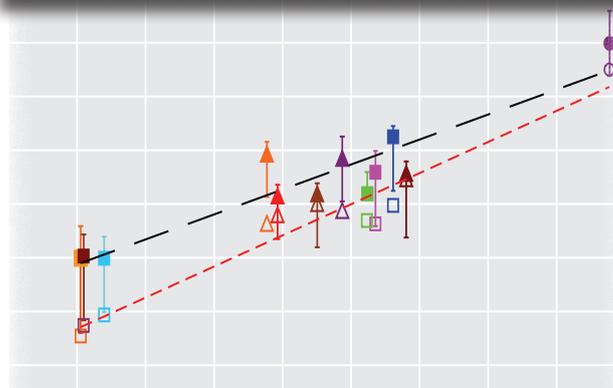
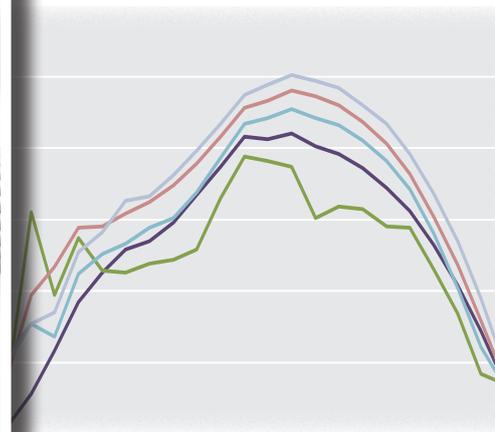
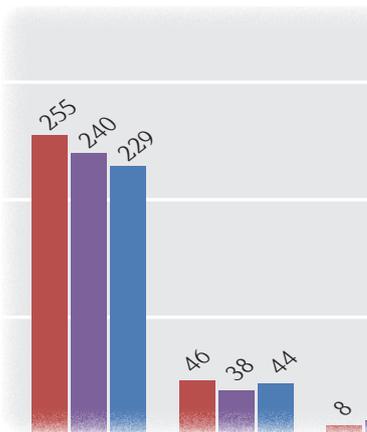
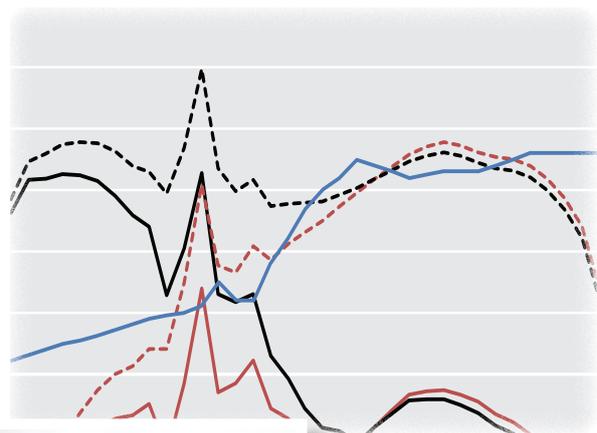
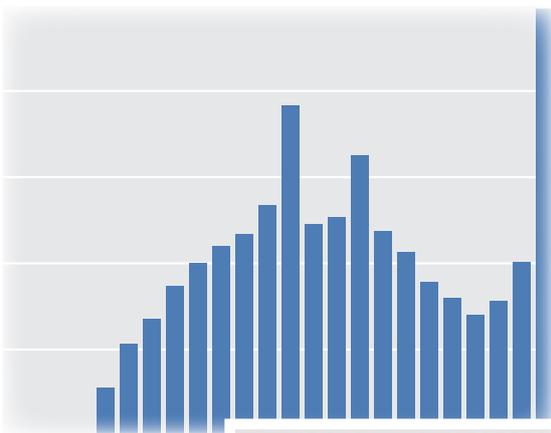




Umwelt und Geologie  
Lärmschutz in Hessen, Heft 5

# Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen



Umwelt und Geologie  
Lärmschutz in Hessen, Heft 5

# **Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen -**

**Zum Auftreten von Korona-Geräuschen, vergleichend für  
Leiteseile mit hohen und niedrigen Randfeldstärken mit  
Auswertungen zur Witterungsabhängigkeit und Auftretens-  
häufigkeit unter Einbeziehung von Emissions- und Prognose-  
Besonderheiten nach TA Lärm**

Wiesbaden, 2015

# Impressum

ISSN 1610-594X  
ISBN 978-3-89026-576-6

Umwelt und Geologie  
Lärmschutz in Hessen, Heft 5

## Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen

erstellt im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie,  
Dezernat I4, Lärm, Erschütterungen, Elektromagnetische Felder

durchgeführt von der Messstelle nach § 29b BImSchG für Lärm- und Erschütterungen  
der TÜV Technische Überwachung Hessen GmbH

Stand: Februar 2015

Autoren: PASCAL SAMES  
MARKUS GOOSSENS (Projekt- und Messstellenleitung)

mitwirkende, messende Sachverständige: Dr. Erich Krämer, Andreas Lingenau, Markus Schweitzer,  
Johannes Zinken

Layout: Martina Schaffner

Herausgeber, © und Vertrieb:  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 69 39-111  
Telefax: 0611 69 39-555  
E-Mail: [post@hlnug.hessen.de](mailto:post@hlnug.hessen.de)

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

## Inhalt

1	Einleitung – Vorbemerkungen	5
2	Grundlagen	6
2.1	Grundlagen zur Geräuschenstehung an Höchstspannungsfreileitungen	6
2.1.1	Koronaentladungen	6
2.1.2	Tonale Schallemissionen	6
2.2	Elektrische Randfeldstärke	7
2.2.1	Übertragungsspannungen	7
2.2.2	Leiteseilquerschnitte und Bündelung – Definition „dünne“ und „dicke“ Leiterseile	8
2.2.3	Niederschläge – Definition „leichter/ mittlerer“ und „starker“ Regenniederschlag	8
2.3	Oberflächenbeschaffenheit der Leiterseile	9
2.4	Zusammenfassung	10
3	Vorgehensweise zur messtechnischen Ermittlung von Koronageräuschen	10
3.1	Standort 1: Rangendingen	10
3.2	Standort 2: Freren	12
3.3	Standort 3: Brilon	13
3.4	Methodik der Erfassung und Auswertung von Messdaten	15
3.5	Zusammenfassung der Basisdaten und Standorte	16
4	Ergebnisse	16
4.1	Häufigkeiten des Auftretens von Leiteseilemissionen im kompletten Untersuchungszeitraum	16
4.2	Eigenrauschen der Messketten	18
4.3	Ergebnisse für „dicke“ Leiterseile (Al/St 560/50)	20
4.3.1	Leise bis mittlere Emissionen/ leichter Schneeniederschlag	20
4.3.2	Laute Emissionen/ starker Schneeniederschlag	22
4.3.3	Leiteseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen	23
4.3.4	Messungen bei Regenniederschlag	24
4.3.5	Bewertung der Tonalität bei „dicken“ Leiterseilen	26
4.4	Ergebnisse für „dünne“ Leiterseile (Al/St 265/35, Al/St 240/40)	28
4.4.1	Leichter Regenniederschlag 0,1–0,4 mm/5 min	28
4.4.2	Starker Regenniederschlag 0,5–1,0 mm/5 min	30

4.4.3	Leiteseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen. ....	30
4.4.4	Bewertung der Tonalität bei „dünnen“ Leiteseilen. ....	34
4.5	Vertrauensbereiche der Messdaten .....	39
5	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse .....	40
5.1	Emissionsmodelle .....	40
5.1.1	Emissionsmodell „dicke“ Leiteseile .....	40
5.1.2	Emissionsmodell „dünne“ Leiteseile .....	42
5.2	Vergleich der Ergebnisse zwischen „dicken“ und „dünnen“ Leiteseilen .....	43
5.3	Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten .....	46
6	Untersuchte Einflussparameter für die Anwendung einer TA Lärm konformen Prognose. ....	48
6.1	Einfluss der Variation von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Ausbreitungsmodell auf die Ergebnisse von Prognoseberechnungen. ....	48
6.2	Einfluss der Variation der akustischen Segmentierung der Leiteseile im Ausbreitungsmodell .....	51
6.3	Einfluss der Variation der Berechnungsmethode für die Bodendämpfung $A_{gr}$ . ....	54
6.4	Einfluss der Fremdgeräusche bei Niederschlagsereignissen auf Leiteseilgeräusche (Überdeckung) ...	55
6.4.1	TA Lärm und DIN 45645-1, Widersprüche und ungeklärte Anwendung für Koronageräusche ...	55
6.4.2	Messung von Fremdgeräusch durch Regen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen. ....	56
6.4.3	Gründe für die Aufteilung in zwei verschiedene Niederschlagsklassen. ....	58
6.4.4	Vergleich der Messergebnisse des Regenrauschens mit Immissionspegeln durch Leiteseilemissionen .....	60
6.4.5	Graphische Darstellung der Fremdgeräuschüberlagerung für Messungen mit idealisierten Umgebungsbedingungen. ....	65
6.4.6	Graphische Darstellung der Fremdgeräuschüberlagerung für Prognosebetrachtungen mit nicht idealisierter urbaner Umgebungsbedingung .....	66
7	Prognostische Prüfung auf tieffrequente Geräusche (Ziff. 7.3 TALärm) .....	68
7.1	allgemeine Hinweise zu tieffrequenten Geräuschen (TG) .....	69
7.2	Empfohlene Vorgehensweise einer Fachbehörde (LANUV). ....	69
7.2.1	Vorgehensweise nach DIN 45680 (1997) respektive TA Lärm .....	70
7.3	Ergebnisse Vorgehensweise nach Handlungsanleitung - Bericht 44932/7 .....	71
7.4	Ergebnisse Vorgehensweise DIN 45680 .....	71
7.5	Zusammenfassung und Hinweise zum Sonderfall nach DIN 45680 .....	72
7.5.1	Ergänzende Hinweise zum Sonderfall in TALärm und DIN Entwurf 45680 vom November 2013.	72

8 Zusammenfassende Empfehlungen für eine TALärm konforme Prognose . . . . .	73
9 Mögliche Schallschutzmaßnahmen. . . . .	75
10 Ausblick . . . . .	76
11 Literatur . . . . .	77
Anhang 1–12 . . . . .	79

## 1 Einleitung - Vorbemerkungen

Die Energiewende und der damit verbundene politisch gewollte Ausbau des Stromnetzes führen zu verstärktem Neu- und Umbau von sogenannten Höchstspannungstrassen. Im deutschen und europäischen Raum wird seit den Anfängen der frühen 20er Jahre elektrische Energie über große Entfernungen fast ausschließlich über Freileitungen mit 220 kV und 380 kV (Höchstspannungs-)Verbundnetzen übertragen. Dies sind derzeit ausschließlich Wechselspannungs- oder Drehstrom-(AC)Übertragungssysteme mit einer (Netz-)Frequenz von 50 Hz. Erst in jüngster Zeit werden Gleichspannungstechnologien bis 500 kV (DC) geplant (vergleiche SÜD LINK Trasse).

Die von Freileitungen auftretende witterungsabhängige Geräuschemission, hier unter dem Begriff „Korona-Geräusche“ behandelte Thematik, wird dabei nach TA Lärm für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen behandelt. Im Rahmen anstehender Planungs- und Genehmigungsverfahren sind realistische Prognosen und rechtssichere Beurteilungen mit entsprechenden Emissionsansätzen zu erstellen. Hierzu wurden vom TÜV Hessen langzeitige Messungen an insgesamt drei Standorten unterschiedlicher Freileitungen durchgeführt.

Hierbei standen die Unterschiede zwischen Leiterseilen der alten Generation und der neuen Generation mit vergleichsweise größeren Querschnitten im Vordergrund. Die vergleichenden Messungen erfolgten dabei unter besonderer Berücksichtigung der mit Korona,- gleichzeitig auftretenden, Regenfremdgeräusche (Sonderfall nach Ziffer 3.2.2 TA Lärm). Die aus der detaillierten Auswertung entstandenen Emissionsansätze und Besonderheiten sollen hier mit Literaturangaben verifiziert und bewertet werden. Im Zuge der vom TÜV Hessen begleiteten Genehmigungsverfahren und Lärmprognosen fanden verschiedene Diskussionen mit den Fachbehörden (LANUV, HLUG) über Anwendung und Interpretation der TA Lärm im Zusammenhang mit Besonderheiten der Koronageräusche statt. Die gefundenen Besonderheiten und Bewertungen der an den Messungen beteiligten Sachverständigen werden hier dargestellt und mit Empfehlungen für ein prognostisches Verfahren unter Anwendung der TA Lärm beschrieben. Gemäß der Abstimmung mit beteiligten Fachbehörden orientieren sich diese Empfehlungen für einen Prognoseansatz so eng wie möglich an entsprechenden Inhalten der TA Lärm.

## 2 Grundlagen

Es gibt verschiedene Faktoren, welche das Auftreten und die Höhe der Geräuschemission von Höchstspannungsfreileitungen beeinflussen. Hierzu zählen: Witterungsbedingungen, Bündelung und Querschnitt der Leiterseile und die damit in Zusammenhang stehende elektrische Randfeldstärke, sowie Oberflächenbeschaffenheit und Alterungszustand der Leiterseile. Inwiefern diese genannten Faktoren die Entstehung von Geräuschemissionen beeinflussen, soll in diesem Kapitel näher beschrieben werden.

### 2.1 Grundlagen zur Geräuschentstehung an Höchstspannungsfreileitungen

Bei den auftretenden, gemessenen Geräuschemissionen von Leiterseilen können zwei verschiedene Frequenzformen unterschieden werden. Zum einen ein breitbandiges höherfrequentes Geräusch, welches als „Knistern“ oder „Bitzeln“ beschrieben werden kann. Dieses kommt durch Koronaentladungen zustande. Zum anderen treten unter bestimmten Bedingungen tonale Schallemissionen auf, welche als ein „tieffrequentes Brummen“ wahrgenommen werden können. Die Entstehung der beiden Geräuschformen wird im Folgenden näher erläutert.

#### 2.1.1 Koronaentladungen

Der Begriff Koronaentladung bezeichnet Entladungsvorgänge in einem Gas. Gase dienen in vielen Anwendungsfällen als elektrische Isolatoren. So verhindert z.B. die Umgebungsluft einen Stromfluss zwischen Freileitungen und der Erde bzw. auf Erdpotential gesetzten Leitungen. Bei einer Erhöhung der elektrischen Randfeldstärke kann es jedoch zu Entladungsvorgängen zwischen Elektroden kommen. Die Ladungen werden hierbei durch Ionen und Elektronen transportiert, welche durch Photoionisation, Thermoionisation oder Stoßionisation freigesetzt werden können.

Einen möglichen Grund für eine lokale Erhöhung der elektrischen Randfeldstärke stellen gekrümmte

Elektrodenkonturen dar. Das können z.B. Schmutzablagerungen an der Leiteroberfläche sein, Schäden an den Leiterseilen (z.B. Seilspleiß) oder aber Wassertropfen, die sich während eines Regens oder aufgrund der Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von Freileitungen ablagern. Durch die Ablagerungen kommt es zur Ausbildung von inhomogenen elektrischen Feldern mit stark erhöhten elektrischen Feldstärken.

Bei diesen Entladungsvorgängen kommt es zur Abstrahlung von Schall in einem breitbandigen Spektrum, das zum Teil auch in dem höheren für den Menschen hörbaren Frequenzbereich liegt, in etwa zwischen 500 und 12500 Hz. Grund für das breitbandige Spektrum sind die impulsartigen Schalleereignisse, welche in kurzer Zeit hohe Drücke aufbauen [1].

#### 2.1.2 Tonale Schallemissionen

Neben den oben beschriebenen breitbandigen hochfrequenten Schallemissionen kann es an Freileitungen zu weiteren Effekten kommen, welche ein tieffrequentes Brummen erzeugen. Diese liegen meist bei der doppelten Netzfrequenz von 2 mal 50 Hz = 100 Hz, teilweise aber auch bei den vielfachen von 100 Hz (200 Hz und 400 Hz). Hierdurch kommt es zumindest im näheren Einwirkungsbereich zu deutlich hörbaren Tonalitäten im Sinne der TA Lärm, bevor mit zunehmender Entfernung eine Überdeckung durch Fremdgeräusche (Regen u.a.) einsetzt

In ersten Untersuchungen bezüglich der Schallentstehung ging man davon aus, dass die 100-Hz-Tonalität durch mechanische Schwingungen der Wassertropfen auf der Leitung erzeugt wird. Dieser Vorgang existiert zwar, aber die Größenordnung der Pegel, welche durch die Verformung von Wassertropfen entstehen, ist um ein vielfaches kleiner als die in bisherigen Felduntersuchungen ermittelten Messwerte. Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass die Bewegungen von Ionen in der „Driftzone“ verantwortlich für die sogenannten 2f-Emissionen sind. Die Ionen übertragen durch elastische Stöße ihre Energie in Form von Kraft und Wärme auf die ungeladene Umgebungsluft. Ein Großteil der Energie führt zu einer periodischen Erwärmung der Luft, welche

sich im Wechsel zusammenzieht und ausdehnt und so tonale Schallemissionen in Form eines 100-Hz-Brummens erzeugt [12].

In Abb. 1 sind die Mechanismen der Geräuschentstehung von breitbandigen hochfrequenten und tonalen tieffrequenten Schallemissionen an Leiterseilen vereinfacht schematisch dargestellt.

## 2.2 Elektrische Randfeldstärke

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, hängt das Auftreten von Koronaentladungen wesentlich von der Höhe der elektrischen Randfeldstärke ab. Diese steht wiederum in direktem Zusammenhang mit den Faktoren: Übertragungsspannung, Leiterseilquerschnitt und Bündelung. Zudem führen gekrümmte Elektrodenkonturen, die in besonderem Maße durch Regentropfen an der Leiterseiloberfläche entstehen können, zu lokalen Erhöhungen der Randfeldstärke. Die einzelnen Einflussfaktoren werden im Folgenden näher beschrieben und begrifflich definiert.

### 2.2.1 Übertragungsspannungen

Die Auswahl der Übertragungsspannung von Freileitungen hängt zum einen von der Nutzung und der damit einhergehenden Leistung je Stromkreis ab und zum anderen von der Übertragungslänge. So werden beispielsweise die Spannungsebenen 10 kV und 20 kV für die örtliche Versorgung von kleinen Gemeinden oder einzelner Industriebetriebe genutzt. Zur Speisung der 20 kV Netze wird die Spannungsebene 110 kV genutzt, welche die Aufgabe der regionalen Verteilung der elektrischen Energie hat. Weiterhin transportieren 110-kV-Freileitungen die Energie von Kraftwerken mit mittlerer Leistung, wie z.B. Flusskraftwerken oder größeren Solarkraftwerken ab und bilden die Verbindung zwischen dem Verbundnetz und dem örtlichen Verteilungsnetz [2]. Für das Verbundnetz dienten in Deutschland zunächst 220-kV-Leitungen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit erfolgte jedoch der Aufbau einer 380-kV-Spannungsebene. Durch eine Erhöhung der Übertragungsspannung kann bei gleicher Stromstärke die übertragene Leistung gesteigert werden. Da



**Abb. 1:** Mechanismen der Geräuschentstehung von breitbandigen hochfrequenten und tonalen tieffrequenten Schallemissionen an Leiterseilen [24].

die Stromwärmeverluste und der Spannungsabfall gleich bleiben, sinken die relativen Stromwärmeverluste bezogen auf die Übertragungsleistung bzw. der relative Spannungsabfall bezogen auf die Übertragungsspannung. In Hinblick auf die Geräuschenstehung an Hochspannungsleitungen können Übertragungsspannungen ab 220 kV als relevant angesehen werden. Bei niedrigeren Spannungen liegen die elektrischen Randfeldstärken in Bereichen, welche keine hörbaren bzw. relevanten Schallemissionen erzeugen und daher im Allgemeinen vernachlässigbar sind. In der Literatur und E DIN SPEC. 8987 wird der Begriff Höchstspannungsleitung ab 220 kV definiert [27].

### 2.2.2 Leiterseilquerschnitte und Bündelung - Definition „dünne“ und „dicke“ Leiterseile

Die Angabe von Leiterseilquerschnitten erfolgt z.B. in folgender Form: Al/St 265/35. Dies bedeutet einen Aluminiumquerschnitt von 265 mm<sup>2</sup> und einen Stahlquerschnitt von 35 mm<sup>2</sup>. Der Querschnitt ist von großer Bedeutung, da von ihm maßgeblich auch die elektrische Randfeldstärke abhängt, welche wiederum im Zusammenhang mit Energieverlusten durch Koronaentladungen steht. Je höher der Querschnitt, desto geringer die elektrische Randfeldstärke. Um die Randfeldstärke herunterzusetzen, können Seile mit größeren Aluminium- und Stahlquerschnitten verbaut werden, wie z.B. Al/St 560/50. Kleinere Leiterseilquerschnitte, wie z.B. Al/St 265/35 oder Al/St 240/40, werden im Folgenden als „dünne“ Leiterseile bezeichnet. Leiterseile mit größerem Querschnitt, wie beispielsweise Al/St 560/50, werden als „dicke“ Leiterseile bezeichnet. Durch die Bündelung von Leiterseilen kann zudem ein höherer Ersatzradius erzeugt werden, welcher eine verminderte elektrische Randfeldstärke zur Folge hat [11].

### 2.2.3 Niederschläge - Definition „leichter/mittlerer“ und „starker“ Regenniederschlag

Die Tropfenbildung an Leiterseiloberflächen während Niederschlagsereignissen kann zur lokalen Erhöhung der Randfeldstärke und somit zum Auftreten von akustischen Leiterseilemissionen führen. Da die Niederschlagsstärke einen maßgeblichen Einfluss auf

die Höhe der Corona-Erscheinungen hat, wurden im IEEE Standard 539-2005 „Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines“ [3] verschiedene meteorologische Zustände definiert und klar voneinander abgegrenzt. Die Regenintensität zu jeder gegebenen Zeit und an jedem Ort wird dabei in folgende vier Klassen eingeteilt:

1. Sehr leicht: Vereinzelt Tropfen, die unabhängig von der Regendauer eine Oberfläche nicht vollständig benetzen
2. Leicht: Die Niederschlagsstärke ist nicht größer als 2,5 mm/h
3. Mäßig: von 2,6 mm/h bis 7,6 mm/h, die maximale Niederschlagsstärke beträgt nicht mehr als 0,76 mm/6 min
4. Stark: über 7,6 mm/h

Die vorliegende Untersuchung orientiert sich daran, hat aber aus pragmatisch messtechnischen Gründen eine einfache Abgrenzung zwischen nur zwei Regen-/Niederschlagsklassen ( $\leq 4,8$  mm/h und  $> 4,8$  mm/h bzw. entsprechend  $\leq 0,4$  mm/5 min und  $> 0,4$  mm/5 min) gewählt, damit dies messtechnisch zu leisten und auch für eine Prognose nach TA Lärm sinnvoll angewendet werden konnte (Vergleiche hierzu auch Kapitel 6.4.3). Die bei allen Messungen verwendete Wetterstation verfügt über eine Auflösung von 0,1 mm Regen. Die Erfassung der Regenmenge wird durch Kippimpulse bei einer Regenmenge von jeweils ca. 0,07–0,08 mm/Impuls ausgelöst. Daher ist eine Angabe der Regenmenge nur in Zehntel-mm Schritten möglich.

Die gewählte Abgrenzung der Niederschlagsklassen mit 4,8 mm/h liegt ungefähr in der Mitte der „mäßigen“ Regenklasse nach IEEE Standard 539-2005 mit 2,6–7,6 mm/h (Mittelwert 5,1 mm/h).

Die Definition des schwachen bis mittleren Regens/geringen Niederschlags bezieht hier also alle Messsituationen mit Corona ein, welche in 5-min-Messintervallen noch mit messbaren Regenmengen von 0,1–0,4 mm/5 min erfassbar waren. Dabei kann diese Regenklasse im Sprachgebrauch als eine Zusammenführung von Nieselregen bis zum kräftigen Landregen verstanden werden. Aufgrund der 5-min-Mittelwert-Intervalle finden diese höheren, durchaus als stärkere (hier mittlere) Regenintensitäten empfundenen Ereignisse dabei in niederschlagsreichen Gebieten in Deutschland nachts bereits relativ selten statt, soweit man die Häufigkeit des einständi-

gen anhaltenden Vorganges mit den oberen 0,4 mm/5 min betrachtet.

Für die hier verwendete Definition des stärkeren Regens / hoher Niederschlag mit  $> 4,8$  mm/h werden in der vorliegenden Untersuchung die 5-min-Messintervalle mit Regenintensitäten von 0,5 mm bis 1,0 mm/5 min zusammengefasst und vom geringeren bis mittleren Niederschlag (der ein starker Landregen sein kann) abgegrenzt. Diese Abgrenzung gegenüber dem mittleren Regen / Niederschlag erlaubt einen 2. Emissionsansatz, für die dann ggf. nach TA Lärm als „sehr selten“ zu erwartenden Korona-Ereignisse mit einer nächtlichen Einwirkdauer von einer Stunde. Dies ergibt sich einerseits aus den Beobachtungen vorliegender Langzeitmessungen und andererseits aus dem Vergleich mit zwei Regenstatistiken der für Deutschland regenreichsten Gebiete im Raum Heilbronn und Köln-Bonn (vergleiche Grafiken Anhang 11 und 12). Aus Sicht der Autoren werden mit diesen zwei erweiterten Niederschlagskategorien für einen rechnerischen Emissionsansatz aus Messwerten alle relevanten Lastfälle pragmatisch abgedeckt und auch Besonderheiten der TA Lärm Anwendung (Seltenheit der Ereignisse, ständige Überdeckung durch Regen) ermöglicht, sowie auch die obigen Definitionen durch andere empirische Betrachtungen weitgehend übereinstimmend abgedeckt. Näheres hierzu im Kapitel 6.4.

## 2.3 Oberflächenbeschaffenheit der Leiterseile

Wie hoch die Pegel der Leiterseilemissionen sind, hängt neben der elektrischen Randfeldstärke auch von der Oberflächenbeschaffenheit der Leiterseile ab. An hydrophilen Oberflächen mit Kontaktwinkeln  $< 90^\circ$  zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und dem Umriss der Kontaktoberfläche des Feststoffs können sich Wassertropfen nicht so spitz verformen wie dies in Abb. 1 vereinfacht dargestellt ist. Stattdessen bildet sich ein gleichmäßiger Wasserfilm auf der Oberfläche, wodurch sich das Entladungsverhalten und das Auftreten von Koronageräuschen im Vergleich zur Tropfenbildung verändert. Im Zuge der altersbedingten Verwitterung von Leiterseilen steigt die Hydrophilie der Oberfläche, und die Höhe der Leiterseilemissionen sinkt bis zu einem gewissen Grad. Um den lärmindernden Effekt der verwitterten

Leiterseiloberfläche auch bei fabrikneuen Leiterseilen zu nutzen, gibt es die Möglichkeit durch spezielle Beschichtungen oder chemische Veränderung der Oberfläche die Hydrophilie zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit, die natürliche Verwitterung (Alterung) vorwegzunehmen und zu simulieren stellt die mechanische Oberflächenbehandlung mittels Glasperlenstrahlen oder Sandbestrahlung dar [24]. Der dabei auftretende Effekt ist in den Abb. 2 und 3 dargestellt. Bei dem unbehandelten Seil sind viele deutlich ausgeprägte Tropfen zu erkennen. Bei dem behandelten Seil bildet sich jedoch ein Wasserfilm auf der Oberfläche und nur wenige Tropfen mit sehr niedrigen Kontaktwinkeln sind sichtbar.



Abb. 2: Unbehandeltes Leiterseil.



Abb. 3: Behandeltes Leiterseil.

## 2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass Auftreten und Höhe der Koronageräuschemissionen im Wesentlichen abhängen von:

- der Übertragungsspannungshöhe
- der Höhe der elektrischen Randfeldstärke und damit einhergehend von
- der sie begünstigenden Meteorologie (resp. Wetterlagen mit Unstetigkeitsbildung durch Tropfenbildung, Regenstärke, Schnee, Kristalle usw.), oder Unstetigkeiten durch

- Seilschäden (Spleiß) und Schmutzablagerungen
- der Leiterseilgeometrie (Querschnitte bzw. dünne/dicke Seile, 2er, 3er, 4er Bündelung etc.),
- der Oberflächenbeschaffenheit (hydrophob - hydrophil) sowie
- dem Alter des Seiles,
- der Mastkonstellation (aufgelegte Anzahl, Art und Anordnung der Stromkreise etc.)
- der das Seil (die Trasse) umgebenden Topografie (Feldstörungen, Hindernisse usw.)

Die angegebene Reihenfolge der Aufzählung entspricht in etwa auch der Wirkungspriorität.

## 3 Vorgehensweise zur messtechnischen Ermittlung von Koronageräuschen

Die im Rahmen dieser Studie dargestellten und diskutierten Messdaten wurden an insgesamt drei verschiedenen Standorten gesammelt. Die Betriebsspannung und die Leiterseilmaterialien waren an allen Standorten mit jeweils 380 kV und Aluminium-Stahl-Verbundseil identisch, sodass sich die Ergebnisse für eine vergleichende Betrachtung eignen. In diesem Kapitel werden die drei Standorte kurz anhand von Übersichtsbildern, Mastkonstellation und des Messaufbaus vorgestellt. Anschließend wird die Vorgehensweise bei den Messungen und deren Auswertung dargestellt.

### 3.1 Standort 1: Rangendingen

Der erste Standort für Langzeituntersuchungen von Leiterseilemissionen lag zwischen den Masten 64A und 65A der Trasse Oberjettingen-Engstlatt. Die Basisdaten des Trassenabschnitts lauten wie folgt:

- Inbetriebnahme 2007 (unbehandeltes Seil im Alter von 5 Jahren zum Messzeitpunkt)
- „Donau“-Masten
- 380 kV
- Viererbündel

- 2 Stromkreise
- Al/St 560/50 („dicke“ Leiterseile)
- Mittlere elektrische Randfeldstärke = 11,66 kV/cm

Zur Erfassung der Leiterseilemissionen wurde für den Zeitraum vom 11.12.12 bis zum 14.12.12 sowie vom 21.12.12 bis zum 28.02.13 eine netzbetriebene wetterfeste Schallpegel-Dauermessstation in Kombination mit einer Wetterstation unterhalb der Leiterseile installiert. Zudem wurden an insgesamt zehn Abenden/Nächten beobachtete Emissionsmessungen an drei zusätzlichen Messpunkten durchgeführt. Die Messpositionen sind in Abb. 5 dargestellt.

Die Dauermessstation (MP0) wurde so platziert, dass der Abstand zu den Leiterseilen möglichst gering ist. Das Mikrofon befand sich auf einer Höhe von 2,2 m. Der senkrechte Abstand zu den Leiterseilen beträgt somit ca. 15 m zu den Leiterseilen auf der unteren Mastebene und 25 m zu den Leiterseilen auf der oberen Mastebene. Bei den beobachteten Messungen wurden zusätzlich an den mit MP 1 bis MP 3 im Plan gekennzeichneten Punkten Schallpegelanalysatoren mit einer Mikrofonhöhe von 1,5 m aufgebaut. Die senkrechten Abstände zur Trassenmitte bzw. zum MP0 wurden mit 38 m, 63 m und 88 m zur Ermittlung der Schallausbreitungsabnahme gewählt

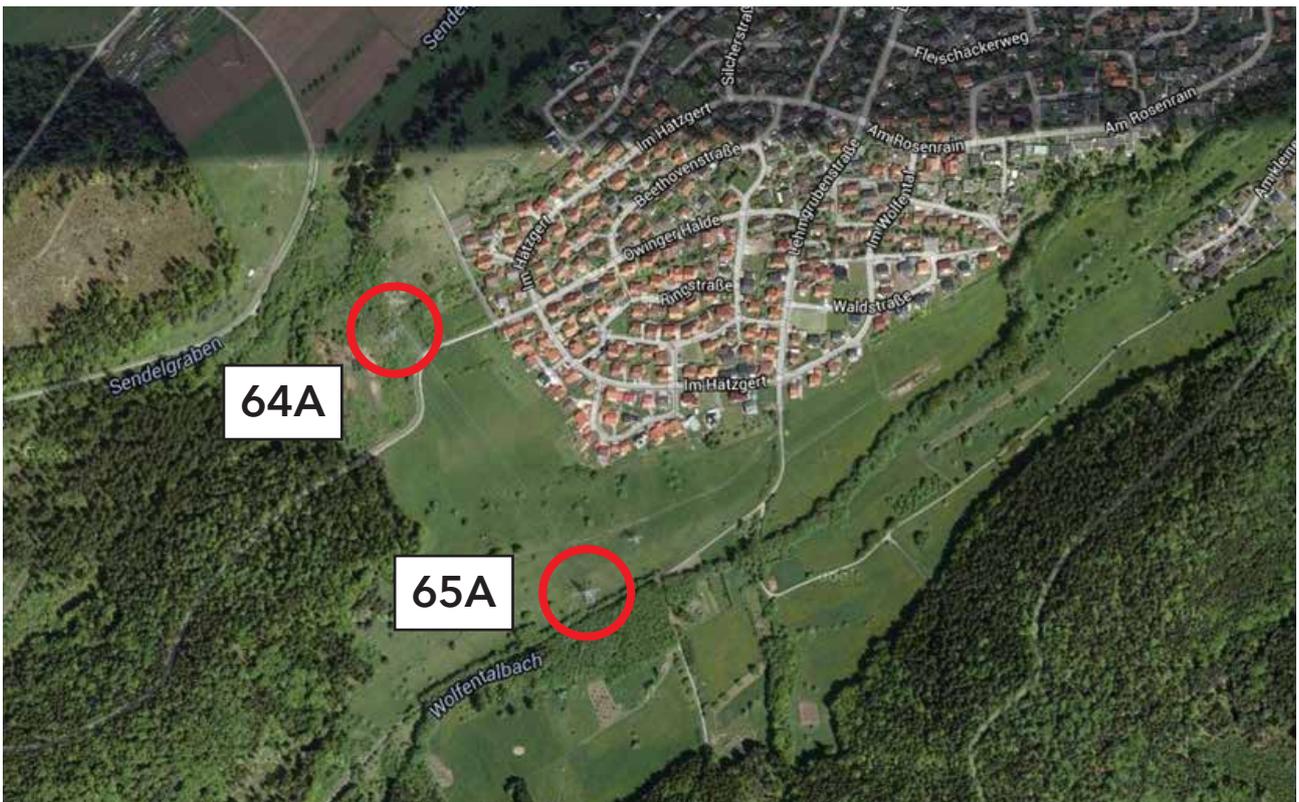


Abb. 4: Luftbild des Messstandorts Rangendingen (Messpunkte zwischen rot gekennzeichneten Masten) [21].

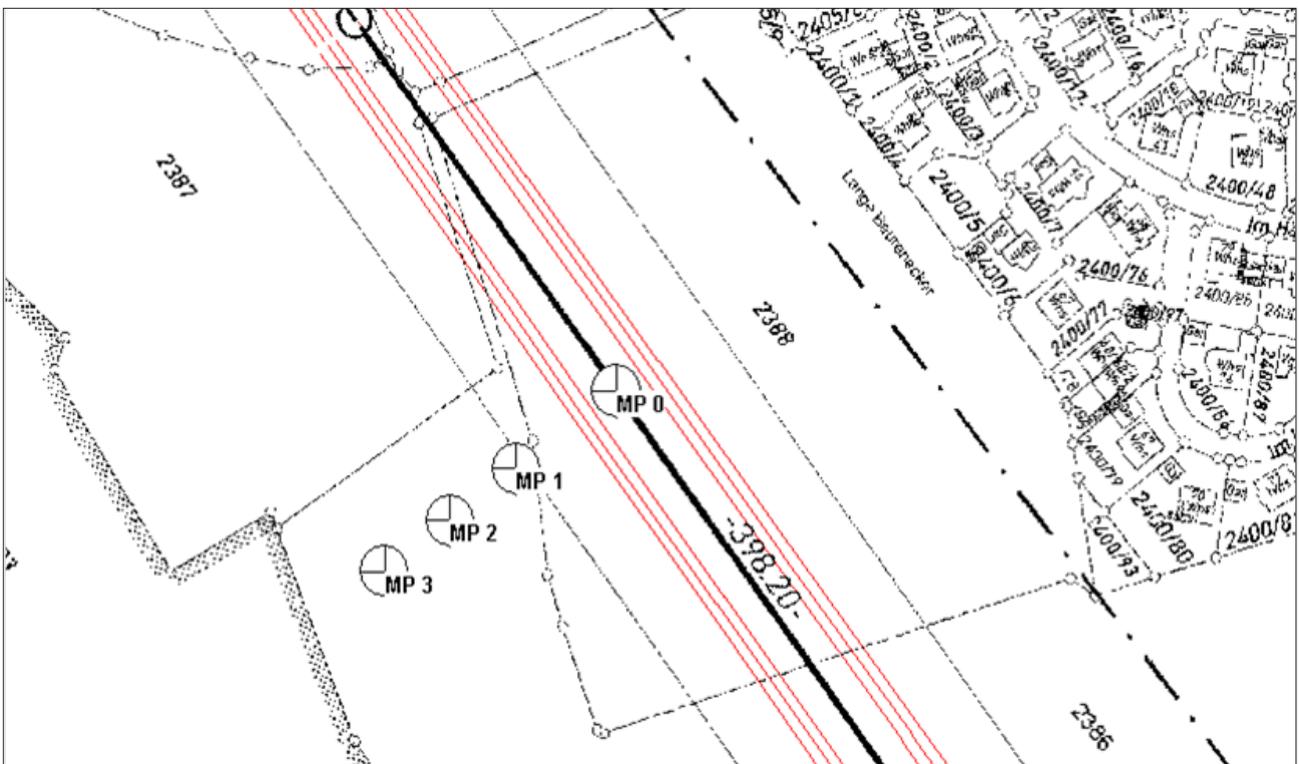


Abb. 5: Position der Messpunkte gekennzeichnet mit MP 0 bis MP 3 am Standort Rangendingen. Die Leiterseilbündel sind als rote Linien dargestellt.

und helfen bei der Bewertung im Hinblick auf Interferenzeffekte zur Erteilung eines prognostischen Tonzuschlages (3 oder 6 dB) im Sinne von [15, 16].

### 3.2 Standort 2: Freren

Als zweiter Standort zur Installation der Dauermessstation wurde der Ort Freren in Niedersachsen ausgewählt. Gemessen wurde zwischen den Masten 252 und 253 auf Bl. 4583 Hanekenfähr – Pkt. Merzen. Hier sollten Vergleichsmessungen an „dünnen“ Leiterseilen durchgeführt werden. Die Basisdaten des Trassenabschnitts lauten wie folgt:

- Inbetriebnahme eines Stromkreises 1972 (Alter: 41 Jahre zum Messzeitpunkt) und des zweiten Stromkreises 2003 (unbehandeltes Seil im Alter von 10 Jahren zum Messzeitpunkt)
- „D4“-Masten
- 380 kV
- Viererbündel
- 2 Stromkreise
- Al/St 265/35 („dünne“ Leiterseile)

- Mittlere elektrische Randfeldstärke = 15,18 kV/cm

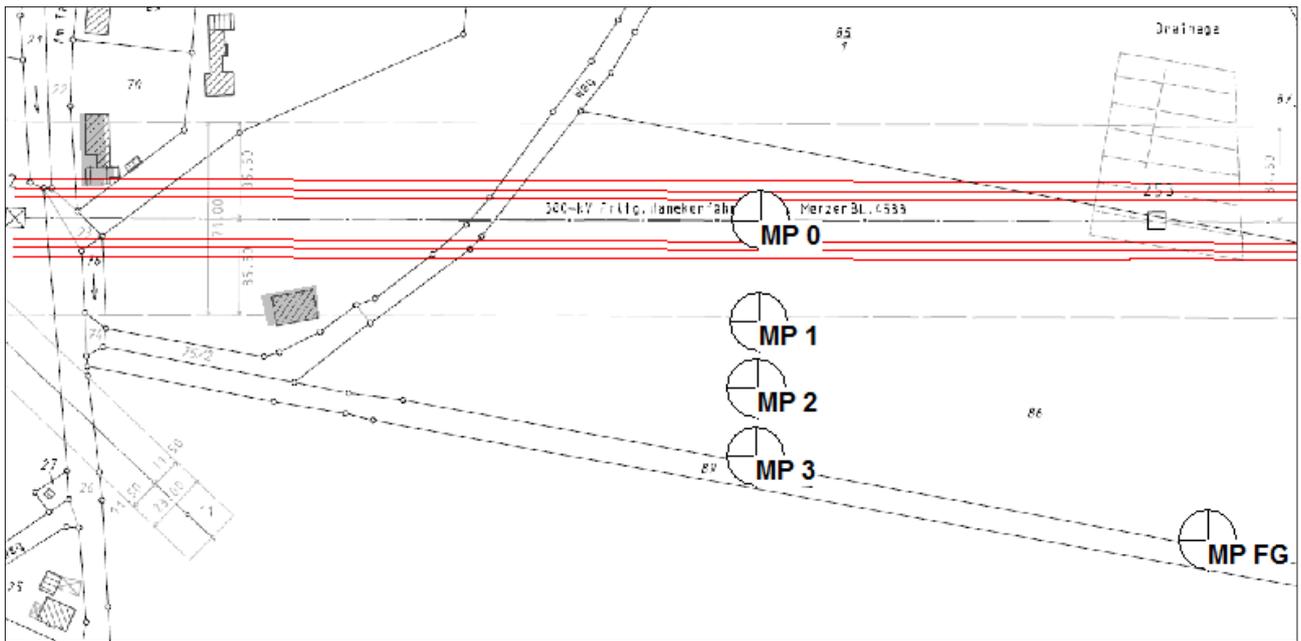
Abb. 6 stellt ein Übersichtsfoto des Standorts dar. Die Dauermessstation wurde an diesem Standort im Zeitraum vom 30.04.13 bis zum 17.05.13 unterhalb der Leiterseile betrieben. In drei Nächten wurden dabei beobachtete Emissionsmessungen an drei weiteren Messpunkten (38 m, 63 m und 88 m Entfernung zum MP 0) durchgeführt. Zusätzlich wurde am Standort Freren eine zweite Dauermessstation zur Aufzeichnung der Fremdgeräusche, im Speziellen von Regenrauschen, installiert. Mithilfe dieser Fremdgeräuschaufzeichnung war es später möglich, die unterhalb der Leiterseile aufgezeichneten Leiterseilemissionen während Regenniederschlagsereignissen um den Fremdgeräuschanteil des Regenrauschens zu korrigieren. Die Messpositionen sind in Abb. 7 dargestellt.

Der senkrechte Abstand der unteren Leiterseile zum Boden beträgt hier ca. 14 m und ca. 24,5 m für die oberen Leiterseile.

