftreten, kann ein Korrekturfaktor die durch die Fensterung eliminierte Information nicht kompensieren.

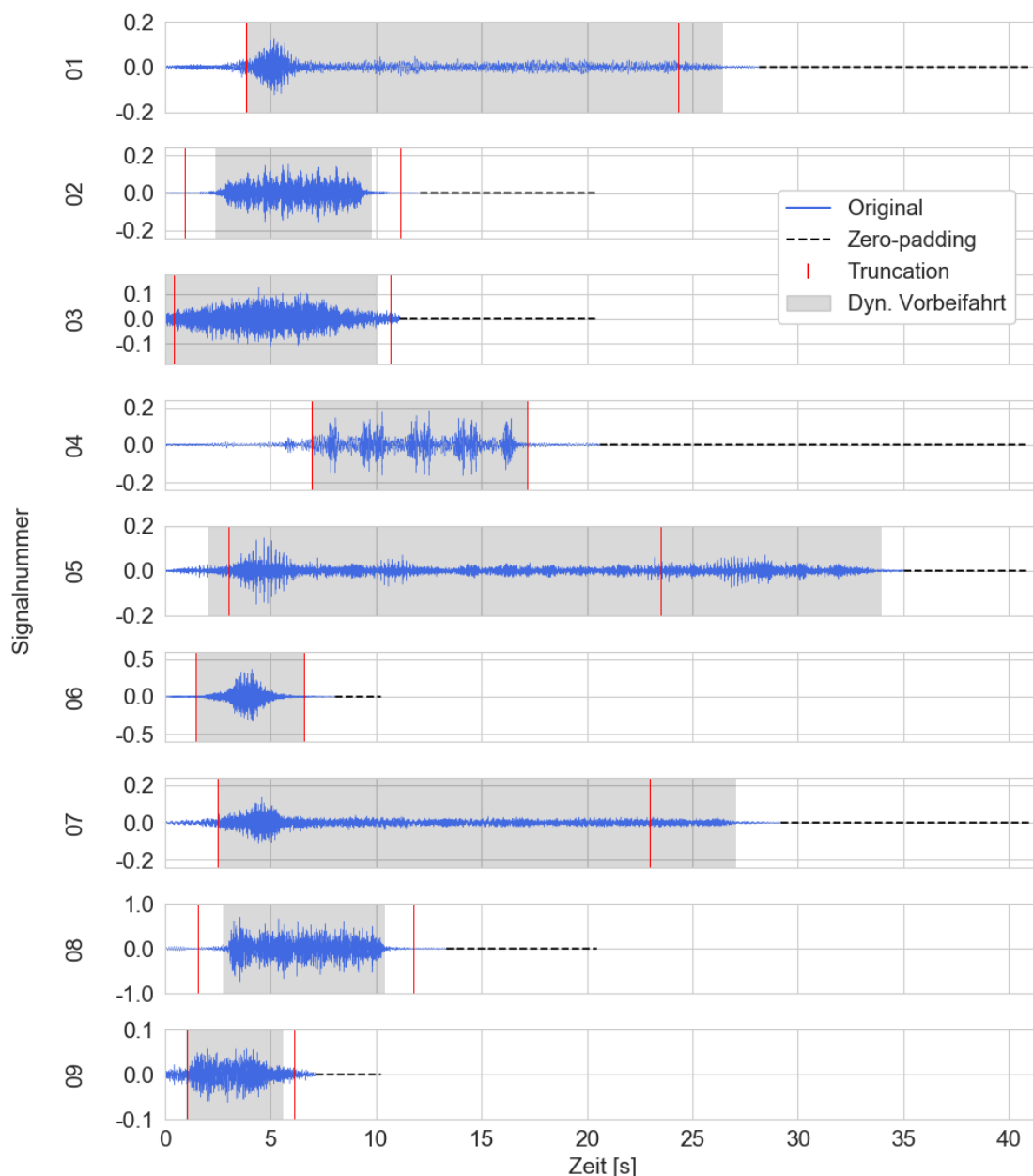


Abbildung 3-1. Zeitverlauf der verwendeten Zugsignale (Schwinggeschwindigkeit in mm/s); Strichliert (schwarz): Signallänge nach Zero-Padding. Vertikale Linien (rot): Truncation Grenzen. Grau hinterlegt: Dynamische Vorbeifahrtdauer.

Im Folgenden werden die technischen Hintergründe zu den durchgeführten Auswerteschritten in den getesteten Softwarepaketen detaillierter beschrieben.

### 3.2.1 MEDA

In dieser Software wird der Energieverlust bei Anwendung einer Hanning Fensterfunktion automatisch korrigiert. Hierbei wird ein Korrekturfaktor von 2 verwendet (entspricht 6 dB), was allerdings einer Amplitudenkorrektur (Spitzenwertkorrektur) bei stationären Signalen entspricht. Die Berechnung der Terzmitten und Terzgrenzen erfolgt nach [14] exakt zur Basis 2. Die Berechnung von Terzbandspektren kann im MEDA sowohl aus einem Schmalbandspektrum als auch direkt aus dem Zeitverlauf erfolgen. Die Bildung des Schmalbandspektrums erfolgt über eine FFT und kann folglich nur von jenen Zeitsignalen berechnet werden, deren Sampleanzahl  $2^n$  entspricht. Durch das Anhängen von Nullen wird die mittlere Gesamtenergie des Originalsignals verringert, was in der Software nach der Transformation automatisch korrigiert wird. Der Korrekturfaktor entspricht dem Verhältnis Sampleanzahl nach Padding zu Sampleanzahl vor Padding.

Die Berechnung von Terzbandspektren direkt aus dem Zeitverlauf geschieht über digitale Filter für jedes Terzband (Bandpassfilter der Ordnung 10 [15]). Bei der Bildung des Max-Hold-Spektrums wird das Zeitsignal nacheinander durch ein Terzfilter der Ordnung 2 geschickt. Der Einschwingvorgang des Filters wird optional für einen begrenzten Zeitausschnitt gelöscht. Aus den gefilterten Zeitverläufen wird der gleitende Effektivwert mit der Zeitbewertung „fast“ (Zeitkonstante  $\tau = 0.125$  s) gebildet und das Maximum dieses Effektivwertzeitverlaufes für jedes Terzband bestimmt.

### 3.2.2 VIEW

Bei Anwendung der Hanning Fensterfunktion wird in diesem Programm der Verlust der Energie nicht korrigiert. Die Berechnung der Terzmitten und Terzgrenzen wurden durch den Autor des Programms [16] rechnerisch festgelegt und entsprechen nicht exakt denjenigen der EN 61260 [14]. Die Berechnung von Terzbandspektren kann nur aus einem Schmalbandspektrum über die FFT ermittelt werden, folglich entfällt bei dieser Software der Vergleich der Filterbankbasierten  $L_{eq}$ -Spektren. Analog zu MEDA ist  $N = 2^n$  erforderlich. Die Energieverringerng aufgrund des Zero-paddings wird in VIEW ebenfalls automatisch korrigiert und entspricht der Wurzel aus dem Verhältnis Sampleanzahl nach Padding zu Sampleanzahl vor Padding.

Die Bildung des Max-Hold-Spektrums basiert auf einer FFT nach Auffüllen mit Nullen im Zeitbereich. Die Fourier-Koeffizienten innerhalb jedes Terzbandes werden verwendet, um das Bandpass-gefilterte Zeitsignal via inverser FFT zu erhalten. Die Maxima dieser Zeitverläufe ergeben jeweils die spektralen Werte.

### 3.2.3 METRIS

Oktavspektren werden in METRIS nur im Zeitbereich gemäß [14] berechnet, daher ist diese Software nur mit den Filterbankberechnungen der anderen Tools vergleichbar und nicht mit den FFT-basierten  $L_{eq}$ -Spektrern. Eine FFT ist in METRIS nur zur Berechnung des Amplituden- und des Leistungsdichtespektrums für harmonische Signale gedacht, wobei zwei Korrekturmöglichkeiten bestehen: 1) Eine Längenkompensation im Falle des Auffüllens mit Nullen zur nächsten Zweierpotenz und 2) eine Fensterkorrektur bezogen auf Peak-Werte (keine Energiekorrektur) [17].

Zur Bestimmung der Max-Hold-Spektren werden die Bandpassausgänge der Filterbank exponentiell gewichtet („fast“ oder „slow“) und der maximale Effektivwert (RMS) pro Terz ermittelt. Diese Auswertung wird in METRIS als „MAX-AVG“ bezeichnet, während die Bezeichnung „MAX-HOLD“ den ungewichteten, maximalen Absolutwert pro Band über die Länge des Signals bestimmt. Für die nachfolgenden Vergleiche der Max-Hold-Spektren wird folglich im Falle von METRIS das „MAX-AVG“ verwendet.

### 3.2.4 Python (Programmiersprache)

Anhand des verfügbaren DFT Algorithmus in der Bibliothek NumPy kann für diese Untersuchung ein beliebig langes Signal in den Frequenzbereich transformiert werden. Aus diesem Grund wird in dieser Studie Python für die Ermittlung des Referenzspektrums  $L_{eq,Ref}$  verwendet, bei dem die dynamische Vorbeifahrt ohne Fensterung oder Längenänderung analysiert wird. Um mit der Mehrheit der getesteten Softwarepakete vergleichbar zu sein, basiert  $L_{eq,Ref}$  auf der Summation der Schmalbandwerte innerhalb der Terzbandgrenzen und nicht auf Zeitbereichsfiltern. Hierbei wird das jeweilige Terzband als Rechteckfenster<sup>1</sup> im Fourierbereich dargestellt.