Die Dauermessstation zur Aufzeichnung der Fremdgeräusche wurde auf der Wiese so weit wie möglich von den Leiterseilen entfernt positioniert um bei gleicher Bodenbeschaffenheit ein für MP0 repräsentatives Fremdgeräusch des Regenrauschens bei Messungen mit Regenniederschlägen zu erhalten.



Abb. 6: Luftbild des Messstandorts Freren (Messpunkte zwischen rot gekennzeichneten Masten) [19]



**Abb. 7:** Position der Messpunkte gekennzeichnet mit MP 0 bis MP 3 sowie der Fremdgeräuschstation (MP FG) am Standort Freren. Die Leiterseilbündel sind als rote Linien dargestellt.

### 3.3 Standort 3: Brilon

In Brilon in Nordrhein-Westfalen wurden weitere Messungen an „dünnen“ Leiterseilen im Zeitraum

zwischen dem 30.05.13 und dem 08.07.13 durchgeführt. Ausgewählt wurde der Abschnitt zwischen den Masten N100 und N101 auf Bl. 4335 Halbeswig - Nehden.



**Abb. 8:** Luftbild des Messstandorts Brilon (Messpunkte zwischen rot gekennzeichneten Masten) [20].

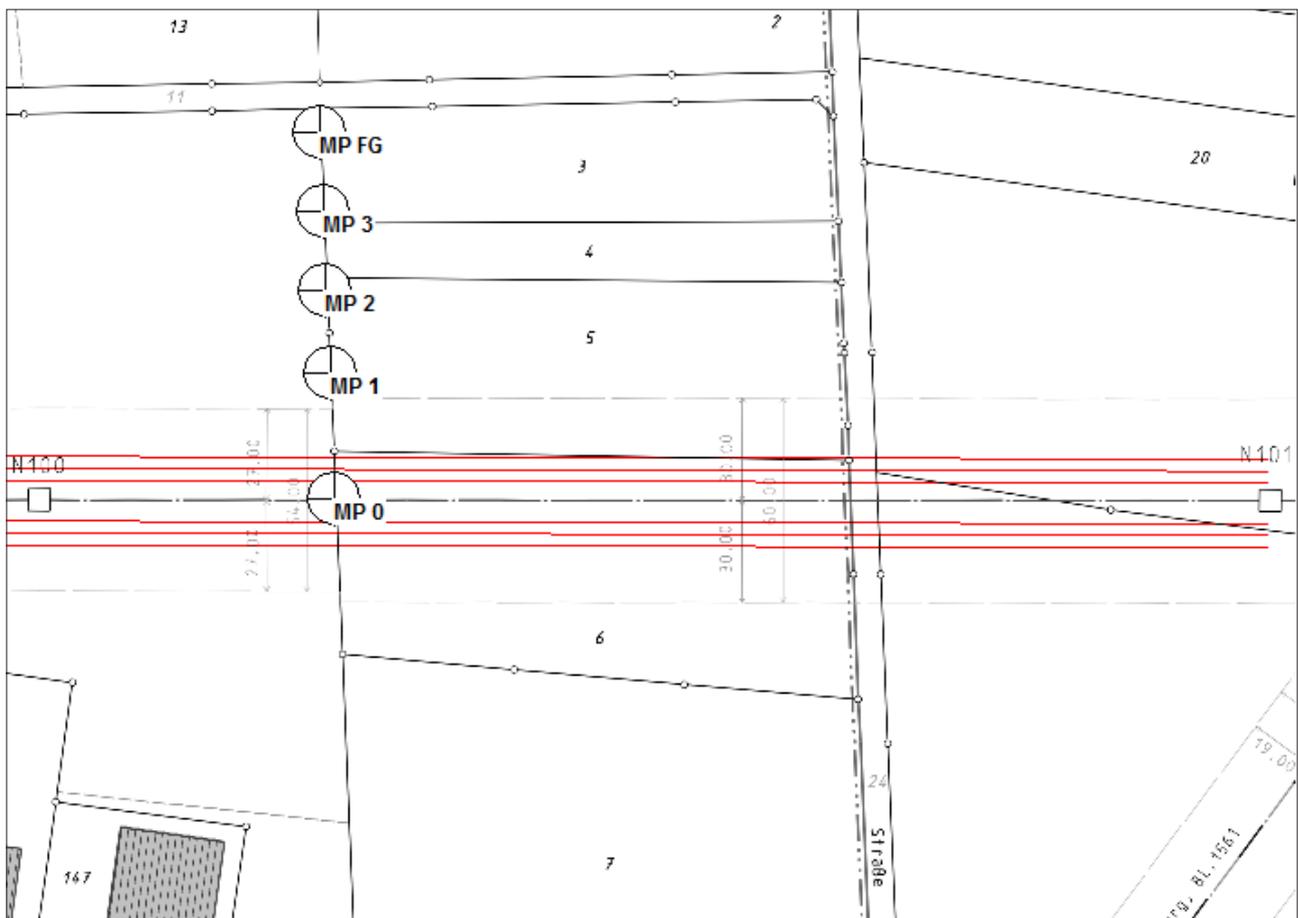
Die Basisdaten des Abschnitts an dem die Messungen durchgeführt wurden lauten:

- Inbetriebnahme 1979 (unbehandeltes Seil im Alter von 34 Jahren zum Messzeitpunkt)
- „AD3V“-Masten
- 380 kV
- Viererbündel
- 2 Stromkreise
- Al/St 240/40 („dünne“ Leiterseile)
- Mittlere elektrische Randfeldstärke =15,88 kV/cm

In Brilon wurde ebenfalls zusätzlich zur Dauermessstation unterhalb der Leiterseile eine zweite Dauermessstation zur Aufzeichnung der Fremdgeräusche

betrieben. Zudem wurden an vier Abenden/Nächten beobachtete Emissionsmessungen an drei weiteren Messpunkten durchgeführt. Die Position der einzelnen Messgeräte ist Abb. 9 zu entnehmen.

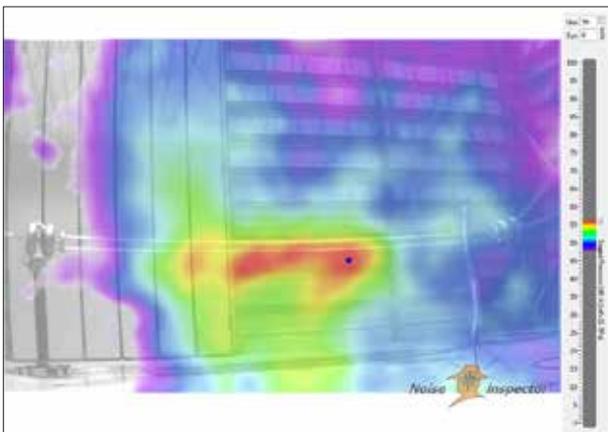
Die Mikrofone der beiden Dauermessstationen (MP0 und Fremdgeräusch MPFG) wurden wie bei den bisherigen Messungen auf eine Höhe von 2,2m eingestellt und MP 1, MP2 sowie MP 3 bei den beobachteten Messungen auf 1,5m. Es wurden die üblichen Abstände von MP 1, MP2 und MP 3 zur Trassenmitte eingehalten. Die Station zur Erfassung der Fremdgeräusche befand sich in 112m Entfernung zur Trassenmitte. Der senkrechte Abstand der Leiterseile zum Boden an der Grundstücksgrenze beträgt ca. 24m zur unteren Mastebene und ca. 35 m zur oberen Mastebene.



**Abb. 9:** Position der Messpunkte gekennzeichnet mit MP0 bis MP3 und MPFG am Standort Brilon. Die Leiterseilbündel sind als rote Linien dargestellt.

### 3.4 Methodik der Erfassung und Auswertung von Messdaten

An allen drei untersuchten Standorten wurde eine wetterfeste Mikrofoneinheit einer Dauermessstation zusammen mit einer Wetterstation mittig unterhalb der Leiterseile positioniert. Das Mikrofon zeichnete über mehrere Wochen durchgängig Tonaufnahmen und die zugehörigen Terzspektren auf, welche anschließend im Akustiklabor ausgewertet werden konnten. Zusätzlich wurden an mehreren Tagen beobachtete Messungen an weiteren Messpunkten durchgeführt, um die Schallausbreitung ausgehend von den Leiterseilen zu untersuchen sowie um die Hörbarkeit vor Ort subjektiv zu bewerten. Um von den gemessenen Schalldruckpegeln auf den längenbezogenen Schallleistungspegel der Leiterseile mittels schalltechnischer Ausbreitungssoftware zurückzurechnen, wurde dem theoretischen Verhalten einer Linienquelle entsprechend angenommen, dass alle Leiterseilbündel über die gesamte Länge gleichmäßig abstrahlen. Dieser Zusammenhang ließ sich bei Prüfstandsmessungen an künstlich berechneten Leiterseilen mithilfe einer akustischen Kamera nachweisen, wie in Abb. 10 dargestellt ist.



**Abb. 10:** Akustisches Bild eines typischen Leiterseiles im 4er Bündel im Frequenzbereich 400 Hz–5500 Hz (A-bewertet).

In Abb. 10 ist zu erkennen, dass die zum Auswertungszeitpunkt höchsten Pegel genau in der ca. 4 m breiten berechneten Zone des Leiterseils liegen. Die Charakteristik einer Linienquelle ist gut zu erkennen und damit optisch nachgewiesen.

Zur Berechnung wurden die gemessenen Schalldruckpegel am MP0 verwendet, da hier durch den geringsten Abstand zu den Leiterseilen auch mit dem geringsten Fremdgeräuschanteil und den sichersten Werten zu rechnen ist. Bei Regenmessungen konnte das Fremdgeräusch durch das Regenrauschen über eine Fremdgeräuschstation an den Standorten Brilon und Freren energetisch subtrahiert werden, insofern ein Fremdgeräuschabstand von mindestens 3 dB(A) im Summenpegel gegeben war. Damit konnten methodisch die Korrekturbedingungen, wie sie in DIN 45645-1 Kapitel 6.3 [16] beschrieben sind, hier sicher erfüllt werden.

Bei sämtlichen durchgeführten Berechnungen wurden die länderspezifischen Regelungen in Abstimmung mit den Landesbehörden methodisch angewendet. Hierzu wurde der standardisierte Faktor  $C_0$ , der von örtlicher Wetterstatistik abhängt, für die meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  nach DIN ISO 9613-2 [22] mit einem Nacht-Faktor für  $C_0 = \text{const. } 2 \text{ dB}$  eingerechnet [23], um ortsunabhängige Ergebnisse zu erhalten. Für konkrete Planungen mit spezifisch bekannten Windverteilungen können zugehörige, berechnete  $C_0$ -Werte winkelabhängig eingesetzt werden.

Weiterhin wurde für die Bodendämpfung  $A_{\text{gr}}$  die Alternativgleichung 10 [22] verwendet, da genaue Kenntnisse über die Bodeneigenschaften nicht vorliegen und sich diese über den langen Untersuchungszeitraum (z.B. Bewuchs, Frost, Regen, Schnee) verändern und die Ergebnisse allgemeingültig und nicht ortsspezifisch, sondern für Planungszwecke verwendet werden sollen. Die Alternativgleichung 10 ist eine sicherere Berechnungsgrundlage, wenn der Summenpegel bei hochliegenden und breitbandigen Quellen im Nahfeld von Interesse ist. Dies gilt für MP0 und auch die Messpunkte MP1–MP3 aufgrund der Breite der Trasse, sowie auch die in kritischen Planungsfällen zu erwartenden Abstände maßgeblicher Immissionspunkte in Trassennähe. Mit den Landesbehörden wurde abgestimmt, welche Abstände für den Quell-, Mittel- und Empfängerbereich maßgeblich sind. Aus methodischen Gründen wurde für die Ausbreitung über den Boden auf eine Abschätzung der G-Werte verzichtet. Dies ist für die kurzen Abstände und Leitungshöhen nach [22] regelwerkskonform. Vergleiche hierzu auch Abschnitt 6.3, mit durchgeführtem Berechnungsvergleich nach beiden Verfahren an relevant kritischen Aufpunkten.

### 3.5 Zusammenfassung der Basisdaten und Standorte

Im Folgenden werden die drei Messstandorte mit den jeweiligen relevanten Basisdaten und Messzeiträumen tabellarisch zusammengefasst.

**Tab. 1:** Basisdaten der drei Messstandorte.

Messort	Trasse	Mastnummer	Spannung	Bündel	Stromkreise	Material	Querschnitt	Randfeldstärke [kV/cm]	Mastbild	Meteorologie
Rangendingen	Oberjettingen-Engstlatt	64A-65A	380 kV	4	2	Al/St	560/50	11,66	Donau	Schneefall, Regen, Trockenheit
Freren	Hanekenfähr – Pkt. Merzen	252-253	380 kV	4	2	Al/St	265/35	15,18	D4	Regen, Trockenheit
Brilon	Halbeswig – Nehden	N100-N101	380 kV	4	2	Al/St	240/40	15,88	AD3V	Regen, Trockenheit

**Tab. 2:** Übersicht über die Messstandorte und die Zeiträume in denen die Messungen durchgeführt wurden.

Standort	Zeitraum	Wochen	auswertbare h Tonaufzeichnung	Leiterseil Typ
Rangendingen	11.12.2012–28.02.2013	10	835 h	dick
Freren	30.04.2013–17.05.2013	2,5	396 h	dünn
Brilon	30.05.2013–8.07.2013	5		
Summe	mit Unterbrechungen ca. 7 Monate	17,5	1231 h	

## 4 Ergebnisse

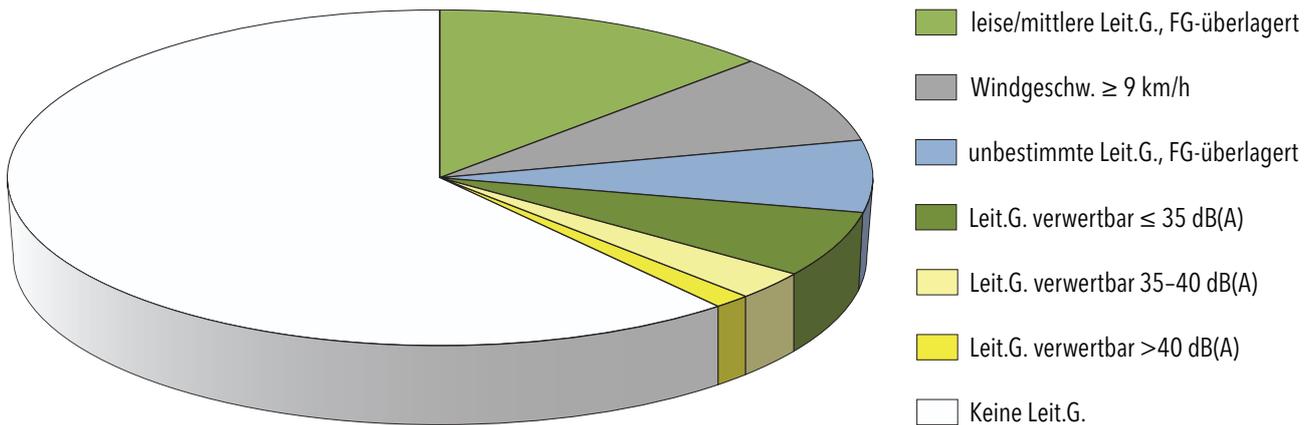
### 4.1 Häufigkeiten des Auftretens von Leiterseilemissionen im kompletten Untersuchungszeitraum

Über die im vorigen Kapitel 4 genannten Zeiträume wurden alle aufgezeichneten Nachtstunden sowie ein Teil der Tagstunden ausgewertet und in verschie-

dene Kategorien eingeordnet. Unterschieden wurde dabei nach Auftreten und Nicht-Auftreten von Leiterseilemissionen sowie der Höhe der Leiterseilemissionen im Falle eines Auftretens. Eine orientierende 5 dB(A) Abstufung folgte dabei den Orientierungsspeglern nach DIN 18005. Die Ergebnisse für alle drei Standorte sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen aufgeführt (Tab. 3, Abb. 11 und 12).

**Tab. 3:** Ergebnisse aus 10 ausgewerteten Wochen bzw. 835 h ausgewerteten Stunden anhand der Tonaufzeichnungen an MP0 in **Rangendingen** an **dicken Leiterseilen** im Zeitraum von 11.12.12–14.12.12 und 21.12.12–28.02.13.

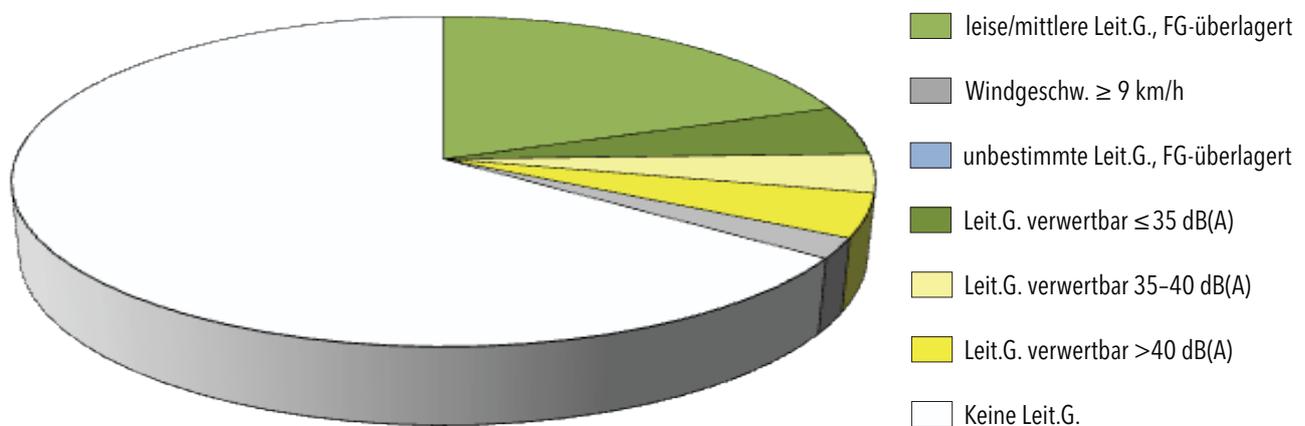
keine Leit.G. [h]	Windgeschw. $\geq 9$ km/h [h]	leise/mittlere Leit.G., FG-überlagert [h]	unbestimmte Leit.G., FG-überlagert [h]	Leitergeräusche verwertbar (ohne FG) [h]			
				$\leq 30$ dB(A)	30–35 dB(A)	35–40 dB(A)	$> 40$ dB(A)
509	72	107	58	16	38	24	11



**Abb. 11:** Kreisdiagramm zur Häufigkeitsverteilung von Leitungsgläuschen am Standort Rangendingen (N=835 h, gemessen am MP0 unterhalb der Leiterseile).

**Tab. 4:** Ergebnisse aus 7,5 ausgewerteten Wochen bzw. 396 ausgewerteten Stunden anhand der Tonaufzeichnungen an MP0 im Zeitraum von 30.04.13–17.05.13 (**Freren**) und 03.06.13–08.07.13 (**Brilon**) an **dünnen Leiterseilen**.

keine Leit.G. [h]	Windgeschw. $\geq 9$ km/h [h]	leise/mittlere Leit.G., FG-überlagert [h]	unbestimmte Leit.G., FG-überlagert [h]	Leitergeräusche verwertbar (ohne FG) [h]			
				$\leq 30$ dB(A)	30–35 dB(A)	35–40 dB(A)	$> 40$ dB(A)
259	8	78	0	0	19	15	17



**Abb. 12:** Kreisdiagramm zur Häufigkeitsverteilung von Leitungsgläuschen an den Standorten Freren und Brilon (N=396 h, gemessen am MP0 unterhalb der Leiterseile).

Bei der Betrachtung und Interpretation der Tab. 3 und 4 sowie der Abb. 11 und 12 sind nachstehende Punkte zu beachten:

- Bei den hier angegebenen Schalldruckpegeln handelt es sich nicht um Mittelungspegel der vollen Stunden, sondern nur um teilweise kurze (min) Phasen innerhalb einer Stunde, in denen die genannten Schalldruckpegel aufgetreten sind.
- Die Koronageräusche mit Fremdgeräuschüberlagerung („FG-überlagert“) konnten subjektiv festgestellt werden (Tonaufnahme der Messungen), messtechnisch sind sie jedoch nicht verwertbar aufgrund zu geringer Pegeldifferenzen zwischen Fremdgeräusch und Nutzpegel.
- 107 h hellgrün „leise/mittlere Leit.G., FG-überlagert“ sind Stunden, in denen der Summenpegel aus Korona und Fremdgeräusch  $\leq 35$  dB(A) ist (Nutz- und Fremdgeräusch nicht trennbar).
- 58 h blau „unbestimmte Leit.G., FG-überlagert“ sind Stunden, in denen der Summenpegel aus Korona und Fremdgeräusch  $> 35$  dB(A) ist (Nutz- und Fremdgeräusch nicht trennbar).

In Abb. 11 sind die Ergebnisse aus Tab. 3 zusätzlich graphisch als Kreisdiagramm dargestellt.

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass kritische Pegel über 35 dB(A) im Untersuchungszeitraum unterhalb der Leiterseile am MP0 nur in 35 von 835 ausgewerteten Stunden festgestellt werden konnten. Das entspricht einem Zeitanteil von lediglich 4 %. Im Großteil der Zeit konnten überhaupt keine Leiterseilgeräusche festgestellt werden (509 von 835 Stunden bzw. 61 %) oder die Leiterseilgeräusche waren von Fremdgeräuschen überlagert (165 von 835 Stunden bzw. 20 %).

Im Untersuchungszeitraum an den „dünnen“ Leiterseilen konnten in 32 von insgesamt 396 ausgewerteten Stunden kritische Pegel von  $> 35$  dB(A) gemessen werden. Dies entspricht einem Anteil von 8 %, der somit doppelt so hoch liegt wie bei der Messkampagne an den „dicken“ Leiterseilen. Der Anteil der Stunden ohne jede wahrnehmbare Form von Leiterseilgeräuschen liegt hier jedoch ähnlich hoch wie bei den „dicken“ Leiterseilen mit 259 von 396 Stunden (65 %). In weiteren 78 von 396 Stunden (20 %) wurden die Leiterseilgeräusche durch Fremdgeräusche überlagert.

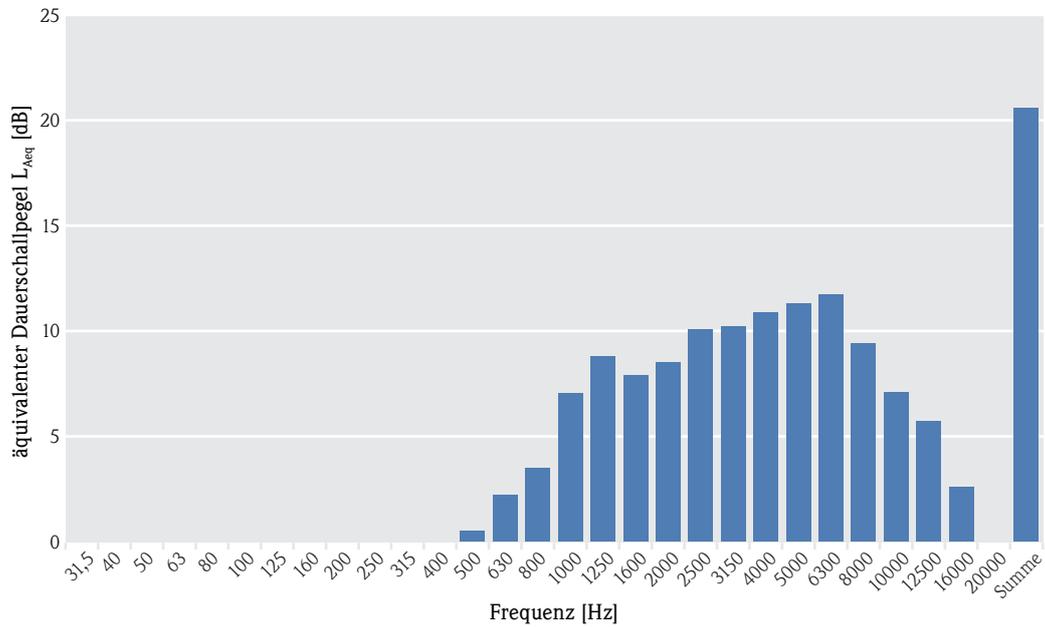
## 4.2 Eigenrauschen der Messketten

Um sicherzustellen, dass bei der Beurteilung der Schalleistungen der untersuchten Leiterseilkonstellationen kein Einfluss durch das Eigenrauschen der Messkette vorliegt, wurden diese jeweils terzspektral aufgezeichnet um anschließend bei den Messwerten eine terzspektrale energetische Korrektur um das Eigenrauschen durchzuführen. Hierbei zeigte sich, dass unterhalb der „dicken“ Leiterseile ein deutlich geringeres Eigenrauschen der Messkette als unterhalb der „dünnen“ Leiterseile zu messen war. Möglicherweise hat hier die erhöhte Randfeldstärke der „dünnen“ Leiterseile einen Einfluss auf das Eigenrauschen der Messkette.

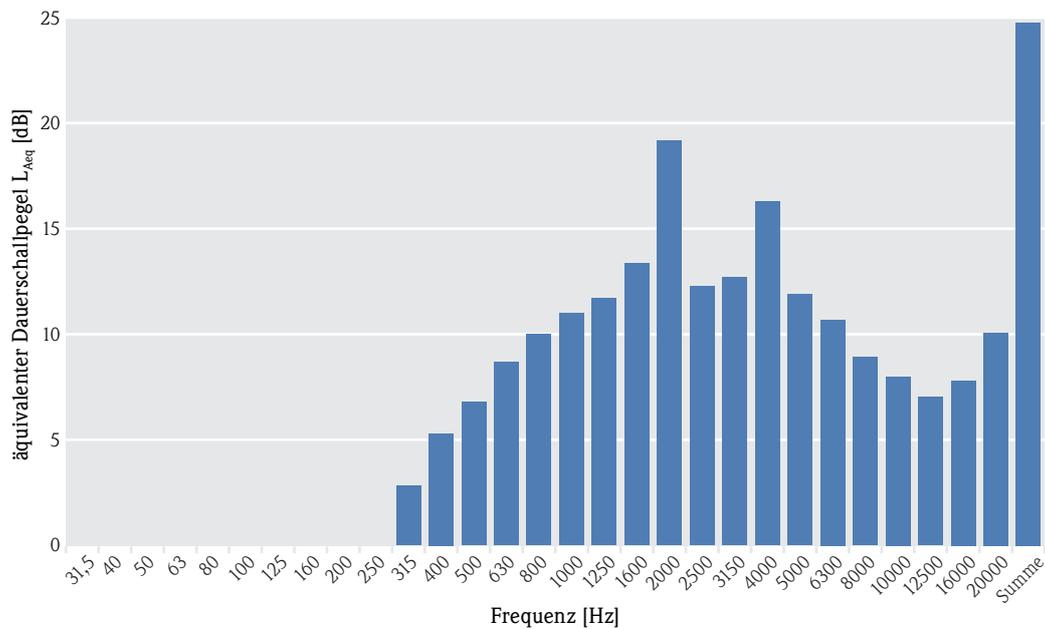
Unterhalb der „dicken“ Leiterseile am Standort Rangendingen konnte durch das Aufdrehen einer schallisolierenden Schutzkappe auf das Mikrofon an MP0 das Eigenrauschen der Messkette mit einem Wert von 20,6 dB(A) ermittelt werden. In Abb. 13 ist das Eigenrauschen der Messkette am MP0 terzspektral dargestellt. Es wurde zur Eigenrauschkorrektur der Messwerte am Standort Rangendingen verwendet.

In Brilon und Freren unterhalb der „dünnen“ Leiterseile schwankte das Eigenrauschen der Messkette am MP0 zwischen 26 und 28 dB(A) und war damit deutlich höher als noch unterhalb der „dicken“ Leiterseile. Bei der Dauermessstation am Fremdgeräusch-Messpunkt ergab sich in Brilon und Freren jeweils ein Eigenrauschen von ca. 21 dB(A).

Der Vergleich der Eigenrauschwerte der beiden Dauermessstationen am MP0 und am Fremdgeräuschmesspunkt weist darauf hin, dass aufgrund der höheren Randfeldstärken unterhalb der „dünnen“ Leiterseile, im Vergleich zum Eigenrauschen an „dicken“ Leiterseilen in Rangendingen, hierdurch ein zusätzlicher Einfluss auf das Eigenrauschen der Messgeräte am MP0 gegeben ist. Unabhängig davon waren alle Kalibrierwerte korrekt. Dieser systematische Fehler mit einem Grundrauschen von ca. 28 dB(A) wirkt sich aufgrund der energetischen Addition der Pegel jedoch nur bis zu einer Pegelhöhe von etwa 38 dB(A) relevant aus. Da sich die zu messenden Pegel bei Regenniederschlag jedoch in Bereichen  $> 40$  dB(A) befinden, ist bei einem Eigenrauschen von 28 dB(A) mit keinem signifikanten Einfluss mehr auf die Messwerte zu rechnen. In Abb. 14 ist das Terzspektrum des Eigenrauschens am MP0 in Brilon dargestellt.



**Abb. 13:** A-bewertetes Terzspektrum des Eigenrauschens der Messkette am MP0 in Rangendingen, gemessen am 11.12.12 um 17:29 Uhr.



**Abb. 14:** A-bewertetes Terzspektrum des Eigenrauschens der Messkette am MP0 in Brilon, gemessen am 24.07.13 um 16:27.

### 4.3 Ergebnisse für „dicke“ Leiterseile (Al/St 560/50)

Da die Messungen an den „dicken“ Leiterseilen in Rangendingen im Winter stattfanden (Dezember 2012 bis Februar 2013) fanden die Niederschlagsereignisse größtenteils in Form von Schnee und nicht als Regenniederschlag statt. Nachteilig hierbei war, dass die verwendete Wetterstation keine quantitativen Schneeniederschläge erfassen konnte, wie im Übrigen auch diejenigen des Deutschen Wetterdienstes DWD nicht. Somit konnten für die Schneemessdaten nur qualitative und keine exakt quantitativen Zusammenhänge zwischen Niederschlagsmenge und längenbezogenem Schallleistungspegel der Leiterseile hergeleitet werden. Allerdings sind diese Messungen sehr gut verwertbar, da durch den Schneeniederschlag selbst ein vernachlässigbar geringer Fremdgeräuschpegel erzeugt wird, im Gegensatz zu den deutlich hörbaren Regenfremdgeräuschen (Regeneigengeräusch, Körperschallaufprallgeräusche, Prasseln). Für die Begriffsdefinitionen „leichter“ und „starker“ Schneeniederschlag können die Angaben nach IEEE Standard 539-2005 [3] mit Kapitel 5.5 sowie VDI 3786 Blatt 9 mit Tab. 9 [4] orientierend zur Einschätzung beobachteter Feldmessungen genutzt werden.

Anhand der vielfach beobachteten Messungen durch mehrere Sachverständige konnte ein Zusammenhang zwischen den aufgetretenen Niederschlagsstärken und den damit einhergehenden Leiterseilemissionen festgestellt werden. Mit zunehmender Niederschlagsstärke konnten eindeutig höhere Pegel vor Ort wahrgenommen und gemessen werden. Aus diesem Grund und mangels verwertbar genau ablesbarer Schnee-Niederschlagsdaten wurden die erfassten Messdaten anhand ihrer Pegelhöhe am MP0 in zwei Kategorien eingeteilt. Ereignisse mit Schalldruckpegeln  $\leq 35$  dB(A) konnten in die Kategorie „leichter Schneeniederschlag“ eingeordnet werden. Während Ereignisse mit Schalldruckpegeln  $> 35$  dB(A) dem als „starker Schneeniederschlag“ bezeichneten Messfall zugewiesen wurden. Alle verwerteten Terzspektren sind in Abb. 15 dargestellt. Zudem konnten vor Ort und auf den Tonaufnahmen auch während niederschlagsfreier Phasen hörbare Leiterseilemissionen

wahrgenommen werden, die aufgrund ihrer sehr niedrigen Pegel jedoch sowohl fremdgeräuschbelastet als auch durch das Eigenrauschen der Messkette selbst beeinflusst wurden. In den nachfolgenden Abschnitten sind die verwerteten Terzspektren für die drei genannten Witterungsbedingungen dargestellt.

#### 4.3.1 Leise bis mittlere Emissionen/leichter Schneeniederschlag

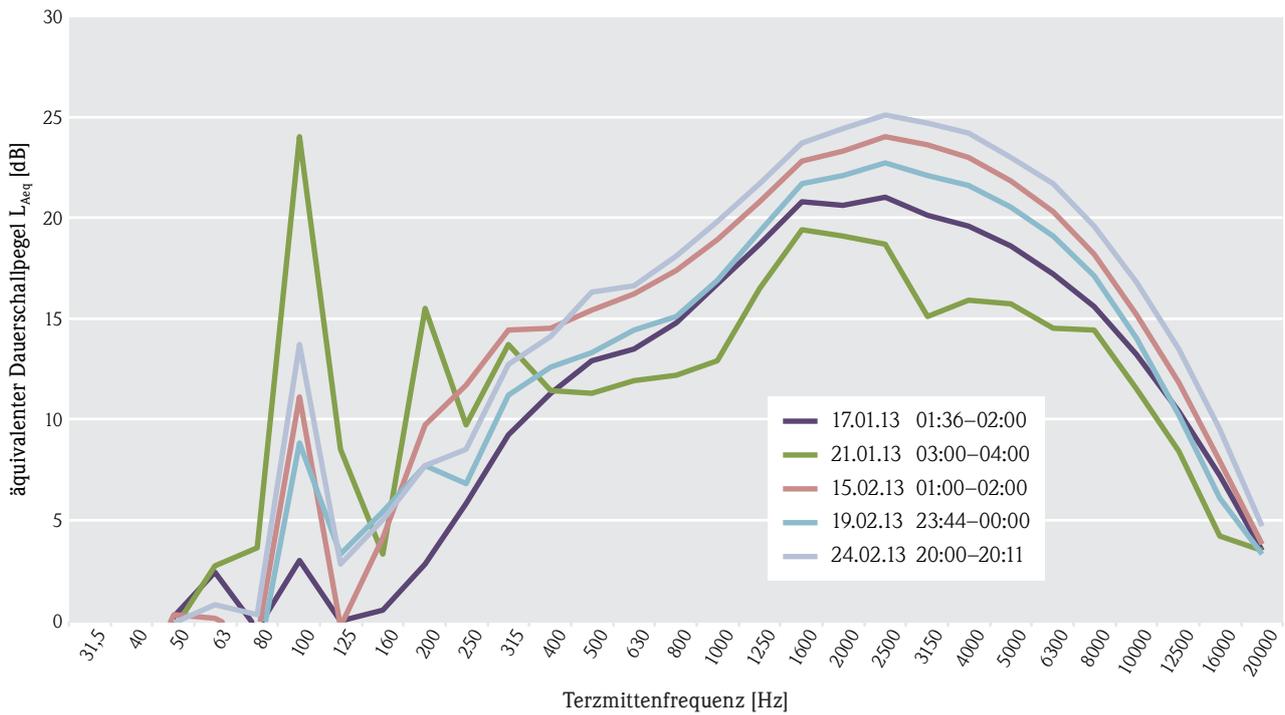
In Abb. 15 sind beispielhaft 5 Terzspektren von insgesamt 25 ausgewerteten Messungen dargestellt (vollständige Übersicht der Terzspektren befindet sich im Anhang 1). Es ist zu erkennen, dass der Verlauf sich sehr ähnelt. Bei den dargestellten Spektren ist ein zum Teil dominierender tonaler Anteil bei 100 Hz zu erkennen, teilweise auch bei 200 Hz. Dies ist der Bewegung der Ionen in der Driftzone zuzuschreiben und konnte bei Auswertung der Tonaufnahmen sowie bei beobachteten Messungen vor Ort als tieffrequentes Brummen auch subjektiv von mehreren Sachverständigen wahrgenommen werden.

Der zweite markante Teil des Spektrums ist der pegelbestimmende hochfrequente Bereich mit einem Scheitelpunkt bei etwa 2,5 kHz, welcher zu den niedrigeren und höheren Frequenzen hin langsam abfällt. Dieser hochfrequente Teil konnte auf den Tonaufnahmen sowie bei den Vor-Ort-Messungen als „Bitzeln“ oder „Knistern“ gehört und beschrieben werden und lässt sich auf Entladungsvorgänge entlang der Leiterseiloberflächen zurückführen.

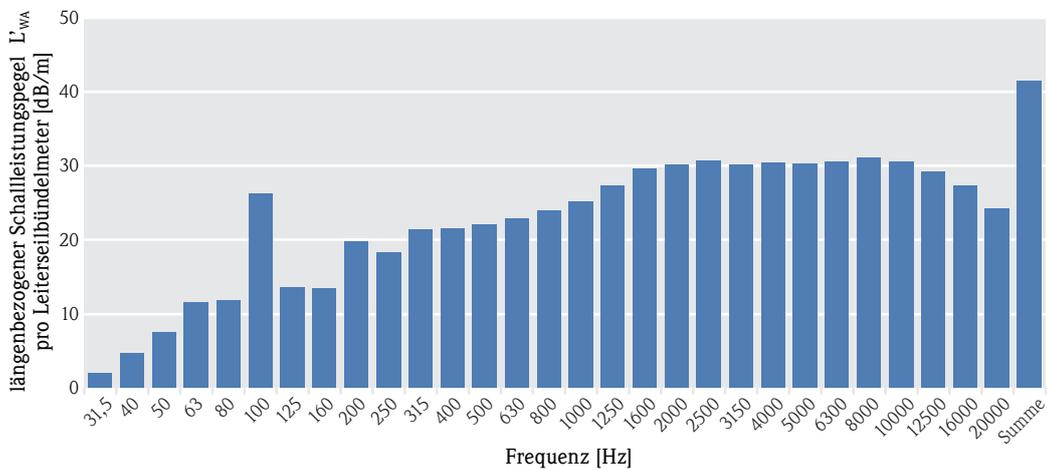
Aus den insgesamt 25 verwerteten Spektren wurde anschließend ein je nach Expositionsdauer zeitlich gewichteter energetischer Mittelwert gebildet, von dem das mit 20,6 dB(A) ermittelte Eigenrauschen der Messkette am MP 0 energetisch abgezogen wurde. Mit Hilfe von Ausbreitungsberechnungen lässt sich somit das in Abb. 16 dargestellte, längenbezogene Schallleistungspegelspektrum berechnen.

Der mithilfe der Ausbreitungssoftware ermittelte längenbezogene Schallleistungspegel der Leiterseile beträgt bei leichtem Schneeniederschlag im Summenpegel:

$$L'_{WA} = 40,8 \text{ dB/m Leiterseilbündel.}$$



**Abb. 15:** Beispielhaft 5 Terzspektren von „leisen/mittleren“ Ereignissen, welche am MP0 in Rangendingen einen Schalldruckpegel von  $\leq 35$  dB(A) erzeugt haben - wahrscheinlich bei leichtem Schneeniederschlag.

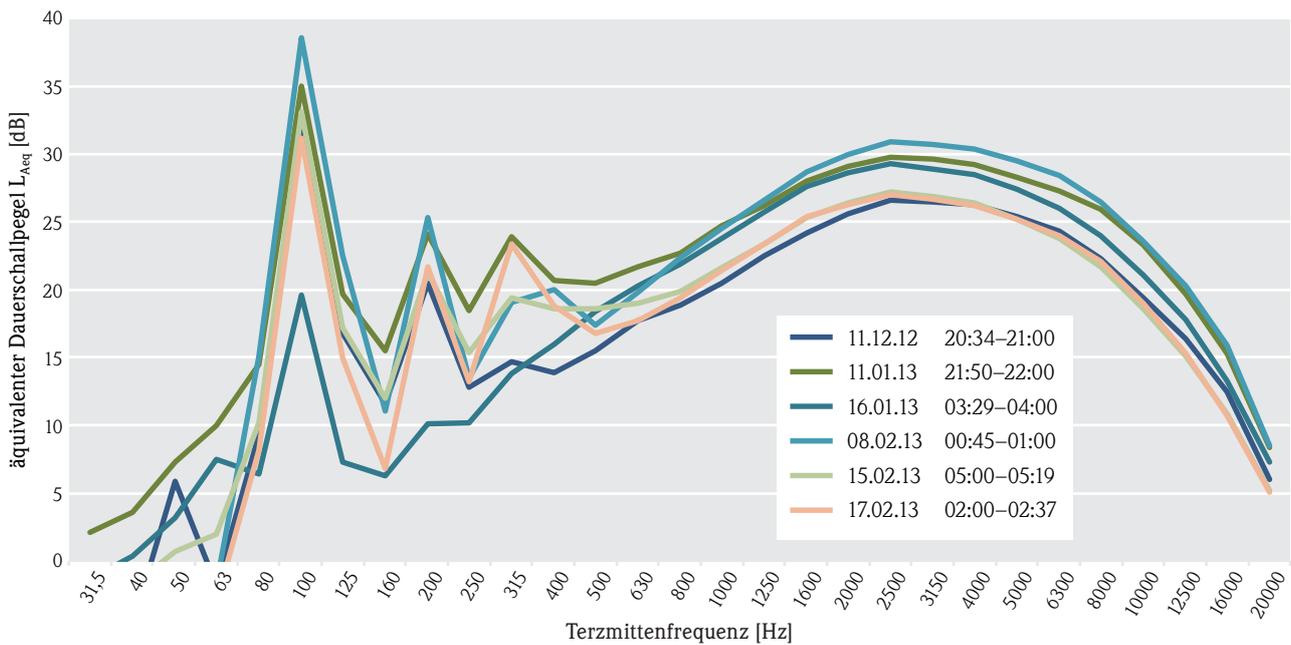


**Abb. 16:** Energetisch gemittelt längenbezogenes Schalleistungsspektrum berechnet aus 25 verschiedenen leisen/mittleren Ereignissen am MP0 in Rangendingen bei wahrscheinlich leichtem Schneeniederschlag nach terzspektraler Subtraktion des Eigenrauschens.