Im Weiteren wurde in Python auch ein IIR-Zeitbereichsfilter implementiert, um die Terzbandfilterbank für den Vergleich in Kapitel 4.2 zu erzeugen.

---

<sup>1</sup> Gemäß IEC1260 entsprechen die Terzband-Bandpässe eigentlich einem Butterworth-Filter. Die dadurch erzeugte Abweichung des Referenzspektrums gegenüber dem Filterbank-basierten Spektrum erwies sich in *Python* jedoch als vernachlässigbar.



#### 4. Softwarevergleich der Vorbeifahrtsspektren

Im Folgenden werden die  $L_{eq,i}$  der neun Zugvorbeifahrten verglichen, die mittels MEDA, VIEW, METRIS und Python anhand der Bearbeitungsschritte a) bis d) aus Kapitel 3.2 ermittelt wurden. Zur erleichterten Anschauung werden nur die Spektren von Signal 01 graphisch dargestellt und wo erforderlich, die anderen Signale im Text beschrieben. Da die Spektralanalyse in VIEW nur via FFT durchgeführt werden kann, werden die in Kapitel 4.1 dargestellten Pegelberechnungen in Python und MEDA im Sinne der Vergleichbarkeit ebenfalls via FFT implementiert ( $N = 2^n$ ).

METRIS berechnet die Pegel nur via Zeitbereichsfilter und wird folglich in Kapitel 4.2 in den Vergleich an Stelle von VIEW einbezogen, um den Filterbänken aus Python und MEDA gegenübergestellt zu werden.

Im dritten Teil der Vergleichsstudie wird in jeder Software das Max-Hold-Terzschnellespektrum  $L_{max,i}$  der dynamischen Vorbeifahrt ohne Fensterung bestimmt (siehe Kapitel 4.3). Zu diesem Zweck wird in allen Softwarepaketen außer VIEW ein Zeitbereichsfilter für die Terzbänder verwendet und die Maximalpegel anhand der gefilterten, fast-bewerteten Zeitverläufe bestimmt. In VIEW erfolgt die Berechnung weiterhin auf Basis einer FFT.

##### 4.1 Terzbandspektren auf Basis einer FFT

Abbildung 4-1 zeigt die energieäquivalenten Dauerschnellespektren von Signal 01 für verschiedene Analysetools. Die Terzbandwerte in VIEW sind aufgrund eines Tiefpassfilters im MR2002 nur bis 250 Hz verfügbar. Beim Abschneiden der Signale auf eine  $2^n$  Sampleanzahl ohne Fensterung (Diagramm A) ergeben sich durchwegs vergleichbare Resultate für alle Programme.

Beim Abschneiden inklusive Hanning Fenster (Diagramm B) ermitteln Python und VIEW nahezu identische  $L_{eq,i}$ , während MEDA um ca. 4 dB (= Faktor 1.6) höhere Werte liefert, die bis 31.5 Hz gut mit der Referenz übereinstimmen. Deutlich zu erkennen ist hier der in Kapitel 3.2 beschriebene Effekt des Informationsverlustes im Falle transienter Signale: Durch die Amplitudengewichtung mittels Hanning wird die Lok zu Beginn der Aufzeichnung beeinträchtigt. Dieser Effekt wird in MEDA bei tiefen Frequenzen noch erfolgreich kompensiert, ab 50 Hz kommt es aber analog zu den anderen Programmen zu einer Unterschätzung des Pegels. Der absolute Effekt dieser Bearbeitungsschritte wird gegenüber der gemeinsamen Referenz  $L_{eq,Ref}$  beurteilt: Es zeigt sich hierbei in Diagramm C, dass VIEW das Auffüllen mit Nullen sehr gut kompensiert und kaum Unterschiede zu  $L_{eq,Ref}$  entstehen. In Python wurde von den Autoren im

Rahmen dieser Studie keine Padding-Kompensation implementiert, wodurch es erwartungsgemäß zu geringeren Pegeln als bei  $L_{eq,Ref}$  kommt. In MEDA scheint eine Überkompensation aufzutreten, folglich liegt  $L_{eq,i}$  im Schnitt um etwa 1.2 dB über den Pegeln des Referenzspektrums.

In Diagramm D ist durch die Hanning- und Padding-Kompensation in MEDA eine leichte Überschätzung des Pegels bis 50 Hz gegenüber  $L_{eq,Ref}$  zu sehen, verglichen mit den anderen Analysetools entspricht das MEDA Spektrum jedoch noch am ehesten der Referenz (max. 5 dB Abweichung).

Die Divergenz bei höheren Frequenzen ist auf das Abschneiden maßgebender Signalanteile bei Hanning Fensterung zurückzuführen und gilt für das hier gezeigte Beispielsignal 01. Bei „symmetrischen“ Zugvorbeifahrten ohne große Amplituden zu Beginn oder Ende der Vorbeifahrt funktioniert die Fensterkompensation in MEDA besser.

Die sehr gute Übereinstimmung aller Auswertesysteme mit dem Referenzspektrum in Bild 4-1A ist darauf zurückzuführen, dass der Zeitausschnitt der dynamischen Vorbeifahrt für Signal 01 jenem des auf die nächste Zweierpotenz abgeschnittenen Signals sehr ähnlich ist (siehe Abbildung 3-1). Für andere Vorbeifahrten wiederum, z.B. Signal 05, bei denen sich das abgeschnittene Signal deutlich von der für die Referenz verwendeten dynamischen Vorbeifahrt unterscheidet, entstehen auch deutlichere Pegelunterschiede von bis zu 4 dB.

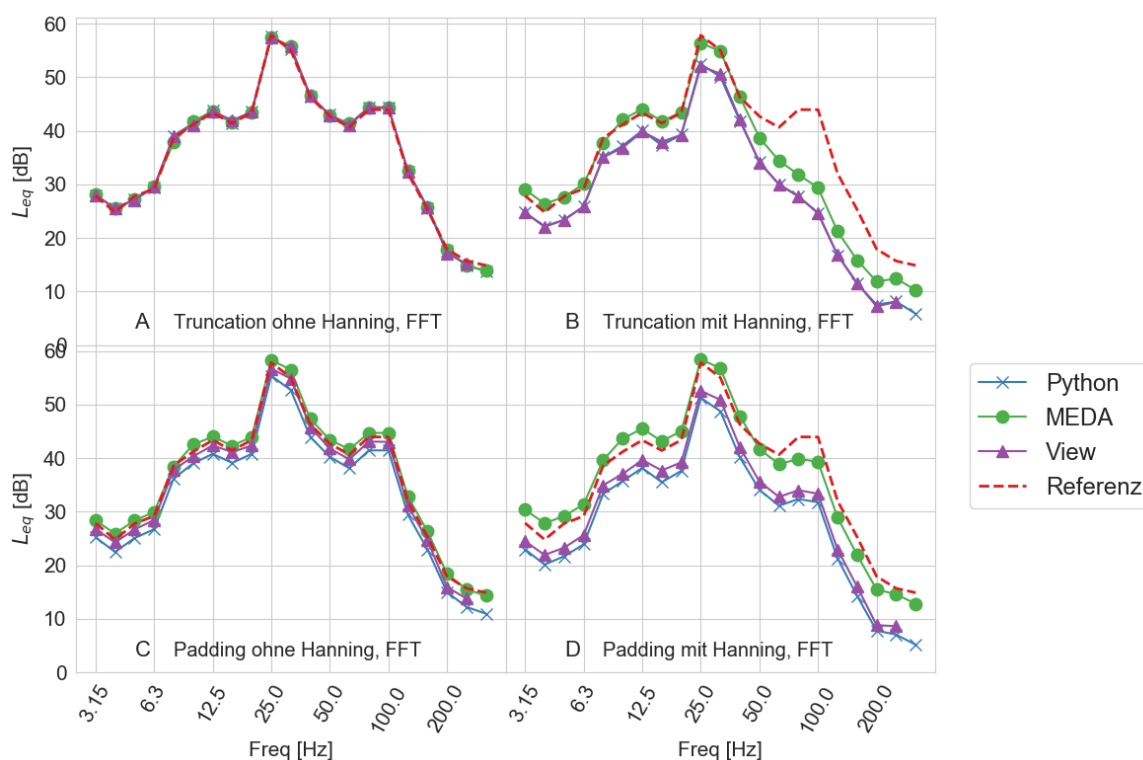


Abbildung 4-1.  $L_{eq}$ -Spektren für Signal 01 aus verschiedener Software verglichen mit  $L_{eq,Ref}$ .

## 4.2 Terzbandspektren auf Basis einer Filterbank

In Abbildung 4-2 werden die mittels Zeitbereichsfilter berechneten  $L_{eq}$ -Spektren von Signal 01 verglichen. Bei dieser Methode ist keine Fensterung oder Längenänderung erforderlich, folglich bildet immer die dynamische Vorbeifahrt das Eingangssignal. Als unbearbeitete Referenz wird weiterhin das auf FFT-Basis in Python ermittelte  $L_{eq}$ -Spektrum der dynamischen Vorbeifahrt dargestellt.