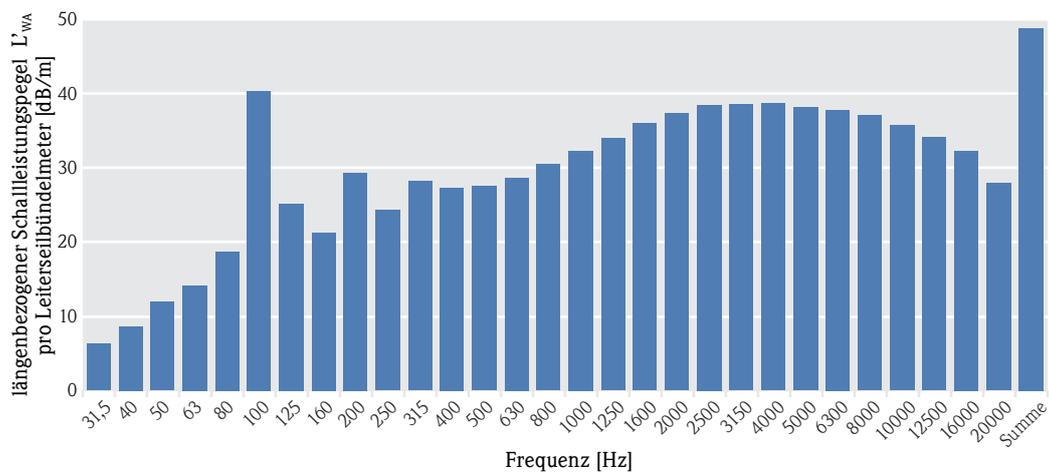
### 4.3.2 Laute Emissionen/ starker Schneeniederschlag

Die in Abb. 17 dargestellten sechs Terzspektren sind ein Ausschnitt von insgesamt 30 verwertbaren Terzspektren (siehe Anhang 2) der lauten Emissionen bei starkem Schneeniederschlag und weisen ebenfalls dominante tonale Komponenten bei 100 Hz sowie in verminderter Form bei 200 Hz auf. Der 100-Hz-Ton

steht hier sogar noch deutlicher hervor und liegt bei vielen Einzelspektren oberhalb des hochfrequenten Bereichs, wodurch die 100-Herz-Terz pegelbestimmend wird. Dies bestätigte sich beim Höreindruck vor Ort wie auch auf den Tonaufnahmen. Ein lautes tieferes Brummen konnte sehr deutlich wahrgenommen werden und überlagerte das hochfrequenzere Knistern/Bitzeln. Bei zeitgewichteter energetischer Mittelung der 30 Einzelereignisse und anschließenden



**Abb. 17:** Beispielhaft sechs Terzspektren von „lauten“ Ereignissen, welche am MPO in Rangendingen einen Schalldruckpegel von > 35 dB(A) erzeugt haben - wahrscheinlich starker Schneeniederschlag.



**Abb. 18:** Energetisch gemittelt längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum berechnet aus 30 verschiedenen lauten Ereignissen am MPO in Rangendingen bei wahrscheinlich leichtem Schneeniederschlag nach terzspektraler Subtraktion des Eigenrauschens.

der Korrektur des Eigenrauschens ergibt sich folgendes längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum: Bei Zugrundelegung des um das Eigenrauschen korrigierten Spektrums am MPO ergibt sich für die lauten Leiterseilemissionen folgender längenbezogener Schalleistungspegel im Summenpegel:

$$L'_{WA} = 48,6 \text{ dB/m Leiterseilbündel.}$$

### 4.3.3 Leiterseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen

Bei Trockenheit bzw. dem Ausbleiben von messbarem Niederschlag traten nur sehr selten hörbare Leiterseilemissionen auf und wenn, dann meist nur mit sehr geringen Pegeln. Dennoch soll an dieser Stelle

ein Emissionsansatz beschrieben werden, der einen Maximalansatz bei Trockenheit an „dicken“ Leiterseilen darstellt. Es handelt sich dabei um Phasen nach längeren Zeitabschnitten ohne Niederschläge (keine Abklingphasen nach Niederschlag).

Die in der folgenden Abbildung dargestellten Terzspektren konnten nicht fremdgeräuschfrei ermittelt werden und enthalten aufgrund ihrer niedrigen Pegel noch unbestimmbare und unbekannte Anteile des Umweltrauschens. Daher sind die daraus berechneten längenbezogenen Schalleistungspegel als absolute Obergrenze anzusehen.

Vom Höreindruck lassen sich die aufgetretenen Leiterseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen an „dicken“ Leiterseilen als sehr leises Knistern oder Zwitschern beschreiben. Bei diesen Messungen ist

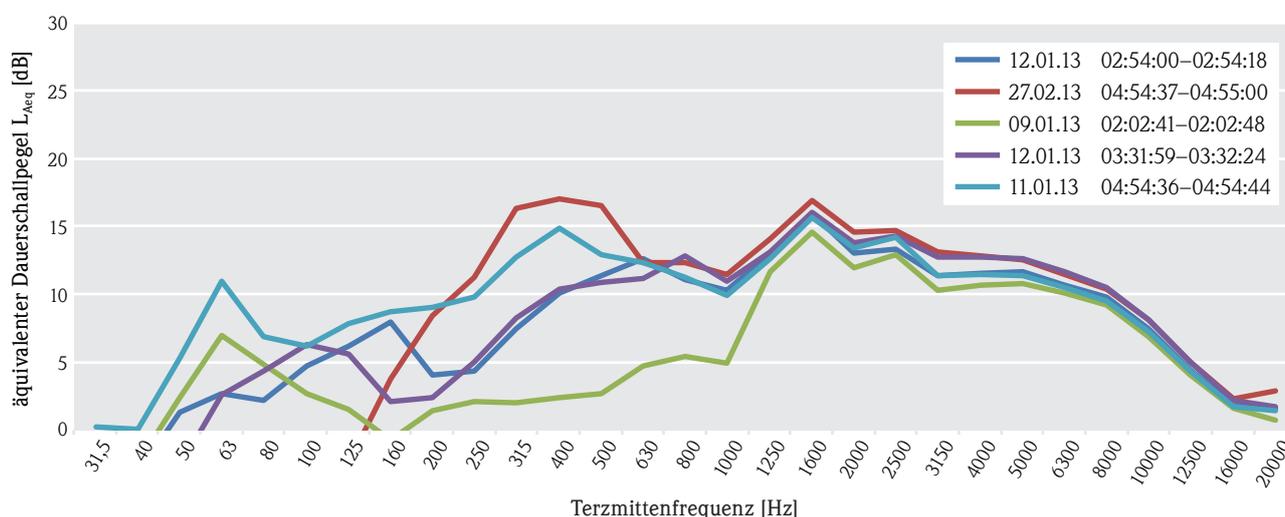


Abb. 19: Übersicht fünf verschiedener nicht fremdgeräuschkorrigierter Spektren von Leitungsgeräuschen in niederschlagsfreien Phasen am MPO in Rangendingen (keine Abklingvorgänge nach Regen).

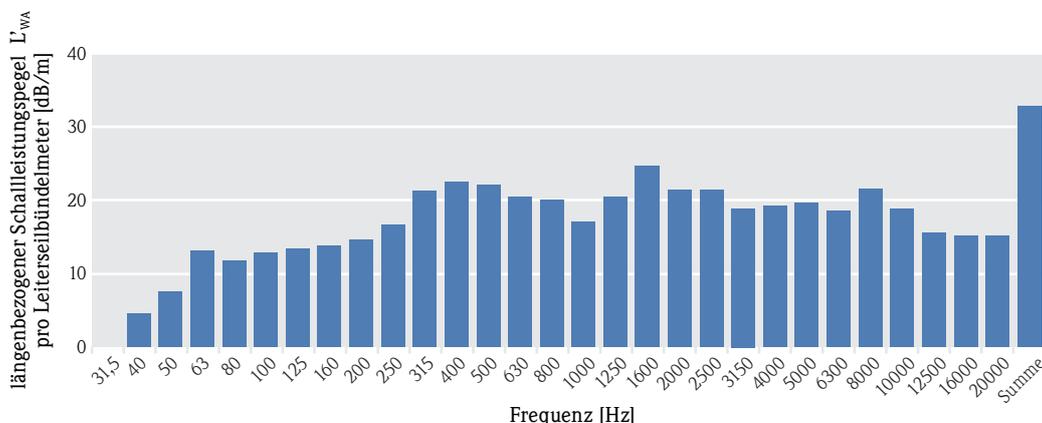


Abb. 20: Energetisch gemittelt längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum berechnet aus fünf verschiedenen Messwerten am MPO in Rangendingen in niederschlagsfreien Phasen nach Korrektur des Eigenrauschens.

aufgrund der niedrigen Pegel ebenfalls der Einfluss des Eigenrauschens der Messkette nicht zu vernachlässigen. Nach energetischer Mittelung der fünf Messungen und der Korrektur des Eigenrauschens ergibt sich folgendes längenbezogenes Schalleistungsspektrum:

Der berechnete längenbezogene Schalleistungspegel, welcher einen Maximalansatz bei Trockenheit darstellt, beträgt im Summenpegel für niederschlagsfreie Phasen:

$$L'_{WA} = 32,5 \text{ dB/m Leiterseilbündel}$$

#### 4.3.4 Messungen bei Regenniederschlag

Da Regenniederschlag im Vergleich zu Schneefall der im Verlauf eines Jahres häufiger auftretende Zustand ist, war es notwendig ebenfalls einen Emissionsansatz für Regen zu entwickeln. Da am Standort Rangendingen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten die Installation eines Fremdgeräuschkesspunktes nicht realisierbar war, ist es nicht möglich, die wenigen aufgezeichneten Messungen bei Regen um den Anteil des Regenrauschens zu korrigieren. Anhand einer vergleichenden Betrachtung der terzspektralen Messungen bei Schnee sowie bei Regen lassen sich jedoch Zusammenhänge zwischen den auftretenden

Leiterseilemissionen bei diesen beiden Zuständen erkennen.

In Abb. 21 ist ein energetisch gemitteltes Spektrum der Schalldruckpegel von zwei Messungen unterhalb der Leiterseile bei starkem Regen ohne Fremdgeräuschkorrektur dargestellt. Bei einer vergleichenden Betrachtung mit den Messungen bei starkem Schneefall (vgl. Abb. 17) zeigt sich, dass der tonale Anteil bei 100 Hz sowohl bei der Regenmessung, als auch bei den Messungen während starkem Schneeniederschlag ähnliche Pegel mit ca. 30 dB(A) im Mittel erreicht. Der hochfrequente Bereich bei der Regenmessung erreicht jedoch deutlich höhere Pegel und liegt über der 100-Hz-Terz, die im Gegensatz zu den Schneemessungen nicht mehr pegelbestimmend ist. Dieser hochfrequente Bereich ist bestimmt durch das Rauschen des Regens und überlagert das „Knistern“ und „Bitzeln“ der Höchstspannungsleitungen, welches in einem ähnlichen Frequenzbereich liegt. Aus diesem Grund konnten auch vor Ort während der dargestellten Regenmessungen keine Leiterseilemissionen differenziert wahrgenommen werden, da diese subjektiv nicht vom Regenrauschen zu unterscheiden waren. Auch das tieffrequente Brummen bei 100 Hz konnte trotz des tonalen Charakters im Terzspektrum vor Ort nicht gehört werden. Auf den nachträglich ausgewerteten Tonaufnahmen ist ein Brummen jedoch zu hören.

Anhand der Messung der Pegel-Abstands-Abnahme

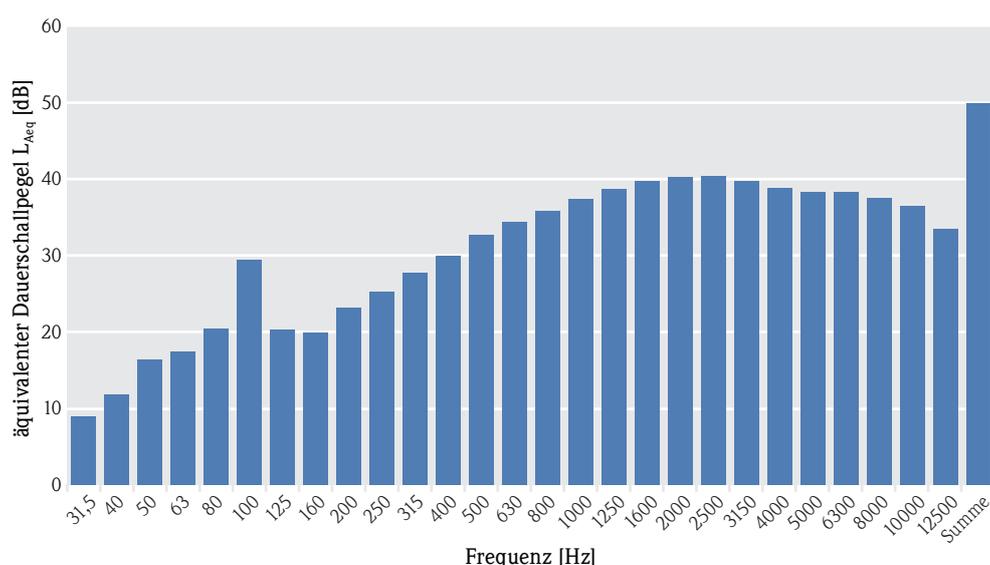


Abb. 21: Energetischer Mittelwert von zwei Messungen an MP0 bei Regen 0,5–1,0 mm/5 min.

vom MP0 unterhalb der Leiterseile bis zum 88 m entfernten MP 3 lässt sich zudem der deutliche Einfluss des Regenrauschens auf die Gesamtpegel erkennen. Während verschiedener Messungen mit Niederschlägen zwischen 0,4 mm/5 min und 1,0 mm/5 min konnte keine Pegel-Abnahme mit zunehmender Entfernung von den Leiterseilen gemessen werden. Stattdessen liegen die Messwerte am MP 3 sogar höher als die Messwerte am MP0. Ein deutliches Indiz dafür, dass an allen Messpunkten das Fremdgeräusch durch den Regen und nicht das

Anlagengeräusch der Leiterseile pegelbestimmend war.

Bei Betrachtung der Messungen mit niedrigeren Regenniederschlagsstärken ergibt sich ein ähnliches Bild (Abb. 23).

Auch hier ist terzspektral zu erkennen, dass die 100-Hz-Terz im Vergleich zu den benachbarten Terzen eindeutig höhere Pegel erreicht. Sie sticht jedoch nicht so deutlich hervor, wie dies noch bei den stärkeren Regenniederschlägen mit >0,5 mm/5 min der Fall war. Im Vergleich zu den Messungen bei

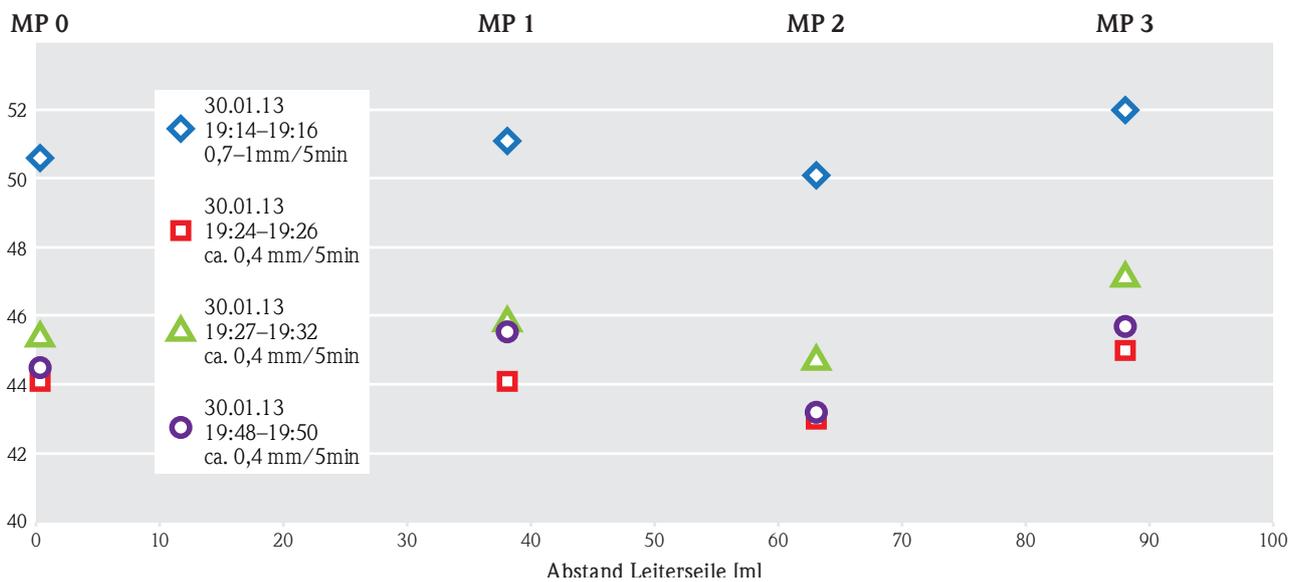


Abb. 22: Pegel-Abstands-Abnahme während eines Regenniederschlags am 30.01.13 in Rangendingen.

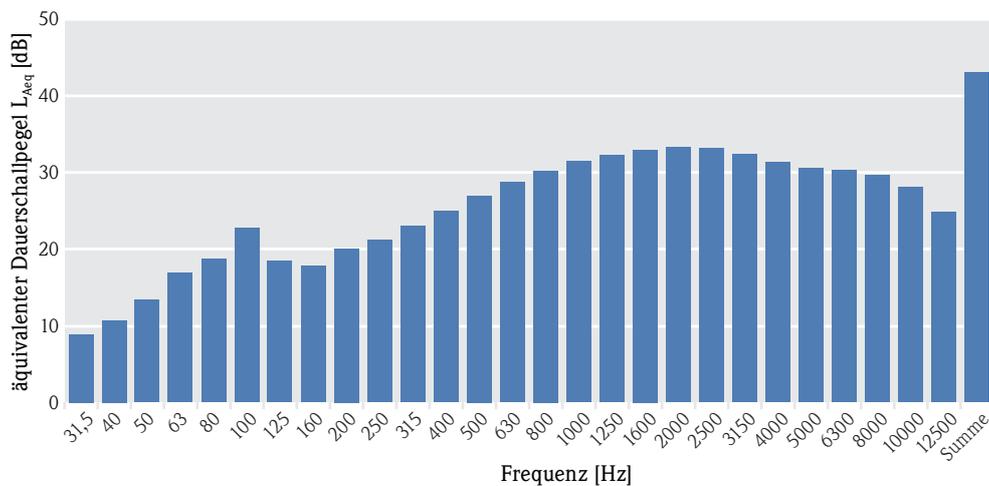


Abb. 23: Energetischer Mittelwert aus sechs Spektren bei 0,3–0,5 mm Regen pro 5 min am MP0 in Rangendingen.

leichten Schneeniederschlägen zeigt sich ebenfalls, dass die 100-Hz-Terz in einer vergleichbaren Größenordnung liegt. Bei leichtem Regen liegt der Wert bei 22,7 dB(A) für 100 Hz und bei leichtem Schnee bei 16,8 dB(A). Ein möglicher Grund dafür, dass der 100-Hz-Ton aus den Schneemessungen etwas leiser ausfällt ist, dass bei der Mittelwertbildung auch einige Spektren berücksichtigt wurden, die keinen 100-Hz-Ton aufweisen sondern nur ein hochfrequentes „Bitzeln“/„Knistern“ (vgl. Abb. 15 und Anhang 1). Zudem wurden bei den Regenspektren aufgrund des geringen Datenumfanges nur Spektren zwischen 0,3 und 0,5 mm Niederschlag in 5 min berücksichtigt und nicht bei niedrigeren Niederschlägen, welche einen niedrigeren 100-Hz-Ton aufweisen.

Bei vergleichender Betrachtung der Mittelungsspektren bei leichtem Regen und leichtem Schnee wird erneut der Unterschied im hochfrequenten Bereich deutlich. Bei den Werten für leichten Schneefall liegt der Pegel beispielsweise bei 21,9 dB(A) für die 2,5 kHz-Terz. Bei den Regenmessungen erreicht der Pegel 33,2 dB(A) bei 2,5 kHz. Diese Erhöhung von mehr als 10 dB(A) macht deutlich, dass das hochfrequente Korona-Bitzeln bei einem solchen Regenrauschen nicht mehr wahrgenommen werden kann. Dass die Pegelerhöhung im hochfrequenten Bereich hauptsächlich auf das Regenrauschen und nicht auf zusätzliche Leiterseilgeräusche zurückzuführen ist, bestätigen die Abstandsmessungen bei Regen (vgl. Abb. 22). Da an allen vier Messpunkten sehr ähnliche Pegel gemessen wurden und der hochfrequente Bereich jeweils pegelbestimmend war, so muss dieser vom Regenrauschen dominiert sein.

### 4.3.5 Bewertung der Tonalität bei „dicken“ Leiterseilen

Die Bewertung der Tonalität erfolgt in Abhängigkeit von der Niederschlagsform und -stärke. Wie groß jeweils die Tonzuschläge für Prognoseberechnungen zu wählen sind, ist in Tab. 5 aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass der Tonzuschlag ein Immissionszuschlag und im Sinne der TA Lärm nach der Hör- und Wahrnehmbarkeit des Sachverständigen am Immissionsort zu vergeben ist.

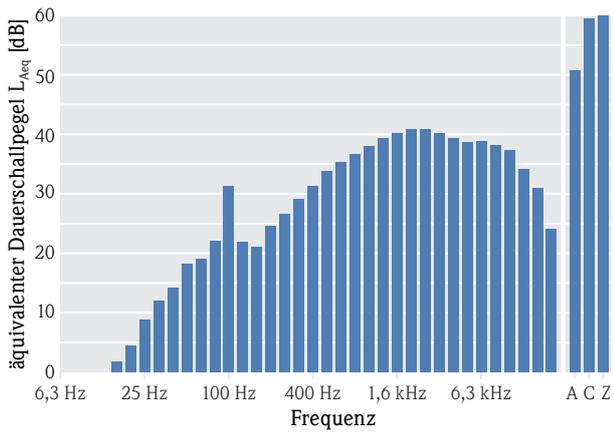
Anhand der Daten in Tab. 5 lässt sich erkennen, dass der starke Schneefall bezüglich der Hörbarkeit von Einzeltönen der kritischste Zustand ist, mit einem flächendeckenden Tonzuschlag von 6 dB(A). Grund ist die starke Geräusch-Emission der Leiterseile aufgrund der hohen Niederschlagsstärke sowie der im Vergleich zur Leiterseilemission vernachlässigbar geringe Fremdgeräuschbeitrag durch den Schneeniederschlag selbst. Durch die fehlende Überdeckung der Leiterseilemissionen bei Schnee, kann der 100-Hz-Brummtone auch noch in weiteren Entfernungen deutlich wahrgenommen werden. Dies gilt sowohl für den leichten, als auch für den starken Schneefall. Bei leichtem Schneefall ist der Einzelton jedoch nicht so auffällig, sodass ein flächendeckender Tonzuschlag von 3 dB(A) prognostisch auf der sicheren Seite zu beschreiben ist.

Bei Regenniederschlägen muss das Fremdgeräusch durch das Regenrauschen berücksichtigt werden. Im Sinne der „worst case“-Betrachtung muss davon ausgegangen werden, dass bei sehr leichtem Regen respektive Nieselregen das Regenrauschen so geringe Pegel erzeugt, dass der 100-Hz-Brummtone ebenfalls in noch weiteren Entfernungen wahrgenommen werden kann. Da die Niederschlagsstärke

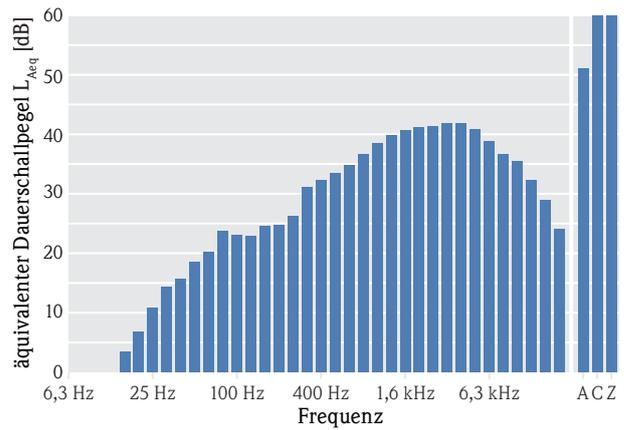
**Tab. 5:** Tonzuschläge bei „dicken“ Leiterseilen in Abhängigkeit von der Niederschlagsform und -stärke.

Niederschlagsform	Niederschlagsstärke	Hörbarer Tonzuschlag bis 25 m in dB(A)	Hörbarer Tonzuschlag ab 25 m in dB(A)
Schnee	Leicht	3	3
Schnee	Stark	6	6
Regen	0,1–0,4 mm/5 min	3	3
Regen	0,5–1,0 mm/5 min	3	0
Niederschlagsfrei	-	0	0

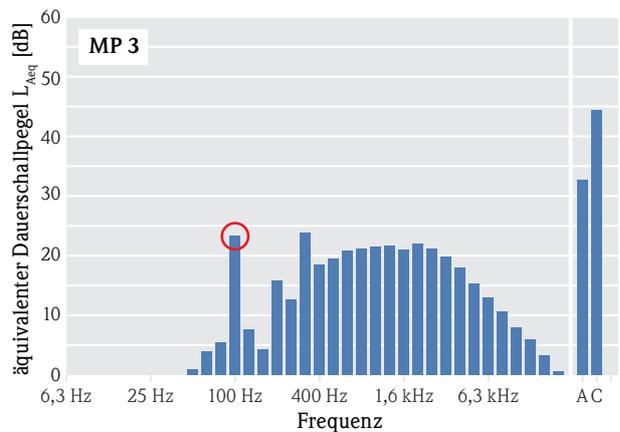
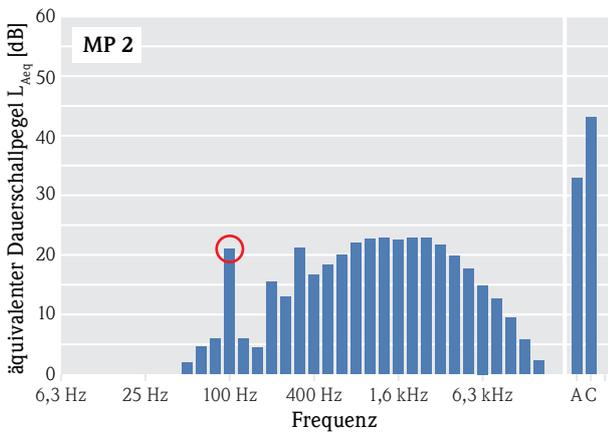
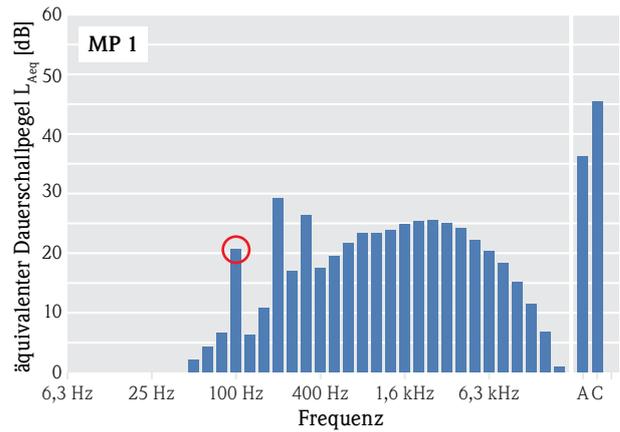
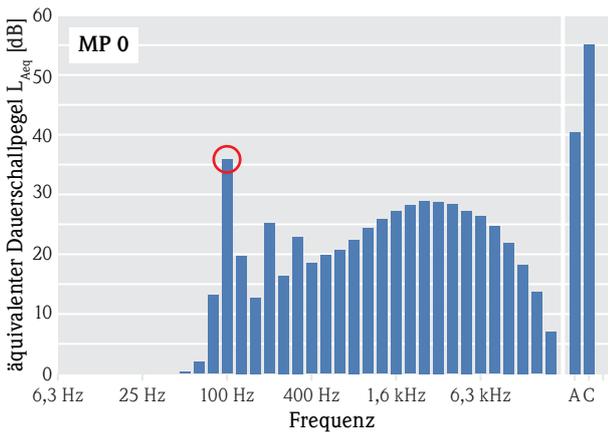
Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen



**Abb. 24:** Spektrum 30.1.13 19:14–19:16 Uhr bei starkem Regen (1 mm/5 min) an MP0.



**Abb. 25:** Spektrum 30.1.13 19:14–19:16 Uhr bei starkem Regen (1 mm/5 min) an MP1 (38 m).



**Abb. 26:** Terzspektren in der Auswertesoftware bei starkem Schneeniederschlag simultan an allen vier Messpunkten aufgezeichnet am 06.02.13 um 22:10:45–22:11:33 Uhr. Rot eingekreist ist jeweils der 100-Hz-Ton (Bilder mit gleicher Skalierung und 5-dB-Rasterung).

aus praktischen Erwägungen in zwei Klassen unterschieden wird, ist daher für die Regenklasse 0,1–0,4 mm/5 min ein flächendeckender Tonzuschlag von 3 dB(A) zu erteilen, um prognostisch auf der sicheren Seite zu liegen. Bei Regenstärken zwischen 0,5 und 1,0 mm/5 min ist jedoch in allen Fällen mit deutlichen Fremdgeräuschen durch das Regenrauschen zu rechnen, sodass nur bis zu einer Entfernung von 25 m von den Leiterseilen ein Tonzuschlag von 3 dB(A) erteilt wird. Ab 25 m ist die Überlagerung durch das Regenrauschen so stark, dass die Leiterseilemissionen nicht mehr wahrgenommen werden können, da das Regenrauschen an entfernten Immissionspunkten deutlich höhere Pegel erzeugt. Dieser Sachverhalt soll anhand der Terzspektren von zwei simultanen Messungen am MP0 und MP1 bei 1 mm/5 min dargestellt werden.

Anhand der Terzspektren in den Abb. 24 und 25 wird deutlich, welchen Einfluss das Regenrauschen auf die Hörbarkeit von Leiterseilgeräuschen hat. Unterhalb der Leiterseile am MP0 sticht der Einzelton bei 100 Hz im Terzspektrum noch deutlich hervor. Bei einer simultanen Messung in 38 m Abstand zu MP0 ist der Einzelton spektral nicht mehr erkennbar. Anders verhält es sich bei Messungen während des Schneefalls. Durch das deutlich niedrigere Fremdgeräusch des Schneeniederschlags gibt es keine Überlagerung der Leiterseilemissionen, sodass diese auch bis zum MP3 in 88 m Entfernung noch deutlich hörbar und terzspektral auch messbar sind, wie in Abb. 26 dargestellt ist.

An allen vier Messpunkten sticht der 100-Hz-Ton terzspektral deutlich hervor. Dies deckt sich mit dem Höreindruck, da das Brummen auch am MP3 noch deutlich hörbar war. Durch das fehlende Regenrauschen kommt es zu keiner Überlagerung der Leiterseilemissionen und diese können auch in größeren Entfernungen wahrgenommen werden.

#### **4.4 Ergebnisse für „dünne“ Leiterseile (Al/St 265/35, Al/St 240/40)**

An den Standorten Freren und Brilon konnten Messungen der Leiterseilemissionen bei Trockenheit und bei Regenniederschlag an „dünnen“ Leiterseilen durchgeführt werden. Die Niederschlagsstärke wurde dabei aus praktischen Erwägungen in zwei

Klassen eingeteilt. Die erste Niederschlagsklasse liegt zwischen 0,1 und 0,4 mm/5 min. Die zweite Klasse erstreckt sich von 0,5 bis 1,0 mm/5 min. Schneeniederschläge traten in den Untersuchungszeiträumen keine auf.

Aufgrund der Lage und Geometrie der Messumgebung konnten hier an beiden Standorten Fremdgeräuschmessstationen installiert werden. Dadurch wurde bei einer Vielzahl von Messungen während Regen anschließend eine Fremdgeräuschkorrektur ermöglicht, womit die ausgewerteten Terzspektren zur Schallleistungsbestimmung gesichert kein Fremdgeräusch mehr enthalten.

##### **4.4.1 Leichter Regenniederschlag 0,1–0,4 mm/5 min**

Am Standort Freren konnten vier verwertbare Terzspektren aufgezeichnet werden. Am Standort Brilon konnten für den leichten Regenniederschlag insgesamt 21 verwertbare Terzspektren aufgezeichnet werden. Die einzelnen aufgezeichneten Terzspektren aus Freren und ein Teilausschnitt der Messungen aus Brilon (vollständiger Datensatz siehe Anhang 3) sind in den Abb. 27 und 28 dargestellt.

Alle dargestellten Spektren sind bereits mit Hilfe der Messdaten der installierten Fremdgeräuschstationen um den Anteil des Fremdgeräuschs in jeder Terz korrigiert. Da eine Vorselektion der Daten stattfand, in der nur solche Messungen berücksichtigt wurden in denen im Summenpegel eine Differenz von mindestens 3 dB(A) zwischen MP0 und MP Fremdgeräusch bestand, war eine DIN-konforme Fremdgeräuschkorrektur nach DIN 45645-1 Kapitel 6.3 [16] durchführbar. Beispielhaft ist eine solche Fremdgeräuschkorrektur in Abb. 29 dargestellt.

Aufgrund der unterschiedlichen Standortgeometrien in Freren und Brilon kann hier kein gemeinsamer energetischer Mittelwert des Schalldruckpegels an MP0 berechnet werden, da dieser abhängig ist vom Abstand zu den Leiterseilen und deren Anordnung. Stattdessen muss zunächst für beide Standorte der messpunktunabhängige längenbezogene Schallleistungspegel der Leiterseile berechnet werden, welcher dann als Grundlage dient, um anschließend einen gemeinsamen längenbezogenen Schallleistungspegel für „dünne“ Leiterseile zu berechnen. Hierbei wird auf Basis der Anzahl der verwendeten Messwerte das Spektrum gewichtet. 21 Messwerte aus Brilon

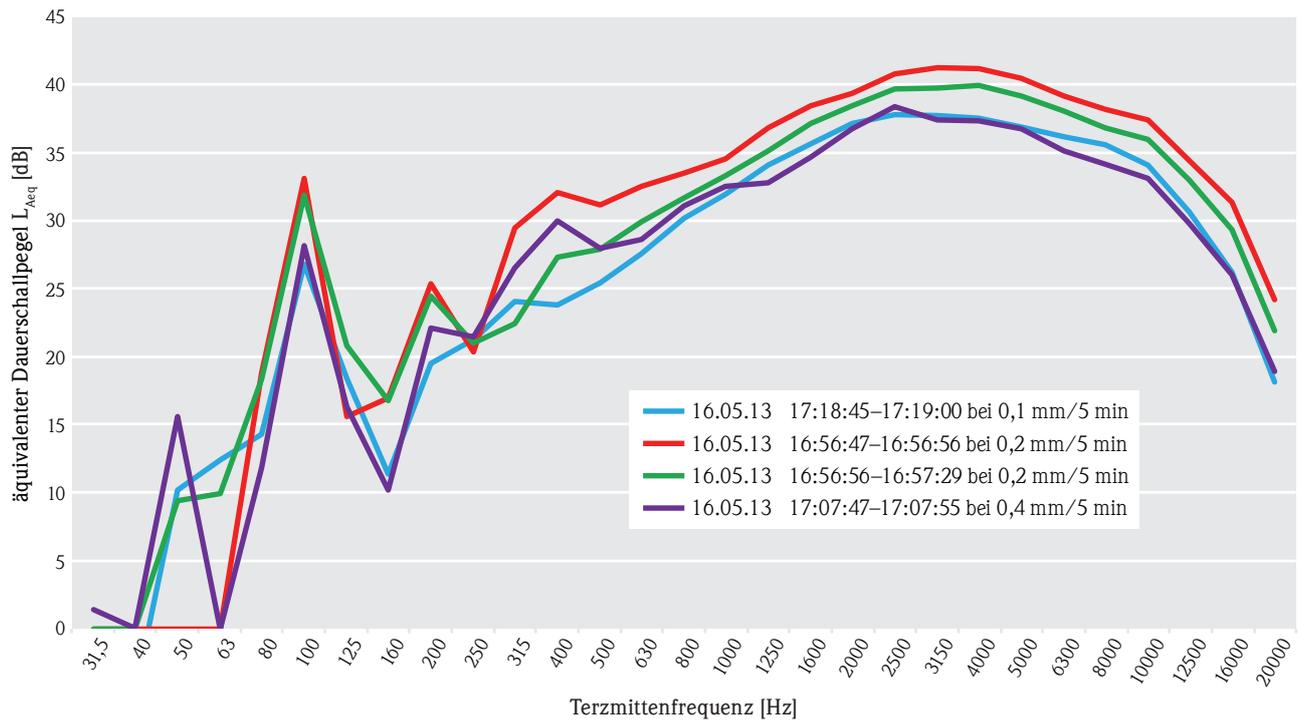


Abb. 27: Vier verschiedene, fremdgeräuschkorrigierte Terzspektren bei Regenereignissen mit 0,1-0,4 mm/5 min am MP0 in Freren.

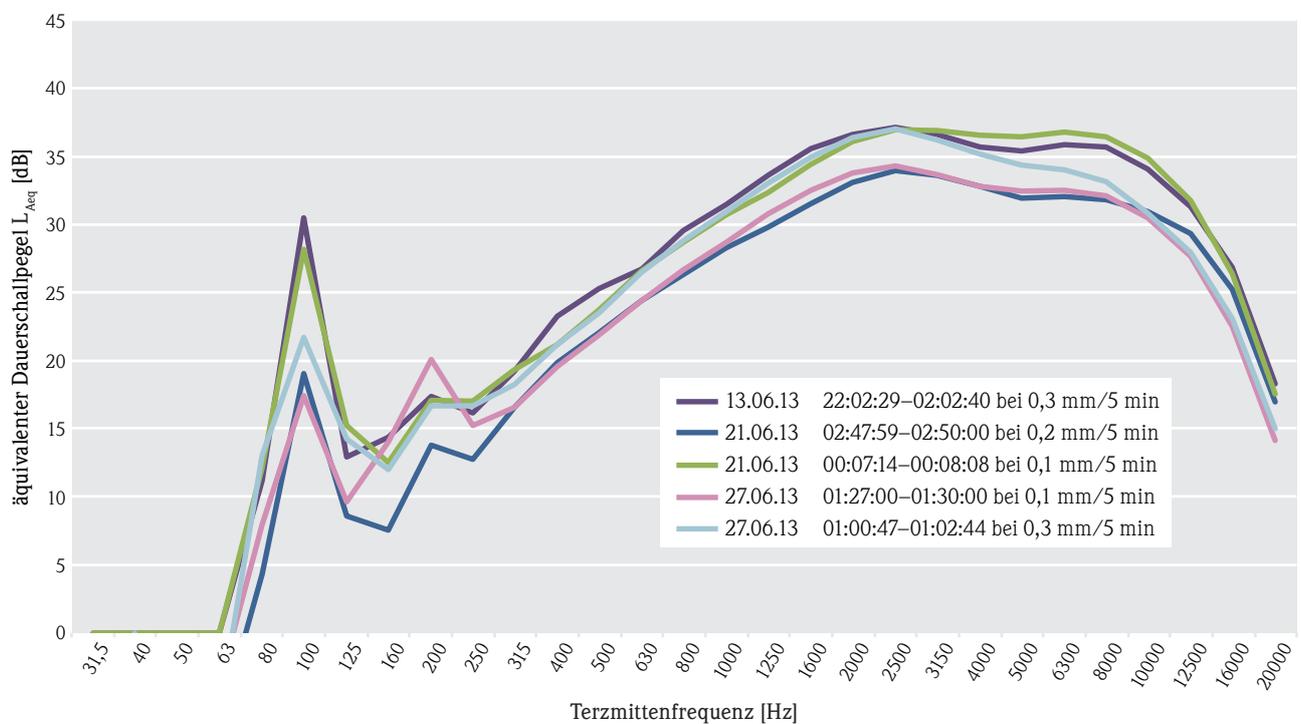


Abb. 28: Beispielhaft fünf verschiedene, fremdgeräuschkorrigierte Terzspektren am MP0 bei Regenereignissen mit 0,1-0,4 mm/5 min in Brilon.

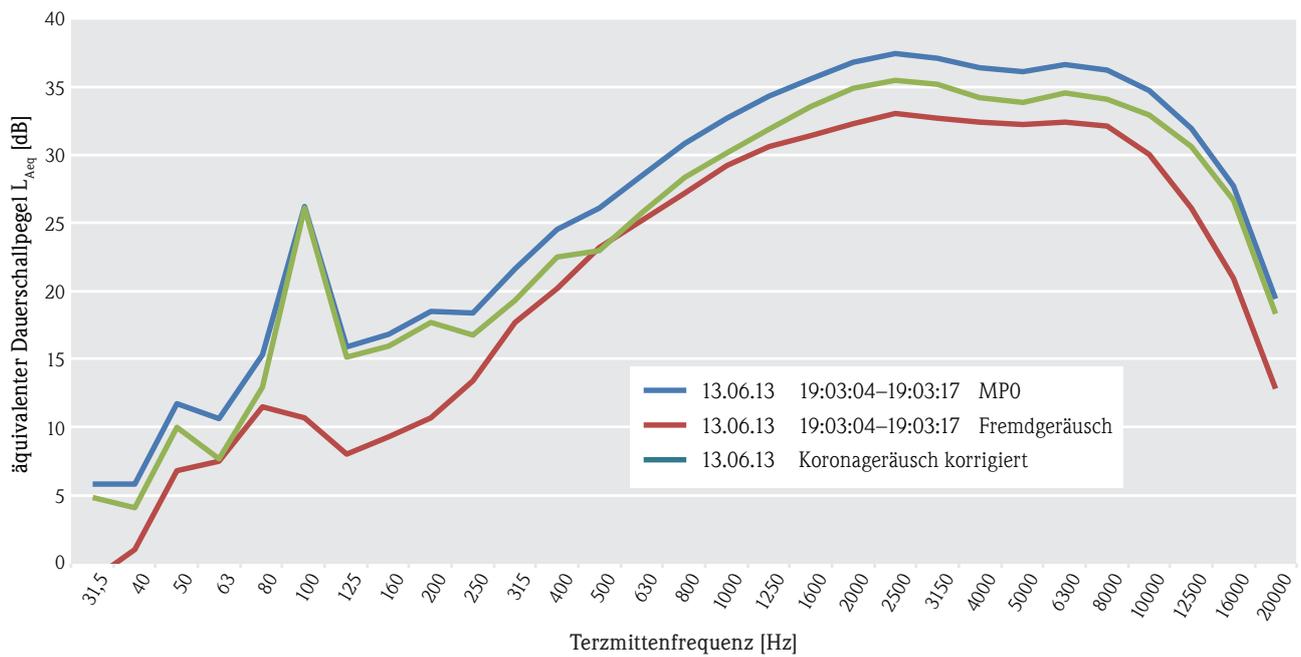


Abb. 29: Beispielhafte Fremdgeräuschkorrektur anhand einer Messung bei 0,3 mm/5 min am Standort Brilon am 13.06.13.