Die in Python verwendete Filterbank liefert nahezu identische Ergebnisse wie das auf FFT-Basis ermittelte Referenzspektrum. Nur in sehr vereinzelt Terzbändern kommt es zu einer Abweichung von  $<2$  dB. Für Signal 01 ergibt METRIS geringfügig kleinere Werte als die Referenz, im Schnitt  $-0.4$  dB über allen Terzen, ebenso wie das MEDA-Spektrum, das im Mittel  $1.7$  dB unter  $L_{eq,Ref}$  liegt. Dieser Effekt ist bei Signal 01 verhältnismäßig stark ausgeprägt, während bei der Mehrheit der Signale eine sehr gute Übereinstimmung zwischen METRIS, Python und den  $L_{eq,Ref}$  Pegeln vorliegt. Bei MEDA sind hingegen auch für Signal 02, 03 und 09 Abweichung von  $-2$ dB bis  $+4$ dB relativ zur Referenz zu beobachten. Außerdem sei angemerkt, dass MEDA bei sehr kurzen Signalen (z.B. 06 und 09, Originalsignal kürzer als 10 Sekunden) keine Werte für Pegel in tiefen Frequenzbändern erzeugen kann, da der Einschwingvorgang der Zeitbereichsfilter von der Software optional abgeschnitten wird.

METRIS benutzt sogenannte Lattice Wave Digital Filters (LWDF), deren Gruppenlaufzeit nahezu halb so groß ist wie bei klassischen, kaskadierten biquadratischen Filtern. Der Effekt des Einschwingens ist daher deutlich geringer und es werden keine Signale abgeschnitten. Das Verfahren der vorwärts-rückwärts Filterung (zero-phase filtering) wird in METRIS zurzeit nicht eingesetzt [persönliche Auskunft SEMEX].

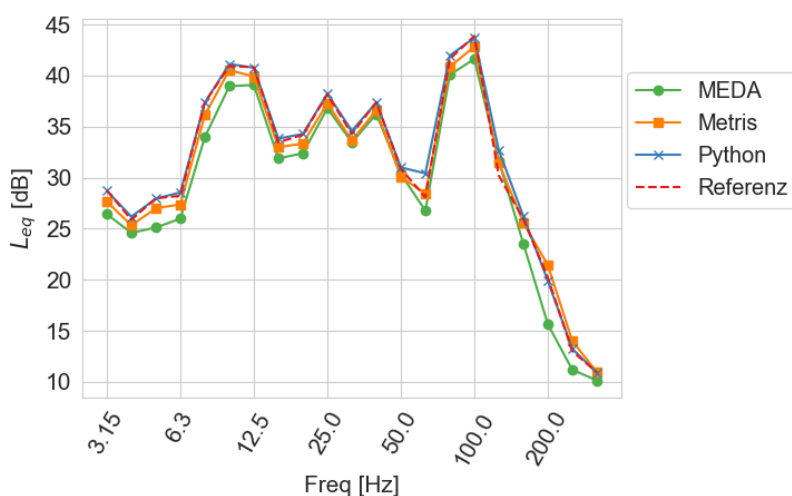


Abbildung 4-2.  $L_{eq}$ -Spektren für Signal 01 auf Basis von Zeitbereichsfiltern. Vergleich mit dem auf FFT-Basis ermittelten  $L_{eq,Ref}$ -Spektrum.

### 4.3 Max-Hold-Spektren aus verschiedener Software

Max-Hold-Spektren werden auf Basis des „fast“ bewerteten Zeitsignals ermittelt. In jedem Terzband wird dabei der Maximalpegel  $L_{\max,i}$  individuell über die gesamte Dauer des Signals gehalten. Bei diesem Auswerteverfahren verwenden alle Softwaresysteme außer VIEW die dynamischen Vorbeifahrtslängen und applizieren keine Fensterung nach der Zeitbewertung. In Abbildung 4-3 ist exemplarisch das  $L_{\max}$ -Spektrum für Signal 01 dargestellt. Überraschenderweise ergeben sich auch bei diesem Kennwert trotz eindeutig definierter Vorgehensweise erhebliche Unterschiede zwischen den Programmen. In der Abbildung erkennt man, dass MEDA in tieffrequenten Terzbändern bis 12 Hz höhere Pegel als Python, METRIS und VIEW liefert, während bei höheren Frequenzen VIEW die größten  $L_{\max,i}$  erzeugt. In manchen Terzen des abgebildeten Beispiels ist eine Diskrepanz von bis zu 7 dB (= Faktor 2.2) zwischen den Softwares erkennbar.

Es zeigt sich, dass METRIS und Python sowie das  $L_{\max,Ref}$  (Python auf FFT-Basis) durchgehend sehr gut übereinstimmen, während MEDA etwas größere und VIEW vor allem in höheren Terzen deutlich größere Werte liefert. Diese Unterschiede sind für die Autoren auch unter Berücksichtigung der Informationen in den Software-Handbüchern nicht nachvollziehbar. Eigentlich war zu erwarten, dass der gehaltene Maximalwert eines Signalverlaufs für alle Programme gleich ist, da das Maximum unabhängig von der Berechnungsmethode (Zeitbereichsfilter oder Summation der Schmalbänder) sein sollte, vorausgesetzt natürlich, das Maximum eines Terzbandes wurde im Zuge der Truncation nicht weggeschnitten (wovon bei den vorliegenden Signalformen nicht auszugehen ist).

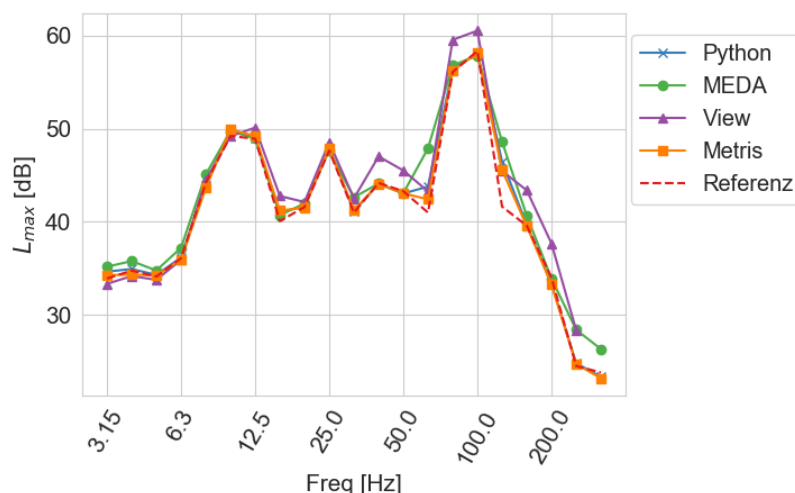


Abbildung 4-3. Max-Hold-Spektren für Signal 01 aus verschiedenen Softwaresystemen.

#### 4.4 Summenpegel

Ergänzend zum bisher angestellten Vergleich der Terzbandspektren werden in Tabelle 4-1 die Summenpegel aller neun Zugsignale für die oben beschriebenen Auswertevarianten dem Summenpegel des Referenzsignals gegenübergestellt. Einzahlwerte wie der KB-Wert sind besonders bei normativen Beurteilungen von Relevanz und werden daher üblicherweise aus den im Rahmen einer Prognose ermittelten Spektralwerten gebildet. Die Tabelle enthält die prozentuellen Schwinggeschwindigkeitsdifferenzen gegenüber der Schwinggeschwindigkeit gemäß Referenzsummenpegel.

Tabelle 4-1. Prozentuale Differenz der Summenpegel der energieäquivalenten Dauerschnellespektren jedes Signals zum jeweiligen Referenzspektrum

| Auswertung           |              | Software | Sig. 01 | Sig. 02 | Sig. 03 | Sig. 04 | Sig. 05 | Sig. 06 | Sig. 07 | Sig. 08 | Sig. 09 | Mittelw. [%] |
|----------------------|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| FFT nach Abschneiden | Ohne Hanning | Python   | 3.7     | -14.9   | -1.0    | 0.0     | 5.4     | 0.0     | 5.9     | -13.1   | -4.3    | -2.0         |
|                      |              | MEDA     | 4.2     | -14.8   | -0.5    | 0.1     | 6.0     | 0.1     | 6.3     | -13.1   | -3.5    | -1.7         |
|                      |              | VIEW     | 3.7     | -14.9   | -1.0    | 0.0     | 5.4     | -0.7    | 5.9     | -13.1   | -4.3    | -2.1         |
|                      | Mit Hanning  | Python   | -53.4   | -31.7   | -25.2   | 34.2    | -50.4   | -8.0    | -55.9   | -36.7   | -31.9   | -36.4        |
|                      |              | MEDA     | -23.4   | 11.7    | 22.7    | 7.6     | -18.3   | 50.3    | -27.6   | 3.4     | 12.0    | 4.3          |
|                      |              | VIEW     | -53.4   | -31.7   | -25.2   | -34.2   | -50.3   | -8.7    | -55.9   | -36.7   | -31.9   | -36.4        |
| FFT nach Auffüllen   | Ohne Hanning | Python*  | -24.4   | -39.8   | -29.6   | -49.3   | -11.2   | -29.2   | -21.5   | -38.4   | -30.9   | -30.5        |
|                      |              | MEDA     | 10.4    | 2.0     | 30.4    | 0.9     | 4.4     | -10.0   | 10.5    | -5.4    | -0.2    | 4.8          |
|                      |              | VIEW     | -8.9    | -21.7   | -4.4    | -28.5   | -4.0    | -20.8   | -7.1    | -23.7   | -17.4   | -15.2        |
|                      | Mit Hanning  | Python*  | -58.6   | -49.1   | -45.6   | -58.0   | -53.5   | -32.0   | -61.8   | -50.2   | -45.7   | -50.5        |
|                      |              | MEDA     | -1.0    | 40.9    | 64.3    | 36.4    | -10.5   | 41.2    | -11.9   | 24.8    | 27.7    | 23.5         |
|                      |              | VIEW     | -50.0   | -33.8   | -26.2   | -40.8   | -49.7   | -23.9   | -54.7   | -38.3   | -35.1   | -39.2        |
| Filterbank-spektrum  | Python       | 1.3      | 1.0     | 1.0     | 1.3     | 1.4     | 1.4     | 1.1     | 1.0     | 1.0     | 1.2     |              |
|                      | MEDA         | -18.7    | -14.8   | -6.8    | 3.4     | 2.3     | 14.6    | -2.8    | 0.1     | -5.0    | -3.1    |              |
|                      | METRIS       | -8.7     | -0.3    | -0.3    | 0.0     | 0.0     | 0.2     | -6.9    | -0.1    | -0.4    | -1.8    |              |