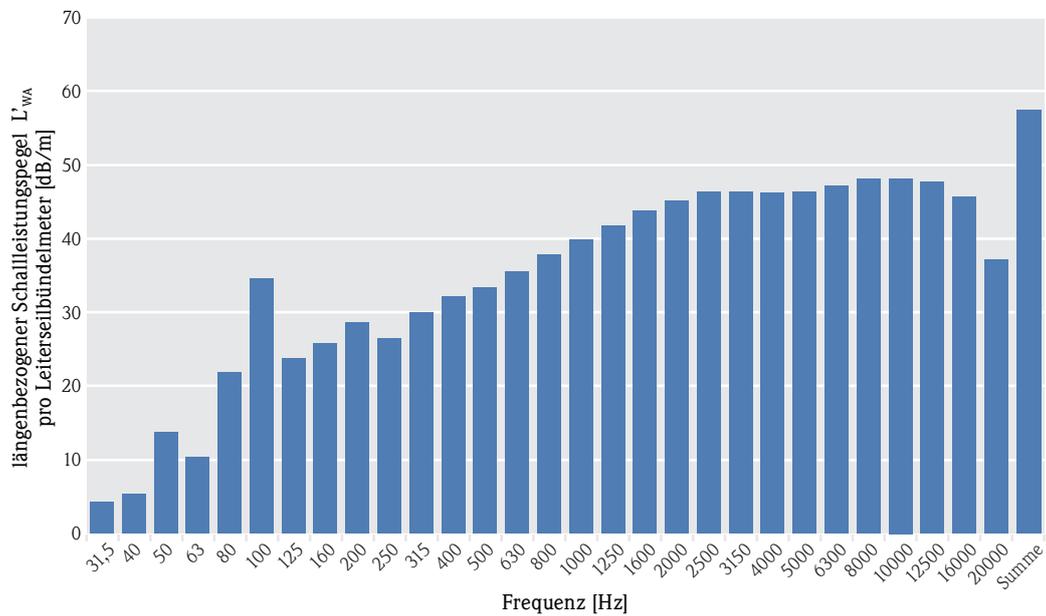


Abb. 30: Gemittelttes, längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum für 0,1–0,4 mm/5 min an „dünnen“ Leiterseilen anhand der insgesamt 25 Messwerte der beiden Standorte Freren und Brilon.

bei 0,1–0,4 mm/5 min und 4 Messwerte aus Freren bei 0,1–0,4 mm/5 min.

Mit dieser Gewichtung ergibt sich nach Korrektur des Eigenrauschens der Messkette folgendes längenbezogenes Schallleistungspegelspektrum für die „dünnen“ Leiterseile bei 0,1–0,4 mm/5 min:  
Der längenbezogene Schallleistungspegel beträgt:

$$L'_{WA} = 56,5 \text{ dB/m Leiterseilbündel}$$

In Abb. 30 ist ein deutlicher 100-Hz-Ton zu erkennen und ein kleinerer Peak bei 200 Hz. Danach folgt ein großer Anstieg im hochfrequenten Bereich, der von ca. 1 kHz bis ca. 16 kHz pegelbestimmend ist. Der hochfrequente Bereich an MP 0 ist bestimmt vom Korona-Bitzeln. Dieser Bereich ist in den meisten Fällen subjektiv kaum vom Regenrauschen zu unterscheiden, da sich beides im gleichen Frequenzspektrum befindet. In weiteren Entfernungen zur Trassenmitte nähern sich die Pegel der Leiterseilgeräusche und des Regenrauschens weiter an, sodass es an den Messpunkten MP 1 bis MP 3 noch schwieriger, bzw. kaum mehr möglich wird, eine klare Trennung zwischen diesen beiden Geräuschen zu ziehen. Nur bei leichtem Nieselregen, der geringe Fremdgeräuschpegel erzeugt, sind die Leiterseilgeräusche noch in weiteren Entfernungen hör- und messbar. Der 100-Hz-Ton konnte vor Ort während den Regemessungen unterhalb der Leiterseile gehört werden. Sowohl in Freren als auch in Brilon jedoch nur bei „konzentriertem Hinhören“, ausgenommen wieder der Nieselregen mit  $\leq 0,1$  mm/5 min. Beim Abschreiten des Feldes von MP 0 Richtung MP 1 konnte festgestellt werden, dass etwa in der Mitte der beiden Messpunkte der 100-Hz-Brummtöne am deutlichsten hörbar war. Am MP 1 war der Brummtöne gerade noch subjektiv wahrnehmbar. Mit zunehmender Entfernung ist der Ton dann bei Regen aufgrund der Überlagerung mit dem Regenrauschen nicht mehr zu hören. Weiterhin konnte beim Abschreiten entlang der Leiterseile von mehreren Sachverständigen, wie schon in Rangendingen, festgestellt werden, dass die Schallabstrahlung gleichmäßig über die Länge der Leiterseile verläuft und keine Punkte mit erhöhter oder verminderter Schallabstrahlung zu ermitteln waren.

#### 4.4.2 Starker Regenniederschlag 0,5–1,0 mm/5 min

Für den starken Regenniederschlag konnten am Standort Freren keine verwertbaren Messungen aufgezeichnet werden. Die 14 verwertbaren Messungen bei 0,5–1,0 mm/5 min wurden alle am Standort Brilon aufgezeichnet. Beispielhaft sind hier fünf Terzspektren in Abb. 31 fremdgeräuschkorrigiert dargestellt.

Der Verlauf der Spektren ist wieder vergleichbar mit den Messungen bei 0,1–0,4 mm Regen/5 min. Allerdings sind die Pegel hier im Mittel höher, sowohl bei dem ausgeprägten 100-Hz-Ton als auch im hochfrequenten Bereich. Nach zeitlich gewichteter energetischer Mittelung aller Terzspektren und der Korrektur des Eigenrauschens der Messkette lässt sich das in Abb. 32 dargestellte längenbezogene Schallleistungspegelspektrum berechnen.

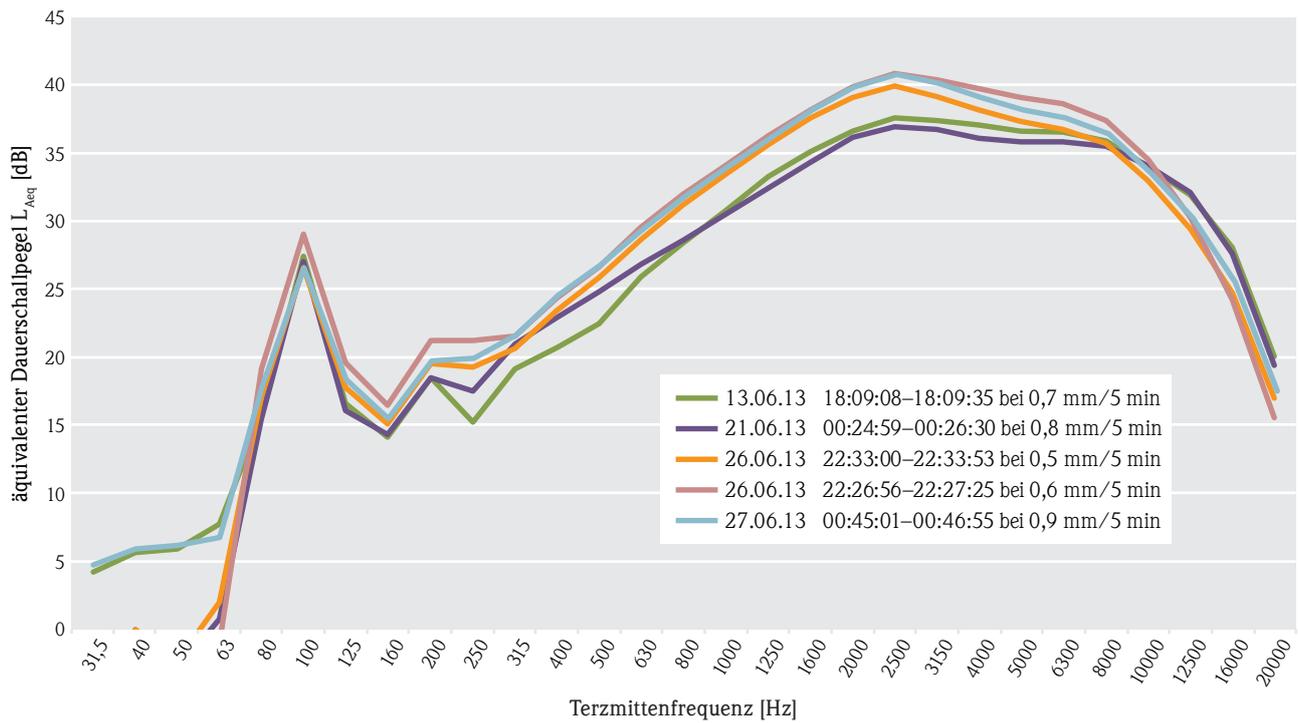
Das Spektrum ähnelt vom Verlauf her sehr stark dem gemittelten längenbezogenen Schallleistungspegelspektrum der Messungen bei 0,1–0,4 mm/5 min an „dünnen“ Leiterseilen. Allerdings sind die Pegel hier leicht erhöht. Sowohl bei dem 100-Hz-Ton als auch im hochfrequenten Bereich. Somit ergibt sich als längenbezogener Schallleistungspegel der „dünnen“ Leiterseile bei 0,5–1,0 mm Regen/5 min:

$$L'_{WA} = 59,7 \text{ dB/m Leiterseilbündel}$$

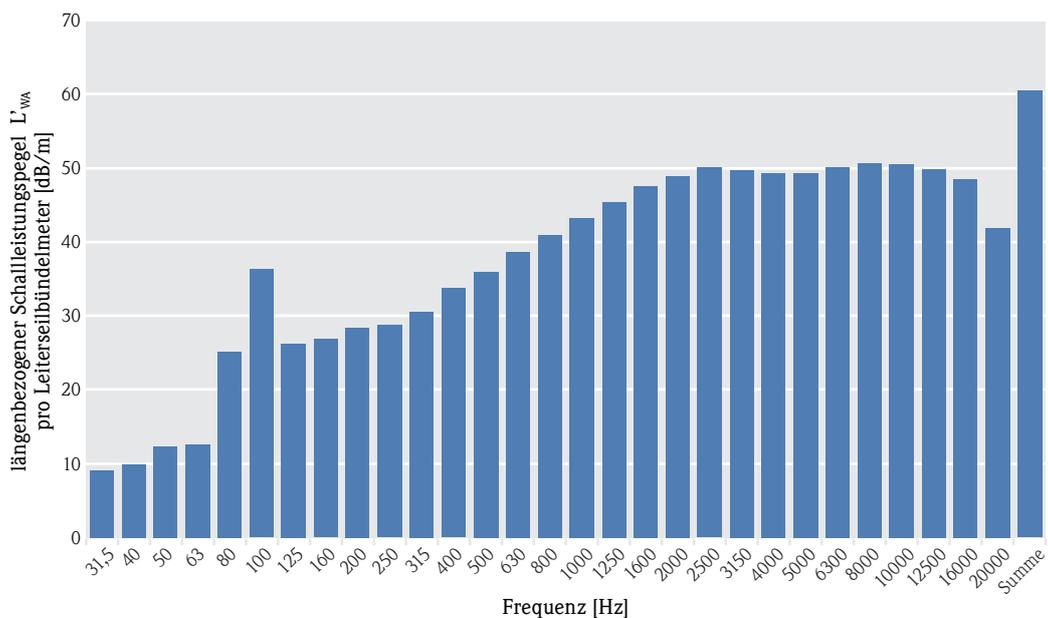
Wie bereits bei den Messungen mit 0,1–0,4 mm/5 min konnten die Leiterseilgeräusche nur etwa bis zum MP 1 in 38 m Entfernung zu den Leiterseilen gehört werden. Mit Entfernungszunahme wurde die Differenzierung vom Regenrauschen immer schwieriger. Hier waren bereits am MP 2 in 63 m Entfernung die Geräusche subjektiv nicht mehr als Leiterseilemission wahrzunehmen.

#### 4.4.3 Leiterseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen

Am Standort Freren konnten in mehreren aufeinander folgenden Nächten vom 03.05.13 bis zum 07.05.13 erhöhte Leiterseilemissionen in niederschlagsfreien Phasen gemessen werden. In jeder dieser Nächte waren auf den Tonaufnahmen deutliche Leitungsgeräusche zu hören, welche sich als „Zwitschern“ oder teilweise als „Rattern“ beschreiben lassen. Dass es sich bei den auf den Tonaufnahmen



**Abb. 31:** Beispielhaft fünf verschiedene fremdgeräuschkorrigierte Terzspektren am MPO bei Regenereignissen mit 0,5–1,0 mm/5 min in Brilon (vollständiger Datensatz siehe Anhang 4).



**Abb. 32:** Gemittelt, längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum für 0,5–1,0 mm/5 min an „dünnen“ Leiterseilen anhand der insgesamt 14 Messwerte am Standort Brilon.

gehörten Geräuschen tatsächlich um Leiterseilgeräusche handelt und nicht um Störsignale, lässt sich dadurch bestätigen, dass bei den ersten beobachteten Messungen in Freren vom 30.04.13 dieselbe Geräuschcharakteristik vor Ort gehört werden konnte, jedoch mit deutlich niedrigeren Pegeln. Tagsüber am 07.05.13 gab es die ersten Regenniederschläge seit Aufbau der Messgeräte in Freren. In der darauffolgenden Nacht vom 07.05.13 auf den 08.05.13 waren keine Leitungsgeräusche mehr in Form von „Zwitschern“ oder „Rattern“ zu hören.

Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist, dass sich Schmutzpartikel oder andere Fremdstoffe während der längeren trockenen Phase an den Leiterseilen ablagern konnten. Diese erzeugen, genauso wie Regentropfen, eine lokale Erhöhung der elektrischen Randfeldstärke und in Folge dessen kann es zu Koronaentladungen kommen. Mit dem Regenschauer am Tag des 07.05.13 wurden diese Partikel von der Leiteroberfläche abgespült. Daraufhin konnten in den folgenden Nächten keine so hohen Leitergeräuschemissionen bei Trockenheit mehr gemessen werden.

In Abb. 33 sind jeweils die Terzspektren der lautesten Stunden der Tage vom 04.05.13 bis zum 07.05.13 ohne Fremdgeräuschkorrektur dargestellt.

Die vier dargestellten Spektren unterscheiden sich deutlich von den bisher gezeigten Spektren bei Re-

gen oder Schneefall. Bei den vorliegenden Spektren sind keine Einzeltöne zu erkennen. Dafür hebt sich der pegelbestimmende hochfrequente Bereich deutlicher vom Rest des Spektrums ab. Der Bereich zwischen 1 000 und 4 000 Hz ist hier eindeutig pegelbestimmend, zu den niedrigeren und höheren Frequenzen hin fallen die Pegel sehr stark ab. Auch vom Höreindruck konnten solche Leiterseilemissionen an den „dicken“ Leiterseilen weder bei Trockenheit noch bei Niederschlag wahrgenommen werden. Die Geräusche in Rangendingen waren vergleichbar mit einem „Knistern“ und „Bitzeln“. Zudem gab es das 100-Hz-Brummen. Die Geräusche bei Trockenheit in Freren ähneln mehr einem „Zwitschern“ oder peitschenden Geräuschen. Vereinzelt kommt es zu einem als „Rattern“ zu beschreibenden Geräusch.

Zum Zeitpunkt der in Abb. 33 dargestellten Messungen wurden von der Fremdgeräuschstation nur Summenpegel und keine Terzspektren aufgezeichnet. Da somit keine terzspektrale Auswertung des fremdgeräuschkorrigierten Pegels vorliegt, wird vereinfacht pauschal in allen Terzen dieselbe Korrektur von 1,3 dB(A) vorgenommen, welche sich als Korrektur im energetisch gemittelten Summenpegel ergibt (vgl. Tab. 6). Von diesem fremdgeräuschkorrigierten Spektrum ist anschließend noch das Eigenrauschen der Messkette energetisch zu subtrahieren.

Für das nun um die Fremdgeräusche und um das

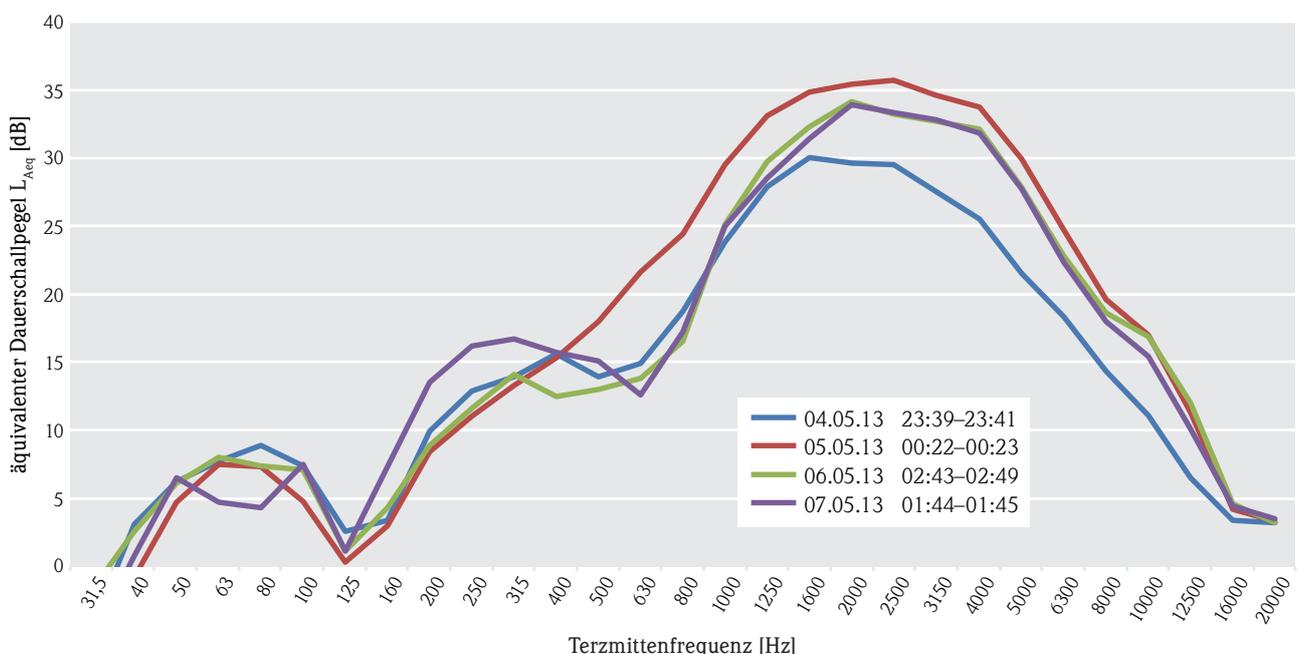
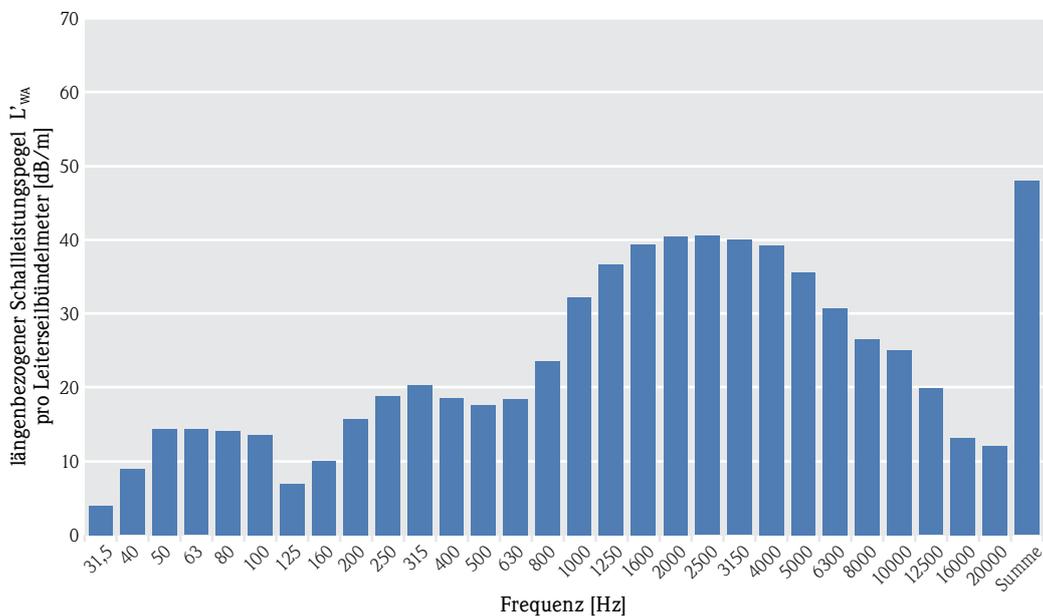


Abb. 33: Terzspektren von vier Messungen während niederschlagsfreier Phasen in Freren (keine Abklingvorgänge nach Niederschlag).

**Tab. 6:** Fremdgeräuschkorrektur der lauten Emissionen bei Trockenheit in Freren im Summenpegel.

Datum	Uhrzeit	$L_{Aeq}$ MP0 [dB]	$L_{Aeq}$ Fremdgeräusch [dB]	Energetische Subtraktion MP0 – FG [dB]
04.05.13	23:39–23:41	37,0	33,5	34,4
05.05.13	00:22–00:23	43,1	36,7	42,0
06.05.13	02:43–02:49	40,9	33,8	40,0
07.05.13	01:44–01:45	40,6	35,2	39,1
<b>Mittelwert</b>		<b>40,9</b>	<b>35,0</b>	<b>39,6</b>



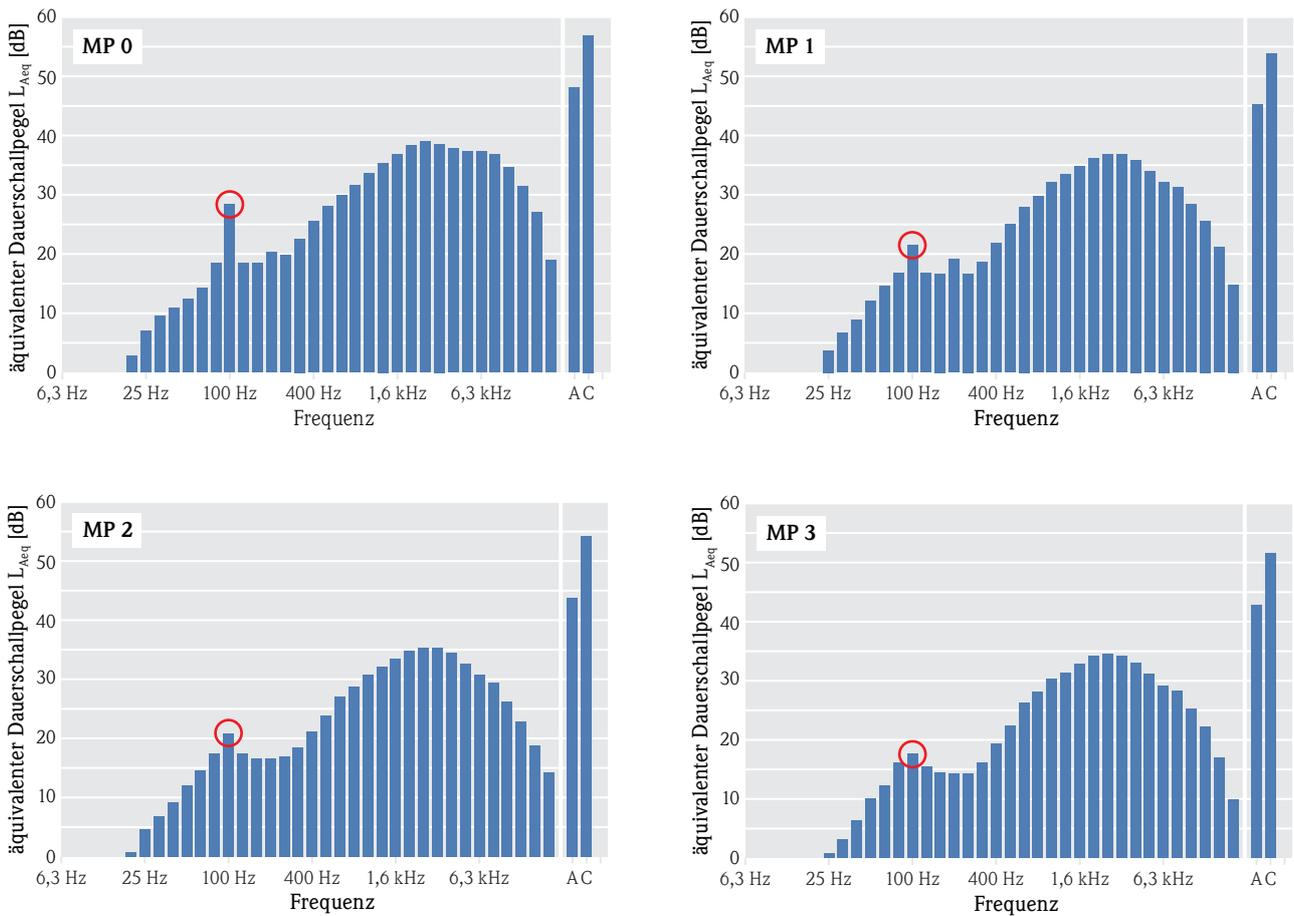
**Abb. 34:** Gemitteltetes längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum für niederschlagsfreie Phasen an „dünnen“ Leiterseilen anhand von vier Messwerten am Standort Freren.

Eigenrauschen korrigierte Spektrum (Abb. 34) in niederschlagsfreien Phasen kann mit der Schallausbreitungssoftware ein längenbezogener Schalleistungspegel berechnet werden, welche möglicherweise einen „worst case“ bei längeren Phasen ohne Niederschläge und Verschmutzung der Leiterseile darstellen kann. Als längenbezogener Schalleistungspegel für laute Emissionen ohne Niederschlag ergibt sich somit:

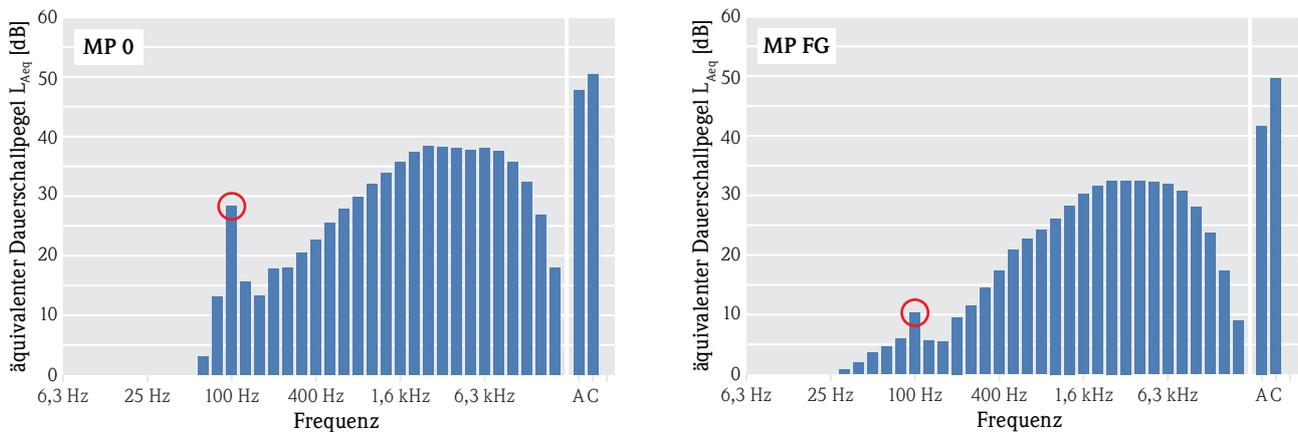
$$L'_{WA} = 48,0 \text{ dB/m Leiterseilbündel}$$

#### 4.4.4 Bewertung der Tonalität bei „dünnen“ Leiterseilen

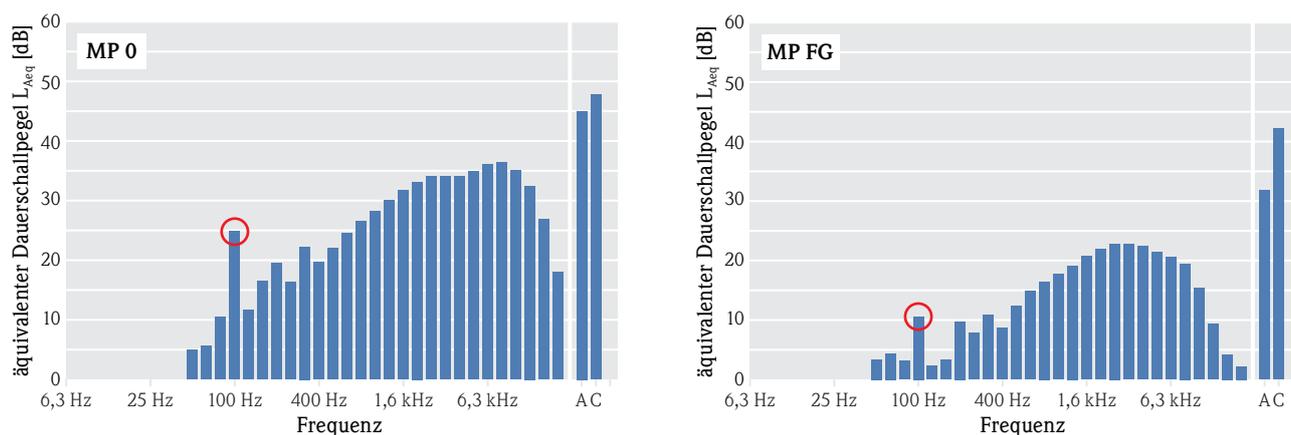
Um die Höhe der Tonalität und deren Abhängigkeit von der Entfernung zur Trassenmitte zu untersuchen, werden im Folgenden beispielhaft die Terzspektren simultaner Messungen an den Messpunkten MP0 bis MP3 bei Regen vergleichend dargestellt. Zunächst die Spektren an den Messpunkten MP0 bis MP3 bei 0,4 mm Regen/5 min.



**Abb. 35:** Terzspektren in der Auswertesoftware bei 0,4 mm Regen/5 min simultan an allen vier Messpunkten aufgezeichnet am 13.06.13 um 21:15:08–21:15:23 Uhr in Brilon. Rot eingekreist ist jeweils der 100-Hz-Ton (Bilder mit gleicher Skalierung und 5-dB-Rasterung).



**Abb. 36:** Terzspektren in der Auswertesoftware bei 0,1 mm Regen/5 min simultan am MP 0 (links) und der Fremdgeräuschstation (rechts) aufgezeichnet am 21.06.13 um 00:07:14–00:08:08 Uhr in Brilon. Rot eingekreist ist jeweils der 100-Hz-Ton. (Bilder mit gleicher Skalierung und 5-dB-Rasterung).



**Abb. 37:** Terzspektren in der Auswertesoftware bei 0,2mm Regen/5 min simultan am MP0 (links) und der Fremdgeräuschstation (rechts) aufgezeichnet am 21.06.13 um 00:02:07–00:03:13 Uhr in Brilon. Rot eingekreist ist jeweils der 100-Hz-Ton (Bilder mit gleicher Skalierung und 5-dB-Rasterung).

**Tab. 7:** Übersicht über die Tonzuschläge nach DIN 45681 [17] und DIN 45645-1 [16] am MP 0 bei Regenereignissen mit Stärken zwischen 0,1 mm/5 min und 0,4 mm/5 min.

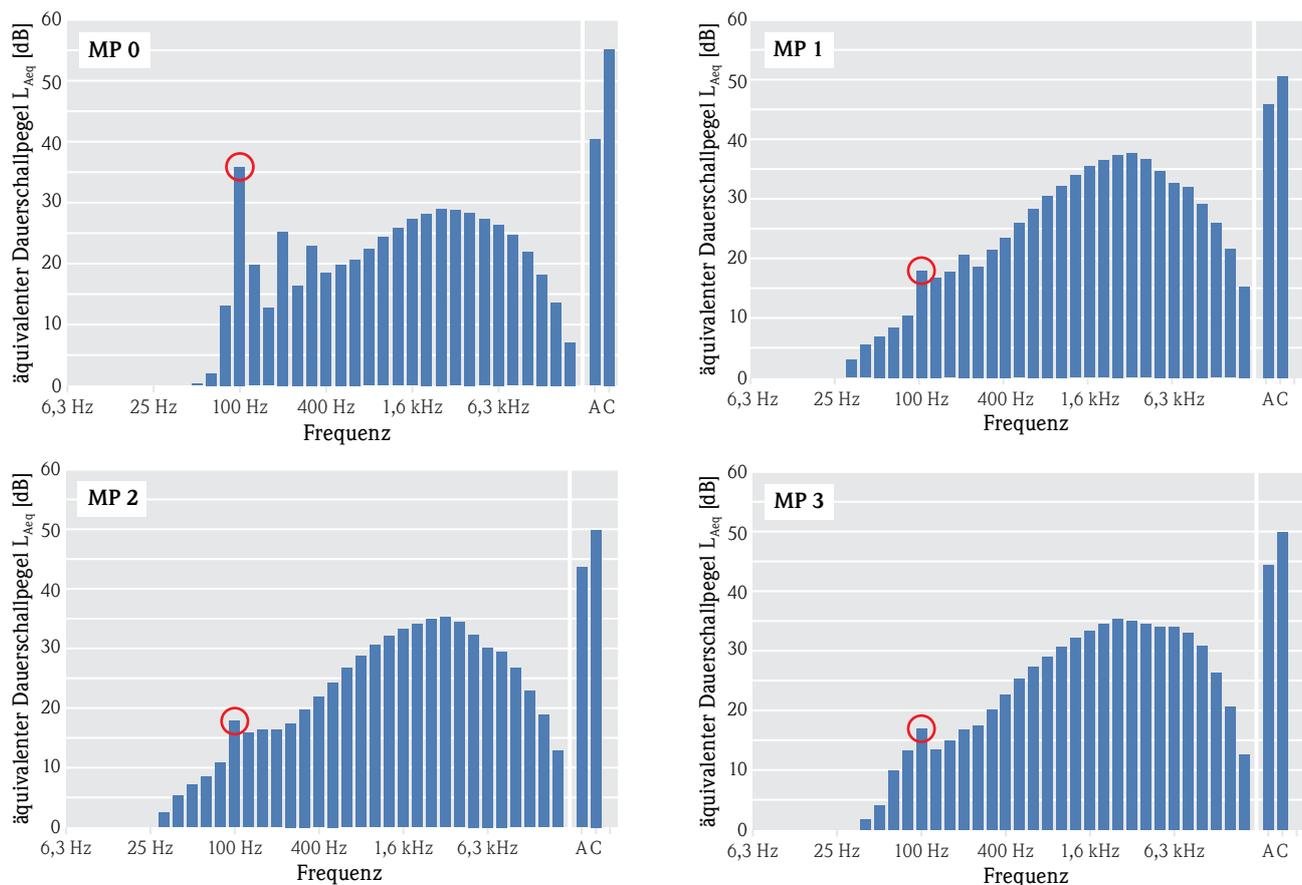
Regenstärke	Datum	Uhrzeit	Tonzuschlag nach DIN 45681	Bewertung Sachverständiger nach TA Lärm/DIN 45645 Teil 1
0,1 mm	13.06.2013	19:17:19–19:17:32	4 dB	3 dB
0,1 mm	21.06.2013	00:07:14–00:08:08	6 dB	6 dB
0,1 mm	27.06.2013	00:25:00–00:29:59	6 dB	6 dB
0,1 mm	27.06.2013	01:27:00–01:30:00	4 dB	3 dB
0,1 mm	27.06.2013	02:25:00–02:26:39	1 dB	0 dB
0,2 mm	21.06.2013	00:02:07–00:03:13	6 dB	6 dB
0,2 mm	21.06.2013	02:47:59–02:50:00	3 dB	3 dB
0,2 mm	27.06.2013	01:30:42–01:32:00	4 dB	3 dB
0,2 mm	27.06.2013	01:43:01–01:45:00	4 dB	3 dB
0,3 mm	13.06.2013	19:03:04–19:03:17	3 dB	3 dB
0,3 mm	13.06.2013	19:05:19–19:05:37	4 dB	3 dB
0,3 mm	13.06.2013	22:02:29–22:02:40	5 dB	6 dB
0,3 mm	27.06.2013	00:57:21–00:58:24	4 dB	3 dB
0,3 mm	27.06.2013	01:00:47–01:02:44	4 dB	3 dB
0,3 mm	27.06.2013	01:06:01–01:07:01	3 dB	3 dB
0,3 mm	27.06.2013	01:38:00–01:39:00	3 dB	3 dB
0,3 mm	27.06.2013	01:46:09–01:46:49	3 dB	3 dB
0,4 mm	13.06.2013	19:13:00–19:13:20	3 dB	3 dB
0,4 mm	13.06.2013	21:15:08–21:15:22	3 dB	3 dB
0,4 mm	13.06.2013	21:16:06–21:16:20	3 dB	3 dB
0,4 mm	27.06.2013	00:53:09–00:53:54	3 dB	3 dB
Mittlerer Tonzuschlag			3,8 dB	3,4 dB → 3 dB

Am MP 0 ist im Terzspektrum der 100-Hz-Ton deutlich sichtbar und nach der Schmalbandanalyse gemäß der DIN 45681 [17] mit einem Tonzuschlag von 3 dB zu beaufschlagen. Bereits am MP 1 hat der 100-Hz-Ton stark abgenommen und am MP 3 hebt er sich kaum noch gegenüber den Nachbarterzen ab. Bei der Analyse weiterer Messungen bei 0,1 – 0,4 mm Regen/5min zeigt sich jedoch, dass bei noch geringeren Regenstärken mit 0,1 oder 0,2 mm/5min der 100-Hz-Ton durchaus auch noch in weiteren Entfernungen sichtbar und hörbar ist. Beispielhaft sollen hier zwei Spektren gezeigt werden, die simultan am MP 0 und der Fremdgeräuschstation aufgezeichnet wurden (Abb. 36 und 37).

Am MP Fremdgeräusch der Messung mit 0,1 mm/5 min (Abb. 36) ergibt sich in 112m Entfernung von der Trassenmitte mit Auswertung nach DIN 45681 [17] immer noch ein Tonzuschlag von 1 dB. Bei der Messung mit 0,2 mm/5 min (Abb. 37) sind es sogar

2 dB Tonzuschlag gemäß DIN 45681 [17]. Vor Ort konnte der Brummtton ebenfalls in dieser Entfernung noch wahrgenommen werden, da das „kaschierende“ Regenrauschen bei diesen Regenmengen hier nur sehr gering war. Allerdings sind die Messumgebungen mit einer offenen – ohne Bebauung – schallabsorbierenden Oberfläche in Form der Wiese/des Ackers idealisiert. In bebauter schallharter Umgebung auf einer realen Immissionsseite ist mit höheren Pegeln durch das Regenrauschen und deutlicherer Kaschierung/Überdeckung zu rechnen.

In Tab. 7 sind für alle zur Ermittlung des längenbezogenen Schalleistungspegels verwendeten Messungen bei 0,1–0,4 mm Regen/5 min die über eine Schmalbandanalyse berechneten Tonzuschläge nach DIN 45681 [17] mit über den Höreindruck der Sachverständigen bewerteten Tonzuschlägen nach TALärm [15] in Verbindung mit DIN 45645-1 [16] am MP 0 vergleichend aufgeführt.



**Abb. 38:** Terzspektren in der Auswertesoftware bei 0,8 mm Regen/5 min simultan an den Messpunkten MP 0 bis MP 2 sowie der Fremdgeräuschstation aufgezeichnet am 21.06.13 um 00:24:59–00:26:30 in Brilon. Rot eingekreist ist jeweils der 100-Hz-Ton (Bilder mit gleicher Skalierung und 5 dB Rasterung).

Hier fällt auf, dass bei den niedrigeren Regenstärken 0,1–0,2 mm/5 min (9 Messungen) der durchschnittliche Tonzuschlag bei 3,7 dB nach der TALärm [15] und DIN 45645-1 [16] liegen würde und bei 0,3–0,4 mm/5 min (12 Messungen) nur bei 3,3 dB. Ein anzunehmender Grund für diesen Effekt ist, dass bei zunehmender Regenstärke das Regenrauschen den Einzelton zunehmend überdeckt bzw. den Höreindruck „maskiert“.

Bei den in Abb. 38 dargestellten Terzspektren bei 0,8 mm Regen/5 min ist am MP0 der 100-Hz-Ton ebenfalls herausstechend. Aus der Schmalbandanalyse nach DIN 45681 [17] resultiert hier ein erhöhter Tonzuschlag von 5 dB, was einer Bewertung nach Höreindruck eines Sachverständigen von 6 dB gemäß TA Lärm in Verbindung mit DIN 45645 Teil 1 [16] entspricht. An den restlichen Messpunkten hingegen hebt die 100-Hz-Terz sich nur noch geringfügig gegenüber den Nachbarterzen ab, sodass keine

Tonzuschläge mehr zu erteilen sind. Auch auf den Tonaufnahmen ist der Brummtton kaum noch wahrzunehmen.

Auch bei der Auswertung weiterer Messungen bei Starkregen bestätigt sich teilweise die starke Tonhaltigkeit unterhalb der Leiterseile, wie die Darstellung des Spektrums bei 1,0 mm/5 min in Abb. 39 verdeutlicht.

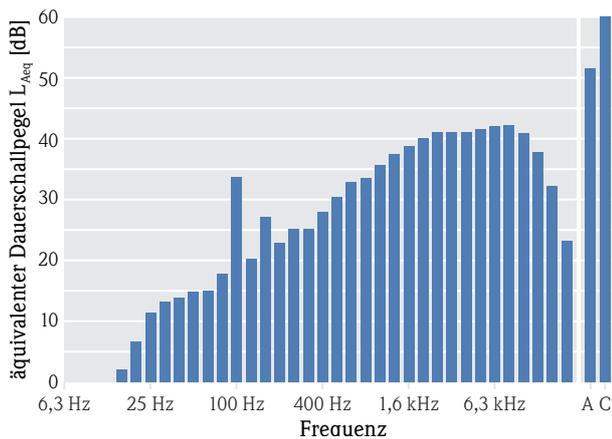
Auch bei diesem Spektrum ergibt sich nach Analyse mittels DIN 45681 [17] ein Tonzuschlag von 5 dB am MP 0. Auf den Tonaufnahmen ist der Brummtton bei 100 Hz sehr gut hörbar. An den weiteren Messpunkten MP 1 bis MP 3 ergeben sich erneut nur Zuschläge von maximal 1 dB, entsprechend 0 dB nach TA Lärm und DIN 45645 Teil 1 [16].