\* Ergebnisse ohne Padding-Kompensation

#### 5. Diskussion

Aus Tabelle 4-1 sowie den Resultaten der vorangegangenen Kapitel lassen sich folgende Erkenntnisse für die Praxis ableiten:

- Wird der untersuchte Zeitausschnitt durch das Abschneiden auf eine  $2^n$  Sampleanzahl kürzer als die dynamische Vorbeifahrt, werden die Summenpegel (ohne Hanning) überschätzt. Dies ist zum Beispiel für Signal 01, 05 und 07 der Fall, wo der subjektive Start- und Endzeitpunkt der Vorbeifahrt nach Truncation nicht vollständig in die Auswertung einbezogen wird und folglich im Mittel höhere Schwinggeschwindigkeiten in die  $L_{eq}$ -Berechnung einfließen.
- Der Einsatz des Hanning Fensters führt in VIEW und der getesteten Python Routine immer zu einem zu niedrigeren Summenpegel gegenüber  $L_{eq,Ref}$  (im Mittel um etwa -4 dB, im Extremfall bis zu -8 dB), da keine Hanning-Korrektur vorliegt. Am stärksten ist diese Unterschätzung bei asymmetrischen Signalformen, die durch Loks zu Beginn oder Ende der Aufzeichnung entstehen. In MEDA kommt es beim Einsatz eines Hanning Fensters, mit Ausnahme der asymmetrischen Testsignale 01, 05 und 07, immer zu einer Überschätzung des Pegels gegenüber der Referenz (im Mittel um +2 dB, im Extremfall bis zu +4 dB).
- Das Auffüllen mit Nullen auf die nächste Zweierpotenz verursacht bei den untersuchten Signalen im Schnitt eine betragsmäßig größere Abweichung von  $L_{eq,Ref}$  als das Abschneiden auf die nächstkleinere  $2^n$  Sampleanzahl. Dies liegt an der größeren prozentualen Längenänderung beim Padding als beim Abschneiden in diesen Beispielen.
- Allgemein sollten Anwender im Falle einer Truncation genau darauf achten, wie die verwendete Software vorgeht. Während für die hier präsentierte Untersuchung immer ein mittlerer Signalausschnitt aus der Originalaufnahme entnommen wurde, schneidet beispielsweise MEDA per Default das Signal nur hinten ab, um auf die gewünschte Sampleanzahl zu kommen.
- Die Filterbänke in METRIS und Python scheinen ähnlich implementiert zu sein, wodurch die Ergebnisse im Schnitt um weniger als 0.2 dB vom jeweiligen Referenzsummenpegel abweichen. Im Mittel über alle Zugvorbeifahrten bedeutet das -1.8% Schwinggeschwindigkeitsdifferenz bei METRIS und 1.2% bei Python. MEDA zeigt geringfügig größere Abweichungen zur Referenz, die manchmal zu einer Überschätzung und manchmal zu einer Unterschätzung des Summenpegels führen. Im Schnitt über alle neun Zugsignale sind aber auch hier nur 3.1% Abweichung festzustellen.
- Max-Hold-Spektren stellen bekannterweise einen konservativen Ansatz dar, wenn diese für Immissionsprognosen herangezogen werden. Dass es hier je nach Software möglicherweise zu noch konservativeren Ergebnissen kommen kann, die besonders in Terzen ab 40 Hz prädominant werden, muss von den Anwendern besonders für Sekundärschallprognosen beachtet werden.