In Tab. 8 sind für alle zur Ermittlung des längenbezogenen Schallleistungspegels verwendeten Messungen bei 0,5 bis 1,0 mm Regen/5 min die über eine Schmalbandanalyse berechneten Tonzuschläge

**Tab. 8:** Übersicht über die Tonzuschläge nach DIN 45681 [17] und DIN 45645-1 [16] am MP0 bei Regenereignissen mit Stärken zwischen 0,5 mm/5 min und 1,0 mm/5 min.

Regenstärke	Datum	Uhrzeit	Tonzuschlag nach DIN 45681	Bewertung Sachverständiger nach TA Lärm/DIN 45645 Teil 1
0,5 mm	13.06.2013	20:48:03–20:48:20	4 dB	3 dB
0,5 mm	13.06.2013	21:06:29–21:06:47	3 dB	3 dB
0,5 mm	26.06.2013	22:33:00–22:33:53	5 dB	6 dB
0,5 mm	27.06.2013	00:37:16–00:38:05	4 dB	3 dB
0,6 mm	26.06.2013	22:26:56–22:27:25	5 dB	6 dB
0,6 mm	26.06.2013	22:39:00–22:40:01	3 dB	3 dB
0,6 mm	27.06.2013	01:11:25–01:14:59	4 dB	3 dB
0,6 mm	27.06.2013	01:53:00–01:55:00	4 dB	3 dB
0,7 mm	13.06.2013	18:09:08–18:09:35	4 dB	3 dB
0,8 mm	21.06.2013	00:24:59–00:26:30	5 dB	6 dB
0,8 mm	26.06.2013	22:21:34–22:22:30	6 dB	6 dB
0,9 mm	27.06.2013	00:45:01–00:46:55	4 dB	3 dB
1,0 mm	13.06.2013	18:00:37–18:00:49	5 dB	6 dB
1,0 mm	26.06.2013	22:42:13–22:43:19	2 dB	3 dB
Mittlerer Tonzuschlag			4,1	4,1 dB → 3 dB

Hinweise: Dargestellte ermittelte und bewertete Zusammenhänge für den Tonzuschlag gelten für hier gemessene, längenbezogene Schallleistungspegel. Sie können andere Werte annehmen, sollten die längenbezogenen Schallleistungspegel aufgrund anderer Seilkonstellationen z.B. wesentlich höhere Werte annehmen. Auch sind Interferenzeffekte bei hier relevanten tiefen Terzfrequenzen darüber hinaus örtlich nicht vorhersagbar.



**Abb. 39:** Terzspektrum am MP0 bei 1,0 mm Regen/5 min am 13.06.13 um 18:00:37–18:00:49 Uhr in Brilon.

nach DIN 45681 [17] mit über den Höreindruck der Sachverständigen bewerteten Tonzuschläge nach TA Lärm [15] in Verbindung mit DIN 45645-1 [16] am MP 0 vergleichend aufgeführt.

Beim Vergleich zu den Messungen bei 0,1–0,4 mm Regen/5 min fällt auf, dass der mittlere Tonzuschlag nach TA Lärm [15] und DIN 45645-1 [16] nur von 3,8 dB auf 4,1 dB gestiegen ist und somit sowohl bei leichtem als auch bei starkem Regen ein Tonzuschlag von 3 dB unterhalb der Leiterseile zu vergeben wäre. Vergleicht man die Höhe des 100-Hz-Tones, so ist zu erkennen, dass bei höheren Regenstärken der 100-Hz-Ton höhere Pegel erreicht. So sind es im Mittelungsspektrum bei 0,1–0,4 mm/5 min 22,5 dB(A) und im Mittelungsspektrum bei 0,5–1,0 mm/5 min 26,2 dB(A). Da jedoch bei höheren Regenstärken auch das Fremdgeräusch durch das Regenrauschen ansteigt, sticht der erhöhte Einzelton nicht mehr so stark hervor und die beiden Effekte gleichen sich ungefähr aus.

## 4.5 Vertrauensbereiche der Messdaten

Um eine Aussage über die Genauigkeit der ermittelten Messwertkollektive zu treffen, wurden nach VDI 3723 Blatt 1 für jeden Standort und jede Niederschlagsklasse die jeweiligen Vertrauensbereiche berechnet. Der Vertrauensbereich ist ein Maß für die Reproduzierbarkeit und damit der Qualität der Aus-

sage. Vertrauensbereiche können bei der Einhaltung von Richt- und Grenzwerten sowie beim Vergleich wiederholt vorgenommener Untersuchungen am selben Objekt herangezogen werden [5]. Berechnet wurde dabei der „Vertrauensbereich bei unbekannter Standardabweichung“ nach Kapitel 5.1.2.2. Die dabei zugrunde gelegten Formeln sind nachfolgend aufgeführt:

$$L_O = L_{x,m} + 10 \lg \left( 1 + \frac{Z' t_{n-1}}{\sqrt{n}} \right) \text{ dB} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$L_U = L_{x,m} - 10 \lg \left( 1 - \frac{Z' t_{n-1}}{\sqrt{n}} \right) \text{ dB} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\text{Mit } Z' = s \cdot 10^{-0,1 L_{x,m}/\text{dB}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Hierbei ist  $s$  die Standardabweichung der bezogenen Schalldruckquadrate.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (10^{0,1 L_x^{(i)}/\text{dB}} - 10^{L_{x,m}/\text{dB}})^2 \quad \text{Gleichung 4}$$

Der Term  $t_{n-1}$  wird als Studentfaktor bezeichnet und kann aus Tab. 3 der VDI 3723 Blatt 1 [5] abgelesen werden. Die angegebenen Werte sind so gewählt, dass der Erwartungswert mit einer Wahrscheinlichkeit 0,8 im Vertrauensbereich liegt. Dies bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,9 der gesuchte Wert der Grundgesamtheit unterhalb der oberen Grenze des Vertrauensbereichs bzw. oberhalb der unteren Grenze liegt [5].

In Tab. 9 sind alle ermittelten Vertrauensbereiche für die zugehörigen Standorte und Niederschlagsstärken aufgeführt.

In Tab. 10 wurde zusätzlich das Schwankungsintervall mit dem minimal und maximal gemessenen  $L'_{WA}$  Wert angegeben. Ergänzend wurde zur Vergleichbarkeit mit der Grafik aus [14] (siehe Kapitel 5.3 „Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten“) noch der Überschreitungspiegel mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % für den oberen Vertrauensbereich und für den unteren der Wert des Vertrauensbereiches der Mittelwert abzüglich der Standardabweichung angegeben.

Die Wahl des oberen und unteren Vertrauensbereichs aus Tab. 10 orientiert sich an der Vorgehensweise des Ingenieurbüros Kurz und Fischer GmbH bei der Darstellung von Messergebnissen in [14] (vgl. Kapitel 5.3 Abb. 42).

**Tab. 9:** Vertrauensbereiche (VB) der Schalleistungen mit  $P = 0,8$  zweiseitig bzw.  $P = 0,9$  einseitig für verschiedene Leiterseiltypen und Niederschlagsstärken nach VDI 3723-1.

Standort	Leiterseilart	Niederschlagsstärke	Anzahl Messdaten	$L'_{WA} \pm VB$ in dB/m	$L'_{WA}$ -Min	$L'_{WA}$ -Max
Rangendingen	„dick“	„leicht/mittel“	25	40,8 +0,5 -0,6	36,3	43,4
Rangendingen	„dick“	„stark“	30	48,6 +0,5 -0,6	44,4	52,8
Freren	„dünn“	0,1-0,4 mm/5 min	4	58,1 +1,2 -1,6	56,2	59,8
Brilon	„dünn“	0,1-0,4 mm/5 min	21	56,1 +0,5 -0,6	47,1	58,7
Brilon	„dünn“	0,5-1,0 mm/5 min	14	59,7 +0,7 -0,8	57,1	62,8

**Tab. 10:** Angabe des Schwankungsintervalls verschiedener Schalleistungen mit  $P = 0,95$  für den oberen Vertrauensbereich und der Standardabweichung als unterer Vertrauensbereich.

Standort	Leiterseilart	Niederschlagsstärke	Anzahl Messdaten	$L'_{WA} +VB/-StAbw$ in dB/m
Rangendingen	„dick“	„leicht/mittel“	25	40,8 +0,6 -1,8
Rangendingen	„dick“	„stark“	30	48,6 +0,7 -2,18
Freren	„dünn“	0,1-0,4 mm/5 min	4	58,1 +1,6 -1,2
Brilon	„dünn“	0,1-0,4 mm/5 min	21	56,1 +0,7 -2,6
Brilon	„dünn“	0,5-1,0 mm/5 min	14	59,7 +0,9 -1,8

## 5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Emissionsmodelle

Anhand der dargestellten Ergebnisse lassen sich Emissionsmodelle für „dicke“ und für „dünn“ Leiterseile bei verschiedenen Witterungsbedingungen ableiten.

#### 5.1.1 Emissionsmodell „dicke“ Leiterseile

Als Grundlage für das Emissionsmodell der „dicken“ Leiterseile dienen die Messergebnisse aus Rangendingen. Verwendet werden können diese Daten für

Leiterseile mit vergleichbaren Querschnitten und Materialien wie sie in Rangendingen verbaut sind (Al/St 560/50). Unterschieden wird dabei zwischen leichtem und starkem Schneeniederschlag sowie leichtem und starkem Regenniederschlag. Weiterhin gibt es einen Maximalansatz für Leiterseilemissionen bei Trockenheit. Der bei Trockenheit ermittelte längenbezogene Schalleistungspegel stellt eine Obergrenze dar, da es nicht möglich war in diesem niedrigen Pegelbereich gänzlich fremdgeräuschfrei zu messen.

Für leichten Schneeniederschlag werden die leisen bis mittleren Emissionsdaten verwendet (vgl. Kapitel 4.3.1), da bei beobachteten Messungen vergleichbare Pegel auftraten wenn es leichten Schneefall gab.

Der längenbezogene Schalleistungspegel für einen Meter Leiterseilbündel bei leisen Emissionen lag bei  $L'_{WA} = 40,8$  dB/m Leiterseilbündel. Da jedoch ein eindeutiger Einzelton bei 100 Hz hörbar ist, welcher bei Schneefall nicht durch ein Rauschen überdeckt wird, sollte hier durchgängig mit einem Tonzuschlag von 3 dB immissionsseitig gerechnet werden. Das Oktavspektrum ohne den Tonzuschlag ist Tab. 11 zu entnehmen.

Für starken Schneeniederschlag werden entsprechend die lauten Leiterseilemissionen aus Kapitel 4.3.2 verwendet, da solche Emissionen bei beobachteten Messungen nur bei starkem Schneefall aufgetreten sind. Hier lag der längenbezogene Schalleistungspegel bei 48,6 dB(A)/m Leiterseilbündel. Zusätzlich wird ein durchgängiger Tonzuschlag von 6 dB immissionsseitig erteilt (vgl. Kapitel 4.3.5). Tab. 12 zeigt das Oktavspektrum ohne Tonzuschlag. Wie bereits im Kapitel 4.3.4 dargestellt wurde, liegen die 100-Hz-Töne sowohl bei Regenniederschlag als auch bei Schneeniederschlag in vergleichbaren Höhen. Da in Rangendingen keine Möglichkeit zur Bestimmung eines repräsentativen Fremdgeräusches bei Regen vorhanden war, ist es an dieser Stelle sinnvoll die Schneemessungen auf den Regenniederschlag zu übertragen. Für leichten Regenniederschlag werden folglich dieselben Messwerte benutzt

wie bei leichtem Schneeniederschlag. Da bei niedrigen Niederschlägen das Fremdgeräusch durch Regengeräuschen relativ gering ist, wird bei leichtem Regenniederschlag auch durchgängig ein Tonzuschlag von 3 dB immissionsseitig erteilt. Bei leichtem Regen wird folglich mit demselben Spektrum gerechnet wie bei leichtem Schneefall (Tab. 13).

Bei starkem Regenniederschlag werden die Messwerte der lauten Leiterseilemissionen verwendet. Anders als bei starkem Schneeniederschlag wird aufgrund des erhöhten Regengeräusches und der damit einhergehenden Überdeckung der Leiterseilgeräusche nicht mehr flächendeckend mit einem Tonzuschlag von 6 dB gerechnet, so wie es bei starkem Schneeniederschlag der Fall ist. Stattdessen ist unterhalb der Leiterseile ein Tonzuschlag von 3 dB gerechtfertigt. Da am MP 1 bei starkem Regen bereits der 100-Hz-Ton nicht mehr mess- und hörbar ist, vgl. hierzu Kapitel 4.3.5 Bewertung der Tonalität bei „dicken“ Leiterseilen“, sollte der Tonzuschlag bei starkem Regen nicht mehr flächendeckend vergeben werden, sondern nur bis zu einer Entfernung von ca. 25 m von der Trassenmitte. Bis zu welchem Punkt der Ton genau hörbar und messbar ist, kann aufgrund fehlender Messwerte zwischen MP 0 und MP 1 nicht sicher gesagt werden. 25 m ist aber ein sicherer und sinnvoller Wert, da die Tonalität, bewertet nach der DIN 45681

**Tab. 11:** Schalleistung von „dicken“ Leiterseilen bei **leichtem Schneeniederschlag**. Tonzuschlag  $K_T = 3$  dB flächendeckend für alle Immissionspunkte anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel</b> $L'_{WA}$ pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]	15,6	26,8	24,7	27,0	30,5	34,9	35,0	35,4	<b>40,8</b>

**Tab. 12:** Schalleistung von „dicken“ Leiterseilen bei **starkem Schneeniederschlag**. Tonzuschlag  $K_T = 6$  dB flächendeckend für alle Immissionspunkte anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel</b> $L'_{WA}$ pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]	20,6	40,6	32,5	32,6	37,2	42,0	43,2	42,0	<b>48,6</b>

**Tab. 13:** Schalleistung von „dicken“ Leiterseilen bei **leichtem Regenniederschlag**. Tonzuschlag  $K_T = 3$  dB flächendeckend für alle Immissionspunkte anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel</b> $L'_{WA}$ pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]	15,6	26,8	24,7	27,0	30,5	34,9	35,0	35,4	<b>40,8</b>

**Tab. 14:** Schallleistung von „dicken“ Leiterseilen bei **starkem Regenniederschlag** in Entfernungen **bis** 25 m von der Trassenmitte mit  $K_T = 3$  dB, **ab** 25 m mit  $K_T = 0$  dB anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schallleistungspegel</b> $L'_{WA}$ pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]	20,6	40,6	32,5	32,6	37,2	42,0	43,2	42,0	<b>48,6</b>

**Tab. 15:** Schallleistung von „dicken“ Leiterseilen bei **Trockenheit**.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schallleistungspegel</b> $L'_{WA}$ pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]	16,2	18,1	23,2	26,5	24,1	27,5	21,6	17,8	<b>32,5</b>

Hinweis: Dargestellte ermittelte und bewertete Zusammenhänge für den Tonzuschlag gelten für hier gemessene längenbezogene Schallleistungspegel. Sie können andere Werte annehmen, sollten die längenbezogenen Schallleistungspegel aufgrund anderer Seilkonstellationen z.B. wesentlich höhere Werte annehmen.

[17], vom MP0 mit 3 dB zum MP 1 mit 0 dB stark abnimmt und eine Entfernung von 25 m bereits ca. 2/3 der Strecke vom MP0 zum MP 1 bedeuten. So ergeben sich bei starkem Regen zwei Emissionsansätze. Von 0–25 m Entfernung mit 3 dB Tonzuschlag und ab 25 m Entfernung ohne Tonzuschlag (Tab. 14). In niederschlagsfreien Phasen konnten in einigen Stunden sehr leise Leiterseilgeräusche in Form von „Knistern“ und teilweise „Zwitschern“ gehört werden. Eine tonale Komponente trat bei Trockenheit nicht auf. Aufgrund der extrem niedrigen Pegel gibt es keine Aufnahmen bei denen die Leiterseilemissionen ohne den Einfluss des stationären Umweltrauschens ausgewertet werden konnten. Daher stellt der nachfolgende Emissionsansatz einen Maximalansatz dar (Tab. 15).

### 5.1.2 Emissionsmodell „dünne“ Leiterseile

Basisdaten für das Emissionsmodell „dünne“ Leiterseile sind die Messungen aus Brilon (Al/St 240/40) und Freren (Al/St 265/35). Unterschieden werden hierbei die zwei Ansätze mit 0,1–0,4 mm Regenniederschlag pro 5 Minuten und 0,5–1,0 mm Regenniederschlag pro 5 Minuten. Zusätzlich gibt es bei den „dünnen“ Leiterseilen aufgrund der Messungen in Freren (vgl. Kapitel 4.4.3) eine Betrachtung des längenbezogenen Schallleistungspegels bei Trockenheit bzw. ohne messbaren Niederschlag. Da es während des Messzeitraums in Freren und Brilon zu keinen

Schneeniederschlägen kam, kann zu einem möglichen Emissionsmodell bei Schnee keine Aussage getroffen werden.

Für die Regenstärken 0,1–0,4 mm/5 min liegen 21 Messwerte vom Standort Brilon sowie vier Messwerte vom Standort Freren vor (insgesamt 25 Werte). Zur Berechnung eines energetisch gemittelten längenbezogenen Schallleistungspegels der Leiterseile werden die Spektren aus Brilon und Freren entsprechend der Anzahl an Messwerten gewichtet. Es wurden 21 Werte aus Brilon bei 0,1–0,4 mm/5 min und vier Werte aus Freren bei 0,1–0,4 mm/5 min verwendet. Zudem wird anhand der Tonalität unterhalb der Leiterseile und deren Abnahme mit der Entfernung ein flächendeckender Tonzuschlag von 3 dB immissionsseitig erteilt. Somit ergibt sich ein Emissionsansatz der in Tab. 16 dargestellt ist.

Für die Regenstärke 0,5–1,0 mm/5 min liegen vom Standort Freren keine Messwerte vor. Daher können nur die 14 Messungen aus Brilon verwertet werden. Wie bei den niedrigen Regenstärken sollte hier unterhalb der Leiterseile ein Tonzuschlag von 3 dB erteilt werden. Aufgrund der zunehmenden Überdeckung des 100-Hz-Brummtones durch das Regenrauschen wird der Zuschlag jedoch nicht flächendeckend vergeben sondern, wie bereits beim Emissionsmodell Rangendingen, nur bis zu einer Entfernung von 25 m von der Trassenmitte (Tab. 17).

Bei den Messungen in Freren konnten zusätzlich hohe Schalldruckpegel nach längeren niederschlagsfreien Phasen gemessen werden. Insgesamt wurden die Messungen von vier Tagen berücksichtigt. Eine

**Tab. 16:** Schalleistung von „dünnen“ Leiterseilen bei **0,1–0,4 mm Regenniederschlag pro 5 Minuten mit  $K_T = 3$  dB** flächendeckend für alle Immissionspunkte anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel <math>L'_{WA}</math> pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]</b>	22,9	35,4	33,4	38,7	44,9	50,0	51,0	52,5	<b>56,5</b>

**Tab. 17:** Schalleistung von „dünnen“ Leiterseilen bei **0,5–1,0 mm Regenniederschlag pro 5 Minuten für Entfernungen bis 25 m von der Trassenmitte ist  $K_T = 3$  dB, ab 25 m von der Trassenmitte  $K_T = 0$  dB** anzuwenden (in Tabelle nicht enthalten).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel <math>L'_{WA}</math> pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]</b>	25,5	37,1	34,2	41,3	48,3	53,7	54,3	55,3	<b>59,7</b>

**Tab. 18:** Schalleistung von „dünnen“ Leiterseilen bei anhaltender **Trockenheit**.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ges
<b>längenbezogener Schalleistungspegel <math>L'_{WA}</math> pro Leiterseilbündelmeter [dB/m]</b>	19,0	15,8	23,5	23,0	38,3	44,9	43,6	33,5	<b>48,0</b>

Tonalität ist hier nicht gegeben, da sich das Spektrum bei Trockenheit (ohne messbaren Niederschlag) von den Messungen mit Niederschlägen terzspektral unterscheidet. Es ist kein 100-Hz-Brummtön vorhanden, stattdessen ist der pegelbestimmende hochfrequente Bereich nicht so breitbandig wie mit den Niederschlägen und nur zwischen 1 000 und 4 000 Hz deutlich pegelbestimmend. Es ergibt sich das in Tab. 18 dargestellte längenbezogene Schalleistungspegelspektrum.

## 5.2 Vergleich der Ergebnisse zwischen „dicken“ und „dünnen“ Leiterseilen

Ziel der dargestellten Messungen war es, unter anderem, den geplanten positiven Effekt der Lärminderung durch den Verbau von „dicken“ Leiterseilen zu überprüfen. Diese Wirkung kann anhand der hier ermittelten Messwerte und dargestellten längenbezogenen Schalleistungspegel eindeutig bestätigt werden. Aufgrund der verschiedenen Messbedingungen kann zwar kein direkter Vergleich der Messwerte bei identischen Bedingungen stattfinden.

Den. Dass die Ergebnisse der Schneemessungen von Rangendingen aber auch auf Messungen bei Regen übertragbar sind, wurde bereits erläutert. Daher sollen im Folgenden die Emissionsansätze „leichter Regen“ und „starker Regen“ in Rangendingen mit den Emissionsansätzen „0,1–0,4 mm Regen/5 min“ und „0,5–1,0 mm Regen/5 min“ aus Brilon und Freren verglichen werden.

Für den Ansatz „leichter Regen“, der auf Messwerten bei fremdgeräuschfreiem leichten Schneeniederschlag basiert, wurde für die „dicken“ Leiterseile ein längenbezogener Schalleistungspegel von 40,8 dB(A)/m Leiterseilbündel ermittelt. Für die „dünnen“ Leiterseile ergibt sich bei 0,1–0,4 mm Regen/5 min ein längenbezogener Schalleistungspegel von 56,5 dB(A)/m Leiterseilbündel. Die Differenz beträgt also 15,7 dB(A)/m Leiterseilbündel. Bei „starkem Regen“ beträgt der längenbezogene Schalleistungspegel der „dicken“ Leiterseile 48,6 dB(A)/m Leiterseilbündel. Für die „dünnen“ Leiterseile ergibt sich bei 0,5–1,0 mm Regen/5 min ein längenbezogener Schalleistungspegel von 59,7 dB(A)/m Leiterseilbündel. Hier beträgt die Differenz 11,1 dB(A)/m Leiterseilbündel.

Wie bedeutend diese Differenzen von 11,1 respektive 15,7 dB(A)/m Leiterseilbündel sind, lässt sich leicht anhand der Immissionsrichtwerte aus der TA Lärm

[15] Kapitel 6.1 „Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden“ festmachen. 15 dB(A) Unterschied können entscheiden, ob die Richtwerte eines Reinen Wohngebietes (WR) eingehalten werden können oder lediglich die Richtwerte

in einem Gewerbegebiet (GE).

Aus den in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnissen kann somit abgeleitet werden, dass die Anwendung und Planung von „dicken“ Leiterseilen an Stelle von „dünnen“ Leiterseilen eine sinnvolle und

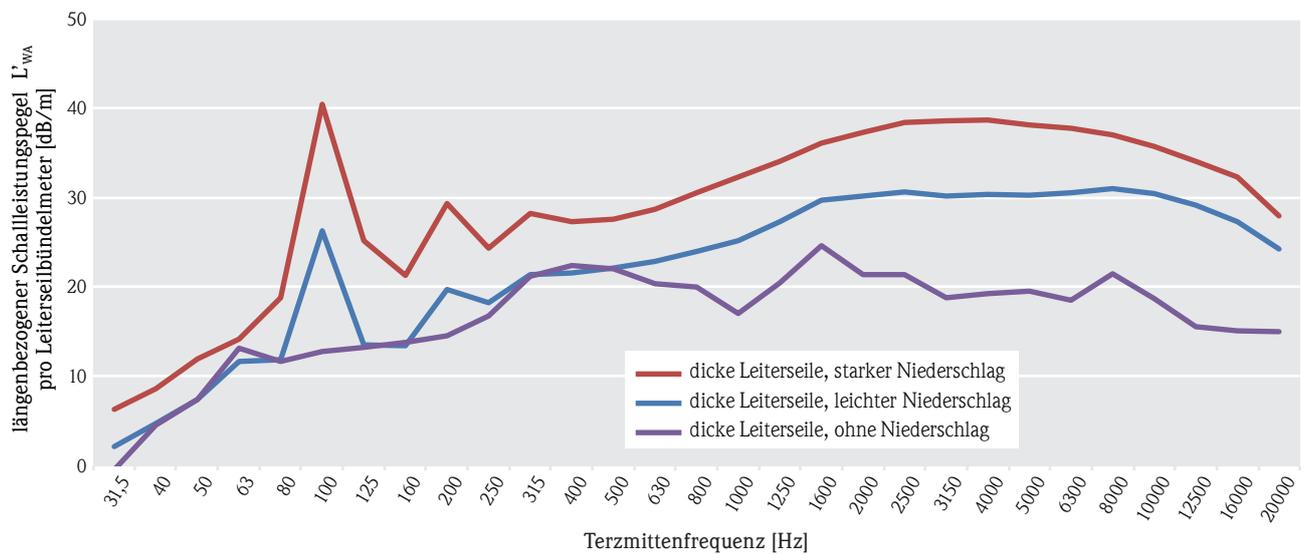


Abb. 40: Übersicht der terzspektralen längenbezogenen Schalleistungspegel für „dicke“ Leiterseile bei verschiedenen Witterungen (Niederschlag in Form von Schneefall).

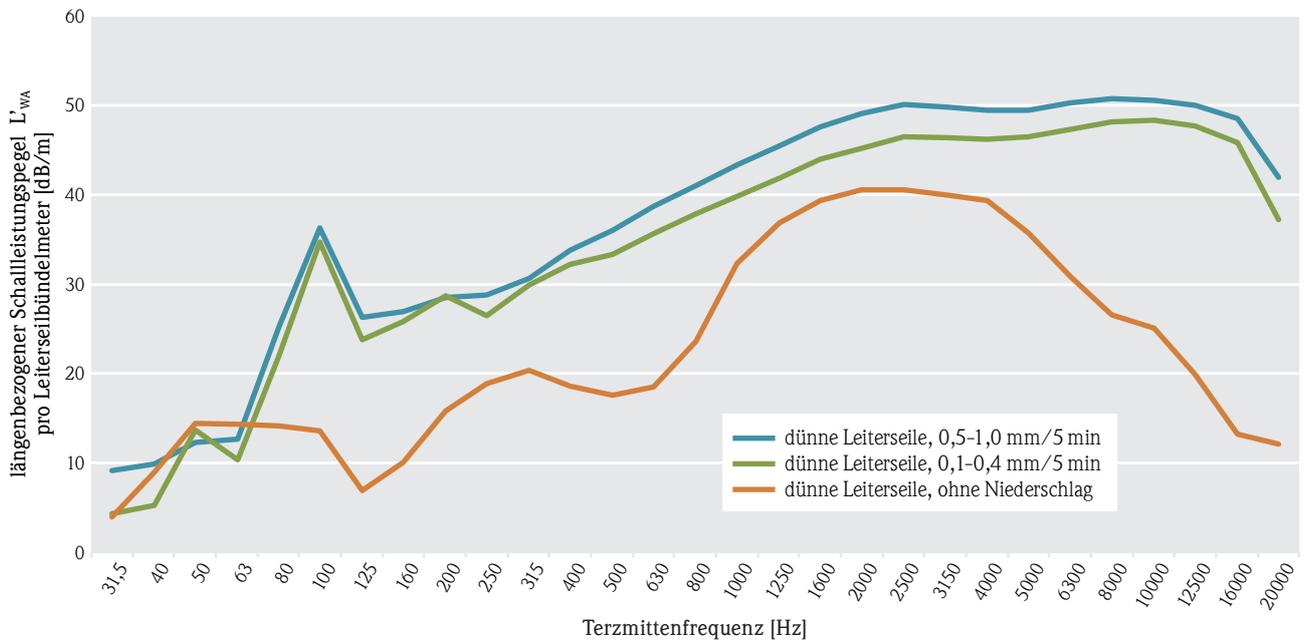


Abb. 41: Übersicht der terzspektralen längenbezogenen Schalleistungspegel für „dünne“ Leiterseile bei verschiedenen Witterungen (Niederschlag in Form von Regen).

wirksame Maßnahme zur Einhaltung von Immissionsrichtwerten darstellt. In den Abb. 40 und 41 ist für die Leiterseiltypen „dick“ und „dünn“ jeweils der terzspektrale längenbezogene Schallleistungspegel in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen dargestellt.

Abbildung 40 und 41 zeigen die grundlegende Frequenzstruktur der verschiedenen Leiterseile in Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen. Ersichtlich ist dabei der im Summenpegel wirksame und vom breitbandigeren, höheren Spektralanteil oberhalb 500 Hz bestimmte, Unterschied der Emissionen in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge.

**Zusammenfassend** lassen sich folgende wichtige Erkenntnisse anhand der Messergebnisse aus Kapitel 4 und 5 anführen:

- Im Vergleich zwischen „dicken“ und „dünnen“ Leiterseilen, lassen sich deutliche Effekte der Schallemissionsminderung durch die Senkung der Randfeldstärke mit erhöhten Leiterseilquerschnitten erkennen.
- An den „dicken“ Leiterseilen konnten in niederschlagsfreien Phasen keine relevanten Korona- oder Leiterseilgeräusche gemessen werden,

welche sich deutlich gegenüber dem ständig vorherrschenden Grundpegel des Umweltrauschens abheben. Als Maximalansatz des noch fremdgeräuschbelasteten, längenbezogenen Schallleistungspegels lässt sich ein Wert von 32,5 dB(A)/m Leiterseilbündel berechnen.

- An den „dünnen“ Leiterseilen konnten in niederschlagsfreien Phasen an wenigen Tagen erhöhte Leiterseil- bzw. Koronaemissionen gemessen werden, welche mit einem längenbezogenen Schallleistungspegel von 48,0 dB(A)/m Leiterseilbündel ähnlich hohe Pegel erzeugten wie die Messungen bei starkem Schneefall an den „dicken“ Leiterseilen mit 48,6 dB(A)/m Leiterseilbündel. Dies entspricht jedoch nicht dem Normalfall bei Trockenheit und ist als Maximalansatz zu verstehen.
- In niederschlagsfreien Phasen traten generell keine tonalen Schallemissionen auf.
- Während Schnee- oder Regenniederschlag traten in den meisten Fällen tonale Komponenten mit auf.
- Die Bewertung der Tonalität ist hierbei abhängig von Form und Stärke der Niederschläge.

**Tab. 19:** Überblick der berechneten Schallleistungen und ermittelten Tonzuschläge für untersuchte Standorte und Witterungsbedingungen.

Messort	Emissionsansatz	Leiterseile „dick“/ „dünn“	Schallleistung in dB(A)/m Leiterseilbündel	Schallleistung in dB(A)/Stromkreismeter	hörbarer Tonzuschlag bis 25 m	hörbarer Tonzuschlag ab 25 m
Rangendingen	leichter Schneefall	„dick“	40,8	45,6	3 dB(A)	3 dB(A)
Rangendingen	starker Schneefall	„dick“	48,6	53,4	6 dB(A)	6 dB(A)
Rangendingen	leichter Regen	„dick“	40,8	45,6	3 dB(A)	3 dB(A)
Rangendingen	starker Regen	„dick“	48,6	53,4	3 dB(A)	0 dB(A)
Rangendingen	Ohne Niederschlag (Maximalansatz)	„dick“	32,5	37,3	0 dB(A)	0 dB(A)
Freren	0,1–0,4 mm/5 min	„dünn“	58,1	62,9	3 dB(A)	3 dB(A)
Freren	Ohne Niederschlag (Maximalansatz)	„dünn“	48,0	52,8	0 dB(A)	0 dB(A)
Brilon	0,1–0,4 mm/5 min	„dünn“	56,1	60,9	3 dB(A)	3 dB(A)
Brilon	0,5–1,0 mm/5 min	„dünn“	59,7	64,5	3 dB(A)	0 dB(A)

- Da der Schneeniederschlag nur ein sehr geringes Fremdgeräusch erzeugt sind die tonalen Leiterseilemissionen auch noch in größeren Entfernungen hör- und messbar (6 dB(A) bei starkem und 3 dB(A) bei leichtem Schneefall).
- Bei Regenniederschlag kommt es mit zunehmender Regenstärke zu einer Überlagerung der tonalen Komponente durch das damit verbundene Regenrauschen. Daher beträgt die Bewertung der Tonalität bei starkem Regen nur 3 dB(A) in Trassennähe. Ab Entfernungen >25 m war aufgrund der Beobachtung kein Tonzuschlag mehr zu erteilen. Bei leichtem Regen beträgt der Tonzuschlag durchgängig 3 dB(A) auch bei größeren Entfernungen, da im Extremfall tonale Komponenten auch bei leichtem fast fremdgeräuschfreiem Nieselregen auftreten können.

In Tab. 19 sind die wichtigsten Ergebnisse aus den Kapiteln 4 und 5 zusammengefasst dargestellt.

### 5.3 Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten

Im Folgenden werden die ermittelten längenbezogenen Schallleistungspegel mit fremden Messungen aus einem Artikel der Fachzeitschrift „Lärmbekämpfung“ verglichen (verifiziert). In der Ausgabe „Lärmbekämpfung Bd. 6 (2012) Nr. 4 - Juli“ [14] wurden Ergebnisse anderer Messinstitute an verschiedenen Leiterseiltypen als längenbezogener Schallleistungspegel in Abhängigkeit ihrer elektrischen Randfeldstärke jeweils bei einer Regenstärke von 3–4 mm/h und einer Betriebsspannung von 400–420 kV dargestellt. In Abb. 42 sind diese Ergebnisse zunächst ohne die Ergebnisse des TÜV Hessen im Original dargestellt.

Umgerechnet auf 5 min entsprechen die 3–4 mm/h etwa 0,3 mm/5 min. Darum wurde zum Vergleich mit den „dünnen“ Leiterseilen der längenbezogene Schallleistungspegel bei 0,1–0,4 mm/5 min herangezogen. Da für die „dicken“ Leiterseile keine differenzierteren Niederschlagswerte vorliegen, wurden hier beide längenbezogenen Schallleistungspegel, sowohl für leichten als auch für starken Schneefall, eingeordnet.

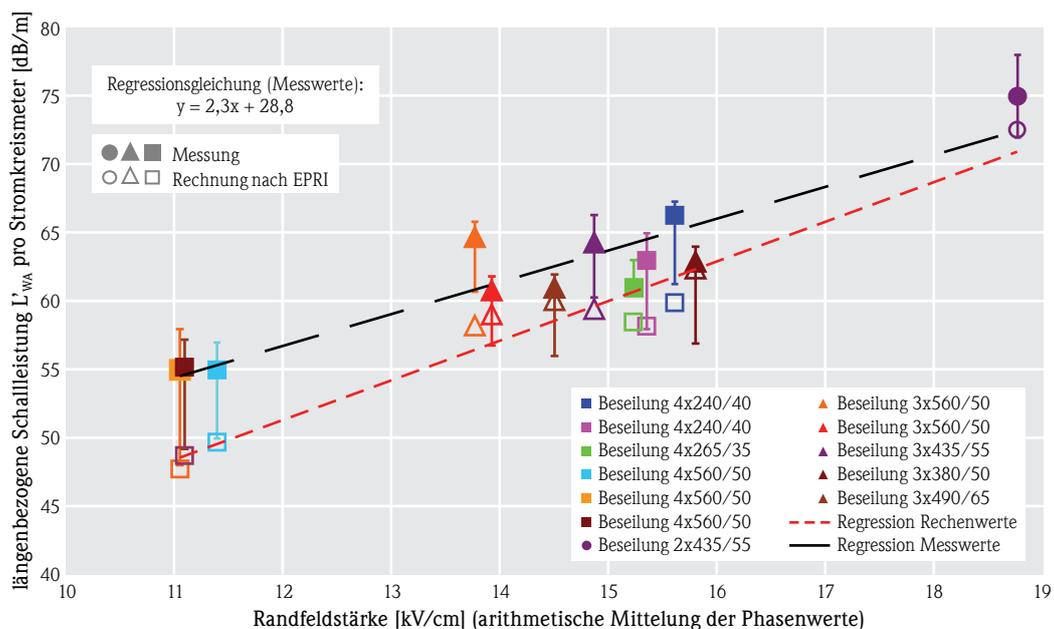


Abb. 42: Längenbezogener Schallleistungspegel in Abhängigkeit elektrischer Randfeldstärken [14].

Die Ergebnisse der längenbezogenen Schalleistungspegel wurden anhand der in Kapitel 3 aufgeführten Randfeldstärken in die Abb. 43 vergleichend eingeordnet. Zudem wurde die Regressionsgerade der Messwerte mit dem erweiterten Datensatz neu berechnet.

Der längenbezogene Schalleistungspegel der „dicken“ Leiterseile bei leichtem und bei starkem Schneefall liegt bei 40,8 bzw. 48,6 dB(A)/m Leiterseilbündel. In der Graphik sind jedoch die längenbezogenen Schalleistungspegel pro Stromkreismeter dargestellt. Demnach wird der längenbezogene Schalleistungspegel von drei Leiterseilbündeln zusammengefasst. Folglich müssen also jeweils

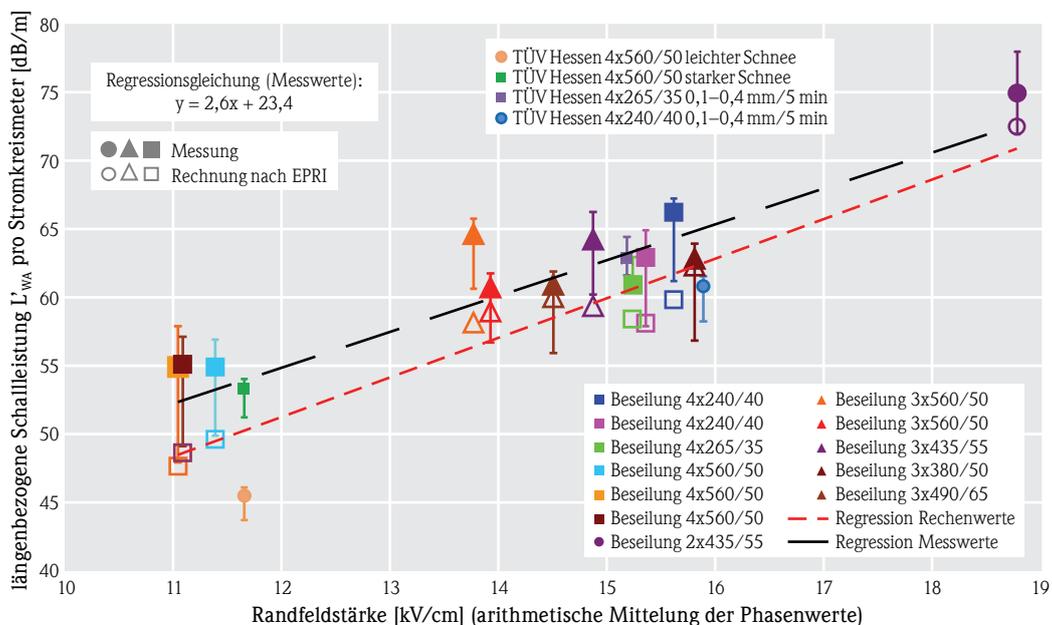
$$10 \cdot \log(3) = 4,8 \text{ dB(A)} \quad \text{Gleichung 5}$$

addiert werden. So ergeben sich 45,6 und 53,4 dB(A)/Stromkreismeter. Im Diagrammvergleich zeigt sich, dass der berechnete längenbezogene Schalleistungspegel für leichten Schneefall bzw. leichten Regen bei „dicken“ Leiterseilen knapp unterhalb des Streubandes liegt. Der Wert für starken Schneefall bzw. starken Regen liegt mit 53,4 dB(A)/Stromkreismeter aber genau innerhalb des Streubandes.

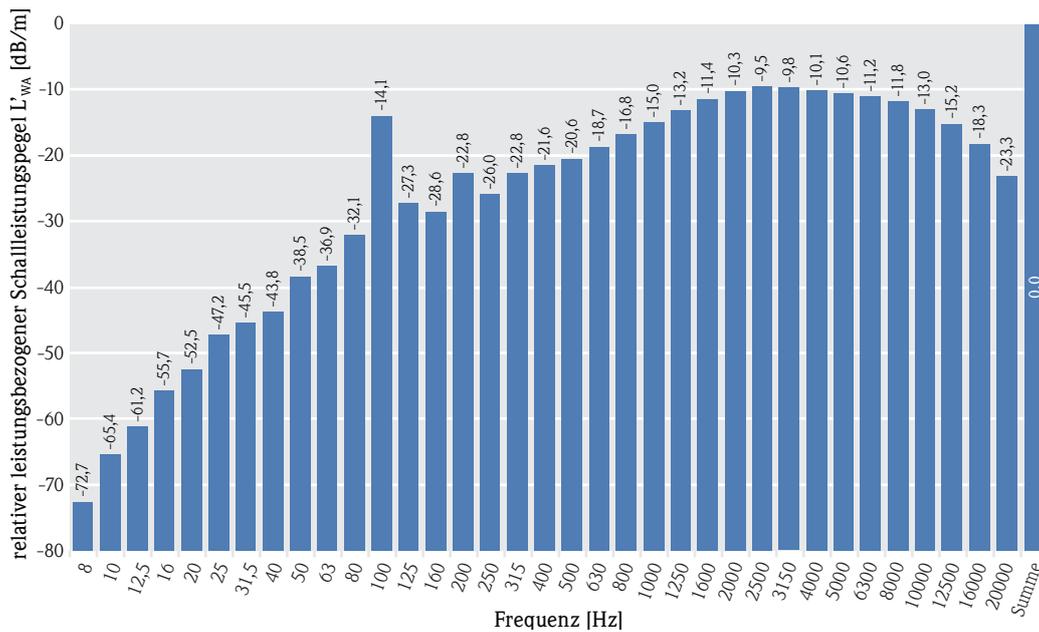
Beim Vergleich der längenbezogenen Schalleistungspegel von „dünnen“ Leiterseilen wurden die Ergebnisse der beiden Standorte Freren und Brilon

jeweils nach ihren in Kapitel 3 aufgeführten Randfeldstärken getrennt dargestellt. Der berechnete längenbezogene Schalleistungspegel für 0,1–0,4 mm Regen/5 min aus den Messungen in Brilon liegt bei 56,1 dB(A)/m Bündel, dem entsprechend 60,9 dB(A)/Stromkreismeter. In Freren liegt der längenbezogene Schalleistungspegel bei 58,1 dB(A)/m Leiterseilbündel respektive 62,9 dB(A)/Stromkreismeter. Die Messwerte aus Freren passen hier sehr gut in das Diagramm. Der Messwert liegt etwa mittig zwischen der Regressionsgerade der Literaturmesswerte und der Regressionsgerade der Rechenwerte nach EPRI. Die Ergebnisse für den Standort Brilon liegen hingegen unterhalb beider Regressionsgeraden.