In der Praxis passieren vermutlich noch größere Fehler, wenn Zugvorbeifahrten ohne Datensichtung im Rahmen einer vorgegebenen Auswerterroutine automatisiert verarbeitet werden. Ein Verbesserungsvorschlag hierzu wäre beispielsweise die Bestimmung des maximalen (Effektiv-)wertes, um den herum ein Vorbeifahrtfenster mit vorgegebener Pegelabnahme – analog zum eingangs beschriebenen Vorgehen bei akustischen Vorbeifahrtsmessungen – ausgewertet wird. Die manuelle Bestimmung relevanter Zeitfenster würde somit entfallen. Im Allgemeinen raten die Autoren unbedingt vom Einsatz des Hanning Fensters für die Auswertung von Zugvorbeifahrten ab, denn dessen Anwendung ist nur im Bereich stationärer Signale, z.B. in der Maschinendiagnostik, zweckmäßig und hinreichend kompensierbar, ohne den Signalinhalt zu zerstören. Bei Prognoserechnungen sollten sich Anwender der möglichen Schwankungsbreite bewusst sein, die je nach Software und Auswertevariante möglich ist: Die Terzbandpegel desselben Signals können – selbst unter Ausschluss der Ergebnisse mit Hanning Fenster – um 20 dB (= Faktor 10) abweichen, je nachdem ob ein abgeschnittenes oder mit Nullen aufgefülltes Signal für  $L_{eq,i}$  oder  $L_{max,i}$  verwendet wird. Empfehlenswert ist die Anwendung von Filterbänken zur Bestimmung der Terzspektren, denn hierfür kann in den meisten Tools die dynamische Vorbeifahrtlänge des Signals ohne Korrekturen verwendet werden und die Zusammenfassung in Tabelle 4-1 zeigt bei den untersuchten Programmen die geringste Abweichung zur Referenz.

#### Literaturangaben:

- [1] ÖNORM S 5005: Messung der Schallimmissionen von Schienenverkehr, Ausgabe April 2011.
- [2] ONR 305011: Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb, Ausgabe November 2009.
- [3] BGBl. Nr. 415/1993: Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Lärmschutzmaßnahmen bei Haupt-, Neben- und Straßenbahnen (Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung - SchIV).
- [4] BGBl. I S. 1274: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, der Bekanntmachung 17. Mai 2013, zuletzt geändert durch Artikel 55 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626).
- [5] ÖNORM S 9012: Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden Schwingungen und sekundärer Luftschall, Ausgabe Dezember 2016.
- [6] DIN 4150-2: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Ausgabe Juni 1999.



- [7] Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweiz, Ausgabe Dezember 1999
- [8] VDI 3837: Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen: Spektrales Prognoseverfahren, Ausgabe Januar 2013.
- [9] DIN EN ISO 11819-1: Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren (ISO 11819-1:1997), Deutsche Fassung EN ISO 11819-1:2001.
- [10] DIN 45672-2: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswerteverfahren, Ausgabe Juli 1995.
- [11] Cooley, J.W.; Tukey, J.W.: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. In: Mathematical Computation, Vol. 19 (1965), pp. 297-301.
- [12] ÖNORM ISO 14837-1: Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance (ISO 11819-1:1997), Ausgabe Juli 2005.
- [13] ÖNORM ISO 2631-2: Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen - Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (1 Hz bis 80 Hz) (ISO 2631-2:2003), Deutsche Fassung, Juli 2007
- [14] ÖVE/ÖNORM EN 61260-1:2014-10 Elektroakustik - Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven - Teil 1: Anforderungen (IEC 61260-1:2014); Deutsche Fassung EN 61260-1:2014
- [15] Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co. KG: MEDA Programmsystem für das rechnergestützte Messen und Analysieren von Schwingungen, Lärm und Erschütterungen – Handbuch. Oktober 2017, 16. Auflage
- [16] Ziegler Consultants AG: VIEW 2002 – Users' Manual. 17.6.2002
- [17] SEMEX-EngCon GmbH: METRIS-Benutzerhandbuch 1.0, August 2019

Autorenangaben Autor 1:

Mag. Karoline Alten

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich

[karoline.alten@ait.ac.at](mailto:karoline.alten@ait.ac.at), +43 664 235 1879

Autorenangaben Autor 2:

Dr. Adrian Egger

TROMBIK Ingenieure AG

Limmattalstrasse 344, CH-8049 Zürich

[a.egger@trombik.ch](mailto:a.egger@trombik.ch), +41 44 344 41 71