Aus den in diesem Kapitel dargestellten terzspektralen Emissionsansätzen für „dicke“ Leiterseile (energetischer Mittelwert aus leichtem und starkem Niederschlag, da keine genaue Niederschlagsmenge messbar war) sowie den Emissionsspektren der Standorte Brilon und Freren bei 0,1–0,4 mm/5 min kann mit den in der hier vorgestellten Literaturstelle verwendeten Terzspektrum bei 3–4 mm/h Regenniederschlag ein mittleres repräsentatives Relativspektrum berechnet werden. Dieses stellt den charakteristischen frequenzabhängigen Verlauf von Leiterseilemissionen bei Niederschlagsereignissen als Nullsummenspektrum dar.



**Abb. 43:** Längenbezogener Schalleistungspegel in Abhängigkeit elektrischer Randfeldstärken. Literaturwerte aus [14] um die in dieser Studie dargestellten Messergebnisse ergänzt, mit Anpassung der Regressionsgeraden.



**Abb. 44:** A-bewertetes Relativspektrum ( $L'_{WA}=0\text{ dB}$ ) von Leiterseilemissionen bei Niederschlagsereignissen. Energetischer Mittelwert aus drei Messkampagnen des TÜV Hessen sowie fünf Messkampagnen aus der Literaturstelle „Lärmbekämpfung Bd. 6 (2012) Nr. 4 - Juli“ [14].

Klar erkennbar sind in Abb. 44 die tonalen Anteile bei 100 Hz sowie in verminderter Form bei 200 Hz. Die höchsten Pegel in diesem Relativspektrum liegen

mit ca. -10 bis ca. -12 dB(A)/m im Frequenzbereich zwischen 1600 Hz und 8000 Hz.

## 6 Untersuchte Einflussparameter für die Anwendung einer TA Lärm konformen Prognose

### 6.1 Einfluss der Variation von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Ausbreitungsmodell auf die Ergebnisse von Prognoseberechnungen

In allen üblichen und auch der vom TÜV Hessen verwendeten Schallausbreitungssoftware (SAOS NP) ist es möglich die Temperatur und die relative Luftfeuchte für die Prognoseberechnung zu variieren. Standardmäßig sind hier Werte von 10 °C und 70 % relative Luftfeuchte (r.Lf.) hinterlegt. Wie sich anhand der Messergebnisse gezeigt hat, liegt die re-

lative Luftfeuchte zu den Zeitpunkten mit relevanten Leiterseilemissionen deutlich höher. Da hörbare Leiterseilemissionen größtenteils mit Niederschlagsereignissen einhergehen, erreicht die relative Luftfeuchte während dieser Ereignisse Werte zwischen 90 und 100 %. Auch die Temperaturen können von der standardmäßigen Einstellung stark abweichen. So wurden während der Messungen am ersten Standort Rangendingen verwertbare Leiterseilemissionen bei Temperaturen bis zu -6 °C aufgezeichnet. An den Standorten Freren und Brilon hingegen wurden Messungen bei deutlich mildereren Bedingungen mit bis zu 16 °C durchgeführt. Wenn diese Umgebungsbedingungen also die repräsentativen Bedingungen während des Auftretens von Leiterseilemis-

sionen darstellen, gilt es zu klären, inwiefern eine Variation der Standardeinstellungen unter Berücksichtigung dieser repräsentativ ermittelten Wetterdaten zu einer Verschiebung der Ergebnisse von prognostisch ermittelten Immissionspegeln führen kann. Zu diesem Zweck wurden für alle drei Standorte die Wetterdaten zu den Messzeitpunkten, die zur Bestimmung des längenbezogenen Schallleistungspegels herangezogen wurden, herausgesucht und der Zustand ermittelt, welcher in Prognoseberechnungen am stärksten von den Ergebnissen unter Standardeinstellungen abweicht. Die Ergebnisse sind in Tab. 20 dargestellt.

Bei der Berechnung der in Tab. 20 dargestellten Ergebnisse wurde ein längenbezogener Schallleistungspegel von 56,1 dB(A)/m Leiterseilbündel auf die Leiterseile im Geländemodell des Standorts Brilon hinterlegt. Variiert wurden lediglich die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Erkennbar ist, dass mit Erhöhung von Temperatur und Luftfeuchte auch die Berechnungsergebnisse an MP0 und MP3 leicht ansteigen. An MP0 beträgt die Differenz 0,6 dB(A), an MP3 sogar 1 dB(A). Bei Betrachtung dieser Werte könnte also zunächst der Eindruck entstehen, dass bei Prognosen mit hinterlegten Standardeinstellungen deutlich niedrigere Werte an den Immissionspunkten berechnet werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der längenbezogene Schallleistungspegel von 56,1 dB(A)/m Leiterseilbündel

ebenfalls über das Ausbreitungsmodell mit Standardeinstellung ermittelt wurde. Dabei wurde der längenbezogene Schallleistungspegel so angepasst, dass die vor Ort erfassten gemittelten Messwerte und die berechneten Werte am MP0 übereinstimmen. Das heißt, dass bei einem hinterlegten längenbezogenen Schallleistungspegel von 56,1 dB(A)/m Leiterseilbündel und einer eingestellten Temperatur von 15 °C sowie einer relativen Luftfeuchte von 100 % der berechnete Wert am MP0 = 44,6 dB(A)/m Leiterseilbündel beträgt und somit 0,6 dB(A) über dem ermittelten Messwert liegt. Der längenbezogene Schallleistungspegel müsste also um 0,6 dB(A) nach unten auf 55,5 dB(A)/m Leiterseilbündel korrigiert werden, damit Messwert und berechneter Wert übereinstimmen. Somit würde der Pegel an MP3 statt 36,3 nur 35,7 dB(A) betragen. Die Differenz der Berechnungsergebnisse zwischen Standardeinstellung und den über die Wetterdaten angepassten Einstellungen beträgt am MP3 also nicht 1,0 dB(A) sondern lediglich 0,4 dB(A). Zu beachten ist hier also die unterschiedliche Pegel-Abstands-Abnahme (vgl. letzte Spalte der Tabelle).

Bei identischer Vorgehensweise für die anderen Standorte bzw. Niederschlagsstärken erhält man bei gleichen Entfernungssprüngen, bedingt durch vergleichbare relative Terzspektren, ganz ähnliche Ergebnisse (Tab. 21).

**Tab. 20:** Abweichung der Berechnungsergebnisse bei 0,1–0,4 mm/5 min in Brilon bei angepassten Temperatur- und Luftfeuchtedaten.

Brilon: 0,1–0,4 mm/5 min; $L'_{WA} = 56,1$ dB/m Leiterseilbündel					
Zeitpunkt relevanter Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Berechneter Schalldruckpegel an MP0	Berechneter Schalldruckpegel an MP3	Pegelabnahme in 88 m Entfernung
Standardeinstellung	10,0	70,0	44,0 dB(A)	35,3 dB(A)	8,7 dB
21.06.13 00:00–03:00	15,1	99,8	44,6 dB(A)	36,3 dB(A)	8,3 dB

**Tab. 21:** Abweichung der Berechnungsergebnisse bei 0,5–1,0 mm/5 min in Brilon bei angepassten Temperatur- und Luftfeuchtedaten.

Brilon: 0,5–1,0 mm/5 min; $L'_{WA} = 59,7$ dB/m Leiterseilbündel					
Zeitpunkt relevanter Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Berechneter Schalldruckpegel an MP0	Berechneter Schalldruckpegel an MP3	Pegelabnahme in 88 m Entfernung
Standardeinstellung	10,0	70,0	47,8 dB(A)	39,3 dB(A)	8,5 dB
21.06.13 00:20–00:30	16,3	100,0	48,3 dB(A)	40,2 dB(A)	8,1 dB

Bei den Messungen in Freren und in Brilon mit erhöhter Niederschlagsstärke erhält man ebenfalls Abweichungen von 0,4 dB(A) in der Pegel-Abstands-Abnahme an einem Immissionspunkt in 88 m Abstand. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Messungen in Rangendingen mit variierenden Temperaturen und Luftfeuchten ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Aufgrund der deutlich niedrigeren Temperaturen ergeben sich niedrigere Immissionspegel als unter Standardbedingungen.

Die Pegel-Abstands-Abnahme liegt bei den Messbedingungen in Rangendingen 0,4 dB(A) für leichten Schneefall bzw. 0,3 dB(A) für starken Schneefall höher als unter den hinterlegten Standardbedingungen des Ausbreitungsprogrammes (SAOS NP). Bei sehr niedrigen Temperaturen würden die Prognoseberechnungen also auf der sicheren Seite liegen.

Es zeigt sich somit, dass die Variation der Wetterdaten also einen minimalen Einfluss von  $\pm 0,4$  dB(A) auf die Berechnungsergebnisse an einem 88 m entfernten Immissionspunkt hätte. Da es Ziel dieser Studie ist, eine standardisierte, möglichst einfache Vorgehensweise bei der Ermittlung von Immissionen durch Leiterseile zu finden, erscheint es jedoch nicht zielführend mit variierenden Temperaturen/Luftfeuchten zu rechnen. Laut einer Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes DWD vom 28.12.12 lag die Jahresdurchschnittstemperatur 2012 in Deutschland bei 9,1 °C. Bei einer Festlegung von einer Temperatur von 9 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90 % im Ausbreitungsmodell betragen die Abweichungen von den Standardeinstellungen an einem 88 m entfernten Immissionspunkt nur noch ca. 0,2 dB(A).

**Tab. 22:** Abweichung der Berechnungsergebnisse bei 0,1–0,4 mm/5 min in Freren bei angepassten Temperatur- und Luftfeuchtedaten.

Freren: 0,1–0,4 mm/5 min; $L'_{WA} = 58,1$ dB/m Leiterseilbündel					
Zeitpunkt relevanter Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Berechneter Schalldruckpegel an MP0	Berechneter Schalldruckpegel an MP3	Pegelabnahme in 88 m Entfernung
Standardeinstellung	10,0	70,0	48,4 dB(A)	37,6 dB(A)	10,8 dB
16.05.13 16:50–17:20	16,2	90,1	48,8 dB(A)	38,4 dB(A)	10,4 dB

**Tab. 23:** Abweichung der Berechnungsergebnisse bei leichtem Schneefall in Rangendingen bei angepassten Temperatur- und Luftfeuchtedaten.

Rangendingen: leichter Schneefall; $L'_{WA} = 40,8$ dB/m Leiterseilbündel					
Zeitpunkt relevanter Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Berechneter Schalldruckpegel an MP0	Berechneter Schalldruckpegel an MP3	Pegelabnahme in 88 m Entfernung
Standardeinstellung	10,0	70,0	30,8 dB(A)	21,3 dB(A)	9,5 dB
24.02.13 02:20–02:50	-5,7	91,4	30,5 dB(A)	20,6 dB(A)	9,9 dB

**Tab. 24:** Abweichung der Berechnungsergebnisse bei starkem Schneefall in Rangendingen bei angepassten Temperatur- und Luftfeuchtedaten.

Rangendingen: starker Schneefall; $L'_{WA} = 48,6$ dB/m Leiterseilbündel					
Zeitpunkt relevanter Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Berechneter Wert an MP0	Berechneter Wert an MP3	Pegelabnahme in 88 m Entfernung
Standardeinstellung	10,0	70,0	38,9 dB(A)	29,6 dB(A)	9,3 dB
16.01.13 22:40–23:10	-5,3	92,8	38,5 dB(A)	28,9 dB(A)	9,6 dB

Wie verschiedene Prognoseberechnungen mit zusätzlich durchgeführten Immissionsmessungen an einem kritischen Praxisbeispiel gezeigt hatten, sind wesentlich größere Entfernungen, bei denen dieser Einfluss einen nennenswert höheren Wert erreichen würde, allerdings dann hinsichtlich der Auswirkungen von Koronageräuschen insgesamt nicht mehr bedeutsam (irrelevant). Ein Einfluss von 0,2 dB(A) ist sicher aufgrund der Fremdgeräuschunsicherheit mit zunehmender Geräuschdominanz des Regens bei > 100 m Entfernung, selbst mit Nieselregen, als irrelevant anzusehen.

Bis zu Entfernungen von etwa 88 m (ca. 100 m) erscheint somit die Variation dieser Parameter aus hiesiger Sicht nicht wirklich sinnvoll. Dies gilt insbesondere auch, wenn man würdigt, dass der worst case bei mit Schneefall vorkommenden Koronageräuschen hier mit Standardbedingungen überbewertet und im Plusbereich der Variation liegt.

Aus pragmatischen Erwägungen und um Anwendungsfehler bei unterschiedlich durchzuführenden Ansätzen für verschiedene Witterungen zu vermeiden, plädieren wir vorliegend für ein Beibehalten der so genannten Standardbedingungen für Temperatur und Luftfeuchte für diese Programmeinstellmöglichkeiten. Überdies enthalten die gemittelten Messdaten die verschiedenen Schwankungen dieser Parameter mit ihrem Vertrauensbereich, und es erscheint kaum möglich, eine belastbare Prognose für Temperatur- und Feuchtedaten des jeweiligen Lastfalls anzugeben. Prognostisch begründbare Sonderfälle kann es darüber hinaus jedoch sicher geben.

## 6.2 Einfluss der Variation der akustischen Segmentierung der Leiterseile im Ausbreitungsmodell

Da der Durchhang von Leiterseilen in Ausbreitungsmodellen nicht ohne Weiteres von Hand exakt nachgebildet werden kann, muss der Verlauf des Durchhangs in eine bestimmte Anzahl von Segmenten aufgeteilt werden, welche jeweils als gerade Linienquelle digitalisiert wird. Diesen Segmentabschnitten kann dann jeweils eine Linienschallleistung bestimmter Höhe zugewiesen werden. Die Höhe der Randfeldstärke und somit des längenbezogenen

Schalleistungspegels ist dabei auch abhängig von der Phasenlage, korrespondierenden Stromkreisen, Abstände und Anordnung am Mast und Höhe des jeweiligen Seiles über Boden bzw. vom Abstand zu Hindernissen, was im Überspannungsfall von Wohnhäusern bedeutsam sein kann. Auf die Variation der „elektrischen Segmentierung“ über die rechnerisch bestimmten Randfeldstärken und daraus abgeleiteten theoretischen längenbezogenen Schalleistungspegeln soll in dieser Studie nicht näher eingegangen werden. Entsprechende Untersuchungen des DIN-Arbeitskreises zur DIN SPEC 8987 werden hier nicht dargestellt. D.h. es wird hier eine Gleichverteilung der Randfeldstärke und damit eine konstante Belegung der längenbezogenen Schalleistungspegel je m Seillänge vereinfachend angenommen, um dann zu prüfen, welchen Einfluss nur die geometrische „akustische Segmentbildung“ bzw. die Anzahl der die Seilkrümmung nachbildenden Teilstücke hat. Zur visuellen Verdeutlichung dient hierzu ein Bild (Abb. 45) aus dem Entwurf der DIN VDE 0873-1[26] mit Definition der mittleren Seilhöhe und anschließend gezeigter 3D-Visualisierung als Annäherung des Seildurchhangs zwischen zwei Mastpunkten.

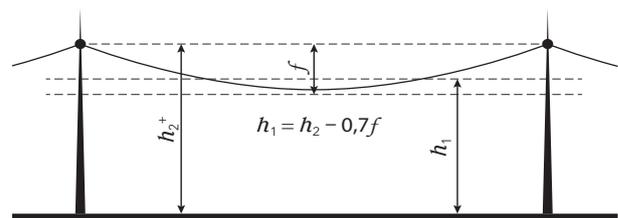


Abb. 45: Definition der mittleren Seilhöhe aus dem Entwurf der DIN VDE 0873-1 [26].

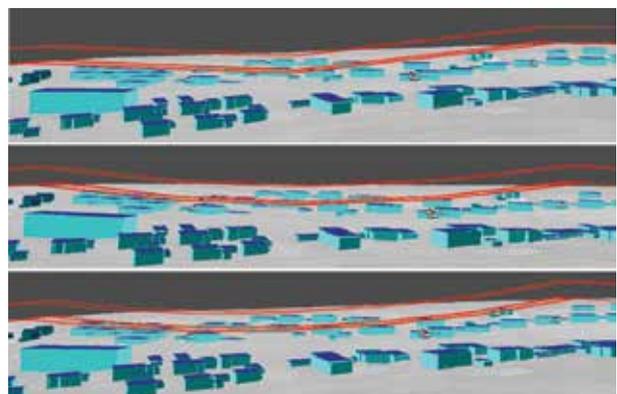
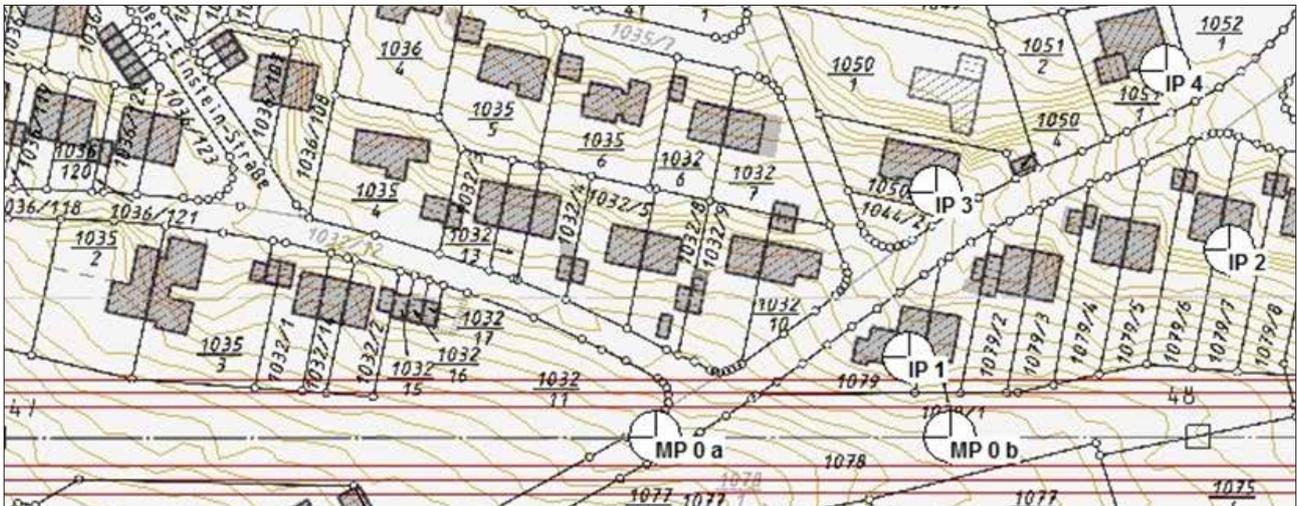


Abb. 46: Digitalisierte Seilsegmente für ein Praxisbeispiel: Bild „oben“ 2, Bild „Mitte“ 4 und Bild „unten“ 6 digitalisierte Segmente um die Seilkrümmung bzw. den Seildurchhang zu simulieren.

Aus Abb. 46 geht hervor, dass mit einer Erhöhung der Anzahl der Segmente der reale Verlauf des Durchhangs zwischen zwei Masten zunehmend exakter nachgebildet wird. Welchen Einfluss die Variation der Anzahl der Teilstücke auf Berechnungen im Ausbreitungsmodell hat, wird im Folgenden anhand der Segmentierung in zwei, vier und sechs Teilstücke pro Mastabschnitt dargestellt. Bei zwei Segmenten wird jeweils von beiden Masten eine Linienquelle vom Aufhängungspunkt des Seils am Mast zum Mittelpunkt zwischen den zwei Masten gezogen (in den meisten Fällen auch der Punkt des größten Durchhangs), wo sich die beiden Linienquellen treffen. Bei vier Segmenten werden je zwei Linienquellen zwischen Mast und Mittelpunkt der beiden Masten digitalisiert, bei sechs Segmenten sind es

jeweils auf jeder Seite drei Linienquellen vom Mast zum Mittelpunkt.

Die Berechnungen wurden für ein kritisches Fallbeispiel mit Geländemodell und umliegenden Wohnhäusern durchgeführt, um den Einfluss der Segmentierung bei realen Immissionspunkten zu untersuchen. In Abb. 47 ist ein Planausschnitt mit den vier berechneten Immissionspunkten an Wohnhäusern zu sehen. Zudem wurden zwei Immissionspunkte direkt unterhalb der Leiterseile gesetzt, um den Einfluss der Segmentierung auf den MP0 bei der Auswertung von Emissionsmessungen unter und entlang der Trasse zu untersuchen. Diese Messpunkte MP0a und MP0b verdeutlichen, dass es z.B. bei Überspannungen von Wohnhäusern und zusätzlich stark variierendem Gelände eine andere als die ge-



**Abb. 47:** Übersicht der berechneten Immissionspunkte zur Beurteilung des Einflusses der Anzahl von Leiterseilsegmenten auf die Immissionspegel.

**Tab. 25:** Immissionspegel an verschiedenen Immissionspunkten in Abhängigkeit von der Anzahl der Segmente, gerechnet mit dem Emissionsansatz: „dünne“ Leiterseile bei 0,1–0,4 mm/5 min.

Immissionspunkt	Abstand zur Trassenmitte [m]	Schalldruckpegel bei 2 Segmenten [dB(A)]	Schalldruckpegel bei 4 Segmenten [dB(A)]	Schalldruckpegel bei 6 Segmenten [dB(A)]
MP 0 a	0	46,5	46,6	46,7
MP 0 b	0	45,0	45,5	45,6
IP 1	20	44,4	44,9	45,0
IP 2	49	40,4	40,4	40,5
IP 3	64	38,7	38,7	38,7
IP 4	96	35,7	35,6	35,6

zeigte symmetrische Aufteilung sinnvoll werden kann, um die optimale Genauigkeit an einem Immissionsort erreichen zu können, als dies hier erfolgte.

In Tab. 25 sind die Berechnungsergebnisse für die in Abb. 47 gezeigten Immissionspunkte in Abhängigkeit von der Anzahl der Segmente aufgeführt. Gerechnet wurde dabei mit dem Emissionsansatz von „dünnen“ Leiterseilen bei  $0,1-0,4 \text{ mm}/5 \text{ min}$  ( $L'_{\text{WA}} = 56,5 \text{ dB/m}$  Leiterseilbündel).

Anhand der Tab. 25 wird erkennbar, dass sowohl der Abstand zur Trassenmitte als auch der Abstand zum Mast einen Einfluss auf die Berechnungen hat. Der MP 0a befindet sich in der Trassenmitte ungefähr mittig zwischen den beiden Masten im abgebildeten Ausschnitt. Daher ist bei allen drei Versionen mit zwei, vier und sechs Segmenten der geringste Abstand zu den Leiterseilen ungefähr gleich, und die Schalldruckpegel variieren nur geringfügig zwischen  $46,5 \text{ dB(A)}$  und  $46,7 \text{ dB(A)}$ . Der MP 0b befindet sich wie der MP 0a auch in der Trassenmitte, jedoch näher am rechten Mast (Nr.48). Hier spielt die Variation der Segmentierung eine deutlich größere Rolle, da der geringste Abstand zum Leiterseil bei sechs Segmenten niedriger ist als bei nur zwei Segmenten. So liegen die Werte am MP 0b zwischen  $45,0$  und  $45,6 \text{ dB(A)}$ . Hierbei ist die Differenz bei zwei zu vier Segmenten mit  $0,5 \text{ dB(A)}$  deutlich größer als von vier zu sechs Segmenten mit nur  $0,1 \text{ dB(A)}$ . Am IP 1 in  $20 \text{ m}$  Entfernung zur Trassenmitte ergeben sich identische Pegeldifferenzen zwischen den drei Ansätzen mit  $0,5$  bzw.  $0,1 \text{ dB(A)}$ . Mit zunehmendem Abstand zur Trassenmitte ergeben sich jedoch kaum noch Differenzen. Bereits am IP 2 in  $49 \text{ m}$  Entfernung zur Trassenmitte sind die Immissionspegel bei zwei und vier Segmenten identisch. Bei sechs Segmenten steigt der Pegel um  $0,1 \text{ dB(A)}$ . Am IP 3 in  $64 \text{ m}$  Entfernung sind die Pegel bei allen drei Segmentierungen identisch. Und am IP 4 in  $96 \text{ m}$  Entfernung liegt der Immissionspegel bei zwei Segmenten nur  $0,1 \text{ dB(A)}$  höher als bei vier und sechs Segmenten.

Anhand der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass bei der Berechnung von längenbezogenen Schallleistungspegeln durch Messungen unterhalb der Leiterseile sowie bei Prognosen mit Überspannungssituationen auf eine genaue Digitalisierung mit sechs Segmenten geachtet werden sollte. Bei Prognosen für Immissionsorte, die sich  $50 \text{ m}$  oder weiter entfernt von der Trasse befinden, spiegeln auch die Ergebnisse mit

Digitalisierungsgenauigkeiten von nur zwei Segmenten realistische Werte wider. Für kritische Fälle mit Wohnhausaufpunkten direkt unter den Leiterseilen kann auch eine asymmetrische Teilstreckenbildung bzw. Segmentierung sinnvoll werden, insbesondere wenn das darunter sich befindende Gelände stärker variiert (z.B. unter einer Seil- bzw. Mastabschnittshälfte mit Lage des Immissionsortes ansteigt). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass

- zur Berechnung der längenbezogenen Schallleistungspegel aus Messungen an Leiterseilen es empfehlenswert ist, eine möglichst hohe Teilstreckenbildung wie hier mit 6-facher geometrischer Segmentierung und höchster programmtechnischer Aufteilung der Linienquellen in Punktquellen zu wählen (z.B. mit Abstand zwischen Punktquelle und Aufpunkt  $d$  größer als 2 mal Größte Abmessung der Quellen  $H_{\text{max}}$  bzw. als  $l_{\text{min}}$  mit  $1 \%$  der jeweiligen Seil-(Quellen)-Länge im Verhältnis zum kürzesten Punktquellenabstand); hierbei sind die Mindestanforderungen nach DIN 9613-2 Abschnitt 4 a), b), c) und Anmerkung 5 zu beachten
- mit Zunahme der Immissionsentfernung ab ca.  $50 \text{ m}$  eine 4-fache Segmentierung und schon ab ca.  $65 \text{ m}$  eine 2-fache Segmentierung ausreichend sein kann und
- für Entfernungen von ca.  $90 \text{ m}$  keine Erhöhung der Genauigkeit mehr beobachtet wurde
- bei kritischen Überspannungsfällen, besonders im ansteigenden Gelände eine asymmetrische Aufteilung der Leiterseilsegmentierung sinnvoll werden kann
- für Immissionsaufpunkte in unmittelbarer Nähe oder unter den Seilen die höchste Segmentierung und Genauigkeitsstufe der Aufteilung der Linienquelle in Punktquellen programmtechnisch empfohlen bzw. normkonform notwendig werden kann und
- die digitale geometrische Nachbildung des genauen Seilverlaufes (z.B. Durchhang bei ansteigendem Gelände) durch 3D-Polyline mit absoluten Höhen über Gelände mit heutigen Schallausbreitungsprogrammen kaum Probleme bereiten und als Stand der Technik angesehen werden sollte.

### 6.3 Einfluss der Variation der Berechnungsmethode für die Bodendämpfung $A_{gr}$

Anhand des oben unter 6.2 beschriebenen und zudem kritischen Fallbeispiels konnten auch die Variation und der Einfluss der Berechnungsmethode für die Bodendämpfung  $A_{gr}$  typisierend untersucht werden. Hierzu wurde das genaue 3D-Modell einmal nach Abschnitt 7.3.1 der DIN ISO 9613-2 [22] über die Bodenfaktoren mit  $G = 0$  für harten (reflektierenden Boden) und  $G = 1$  für porösen (absorbierenden Boden) nach zuvor exakt definiert spezifischen (= modellbezogenen) Polygonflächen digitalisiert und dann ein zweites Mal nach Abschnitt 7.3.2, d.h. mit der Alternativgleichung 10 (Bodendämpfung nach zurückgezogener VDI 2714 [6]), für den jeweiligen Ausbreitungsweg digitalisiert und die Schalleistung jeweils über die Messwerte am MPO unterhalb der Leiterseile für beide Varianten zurückgerechnet. Anschließend wurden die Messergebnisse an 20, teils simultan **gemessenen** Immissionsorten, mit den **berechneten** Werten beider Varianten verglichen.

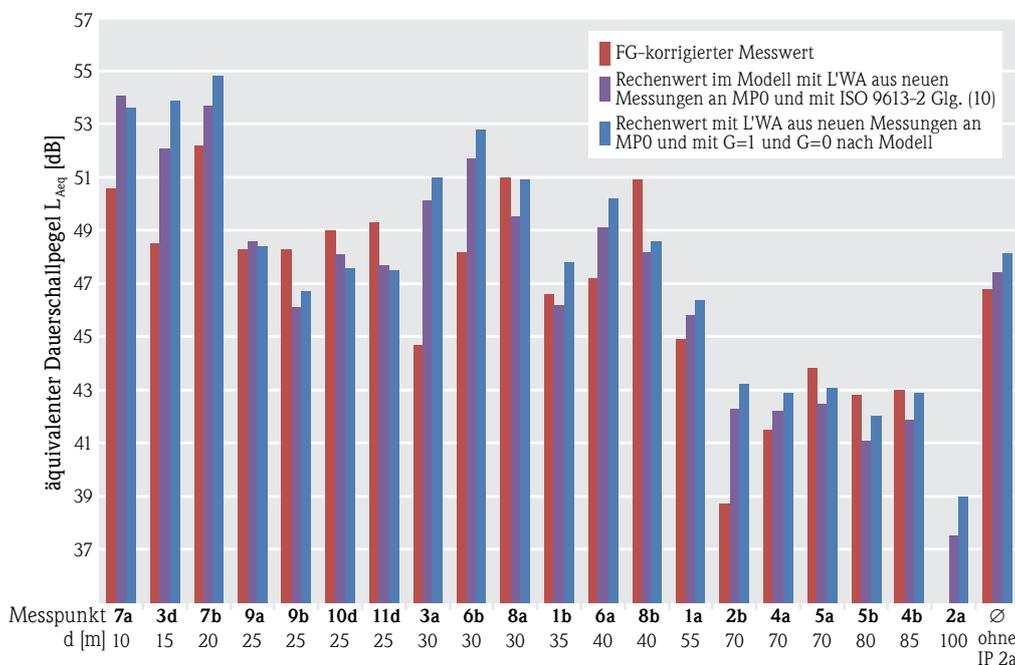
Zur Berechnung wurde der messtechnisch ermittelte längenbezogene Schalleistungspegel (Langzeitmessungen) eingesetzt.

Das Ergebnis hierzu ist Abb. 48 zu entnehmen.

Tabelle 26 zeigt die Variation des Vergleiches in Abhängigkeit der nach Abstand sortierten Immissionsorte und des Differenzpegels zwischen Messwert und Berechnungsmethode auf. Um die Wirkung der Berechnungsmethode (Variation  $A_{gr}$ ) deutlicher darzustellen, zeigt die folgende Tabelle die oben dargestellten absoluten Werte hier nochmal als diskrete Differenzpegel auf:

Aus der Tab. 26 sind für das typisierende Fallbeispiel als Zusammenfassung abzuleiten:

- Die mit dem gemessenen Emissionspegel (längenbezogener Schalleistungspegel) berechneten Immissionspegel sind relativ genau und liegen im Nahbereich zudem ausreichend sicher über den Messwerten (gewünscht).
- Wo dies nicht zutrifft, ist dies auf andere Ursachen (Abschirmung, Reflexion bzw. Messstandorte mit Zeitpunkt und Unschärfe der Niederschlagsintensität, unsicherer Fremdgeräuschkorrektur) zurückzuführen.



**Abb. 48:** Vergleich der Messergebnisse eines Beispielprojekts mit den Berechnungsergebnissen im Ausbreitungsmodell mit Variation der Bodendämpfung  $A_{gr}$  (an IP 2a fehlt der Messwert, da aufgrund eines zu geringen Pegelunterschieds zwischen Fremdgeräusch und Nutzgeräusch eine Fremdgeräuschkorrektur nicht möglich war).

räuschkorrektur, siehe gelbe Markierung o.ä.) zurückzuführen.

- Die mit den genau und aufwendig digitalisierten Bodenfaktoren  $G = 0/1$  nach Abschnitt 7.3.1 berechneten Werte liegen vergleichsweise mit 1,3 dB(A) doch deutlich über den Immissionsmessungen.

**Tab. 26:** Differenz zwischen Rechenwert und Messwerten bei Variation der Berechnungsvariante der Bodendämpfung  $A_{gr}$  (an den gelb markierten Messpunkten ist die Fremdgeräuschkorrektur unsicher, da der Abstand zwischen Nutz- und Fremdgeräuschpegel  $< 3$  dB beträgt)

Messung Nr. und Abstand zu Trassenmitte	$A_{gr}$ Variation	
	Differenz: Rechenwert - Messwert [dB] mit Glg. 10 aus ISO 9613-2	Differenz: Rechenwert - Messwert [dB] mit $G=1$ und $G=0$ nach Modell
7a d=10 m	3,5	3
3b d=15 m	3,6	5,4
7b d=20 m	1,5	2,6
9a d=25 m	0,3	0,1
9b d=25 m	-2,2	-1,6
10 d=25 m	-0,9	-1,4
11 d=25 m	-1,6	-1,8
3a d=30 m	5,4	6,3
6b d=30 m	3,5	4,6
8a d=30 m	-1,5	-0,1
1b d=35 m	-0,4	1,2
6a d=40 m	1,9	3
8b d=40 m	-2,7	-2,3
1a d=55 m	0,9	1,5
2b d=70 m	3,6	4,5
4a d=70 m	0,7	1,4
5a d=70 m	-1,3	-0,7
5b d=80 m	-1,7	-0,8
4b d=85 m	-1,1	-0,1
2a d=100 m	kein FG-korrigierter Messwert vorhanden	kein FG-korrigierter Messwert vorhanden
<b>Mittelwerte</b>	<b>0,61</b>	<b>1,31</b>

- Im Mittel liegen die mit der Alternativgleichung 10 nach Abschnitt 7.3.2 berechneten Werte nur um 0,6 dB(A) über dem Immissionsmesswert.
- Im Mittel werden die 20 unterschiedlichen Immissionswerte hierdurch besser wiedergegeben.

Diese Ergebnisse bestätigen die in Abschnitt 3.4 beschriebene, hier angewendete und vom TÜV Hessen empfohlene Vorgehensweise für die überwiegend hochliegenden Leiterseilquellen bezüglich der Berechnungsanwendung für die Bodendämpfung  $A_{gr}$ . Dies ist in anderen Literaturstellen bereits ähnlich für hochliegende Quellen (z.B. für Kamine) beschrieben worden.

## 6.4 Einfluss der Fremdgeräusche bei Niederschlagsereignissen auf Leiterseilgeräusche (Überdeckung)

### 6.4.1 TA Lärm und DIN 45645-1, Widersprüche und ungeklärte Anwendung für Koronageräusche

Zur Beurteilung und Prognosebetrachtung von Koronageräuschen ist die TALärm [15] anerkanntermaßen mit den Kriterien für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen heranzuziehen. Bei näherer Betrachtung ergibt sich dabei der Widerspruch zwischen der Prognose einerseits und der Messung im Nachweisverfahren andererseits mit Anwendung der in TALärm zitierten DIN 45645-1 [16]. Dieser Widerspruch besteht einerseits in der prognostischen Forderung nach Ziffer 6.4 TALärm, den höchsten Nacht-Beurteilungspegel, zu dem die zu beurteilende Anlage relevant beiträgt, heranziehen zu müssen. Andererseits stehen dieser Forderung, den worst case prognostisch zugrundelegen zu **müssen**, die Einschränkungen der DIN 45645-1 entgegen. Hier wird gefordert, dass im Nachweis nach Ziffer 6.4 „*bei ungeeigneten Wetterbedingungen wie stärkerem Regen, Schneefall, größeren Windgeschwindigkeiten, gefrorenem oder schneebedecktem Boden keine Messungen erfolgen sollten*“ oder anders formuliert aus Fremdgeräusch- und messtechnischen Problemgründen

**nicht** erfolgen dürfen. Jedoch treten aufgrund ihrer ursächlichen Entstehung die höchsten Koronageräusche bei den stärkeren Niederschlägen (Schnee oder Regen) auf. Die vorherrschende Wetterlage ist regelmäßig der trockene bzw. niederschlagsfreie Zustand (ca. 83–89 %), und nur in geringen Zeiträumen bis hin zu seltenen Ereignissen (Schneefall) ist nachts mit geringen bzw. stärkeren Niederschlägen (wenige % bzw. Tage im Jahr), abhängig von der ortsspezifischen – oder besser gebietsabhängigen – Wetterlage und damit verbundenen Entstehung von Koronageräuschen zu rechnen. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Betrachtung nötig. Zum einen gibt es Gebiete, bei denen je nach Jahreszeit aufgrund von statistischen Langzeituntersuchungen mit häufigen Schneeniederschlägen zu rechnen ist. Zum anderen gibt es jedoch auch Gebiete in denen so gut wie kein Schnee im Jahresverlauf fällt.

Aus hiesiger Sicht können die Schwierigkeiten der Beurteilung und des Prognoseansatzes nur über pragmatische Überlegungen und eine, die jeweilige Betrachtung des Einzelfalles anzuwendende, **Sonderfallbetrachtung** nach Ziff. 3.2.2 der TA Lärm aufgelöst werden. Hier ist darauf hinzuweisen, dass es im Bereich der TALärm-Anlagen **keine** Berücksichtigung der erhöhten Rollgeräusche von Fahrzeugen auf Betriebsgeländen gibt, wenn die Fahrbahnen durch Regen- und Nässe zu einer Erhöhung der Emissionspegel führen. Auch kommen im Sinne des § 3 BImSchG der spezifischen Beurteilung von Art, Häufigkeit und Dauer der Geräuscheinwirkung eine besondere Bedeutung zu. Der Sonderfall ist dabei zunächst die Ankopplung des Anlagengeräusches an das jeweils nahezu zeitgleich auftretende Regenfremdgeräusch, da dies vom Betreiber nicht beeinflusst werden kann. Es ergeben sich damit folgende einhergehende Fragen:

- Wie häufig ist dies standortbezogen der Fall?
- Sind die Bedingungen für seltene Ereignisse (Schneefall, Starkregen) ggf. dabei erfüllt?
- Welche Fremdgeräuschüberdeckung ist zu erwarten bzw.
- Treten dominante hörbare Einzeltöne auf? oder
- Ab welcher Entfernung findet eine nahezu vollständige Maskierung und ständige Überdeckung im Sinne der TA Lärm Ziff. 3.2.1 Absatz 5 statt?

Die Niederschlagshöhenabhängigkeit des Auftretens

der Koronageräusche kann dabei nicht durch eine Vielzahl von Prognoseansätzen unterschiedlicher „Lastzustände“ vorhergesagt bzw. beurteilt werden. Man wird sich vielmehr auf eine pragmatische und sinnvolle Einteilung und Definition in Anlehnung an die TALärm und die hier gegebenen Begrifflichkeiten bzw. Kriterien orientieren müssen.

Merkmale dafür könnten aber auch mit den Angaben der Niederschlagsabhängigkeit für die empirisch gefundenen Zusammenhänge des berechneten längenbezogenen Schalleistungspegels aus der Randfeldstärke nach z.B. der EPRI Gleichung sein. In Kapitel 2.2.3 wurden hierzu bereits entsprechende Angaben gemacht.

#### 6.4.2 Messung von Fremdgeräusch durch Regen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen

Koronageräusche haben, wie gezeigt wurde, gegenüber anderen Anlagengeräuschen zwei entscheidende Besonderheiten:

1. Diese Geräusche unterliegen dem **Sonderfall**, bei relevant hoher Abstrahlung mit gleichzeitigem Auftreten des sie verstärkend erzeugenden Regens (Tropfen = Leiterseilunstätigkeit) respektive dem Regenrauschen als dem Koronageräusch sehr ähnlichem Fremdgeräusch, synchron gekoppelt und überlagert zu sein.
2. Die dabei verstärkt auftretenden Einzeltonkomponenten (100-, 200-, seltener 400-Hz-Töne) werden in der Regel mit Zunahme der Entfernung (Abstandsabnahme) durch das gleichzeitige schnell dominierende Regenfremdgeräusch mit der geometrischen Abstandszunahme nach einer bestimmten Entfernung und je nach den Randumständen im Sinne der TALärm hinsichtlich der Hörbarkeit tonaler Geräusche maskiert und relativ schnell vollständig überdeckt.

In diesem Sinne ist die für wesentliche Koronageräusche mit verursachende Regenkomponente gleichzeitig im Sinne der TALärm als ein ständig vorherrschendes Fremdgeräusch (Naturereignis) anzunehmen und folglich prognostisch näher zu betrachten.

So darf gemäß TA Lärm Ziff. 3.2.1 Abs. 5 [15] eine Anlagengenehmigung wegen einer Überschreitung der Immissionsrichtwerte nicht versagt werden, wenn infolge ständig vorherrschender Fremdgeräusche keine zusätzlichen schädlichen Umwelteinwirkungen durch die zu beurteilende Anlage zu befürchten sind. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn für die Beurteilung der Geräuschimmissionen der Anlage weder Zuschläge gemäß dem Anhang für Ton- und Informationshaltigkeit oder Impulshaltigkeit, noch eine Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche nach Nummer 7.3 erforderlich sind und der Schalldruckpegel der Fremdgeräusche in mehr als 95 % der Betriebszeit der Anlage in der jeweiligen Beurteilungszeit nach Nummer 6.4 höher ist als der Mittelungspegel  $L_{Aeq}$  der Anlage.

Sofern also diese zusätzlichen, wesentlichen Bedingungen der Prüfung im Regelfall nach TA Lärm zutreffend vorliegen, kann eine Höchstspannungsanlage unter Würdigung des oben beschriebenen **Sonderfalles** nach Ziffer 3.2.2 genehmigungsfähig sein. Aus hiesiger Sicht ist dies jeweils im Einzelfall prognostisch zu prüfen und kann nicht generell beschrieben werden.

Nachfolgend wird versucht diese Einflüsse anhand der vorliegenden Messergebnisse unter bestimmten, bekannten Abständen mit ihren Randbedingungen näher zu beschreiben, um diese Kriterien prognostisch angeben zu können. Die obigen TALärm-Kriterien nach Ziff. 3.2.1 Abs. 5 konnten wie folgt untersucht und beurteilt werden:

#### **Informations- und Tonhaltigkeit:**

Wie oben ausgeführt, ist es für Immissionsprognosen von Leiterseilgeräuschen, insbesondere tonalen Koronageräuschen, von entscheidender Bedeutung in wie weit diese Geräusche während Regenniederschlägen subjektiv und objektiv an verschiedenen Immissionsorten überhaupt wahrnehmbar sind, da sie beträchtlich vom Regenrauschen überlagert werden können.

Mit dem vorliegenden Untersuchungsumfang kann das ermittelte Regenfremdgeräusch dabei unterschieden werden in:

- A) die idealisierten Bedingungen der durchgeführten Messungen im fremdgeräuscharmen Freifeld ohne zusätzliche Reflexions- und/oder schallharte Regen-Aufprallflächen und
- B) die typisierenden Bedingungen in Ortsrandlage

bei unter verschiedenen Regenmengen ermittelten Regen-Fremdgeräuschen (Langzeitmessung) mit mittleren schallharten typischen Aufprallflächen sowie

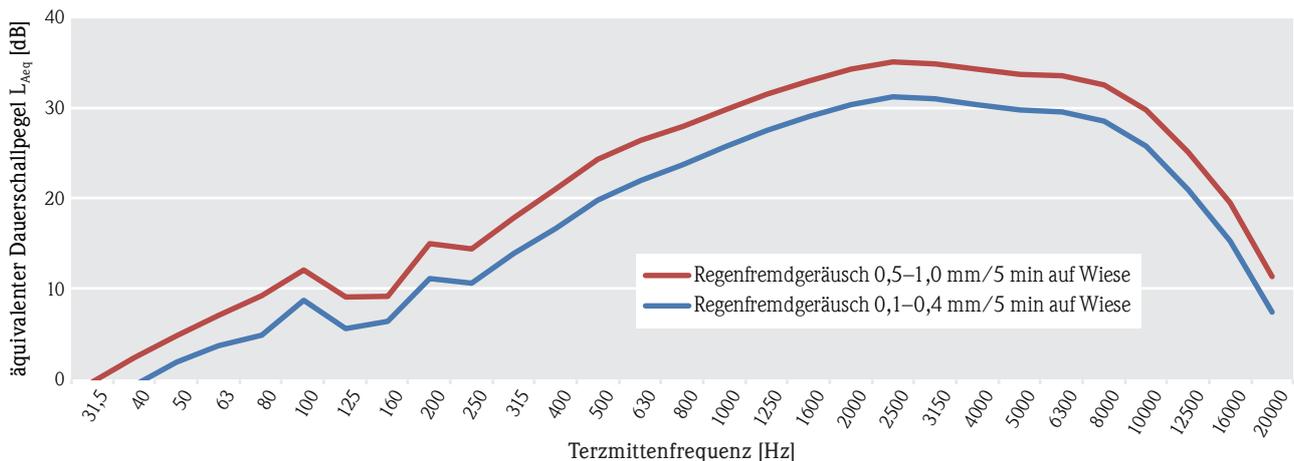
- C) die projektspezifischen vereinzelt durchgeführten regenbehafteten Vorbelastungsmessungen im städtischen bzw. urbanen schallharten Umfeld

#### **Zu A) idealisierte Freifeldbedingungen, ohne schallharte Aufprallflächen und ohne zusätzliche Fremdgeräusche**

Bereits während der Emissions- und Immissionsmessungen mit idealisierten Umgebungsbedingungen (weicher Ackerboden bzw. Wiese; keine Gebäude in näherer Umgebung mit Vordächern o.ä.) konnten die Leiterseilgeräusche nur bei sehr geringen Regenstärken (0,0–0,2 mm/5 min) auch in Entfernungen bis zu 112 m (FG-Station in Brilon) überhaupt wahrgenommen werden. Bei höheren Regenniederschlägen steigt das Fremdgeräusch durch das Regenrauschen an und die Leiterseilemissionen sind nur noch bis etwa 38 m (MP 1) gut zu hören. Zwischen 38 m und 63 m (MP 2) „verschwimmen“ die Leiterseilgeräusche fortlaufend mit dem Regenrauschen, und es kann keine klare Trennung mehr vollzogen werden (Kaschierung/Überdeckung).

In der nachfolgenden Graphik (Abb. 49) sind die Regen-Fremdgeräuschmessungen während der zum längenbezogenen Schalleistungspegelbestimmung verwerteten Messungen der Leiterseilemissionen am Standort Brilon (vgl. Kapitel 4.4) dargestellt. Gemessen wurde dabei in einer Höhe von ca. 2,2 m über Boden.

In Abb. 49 ist das energetisch gemittelte Terzspektrum von 21 Messungen bei 0,1–0,4 mm/5 min sowie von 14 Messungen bei 0,5–1,0 mm/5 min an der Fremdgeräuschstation in Brilon dargestellt (vollständiger Datensatz im Anhang 5 und 6). Als zeitlich gewichteter energetischer Mittelwert dieser Messungen ergeben sich als mittlere Summenpegel **40,0 dB(A)** bei 0,1–0,4 mm/5 min und **43,9 dB(A)** bei 0,5–1,0 mm/5 min. Hier ist bereits ein „Klassenunterschied“ von ca. 4 dB(A) der Fremdgeräusche und gewählter Einteilung 0,1–0,4 und >0,4 mm/5 min bzw. >4,8 mm/h zu erkennen, der sich in dörflichem Umfeld mit Zunahme schallharter Aufprallflächen weiter verschärft (vergleiche Abb. 52). Bei beiden Terzspektren fällt auf, dass noch kleine Peaks im Bereich bei 100 Hz bzw. 200 Hz zu sehen sind. Das heißt, der Einfluss der tonalen Leiterseilemissionen ist hier in 112 m



**Abb. 49:** Energetisch gemittelte Terzspektren von 21 Messungen bei 0,1–0,4 mm/5 min und 14 Messungen bei 0,5–1,0 mm/5 min zur Darstellung von Regen-Fremdgeräuschen auf einer freien Wiesenfläche in Brilon in 2,2 m Höhe und 112 m Entfernung zur Trassenmitte.

Entfernung zur Trassenmitte noch messtechnisch erkennbar. Jedoch liegen die Terzpegel ca. 20–25 dB(A) unterhalb des hochfrequenten Regenrauschens, woraus ersichtlich wird, dass eine solche tonale Komponente vor Ort subjektiv nicht wahrgenommen wurde (Überdeckung sicher vorhanden).

### 6.4.3 Gründe für die Aufteilung in zwei verschiedene Niederschlagsklassen

Eine grafische Gegenüberstellung beider gemittelter Regenklassen zeigt bereits für diese idealisierten Freifeldbedingungen, dass die zu korrigierenden Regengeräusche > 0,4 mm/5 min nochmal deutlich zunehmen [3,9 dB(A)]. Diese lassen sich nicht vermeiden und schwanken je nach Tropfengröße und -dichte und resultieren aus Aufprallgeräuschen der Oberflächen-Messumgebung (hier absorbierender Acker/Wiese) aber auch aus Körperschallaufprallgeräuschen am Windschirm, Mikrofonhalter, Kabel und Stativ usw. Sie sind nicht eliminierbar, nehmen aber mit zusätzlichen anderen schallharten Bedingungen und mit zunehmender Regenintensität **deutlich** zu. Neben den mit Kapitel 2.2.3 genannten Gründen für die dort definierte Aufteilung in zwei Niederschlagsklassen sprechen auch folgende Argumente:

- Den Messungen für idealisierte Umgebungen ist zu entnehmen, dass durch das alleinige Regengeräusch bereits ein Pegelwert von 40 dB(A), also

einer Richtwertentsprechung für Allgemeines Wohngebiet erreicht wird. Der Nachweis für ein Reines Wohngebiet mit Richtwert nachts von 35 dB(A) wäre mit diesen Bedingungen bereits nicht mehr möglich. Er wird für ein Allgemeines Wohngebiet mit nachts zulässig 40 dB(A) auch aufgrund des ungenügenden Fremdgeräuschabstandes nach DIN 45645-1 [16] spätestens mit der Regenklasse > 0,4 mm/5 min ebenso sicher vereitelt. Dieser Unterschied in idealisierter Umgebung hinsichtlich der Korrelation Regenklasse und Richtwertentsprechung kann als ein erster Grund für eine Aufteilung in zwei Niederschlagsklassen angeführt werden.

- Der zweite Grund ist die deutliche Zunahme der zu erwartenden, stärkeren ständigen Überdeckung für die allermeisten Fälle des Auftretens von Koronageräuschen mit stärkeren Niederschlägen und damit drastisch zunehmenden Regenfremdgeräuschanteilen.
- Der dritte Grund ist, dass sich in der Nachtzeit Regenintensitätsraten mit stärkeren Niederschlägen (> 0,4/5 min = > 4,8 mm/h nachts) anhand von Regenstatistiken für zwei der regenreichsten Gebiete Deutschlands hier als eher sehr selten darstellen und mit den Bedingungen für seltene Ereignisse im Sinne der TALärm [15] überprüfbar und ggf. die Immissionspegel dann mit höheren Richtwerten vergleichbar werden.

Vergleiche hierzu die Regenstatistiken und Auswertungen des DWD für einen ausgewerteten Standort

am Köln-Bonner Flughafen wie auch für den regenreichen Standort in Massenbachhausen; siehe Anhänge 11 und 12. Siehe hierzu auch die in Kapitel 2.2.3 erfolgte Definition der Niederschlagshöhen. Diese oben dargestellten Terzspektren stellen jedoch, wie bereits erläutert, das Fremdgeräusch bei idealisierten Umgebungsbedingungen dar. Sie dürften in der Praxis eher nicht relevant sein. Daher werden im Folgenden die Fremdgeräuschmessungen in dörflicher Umgebung mit schallharten Flächen dargestellt, bei denen höhere Regenfremdgeräuschpegel zu erwarten sind.

**Zu B) typisierende Bedingung in Ortsrandlage, mit mittleren schallharten Aufprallflächen in dörflicher fremdgeräuscharmer Umgebung**

Um die erhöhten Fremdgeräusche des Regenrauschens in Gebieten mit Bebauung näher zu untersuchen (zusätzlich schallharter Asphaltboden, Ziegeldachflächen, Prasseln auf Vordächern, Regenrinnen o.ä.), wurden zusätzliche exemplarische Messungen an einem typischen Wohnhaus durchgeführt, welches sich nicht in der Nähe einer Stromtrasse befindet. Hier sollte das reine, durch den Regen erzeugte Fremdgeräusch in einem Wohngebiet bei verschiedenen Niederschlagsstärken ermittelt werden ohne den Einfluss von Koronageräuschen, um dieses mit den Emissionen von Höchstspannungsleitungen gegenüberzustellen. Zu diesem Zweck wurde für die



Abb. 50: Messaufbau an einem Wohnhaus in Hungen zur Erfassung von regenbedingten Fremdgeräuschen an einem Wohnhaus. Rot eingekreist ist die Mikrofonposition.



Abb. 51: Luftbild vom Messstandort zur Erfassung von regenbedingten Fremdgeräuschen an einem Wohnhaus [28]. Roter Punkt entspricht der Mikrofonposition.

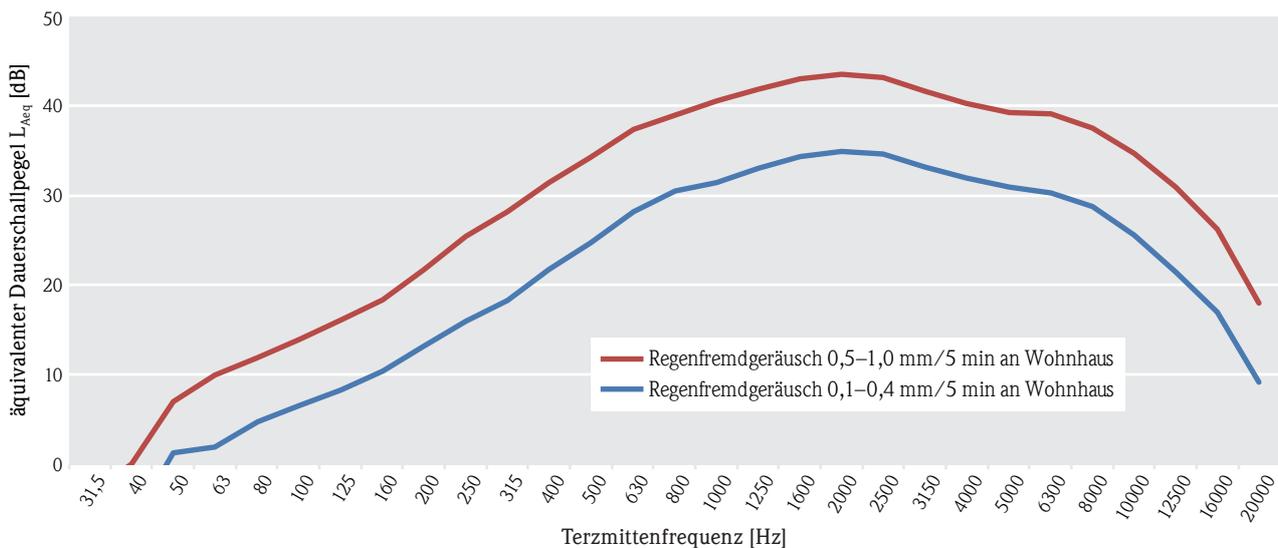


Abb. 52: Energetisch gemitteltetes Terzspektrum von 19 Messungen bei 0,1–0,4 mm/5 min und 14 Messungen bei 0,5–1,0 mm/5 min. Reines Fremdgeräusch bei Regen an einem Wohnhaus in typisch dörflicher Ortsrandlage.

Dauer von ca. 9 Wochen eine Dauermessstation mit Schallpegelmessgerät und Wetterstation im Garten eines Wohnhauses in einem Wohngebiet in Hungen (ruhige Ortsrandlage) installiert. Ein Überblick über die Messumgebung zeigen die Abb. 50 und 51.

Dabei konnten folgende Terzspektren (nachts ab 22:00 Uhr) in einer Immissionshöhe von 3 m aufgezeichnet werden (Abb. 52).

Als zeitlich gewichteter und energetisch gemittelter Immissionspegel, erzeugt durch das Regengeräusch bei 0,1–0,4 mm/5 min, ergibt sich an diesem exemplarischen Immissionsort **43,4 dB(A)**. Für den stärkeren Regen mit 0,5–1,0 mm/5 min ergibt sich ein zeitlich gewichteter und energetisch gemittelter Immissionspegel von **52,1 dB(A)**. Der vollständige Datensatz mit allen Messungen befindet sich im Anhang 7 und 8.

Im Vergleich zu den Regen-Messungen bei den idealisierten Emissions-Umgebungsbedingungen (Wiese, Acker) konnten also vor allem für die hohen Niederschläge (0,5–1,0 mm/5 min) deutlich höhere Fremdgeräuschpegel in der dörflichen Umgebung gemessen werden. Die gemittelten Messwerte sind in Tab. 27 gegenübergestellt.

Bei 0,1–0,4 mm/5 min liegen die Messwerte am Wohnhaus mit 43,4 dB(A) 3,4 dB(A) über den Messwerten auf der freien Wiese. Bei 0,5–1,0 mm/5 min liegen die Messwerte mit 52,1 dB(A) sogar 8,2 dB(A) höher als auf der Wiese. Eine Differenz von etwa 10 dB(A) würde einer subjektiven Verdoppelung der Lautstärke entsprechen und ist dementsprechend deutlich lauter wahrnehmbar. Das heißt bei zunehmender Regenstärke erhöht sich der Einfluss der umgebenden schallharten Flächen auf den Fremdgeräuschpegel, wodurch die Hörbarkeit von Leiterseilemissionen bei starkem Regen im urbanen Umfeld deutlich vermindert wird. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, werden im folgenden Kapitel die Immissionen durch Regenniederschläge an einem Wohnhaus mit prognostisch berechneten Immissionen durch Leiterseilemissionen verglichen.

#### 6.4.4 Vergleich der Messergebnisse des Regengeräuschs mit Immissionspegeln durch Leiterseilemissionen

In den Tab. 28 und 29 werden die Messergebnisse des reinen Regengeräuschs mit berechneten Immissionspegeln von Leiterseilemissionen für verschiedene Mastkonstellationen gegenübergestellt. Zunächst werden die Leiterseilemissionen von „dünnen“ Seilen mit dem im Wohngebiet ermittelten reinen Regengeräusch verglichen. Hierbei wird für das Fremdgeräusch durch den Regen neben dem  $L_{Aeq}$  ebenfalls der  $L_{AF95\%}$  angeführt, da dieser als Kriterium für die ständige Überdeckung durch Fremdgeräusche gilt, in deren Fall eine Genehmigung nicht versagt werden darf [15].

Die Ergebnisse in Tab. 28 zeigen, dass bereits bei geringen Abständen zur Trasse die durch den Regen erzeugten Pegel über den Immissionspegeln der Leiterseilgeräusche liegen. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei Regenstärken von 0,5–1,0 mm/5 min. Hier liegt das Fremdgeräusch durch den Regen bereits bei einer Entfernung von 63 m zur Trassenmitte mehr als 10 dB(A) für den  $L_{Aeq}$  bzw. 9 dB(A) für den  $L_{AF95\%}$  über dem Immissionspegel der Leiterseilgeräusche. An diesem Punkt ist demnach von einer kompletten Überdeckung der Leiterseilemissionen auszugehen. Bei 0,1–0,4 mm/5 min beträgt die Pegeldifferenz erst ab 112 m ca. 10 dB(A). In einzelnen Fällen findet die Überdeckung jedoch erst an weiter entfernten Punkten statt, da bei Nieselregen deutlich leisere Fremdgeräuschpegel auftreten.

In Tab. 29 wird das ermittelte Fremdgeräusch durch den Regen mit den Leiterseilemissionen von „dicken“ Seilen gegenübergestellt.

Da die Leiterseilemissionen von „dicken“ Leiterseilen niedriger ausfallen ist die Differenz zu den Fremdgeräuschen durch den Regen noch deutlich größer geworden. Bereits direkt unterhalb der Leiterseile beträgt die Pegeldifferenz in einer Immissionshöhe von 3 m mehr als 10 dB(A), sowohl bei den niedrigen als auch bei den hohen Niederschlägen, sodass es bei starken Regenereignissen in der Nähe von Hochspannungsleitungen mit „dicken“ Leiterseilen selbst in unmittelbarer Trassennähe zu keiner Belästigung durch Leiterseilemissionen kommen sollte aufgrund der ständigen Überdeckung durch Fremdgeräusche, gemessen als  $L_{AF95\%}$ . Bei leichten Niederschlägen ist

**Tab. 27:** Vergleich der Regen-Fremdgeräuschmessungen (Mittelwerte) bei verschiedenen Niederschlagsstärken und an unterschiedlichen Standorten.

Standort	Pegel bei 0,1–0,4 mm/5 min [dB(A)]	Pegel bei 0,5–1,0 mm/5 min [dB(A)]
unbebaute Wiese	40,0	43,9
Wohnhaus	43,4	52,1

**Tab. 28:** Gegenüberstellung von Immissionen durch Regenrauschen und durch Leiterseilgeräusche bei „dünnen“ Leiterseilen und der Mastkonstellation Brilon (zwei Stromkreise).

Regenstärke in mm/5 min	Entfernung zu Trassenmitte [m]	Abstand Mikrofon zum nächsten Leiterseil [m]	Immissionspegel in 3 m Höhe durch Leiterseilemissionen [dB]		Immissionspegel in 3 m Höhe durch Regenrauschen [dB]		Differenz Leiterseilimmissionen – Regenrauschen [dB]	
			$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$	$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$	$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$
0,1–0,4	0	21,9	44,0	43,4	42,9	0,6	1,1	
0,1–0,4	38	33,3	40,5	43,4	42,9	-2,9	-2,4	
0,1–0,4	63	55,0	37,6	43,4	42,9	-5,8	-5,3	
0,1–0,4	88	78,6	35,4	43,4	42,9	-8,0	-7,5	
0,1–0,4	112	101,9	33,5	43,4	42,9	-9,9	-9,4	
0,5–1,0	0	21,9	47,8	52,1	50,8	-4,3	-3,0	
0,5–1,0	38	33,3	44,4	52,1	50,8	-7,7	-6,4	
0,5–1,0	63	55,0	41,6	52,1	50,8	-10,5	-9,2	
0,5–1,0	88	78,6	39,4	52,1	50,8	-12,7	-11,4	
0,5–1,0	112	101,9	37,5	52,1	50,8	-14,6	-13,3	

**Tab. 29:** Gegenüberstellung von Immissionen durch Regenrauschen und durch Leiterseilgeräusche bei „dicken“ Leiterseilen und der Mastkonstellation Rangendingen (zwei Stromkreise).

Niederschlagsstärke	Entfernung zu Trassenmitte [m]	Abstand Mikrofon zum nächsten Leiterseil [m]	Immissionspegel in 3 m Höhe durch Leiterseilemissionen [dB]		Immissionspegel in 3 m Höhe durch Regenrauschen [dB]		Differenz Leiterseilimmissionen – Regenrauschen [dB]	
			$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$	$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$	$L_{Aeq}$	$L_{AF95\%}$
Leicht	0	14,4	30,9	43,4	42,9	-12,5	-12,0	
Leicht	38	26,2	27,3	43,4	42,9	-16,1	-15,6	
Leicht	63	49,7	24,1	43,4	42,9	-19,3	-18,8	
Leicht	88	74,2	21,5	43,4	42,9	-21,9	-21,4	
Stark	0	14,4	38,9	52,1	50,8	-13,2	-11,9	
Stark	38	26,2	35,4	52,1	50,8	-16,7	-15,4	
Stark	63	49,7	32,3	52,1	50,8	-19,8	-18,5	
Stark	88	74,2	29,8	52,1	50,8	-22,3	-21,0	

der leichte Nieselregen wieder als Ausnahmefall zu bewerten, bei dem es zu hörbaren Leiterseilemissionen in Trassennähe kommen kann. In den meisten Fällen jedoch dürften auch bei leichten Regen-Niederschlägen keine von den Leiterseilen ausgehenden Emissionen subjektiv hörbar sein.

**Zusammenfassend** kann gesagt werden, dass die Überdeckungswahrscheinlichkeit in dörflicher ruhiger, d.h. fremdgeräuscharmer Ortsrandlage

- bei „dünnen“ Seilkonfigurationen und starkem Regen insgesamt etwas höher ist im Vergleich zu leichtem Regen,
- bei „dicken“ Seilkonfigurationen insgesamt höher und ab Entfernungen von > 38 m als fast sicher gelten kann
- aufgrund geringerer Regengeräusche bei niedrigen bzw. leichterem Nieselregen es für die lautereren, „dünnen“ Leiterseile noch zu hörbaren Koronageräuschen auch noch in größeren Entfernungen kommen kann (mit geringerer Überdeckungswahrscheinlichkeit), dem Auftreten hörbarer tonaler Ereignisse in Trassennähe ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu widmen
- der niedrigere Niederschlag ist hiernach insgesamt als kritischer anzunehmen

**Zu C) die projektspezifisch durchgeführten regenbehafteten Vorbelastungsmessungen im städtischen bzw. urbanen schallharten Umfeld**

Im Zuge von Vorbelastungsmessungen in dichter besiedelten, typisch urbanen Ballungsräumen wurde mehrfach versucht, die Vorbelastung unter Regeneinwirkung von Höchstspannungstrassen zu ermitteln. Projektspezifisch sollten Aussagen über den Einfluss der durch Regen generierten Korona-Vorbelastung mit vor allem „stärkerem“ Regen (> 4,8 mm/h) ermittelt werden. Hierzu wurden vereinzelt die Situationen bei erwartetem, gemeldetem Regen vor Ort an den beiden kritischsten Immissionsorten eines Projektes untersucht bzw. versucht zu messen. Diese Immissionsorte liegen in einem typischen urbanen Gebiet, dichter Wohnbebauung mit teils durchzogenen Grünflächen (Köln Hürth). Zur Bestimmung der Anlagenvorbelastung sind erfahrungsgemäß hier nur die leisesten Nachtstunden mit den geringsten Verkehrseinflüssen im Zeitkorridor von 1:00–3:00 Uhr nachts (bzw. ca. 00:30–3:30 Uhr) sinnvoll und zielführend messbar. Dies wurde hier bereits durch

Messversuche mit dominant auftretenden Verkehrsgeräuschen aus entfernterer Umgebung bestätigt. Aufgrund des geringen Auftretens stärkerer Niederschläge in diesem Zeitkorridor für dieses Untersuchungsgebiet, welches als eines der regenreichsten Gebiete Deutschlands gilt, stellte sich diese Untersuchung doch als nicht umsetzbar heraus. Während eines Zeitraumes vom 01.09.2013 bis zum 13.06.2014 (> 10 Monate) wurden durchgehend Wettervorhersagen beobachtet. Jedoch konnten in diesem Zeitkorridor insgesamt nur drei Messversuche bei gemeldeter stärkerer Regeneinwirkung durchgeführt werden. Die Messungen sollten im Zeitkorridor mit der geringsten verkehrsbedingten Fremdgeräuscheinwirkung (1:00–3:00 Uhr) nachts stattfinden. Für den genannten Zeitraum vom 01.9.2013 bis zum 13.06.2014 wurden dabei für die Nachtzeit zwischen 00:00 Uhr und 04:00 Uhr nur einmal Regenstärken mit den zu untersuchenden Regenmengen vorausgesagt, wobei es sich hier um ein Unwetter handelte mit ungünstigen Messbedingungen (Sturm mit zu viel Wind). Um sicher zu gehen, wurden zwischenzeitlich Wetterdaten vom DWD angefordert (Zeitraum 01.09.2013 bis 19.03.2014), welche das geringe Auftreten hoher Niederschläge bestätigten: in diesem Zeitraum traten lediglich zweimal jeweils in der Nachtstunde zwischen 23:00 Uhr und 00:00 Uhr Niederschläge > 4,8 mm/h auf.

Von insgesamt drei Messversuchen, ausgehend von der Wettervorhersage im genannten Zeitkorridor, kam es lediglich bei einem Versuch auch Vorort zu Niederschlag, welcher jedoch nur bei < 1,2 mm/h lag. Diese Messung wurde am 10.10.2013 zwischen 00:30 Uhr und 3:00 Uhr an zwei Immissionsorten durchgeführt. Diese waren durch eine bestehende Trasse mit einem Stromkreis mit 380 kV, 4er Bündel und dünnen Leiterseilen, sowie einem Stromkreis mit 220 kV, 4er Bündel und dünnen Leiterseilen, überspannt. Dabei wurde ein Messgerät am Immissionsort (IO) selbst aufgestellt, und ein Messgerät in ausreichender Entfernung mit vergleichbaren örtlichen Gegebenheiten, um möglichst isoliert nur die Regenfremdgeräusche (FG) simultan erfassen zu können. Diese zeitgleichen Messergebnisse sind in Tab. 30 dargestellt.

Aus der Tabelle ist ablesbar, dass alle Fremdgeräuschemesswerte über den Messwerten am nächsten Punkt der Trasse, respektive den Immissionsortpegeln liegen. Es kommt an allen Immissionspunkten zu einer Überlagerung/Maskierung der Immissionspegel

**Tab. 30:** Gegenüberstellung von projektspezifischen Immissionen durch Regenrauschen an urbanem IO und durch Leiterseilgeräusche bei „dünnen“ Leiterseilen und einem wirksamen 380 kV-Stromkreis bei leichtem Niederschlag < 1,2mm/h; IO = Immissionsort FG = Fremdgeräuschmesspunkt.

Messpunkte	Abstand Messpunkt zur Trassenmitte [m]	Mittelwert der Messungen $L_{Aeq}$ [dB]
Messpunkt Gebäude nahe Immissionsort A: - Messpunkt 1 (am IO) - Messpunkt 2 (FG)	8 m 53 m	39,7 40,1
Immissionsort A: - Messpunkt 1 (am IO) - Messpunkt 2 (FG)	21 m 53 m	35,8 36,2
Immissionsort B: - Messpunkt 1 (am IO) - Messpunkt 2 (FG)	11 m 87 m	41,6 42,2

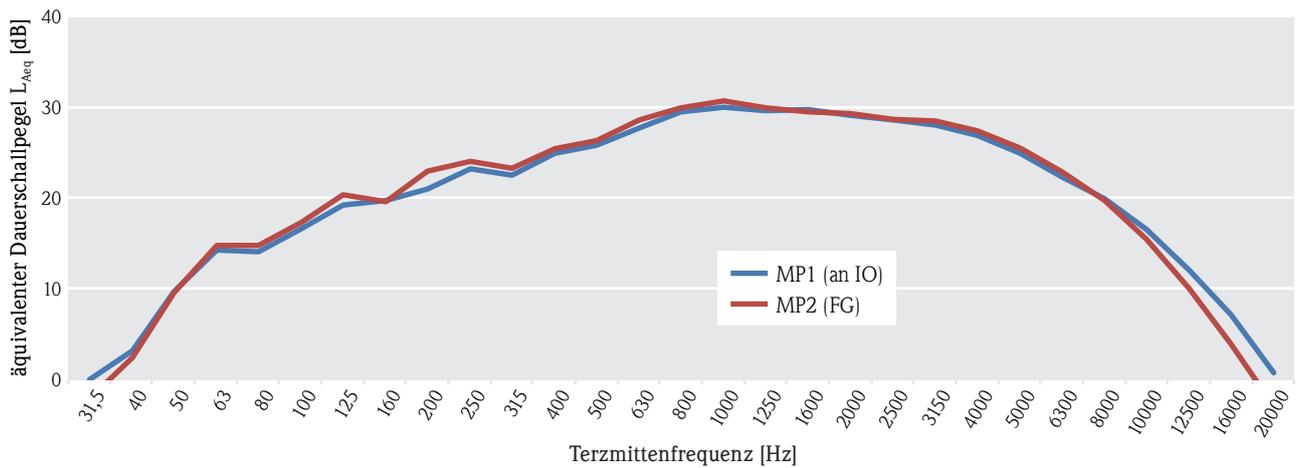
durch die Umgebungspegel, welche durch Fremd- und Regengeräusche beeinflusst sind. Wirkungsbezogene Auswertungen oder Fremdgeräuschkorrekturen sind daher nicht möglich. Die zugehörigen simultan erfassten terzspektralen Messergebnisse sind mit Abb. 53 widergegeben:

An allen drei gemessenen Aufpunkten konnten Koronageräusche während der Messungen subjektiv kaum bis schwach wahrgenommen werden. Auf den anschließend im Akustiklabor ausgewerteten Tonaufnahmen konnten die Koronageräusche nicht vom Regengeräusch unterschieden werden. Die messenden Sachverständigen vor Ort bestätigten, dass das Koronageräusch aufgrund seines Geräuschcharakters sehr ähnlich zum Regengeräusch auftritt und nur aufgrund der bewussten Fokussierung die Stromtrasse mit den gesuchten Koronageräuschen als solches identifiziert werden konnte. Dabei wurde das Koronageräusch von den messenden Sachverständigen nicht als laut wahrgenommen, was in Verbindung mit den geringen Niederschlägen und der damit geringen Benetzung der Leiterseile mit Wasser auch erklärt werden könnte. Es ist zu erkennen, dass spektral an allen Immissionsorten für alle pegelbestimmenden Terzen die Regenfremdgeräuschwerte (MP2) immer leicht über dem von MP1 liegen. Die Unterschiede an den einzelnen Immissionsorten erklären sich mit örtlichen Gegebenheiten, z.B. an IO A in Abb. 54 bezüglich der Autobahnlage sowie u.a. auch unterschiedlichen schallharten Flächen, nicht aber in der Entfernung zur Trasse. Gut erkennbar ist, dass die Koronageräusche keinen relevanten Anteil am gemessenen Pegel des MP1 hatten und zudem durch die Regengeräusche und vor allem auch durch

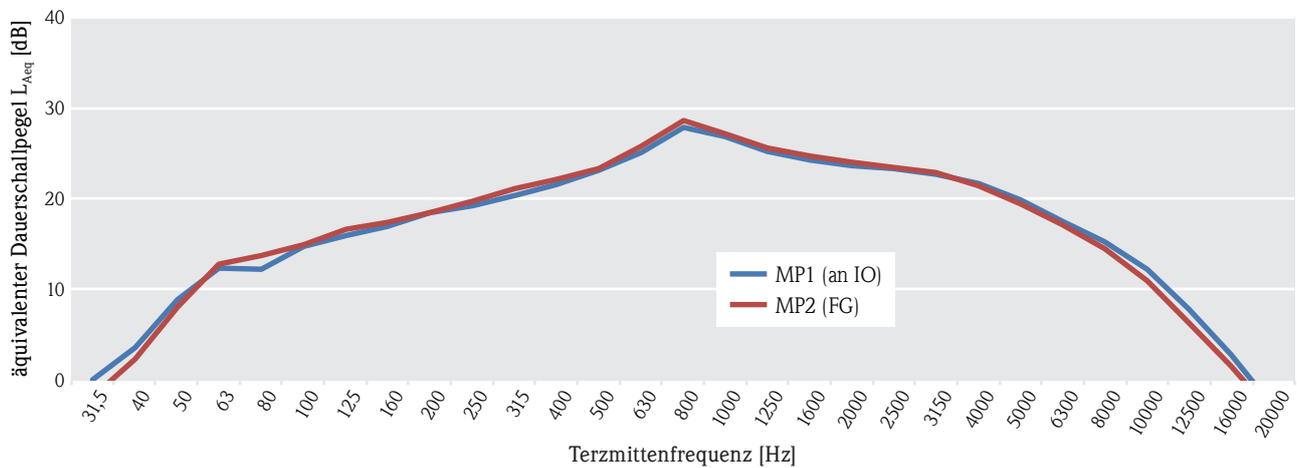
erhöhte Verkehrsfremdgeräusche auf regennasser Fahrbahn überlagert wurden.

Auch wenn hier nicht das Szenario bei stärkerem Niederschlag abgebildet werden konnte, zeigen diese Messungen **zusammenfassend**, dass:

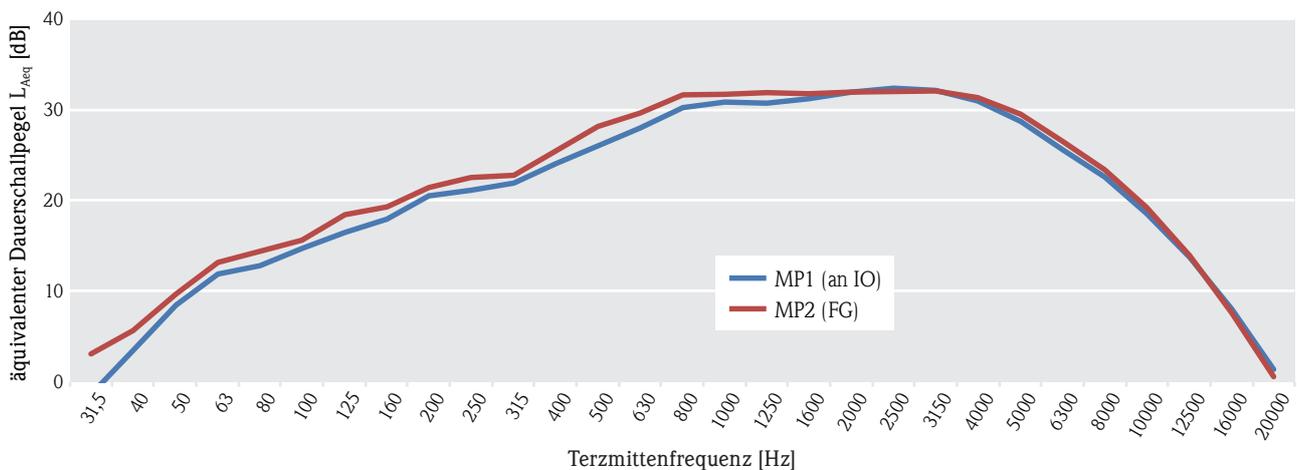
- schon bei leichtem Regen die Koronageräusche durch die erhöhten Fremdgeräusche, bedingt durch regennasse Fahrbahnen (urbanes Verkehrs-Hintergrundrauschen) und das Regenrauschen selbst, überlagert werden,
- der typische Frequenzverlauf mit auftretenden Einzeltönen bei 100 und/oder 200 Hz nicht beobachtet oder gemessen werden konnte,
- bereits bei leichtem Regen mit nur 1,2 mm/h bzw. 0,1 mm/5 min hierdurch bedingte Fremdgeräusche im urbanen Umfeld von >40 dB(A) auftreten und diese somit hierfür ggf. als „ortsüblich“ gelten können,
- diese regenbedingten Fremdgeräusche höher liegen als in dörflicher Ortsrandlage und deutlich höher als im vergleichsweise idealisierten Freifeld (Emissionsmessungen),
- Vorort die „gesuchten“ Koronageräusche in nächster Trassennähe kaum vom gemessenen und sehr ähnlichem Spektralverlauf des Gesamtgeräusches zu identifizieren und zu unterscheiden waren (Maskierung),
- bei der anschließenden Auswertung im Akustiklabor die Tonaufnahmen der Geräuschaufzeichnungen im Vergleich zur Vorortbeobachtung.



**Abb. 53:** Energetisch gemitteltetes Terzspektrum von drei Messungen bei  $< 1,2$  mm/h an einem Immissionsort mit urbanem Umfeld und zugehöriger Fremdgeräuschmessung (Regengeräusch) nahe Immissionsort A.



**Abb. 54:** Energetisch gemitteltetes Terzspektrum von sechs Messungen bei  $< 1,2$  mm/h an einem Immissionsort mit urbanem Umfeld und zugehöriger Fremdgeräuschmessung (Regengeräusch) an Immissionsort A.



**Abb. 55:** Energetisch gemitteltetes Terzspektrum von drei Messungen bei  $< 1,2$  mm/h an einem Immissionsort mit urbanem Umfeld und zugehöriger Fremdgeräuschmessung (Regengeräusch) an Immissionsort B.

noch eindeutiger nur als Regengeräusch charakterisiert wurden

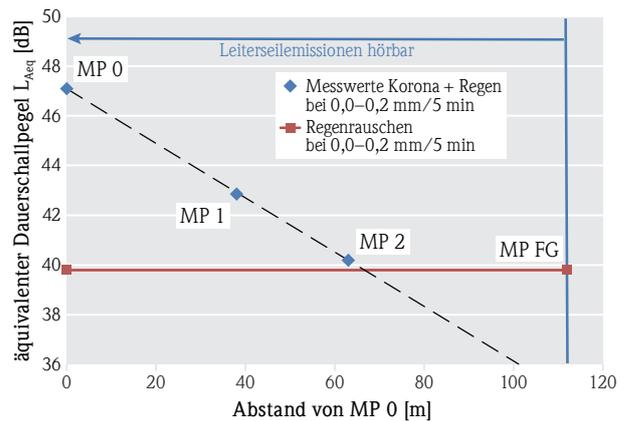
- die Langzeitstatistiken des DWD hinsichtlich der Regenhäufigkeiten von auftretenden Starkregenereignissen im Raum Köln-Bonn mit sehr seltenen Regenintensitäten  $> 4,8 \text{ mm/h}$  sich im beobachteten, überwachten Zeitraum ( $> 10$  Monate) hiermit praktisch bestätigt werden und
- in Anlehnung an die TA Lärm sie sich als sehr selten gezeigt haben und damit im Langzeitversuch ein solches stärkeres Regenereignis mit deutlicheren Koronageräuschen zu messen nicht möglich war

### 6.4.5 Graphische Darstellung der Fremdgeräuschüberlagerung für Messungen mit idealisierten Umgebungsbedingungen

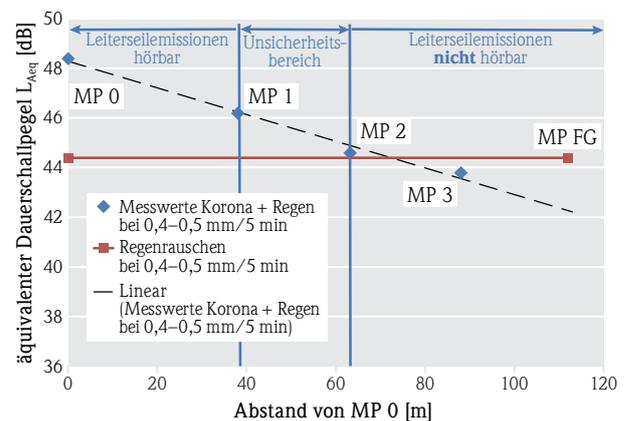
Bei verschiedenen Regenstärken konnten entfernungsabhängige Geräuschmessungen in Trassennähe durchgeführt werden. Die Messdaten entstammen dem Standort Brilon mit „dünnen“ Leiterseilen. Gemessen wurde dabei neben der festinstallierten Dauermessstation MP0 zusätzlich noch am MP1 in 38 m Entfernung zum MP0 und am MP2 in 63 m Entfernung zum MP0. Teilweise konnte auch noch am MP3 in 88 m Entfernung gemessen werden, dies war jedoch aufgrund von technischen Problemen (Eindringen von Feuchtigkeit, Mikrofonüberschläge usw.) nicht in allen Fällen möglich.

In den folgenden Abbildungen ist zu erkennen, dass die vor Ort gemessenen fremdgeräuschüberlagerten Pegel bestehend aus Leiterseilemissionen und Regenrauschen mit zunehmender Entfernung von den Leiterseilen abnehmen, da der Anteil der Leiterseilemissionen geringer wird und die Pegel sich dem reinen Fremdgeräuschpegel des Regenrauschens, gemessen am MPFG in 112 m Entfernung zum MP0, annähern.

Anhand der Darstellung in den Abb. 56–58 wird ersichtlich, dass es bei den hohen Niederschlagsstärken mit  $0,8\text{--}1,0 \text{ mm/5 min}$  deutlich früher zur Überlagerung der hörbaren Leiterseilemissionen durch das Regenrauschen kommt als bei den Messungen bis zu  $0,5 \text{ mm/5 min}$ . Sowohl bei den Messungen bei  $0,0\text{--}0,2 \text{ mm/5 min}$  als auch bei den Messungen mit  $0,4\text{--}$

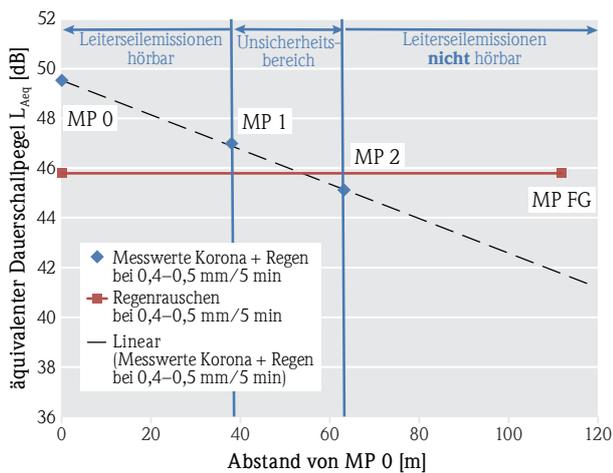


**Abb. 56:** Abstandsabnahme der Pegel von MP0 bis MP2 bei  $0,0\text{--}0,2 \text{ mm/5 min}$  (Mittelwert von sechs Messungen in Brilon mit „dünnen“ Leiterseilen) im Vergleich zum Regenrauschen an der Fremdgeräuschstation bei simultanen Messungen. Mit subjektivem Höreindruck der Sachverständigen vor Ort.



**Abb. 57:** Abstandsabnahme der Pegel von MP0 bis MP3 bei  $0,4\text{--}0,5 \text{ mm/5 min}$  (Mittelwert von vier Messungen in Brilon mit „dünnen“ Leiterseilen) im Vergleich zum Regenrauschen an der Fremdgeräuschstation bei simultanen Messungen. Mit subjektivem Höreindruck der Sachverständigen vor Ort.

$0,5 \text{ mm/5 min}$  liegen die gemessenen Pegel am MP2 noch knapp oberhalb des Regenrauschens am MPFG. Bei  $0,8\text{--}1,0 \text{ mm/5 min}$  jedoch liegt der Messwert am MP2  $0,7 \text{ dB(A)}$  unterhalb des Messwertes am MP Fremdgeräusch (FG). Das heißt der Messwert am MP2 enthält keinen signifikanten Einfluss mehr von den Leiterseilen und ist durch das Regenrauschen dominiert. Dass der Pegel am MPFG minimal höher liegt als am MP2, kann auf kleine lokale Schwankungen des Regenrauschens zurückgeführt werden. Zudem ist ersichtlich, dass bei  $0,0\text{--}0,2 \text{ mm/5 min}$



**Abb. 58:** Abstandsabnahme der Pegel von MP0 bis MP2 bei 0,8–1,0 mm/5 min (Mittelwert von drei Messungen in Brilon mit „dünnen“ Leiteseilen) im Vergleich zum Regenrauschen an der Fremdgeräuschstation bei simultanen Messungen. Mit subjektivem Höreindruck der Sachverständigen vor Ort.

die Pegelabnahme mit zunehmender Entfernung am deutlichsten messbar ist. Hier beträgt die Abnahme von MP0 zu MP2 6,9 dB(A). Bei 0,4–0,5 mm/5 min beträgt die Pegelabnahme zwischen MP0 und MP2 nur noch 3,8 dB(A). Bei 0,8–1,0 mm/5 min sind es 4,4 dB(A). Dieser Zusammenhang zeigt erneut, dass bei sehr leichtem Regen die Leiteseilemissionen auch noch in weiteren Entfernungen einen hörbaren Einfluss auf die Immissionspegel beisteuern können. Mit zunehmender Regenstärke jedoch wird die Hörbarkeit der Leiteseilemissionen immer schwieriger mit größeren Entfernungen zu den Leiteseilen. Die Punkte, an denen sich die Regressionsgerade der Messungen an MP0 bis MP3 (Messung von Korona + Regen) und die Gerade des reinen Regenrauschens schneiden, bedeuten, dass die Pegel des Regenrauschens bereits ca. 10 dB(A) höher liegen als die Pegel der reinen Leiteseilemissionen: es kommt zu keiner signifikanten Pegelerhöhung gegenüber dem Regenrauschen. Dort wo der Summenpegel aus Leiteseilemission und Regenrauschen 3 dB(A) über dem reinen Regenrauschen liegt, sind die Pegel von Regenrauschen und reiner Leiteseilemissionen etwa auf gleichem Niveau, da die Aufsummierung von zwei gleich hohen Schalldruckpegeln zu einer Erhöhung um 3 dB(A) des Gesamtpegels führt. Bei den dargestellten Messwerten handelt es sich, wie beschrieben, um Summenpegel aus Regenrau-

schen und Leiteseilemissionen. Dadurch wird nicht direkt ersichtlich wie groß die Pegeldifferenz zwischen Leiteseilemission und Regenrauschen ist. Eine Darstellung des fremdgeräuschkorrigierten reinen Leiteseilgeräuschs ist an den Messpunkten MP1 bis MP3 jedoch nicht möglich, da an diesen Punkten kein ausreichender Fremdgeräuschabstand von mindestens 3 dB(A) zum Pegel an der Fremdgeräuschstation mehr gegeben ist. Aus diesem Grund kann keine Fremdgeräuschkorrektur durchgeführt werden.

#### 6.4.6 Graphische Darstellung der Fremdgeräuschüberlagerung für Prognosebetrachtungen mit nicht idealisierter urbaner Umgebungsbedingung

Um diesen Zusammenhang für ein urbanes städtisches Umfeld dennoch graphisch darzustellen, können die berechneten Immissionspegel mit zwei Stromkreisen aus Kapitel 6.4.4 und die ständigen vorherrschenden Regengeräusche der typisierend gemessenen, ruhigen Ortsrandlage mit schallhartem dörflichem Umfeld als  $L_{AF95\%}$  vergleichend gegenübergestellt und prognostisch genutzt werden. Aus den in Kapitel 6.4 dargestellten Tabellen und Grafiken können folgende Schlussfolgerungen **zusammenfassend** gezogen werden:

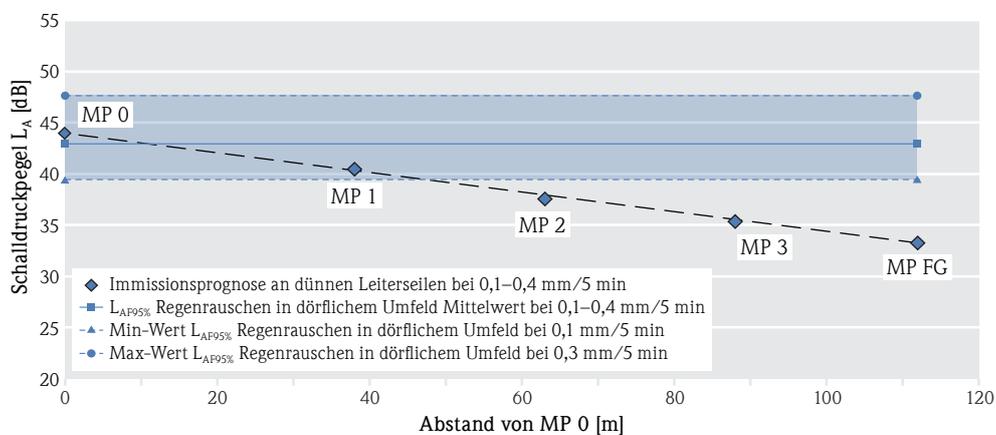
- Die Pegel der mit Regenniederschlägen einhergehenden Fremdgeräusche hängen im wesentlichen von der Niederschlagsstärke und der Umgebung ab (schallharte oder schallweiche Umgebung).
- Mit zunehmender Regenstärke nimmt das damit einhergehende Fremdgeräusch zu.
- Dieser Effekt verstärkt sich in schallharter Umgebung. Hier steigen die Pegel um ca. 9 dB(A) von 43,4 dB(A) auf 52,1 dB(A) im Vergleich zwischen leichtem/mittlerem Regen (0,1–0,4 mm/5 min) und stärkerem Regen (0,5–1,0 mm/5 min). In schallweicher Umgebung steigen die Pegel nur um ca. 4 dB(A) von 40,0 dB(A) auf 43,9 dB(A).
- Da sich reale Immissionspunkte fast ausschließlich in schallharter Umgebung befinden, sind die Fremdgeräuschmessungen in schallharter Umgebung als die maßgeblichen anzusehen, welche mit den durch Leiteseilemissionen erzeugten

Immissionspegeln zu vergleichen sind.

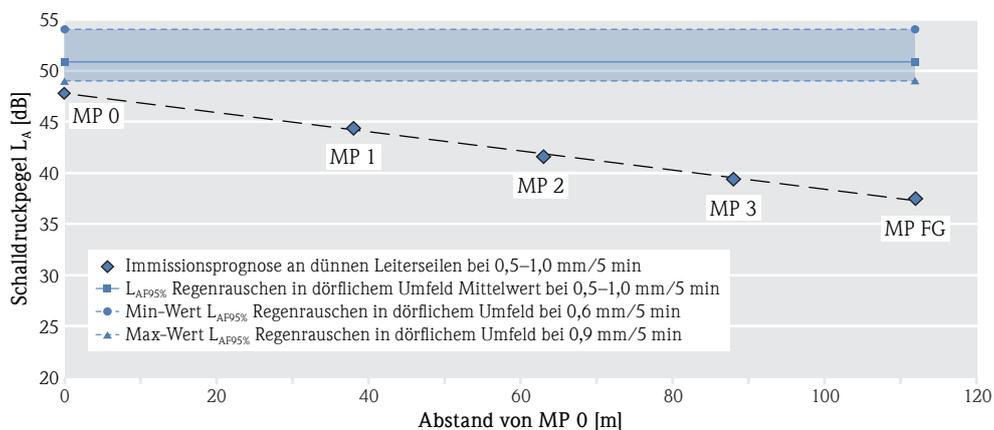
- In diesem Zusammenhang sind „dünne“, lautere Leiterseile während leichtem/mittlerem Regenniederschlag, als kritischster Zustand zu bewerten (vgl. Abb. 59).

Bei den leiseren „dicken“ Leiterseilen ist in den meisten Fällen von einer Überlagerung der Leiterseilemissionen durch das Regenrauschen zu rechnen (vgl. Abb. 61 und 62).

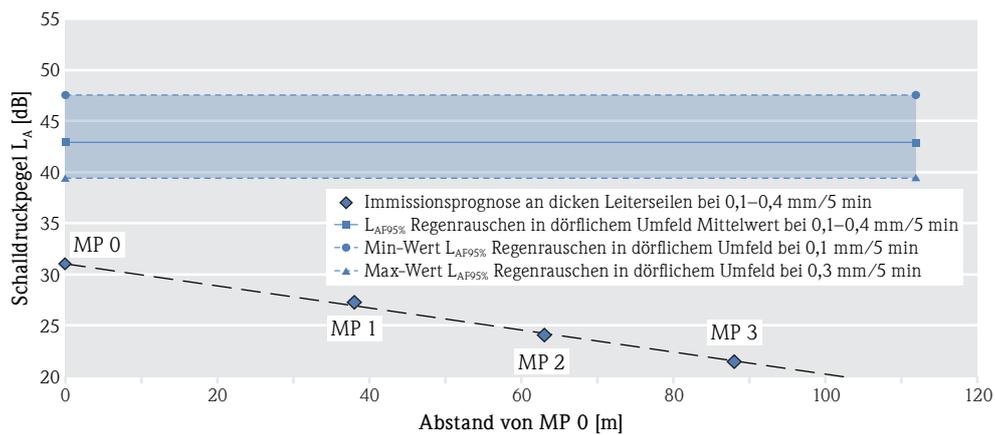
**Hinweis:** Dargestellte Zusammenhänge für die „ständige Überdeckung“ mit einem  $L_{AF95\%}$  Hintergrundpegel durch urbanes Regenrauschen gelten nur für hier berechnete, angegebene Pegelverhältnisse. Im Sinne der TALärm gilt dies nur, wenn signifikante Einzeltöne bei diesen Verhältnissen nicht auftreten resp. gehört werden können sowie daraus keine tieffrequenten Geräusche abzuleiten sind (siehe Kapitel 6.4.1). Dies ist jeweils im Einzelfall sorgfältig zu prüfen.



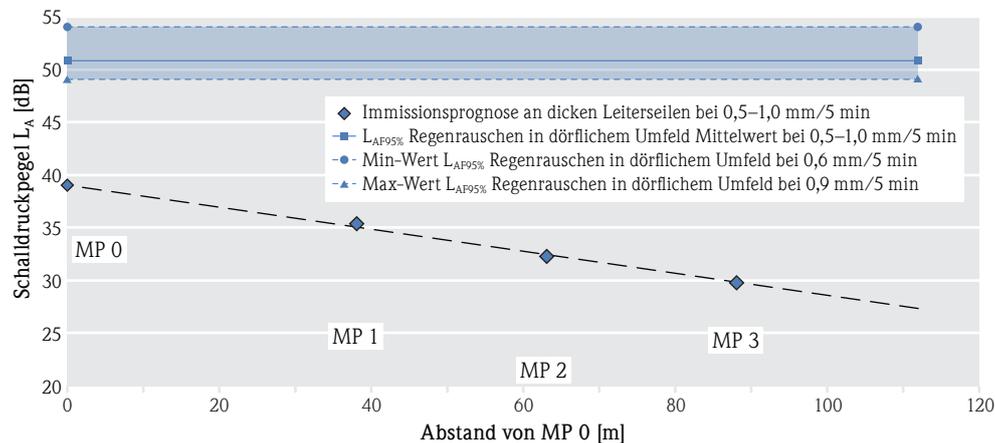
**Abb. 59:** Vergleichende Darstellung der berechneten Immissionsprognosen der reinen Leiterseilemissionen von zwei Stromkreisen für MP0 bis MPFG bei 0,1–0,4 mm/5 min bei „dünnen“ Leiterseilen anhand des Emissionsansatzes aus Kapitel 5.1.2 sowie des gemessenen  $L_{AF95\%}$  in ruhigem, dörfllichem Umfeld bei 0,1–0,4 mm/5 min Regenniederschlag.



**Abb. 60:** Vergleichende Darstellung der berechneten Immissionsprognosen der reinen Leiterseilemissionen von zwei Stromkreisen für MP0 bis MPFG bei 0,5–1,0 mm/5 min bei „dünnen“ Leiterseilen anhand des Emissionsansatzes aus Kapitel 5.1.2 sowie des gemessenen  $L_{AF95\%}$  in ruhigem, dörfllichem Umfeld bei 0,5–1,0 mm/5 min Regenniederschlag.



**Abb. 61:** Vergleichende Darstellung der berechneten Immissionsprognosen der reinen Leiterseilemissionen von zwei Stromkreisen für MP0 bis MP 3 bei 0,1–0,4 mm/5 min bei „dicken“ Leiterseilen anhand des Emissionsansatzes aus Kapitel 5.1.1 sowie des gemessenen  $L_{AF95\%}$  in ruhigem, dörflichem Umfeld bei 0,1–0,4 mm/5 min Regenniederschlag.



**Abb. 62:** Vergleichende Darstellung der berechneten Immissionsprognosen der reinen Leiterseilemissionen von zwei Stromkreisen für MP0 bis MP 3 bei 0,5–1,0 mm/5 min bei „dicken“ Leiterseilen anhand des Emissionsansatzes aus Kapitel 5.1.1 sowie des gemessenen  $L_{AF95\%}$  in ruhigem, dörflichem Umfeld bei 0,5–1,0 mm/5 min Regenniederschlag.

## 7 Prognostische Prüfung auf tieffrequente Geräusche (Ziff. 7.3 TALärm)

Bei den hier ermittelten spektralen Emissionswerten mit messbarem tonalen Immissionspegel in nächster Umgebung mit teils deutlich heraustretenden 100-Hz-Einzelönen stellt sich im Sinne der TALärm die Frage, inwieweit durch Koronageräusche auch sogenannte „Tieffrequente Geräusche“ (TG) auf-

treten können. In diesem Zusammenhang fordern einzelne Fachbehörden (LANUV, HLU) für die Genehmigungsprognosen entsprechende prognostische Überprüfungen. Im Folgenden wird ein mögliches Prüfverfahren hierzu, welches von einer Fachbehörde (LANUV) empfohlen wurde, erläutert.

## 7.1 allgemeine Hinweise zu tief-frequenten Geräuschen (TG)

Gemäß Ziffer 7.3 TALärm [15] ist für tieffrequente Geräusche mit vorherrschenden Energieanteilen unter 90 Hz zu beurteilen und ggf. prognostisch abzuschätzen und zu prüfen, inwieweit hierdurch schädliche Umwelteinwirkungen im Einzelfall nach den örtlichen Verhältnissen erwartet werden können.

Schädliche Umwelteinwirkungen können insbesondere auftreten, wenn bei deutlich wahrnehmbaren tieffrequenten Geräuschen in den schutzbedürftigen Räumen, bei geschlossenen Fenstern die nach Nummer A.1.5 des Anhangs ermittelte Differenz der Pegel  $L_{Ceq} - L_{Aeq}$  den Wert 20 dB überschreitet. Hinweise zur Ermittlung und Bewertung hierzu enthält Anhang A.1.5 zum Beispiel mit der Aufzählung von Schallquellen, welche (bekanntermaßen) tieffrequente Geräusche verursachen können (vergleiche Korona Emissionsspektrum). Zusätzlich wird der Hinweis gegeben, dass bei bestimmten Anlagen auch die Einleitung tieffrequenter Wechselkräfte in den Baugrund mit den dadurch erzeugten Schwingungen als Körperschall innerhalb schutzbedürftiger Räume tieffrequente Geräusche (als sekundärer Luftschall) erzeugt und übertragen werden können.

Gehört die betrachtete Quelle/Quellgruppe zu dieser Aufzählung bzw. zu diesem Anlagentypus, so ist eine Prüfung bzw. Ermittlung und Bewertung mit den Hinweisen der in A.1.5 datiert angegebenen DIN 45680 [7], Ausgabe März 1997 und dem zugehörigen Beiblatt 1 [8], durchzuführen. Wenn die im Beiblatt 1 genannten Anhaltswerte nicht überschritten werden, so sind gemäß TALärm [15] schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche nicht zu erwarten.

Streng genommen gelten die datierte DIN 45680 inkl. der Hinweise des Beiblattes 1 nur für den „*messtechnischen Nachweis*“ tieffrequenter Geräusche, da es für eine prognostische Berechnung (Abschätzung) derzeit kein gültiges, öffentlich anerkanntes und z.B. vom LAI (Länderausschuss Immissionen) geprüftes Regelwerk gibt. Dies liegt insbesondere an den Randbedingungen, denen die prognostische Aussage mit folgenden Schwierigkeiten unterworfen ist:

- die Unmöglichkeit, die Bauausführung sämtlicher evtl. betroffener Gebäude und die Abmessungen maßgeblicher Räume vor Errichtung bzw. im Planzustand einer Anlage zu erfassen,

- ungenügende oder fehlende verlässliche Daten über die Schalldämmung von Bauteilen bei tief-frequenten Geräuschen, insbesondere im Falle von Körperschallanregung,
- fehlende, verlässliche Daten über das Absorptionsvermögen der maßgeblichen Räume (Immissionsorte innen, „Raumantwort“) im tieffrequenten Bereich.

## 7.2 Empfohlene Vorgehensweise einer Fachbehörde (LANUV)

Vorliegend kann unterstellt werden, dass Koronageräusche bzw. zu untersuchende Stromtrassen weder Erschütterungen im Baugrund verursachen können, noch zu den aufgezählten Schallquellen oder Anlagentypus nach A.1.5 gehören, welche bekanntermaßen tieffrequente Geräusche erzeugen können. Auf Empfehlung einer Fachbehörde (LANUV) sollen aber absichernde prognostische Prüfungen durchgeführt werden, um eine gutachterliche Einschätzung zu finden. Mit dieser Thematik hat sich der Bericht 44932/7 „*Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren – Mustergutachten und Handlungsanleitung*“ [9], erstellt im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kiel, auseinandergesetzt. Da es sich bei dem hinlänglich abgesicherten Korona-Emissionsspektrum um ein Geräusch mit einem wesentlichen Energieanteil in der 100-Hz-Terz handelt, wurde den Empfehlungen dieser Fachbehörde gefolgt und zur abschätzenden Berechnung die Handlungsanleitung (Mustergutachten, Bericht Nr. 44932/7 vom 13.02.2001) der Müller-BBM GmbH von Herrn Dipl. Ing. J. Gilg [9] verwendet.

Dieses Verfahren beschränkt sich ausschließlich auf die Anregung von außen durch Luftschall und beruht auf empirischen Daten. Auf die oben geschilderten Schwierigkeiten der Prognoserandbedingungen (Unsicherheit in Datenerhebung, Raumantwort usw.) wird auch vom Autor in diesem Bericht in entsprechenden Kapiteln näher eingegangen. Auch aus Sicht des TÜV Hessen erscheint die hier vorgeschlagene Methode, mit Hilfe von Grenzkurven und empirischen Mittelwerten für die Schalldruckpegeldifferenz bei mittlerer und hoher Schalldämmung aber

als eine Möglichkeit eine Abschätzung zu finden, für diese Fälle sinnvoll. Zur Reduzierung des Aufwandes und um einer nicht leistbaren, jedoch evtl. erwarteten Genauigkeit vorzubeugen, empfiehlt es sich nur die *maßgeblichen*, d.h. exemplarisch kritischen und nächstliegenden Immissionsorte zur rechnerischen Abschätzung unter Anwendung des worst case Emissionsansatzes näher zu untersuchen. Dies ergibt sich auch bereits aus den oben beschriebenen Beobachtungen des Überdeckungseffektes der 100-Hz-Tonalität durch Regenfremdgeräusche bei größeren Abständen.

Nach den Ausführungen in diesem Bericht [9] wird die Anwendung der Grenzkurvenwerte nach Abb. 11a vorgeschlagen, die tabellarisch in Tab. 31 aufgeführt sind. Bei Einhaltung dieser Werte außen vor dem Gebäude werden hiernach im Regelfall keine Betroffenheiten bezüglich des Beurteilungsverfahrens der DIN 45680 [7] für tieffrequente Geräusche innerhalb des Raumes und somit keine schädlichen Umwelteinwirkungen erwartet. Eine Überschreitung dieser Werte liefert einen Hinweis auf mögliche Betroffenheiten, die aber tatsächlich nicht zwingend eintreten müssen. Andererseits können beim Zusammentreffen aller ungünstigen Umstände (Raumresonanzen stimmen mit den anregenden Frequen-

zen überein, Bauteile haben eigene Resonanzen bei den anregenden Frequenzen) auch bei Nichtüberschreitung dieser Grenzkurvenwerte „außen“ mit einem gewissen Restrisiko trotzdem Überschreitungen der Anhaltswerte in Tab. 1 des Beiblattes 1 zu DIN 45680 [8] im Inneren von Wohnungen auftreten. Bei Überschreitung dieser Grenzkurve (außerhalb eines Gebäudes) ist der Außenpegel auf den Innenpegel umzurechnen mit mittlerer Schalldämmung der Außenbauteile (Projektschritt 2) bzw. mit hoher Schalldämmung der Außenbauteile (Projektschritt 3). Die so ermittelten Innenpegel können anschließend mit der Grenzkurve 10b verglichen werden (siehe Anhang 9 und 10).

### 7.2.1 Vorgehensweise nach DIN 45680 (1997) respektive TA Lärm

Zur Frage, ob nun das erwartete Geräusch tieffrequent im Sinne DIN 45680 [7] Ziffer 5.1 ist, muss die Pegeldifferenz der über die Messdauer gemittelten  $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ -Werte für die im Raum „innen“ auf der Immissionsseite erwarteten Werte gebildet bzw. vorliegend rechnerisch abgeschätzt werden. Das Geräusch ist als tieffrequent im Sinne der Norm definiert, sobald diese Pegeldifferenz (gerundet) den Wert  $> 20$  dB annimmt (vergleiche Ziffer 5.1 DIN 45680 und Seite 7 des Berichtes 44932/7 [9]). Bei einer geringeren Pegeldifferenz ( $< 20$  dB) sind schädliche Umwelteinwirkungen, verursacht durch tieffrequente Geräusche, im Sinne dieser Norm dann nicht zu erwarten und weitere Untersuchungsschritte können entfallen.

Zur Berechnung der erwarteten Innenpegel wurde hier die Umrechnung auf die zugehörigen Innenpegel wie folgt durchgeführt:

In Ermangelung genügend abgesicherter eigener oder fremder Literaturwerte für die Schallpegeldifferenz zwischen dem Schalldruckpegel außen und dem Schalldruckpegel innerhalb eines Raumes wurde für den Frequenzbereich 8–100 Hz die untere Hüllkurve nach Abb. 6 des Berichtes 44932/7 für das Minimum der empirischen Schalldruckpegeldifferenz zugrunde gelegt. Für den darüber liegenden Frequenzbereich mit 125–3150 Hz ( $> 5000$  Hz) liegen genügende Messerfahrungen für die, die resultierende Schalldämmung der gesamten Außenfläche eines Raumes bestimmende,

**Tab. 31:** Grenzkurve entsprechend Abb. 11a Handlungsanleitung - Bericht 44932/7 [9].

Terzfrequenz [Hz]	Grenzkurve für tonhaltige Geräusche außerhalb eines Gebäudes [dB]
8	105
10	98
12,5	91
16	84
20	77
25	70
31,5	63
40	57
50	50
63	44
80	45
100	47

Fensterdämmungen und Nachhallzeiten typischer Wohnräume aus der Bauakustik vor. Für diesen Frequenzbereich > 100 Hz wurde die Gleichung 5 nach VDI 2719 [10] wie folgt verwendet:

- typische gemessene Nachhallzeiten (ca. 0,56–0,74 s) für mittelgroße möblierte Schlaf-/Wohnräume (32–50 m<sup>3</sup>), sowie eine,
- nach VDI 2719 angenäherte Dämmkurve eines bewerteten Schalldämmmaßes mit 30 dB für mittelgroße Fenster (ca. 2–5 m<sup>2</sup>), welches heute praktisch alle isolierverglasteten Fenster erfüllen.

Bestimmend bei dieser Betrachtung bleibt jedoch die untere Hüllkurve nach Bild 6 des Berichtes 44932/7 [9], da vorliegend hier der tieffrequente Einzelton liegt. Die Berechnungen mit diesem Ansatz (siehe Anhang 9 und 10) können dann Auskunft darüber geben, ob tieffrequente Geräusche im Sinne der Norm zu erwarten sind.

Diese im Anhang dokumentierte Vorgehensweise, erfordert einen erhöhten Rechenaufwand, da der gesamte Frequenzbereich von 8 Hz bis 8 kHz im detaillierten Emissionsansatz nach DIN ISO 9613-2 [22] zum potentiellen Aufpunkt und dann in die Innenpegel umgerechnet werden müssen. Als Emissionsansatz für tieffrequente Geräusche wurde als maßgeblicher Zustand der leichte Niederschlag (Emissionsansatz 1 mit  $\leq 4,8$  mm/h Niederschlag) verwendet. Zusätzlich wurden die tieffrequenten Geräusche für den eher selten auftretenden Zustand bei starkem Niederschlag (Emissionsansatz 2a/b, > 4,8 mm/h) untersucht. Dieser Zustand ist u.U. in Anlehnung an Abschnitt 7.2 der TALärm als ein seltenes Ereignis anzusehen, ruft jedoch die höchsten Pegel in der 100-Hz-Terzmittenfrequenz hervor, so dass auch dieses Szenario zur Sicherheit mit untersucht wurde.

Für die Prüfung auf „Tieffrequente Geräusche“ (TG) wurden jeweils Einwirkzeiten einer vollen Nachtstunde ohne Tonzuschlag, sowie die Gesamtbelastung unter Berücksichtigung bestehender und geplanter Trassen regelwerkskonform durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse aus einem kritischen Fallbeispiel können dem Anhang 10 entnommen werden.

### 7.3 Ergebnisse Vorgehensweise nach Handlungsanleitung - Bericht 44932/7

Im Emissionsansatz 1, welcher den Betriebszustand bei leichtem Niederschlag darstellt, wird die Grenzkurve für tonhaltige Geräusche außerhalb eines Gebäudes nach der Handlungsanleitung in allen untersuchten Frequenzen unterschritten (siehe Anhang 9). Damit sind am Immissionsort IO prognostisch für diesen Betriebszustand keine tieffrequenten Geräusche und störenden Umwelteinwirkungen durch die geplante Trasse zu erwarten. Dieses Beispiel stellt von allen bisher durch den TÜV Hessen untersuchten Immissionsorten einen kritischen Fall, bezüglich möglicher TG generiert durch Corona, dar.

Im Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag, selten) wird diese Grenzkurve bei 100 Hz überschritten, so dass eine Umrechnung auf den Innenpegel gemäß der Handlungsanleitung (Bericht 44932/7) erfolgte (siehe Anhang 10). Im Projektschritt 2 wird der Umrechnung auf den Innenpegel eine mittlere Schalldämmung der Außenbauteile zugrunde gelegt. Die Grenzkurve für tonhaltige Geräusche innerhalb eines Gebäudes wird durch den prognostizierten Innenpegel unterschritten. Für den Betriebszustand bei selten auftretendem, starkem Niederschlag sind somit schädliche Umwelteinwirkungen durch die geplante Trasse weniger zu erwarten.

### 7.4 Ergebnisse Vorgehensweise DIN 45680

Das Ergebnis der Abschätzung für die Pegeldifferenz berechnet mit der unteren Hüllkurve nach M-BBM und für typische Räume wie beschrieben, liegt für den Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag) bei  $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 27,3$  dB. Damit ist das Geräusch innerhalb des Gebäudes tieffrequent gemäß DIN 45680 [7], und es muss eine Terzanalyse durchgeführt werden. Da das Geräusch tonhaltig ist (Sonderfall 100 Hz), werden die Anhaltswerte mit dem  $\Delta L1$  verglichen. Dabei werden die Anhaltswerte in allen Frequenzen unterschritten. Im Emissionsansatz 1 sind folglich an IO (TG) durch die geplante Trasse keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten (siehe Anhang 9).

Für das Szenario im Emissionsansatz 2a/b (seltenes Ereignis starker Niederschlag) liegt die Pegeldifferenz (Innenpegel) bei  $L_{\text{Ceq}} - L_{\text{Aeq}} = 25,5$  dB. Die Terzanalyse ergibt, dass in allen Frequenzen die Anhaltswerte durch den  $\Delta L1$  unterschritten werden. Für den Betriebszustand bei starkem Niederschlag sind an IO (TG) ebenfalls keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten (siehe Anhang 10).

## 7.5 Zusammenfassung und Hinweise zum Sonderfall nach DIN 45680

Insgesamt wird aus gezeigten und anderen Beispielen abgeleitet, dass die Anhaltswerte vorliegend durch Koronageräusche für alle bisher untersuchten kritischeren Fälle prognostisch **nicht** überschritten wurden. Schädliche Umwelteinwirkungen durch hieraus abgeleitete tieffrequente Geräusche sind daher weniger (eher unwahrscheinlich) zu erwarten. Sie können aber auch aus den oben beschriebenen Gründen systembedingt nicht gesichert ausgeschlossen werden. In der Häufigkeit des Auftretens sind sie, wie begründet wurde, als eher selten im Sinne der TALärm zu bezeichnen. Dies gilt für das Auftreten tieffrequenter Geräusche mit hier abgeschätzten Innenpegeln und der möglichen schädlichen Umwelteinwirkung umso mehr. Auch aus diesen Gründen stellt, -vorbehaltlich der Behördensicht-, die Beurteilung von Koronageräuschen aufgrund des zufälligen, wetterabhängigen Zeitverhaltens (eher selten) und des erweiterten Frequenzbereiches (100 Hz) einen die Besonderheiten des Einzelfalles zu berücksichtigenden Sonderfall dar. Für kritische Trassensituationen, z.B. besonders mit Überspannungen von schutzbedürftigen Räumen und/oder mit geringen Abständen (ca. < 50 m) zu Stromkreisen mit tonalen Schallemissionen, sollten diese Überprüfungen jedoch TALärm-konform stattfinden.

### 7.5.1 Ergänzende Hinweise zum Sonderfall in TALärm und DIN Entwurf 45680 vom November 2013

Die rechtsverbindlich, d.h. in TALärm datierte DIN 45680 inkl. Beiblatt1, sieht für das Frequenzband 100 Hz eine Sonderfallbewertung vor, da der Bereich tiefer Frequenzen nach Ziffer 3.1 im Sinne der DIN 45680 die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 10–80 Hz umfasst. In Sonderfällen, wenn geräuschbestimmende Anteile diesem Bereich dicht benachbart sind, kann regelwerkskonform, d.h. nach in TALärm verwiesener DIN 45680, dieser Bereich um eine Terz nach oben oder unten erweitert werden. Dies ist vorliegend mit einem 100 Hz Korona-Brummtönen gegeben und wurde entsprechend angewendet. Unabhängig davon grenzt die TALärm unter Ziffer 7.3 den Bereich tiefer Frequenzen mit < 90 Hz ab. Insofern ist die hier vorgenommene Prüfung mit 100 Hz diesbezüglich ein Sonderfall. Hier wird der Hinweis gemacht, dass der inzwischen alte DIN-Entwurf 45680 vom November 2013 [13] verfahrensbedingt einen erweiterten Bereich mit den Terzmittenfrequenzen von 8–125 Hz definiert hatte. Anfang 2015 wurde vom Arbeitskreis zur DIN 45680 entschieden, dass der alte Entwurf vom November 2013 aufgrund vieler Einsprüche sich im Beurteilungsverfahren wieder vollständig ändern wird. Aus vergleichenden Untersuchungen (DIN 97 zu Entwurf DIN 2013), im Rahmen einer vom TÜV Hessen betreuten Bachelorarbeit, ist jedoch vorliegend bekannt, dass nach diesem verworfenen Entwurf 2013 eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten tieffrequenter Geräusche, generiert über Koronageräusche, abzuleiten gewesen wäre [18, 25]. Wie sich dies zukünftig entwickeln wird, bleibt damit offen und abzuwarten.

## 8 Zusammenfassende Empfehlungen für eine TALärm konforme Prognose

Aus dem bisher beschriebenen Erfahrungsbericht des TÜV Hessen können für eine TALärm konforme Prognose folgende Schlussfolgerungen aus hiesiger Sicht beschrieben werden:

- Für die programmtechnische Parametereinstellung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte kann mit Bezug auf langzeitige Prognosen von Korona-Geräuschen, die jahreszeitliche Durchschnittstemperatur nach DWD Angabe ( $-9\text{ °C}$  für 2012 mit Standard 70 % Luftfeuchte), die geringen Abweichungen für relevante Immissionsentfernungen bis ca. 100m mit ca.  $\pm 0,2\text{ dB(A)}$ , hier im pragmatischen Sinne die Beibehaltung einer „Standardeinstellung“ mit  $10\text{ °C}$  und 70 % relativer Luftfeuchtigkeit zur Anwendung empfohlen werden. Näheres siehe Kapitel 6.1.
- Zur Berechnung des längenbezogenen Schallleistungspegels aus Messungen an Leiterseilen wird empfohlen, eine möglichst hohe „akustische Teilstreckenbildung“ z.B. mit 6-facher geometrisch symmetrischer Segmentierung und höchster programmtechnischer Aufteilung der Linienquellen in Punktquellen zu wählen; z.B. mit Abstand  $d > 2H_{\max}$  (mit  $d$  = Abstand zwischen Punktquelle und Aufpunkt und  $H_{\max}$  = Größte Abmessung der Quellen) bzw. als  $l_{\min}$  mit 1 % der jeweiligen Seil-(Quellen)-Länge im Verhältnis zum kürzesten Punktquellenabstand; hierbei sind die Mindestanforderungen nach DIN 9613-2 Abschnitt 4 a), b), c) und Anmerkung 4 zu beachten. Asymmetrische, hohe Abschnittsaufteilungen können je nach Gelände und Aufpunktlagen unter Trassen bzw. Abständen zum nächstkritischen Leiterseil notwendig werden. Näheres siehe Kapitel 6.2.
- Für die überwiegend hochliegenden Leiterseilquellen kann bezüglich der Berechnungsanwendung für die Bodendämpfung  $A_{\text{gr}}$  die Alternativgleichung 10 nach DIN ISO 9613-2 als allgemeingültigere, die Bodendämpfung begrenzende Anwendung für Entfernungen bis ca. 100m empfohlen werden. Im Mittel waren hiermit für typische, kritische Praxisbeispiele geringere Abweichungen im Mess-Berechnungsvergleich feststellbar. Näheres siehe Kapitel 6.3.
- Die Schallausbreitungsberechnung sollte TALärm konform nach DIN ISO 9613-2 unter Berücksichtigung der meteorologischen Korrektur  $C_{\text{met}}$  erfolgen. Der an anderer Stelle hierfür in der Literatur [14] empfohlene Faktor  $C_{\text{Niederschlag}}$  als Ersatz hierfür und anstelle der vorgestellten verschiedenen Emissionsansätze unterschiedlicher witterungsbedingter längenbezogener Schallleistungspegel ist nicht TALärm konform und würde fälschlicherweise verschiedene Emissionszustände der Schallausbreitung (vermischend) zuordnen. Die besondere Ausbreitungs- und Verdeckungssituation bei starkem Niederschlag kann im Rahmen einer Sonderfallprüfung in Abhängigkeit der jeweiligen Umgebungsverhältnisse behandelt werden. Näheres siehe Kapitel 6.4ff
- Im Sinne der TALärm kann die witterungsabhängige Geräuschemission von Koronageräuschen nicht mit einem einzelnen Emissionsansatz beschrieben werden. Bisher gewonnene Erkenntnisse über die Auftretenshäufigkeit und Dauer von Koronageräuschen in dieser Abhängigkeit legen nahe, das Emissionsverhalten in 3 typische Emissionssituationen zu untergliedern. Zum einen für den vorherrschenden Normalfall bei Trockenheit und zum anderen für die Sonderfälle mit geringen Niederschlägen, sowie selteneren stärkere Niederschläge. Näheres siehe Kapitel 4 ff und 5 ff
- Die Emissionsansätze des vorherrschenden Normalfalles (bei Trockenheit) und des Sonderfalls mit „leichtem“ Niederschlag beschreiben einen Betriebszustand bei häufig auftretenden Witterungsbedingungen wie z.B. leichterem Nieder-

schlag, wie er in Kapitel 2.2.3 definiert wurde. Die Häufigkeit des Auftretens erfordert hier eine Betrachtung im Rahmen normaler Immissionsrichtwerte der TALärm.

- Der Emissionsansatz für den „starken Schneefall“ beschreibt den Betriebszustand der lautereren gemessenen Emissionen. Für diesen witterungsbedingt seltenen Fall starker Emissionen, welche mit hoher Feuchtigkeit einhergehend, entstehen durch die Art des verursachenden Schneeniederschlages keine parallel dazu auftretenden, verdeckenden Geräusche. Dieser Betriebsfall ist daher immissionsseitig relevant und bedarf einer Berücksichtigung. Aus Sicht des TÜV Hessen kann standortabhängig überprüft werden, inwieweit diese Situationen witterungsbedingt nur „selten“ im Sinne von Nr. 7.2 der TALärm auftritt. Da solche Situationen durch die Witterung verursacht werden und keiner Beeinflussungsmöglichkeit durch den Betreiber unterliegen, handelt es sich nicht originär um „seltene Ereignisse“ im Sinne der Nr. 7.2 TALärm, die Besonderheiten beim Betrieb einer Anlage voraussetzen. Art und Häufigkeit der Geräusche entsprechen jedoch den in der TALärm dort angesprochenen Besonderheiten. Gegenüber „seltene Ereignissen“ durch vom Betreiber nicht steuerbaren Schneefall oder Starkregen (< 1 %) nachts sind die zeitlich vorherrschenden Emissionen ohne Niederschlag (> 83 %) mit wesentlich niedrigeren Emissionen als „ruhige“ Zeiten anzusehen. Anders als bei Windenergieanlagen handelt es sich vorliegend auch nicht um besondere meteorologisch seltene Ausbreitungsbedingungen, die z.B. mit Starkwind die Leistung (inklusive Geräusche) einer Anlage gewünscht erhöhen und auf deren damit einhergehenden Emissionen der Betreiber mittels Regelung (Drosselung) Einfluss nehmen könnte. Somit können aus hiesiger Sicht und nach Diskussion mit den Fachbehörden hierzu
- die Anforderungen nach Nr. 7.2 in Verbindung mit Nr. 6.3 der TALärm herangezogen werden. Die Einhaltung der erhöhten Immissionsrichtwerte für seltene Ereignisse müssen dann hierzu nachgewiesen werden.
- Der Emissionsansatz für den in Kapitel 2.2.3 definierten „starken Niederschlag (Regen)“ beschreibt einen mit dem „starken Schneefall“ vergleichbaren Betriebszustand, der ebenfalls witterungsbedingt starke Unstetigkeiten (Tropfenbildung auf Leiterseil) mit hoher Feuchtigkeit eher selten verursacht wird. Dies geschieht aber hier u.U. so häufig, dass eine Berücksichtigung im Rahmen der „seltene Ereignisse“ ggfs. nicht sicher in Betracht kommt. Jedoch führt in diesem Fall die Art des verursachenden Niederschlages zu einem verdeckenden Fremdgeräusch. Daher kann in diesem Fall im Rahmen einer Sonderfallprüfung unter Anlehnung an Nr. 3.2.1 Abs. 5 der TALärm der Nachweis der Unschädlichkeit dieser Geräusche über die Verdeckung überprüft werden, so dass keine strikte Einhaltung der Immissionsrichtwerte erforderlich ist. Näheres siehe Kapitel 6.4 ff
- Aufgrund der im näheren Immissionsbereich zu erwartenden tonalen Anteile (100 Hz Brummton) wird eine prognostische Überprüfung für den Sonderfall der 100 Hz im Sinne von TALärm mit hier datierter DIN 45680 angeraten und sinnvoll. Das Vorgehen hierzu ist in Kapitel 7 ff näher beschrieben. Da der DIN Entwurf 45680 aus November 2013 aufgrund vieler Einsprüche derzeit erneut im zugehörigen DIN Arbeitskreis beraten und völlig neu überarbeitet wird, ist es derzeit noch offen und nicht absehbar, ob es in zukünftigen Fassungen der DIN 45680 zu einer generellen Erweiterung des oberen Frequenzbereiches für tieffrequente Geräusche kommen wird.

## 9 Mögliche Schallschutzmaßnahmen

Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind nach § 22 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BImSchG so zu errichten und zu betreiben, dass

- a) *schädliche Umwelteinwirkungen durch Geräusche verhindert werden, die nach dem Stand der Technik zur Lärminderung vermeidbar sind und*
- b) *nach dem Stand der Technik zur Lärminderung unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen durch Geräusche auf ein Mindestmaß beschränkt werden.*

Anhand der in dieser Studie dargestellten Zusammenhänge zur Geräuschentwicklung und -ausbreitung an Höchstspannungsleitungen lassen sich nach Priorität geordnete, mögliche Schallschutzmaßnahmen zur Einhaltung der Richtwerte nach TAlärm Nummer 6.1 [15] wie folgt angeben:

- Bei Neuplanungen gilt es generelle Überspannungssituationen zu vermeiden und die Abstände zur schutzwürdigen Bebauung in Abhängigkeit zur Mast- und Trassenkonstellation möglichst hoch einzuplanen.
- Für Neuplanungen dürften in den meisten Fällen Abstände zum nächstliegenden Leiterseil bzw. Stromkreis von > 100 m ausreichend sein, was im Einzelfall jeweils zu prüfen sein dürfte, da die Seil- und Mastkonstellationen sehr unterschiedlich ausfallen und auch von Vorbelastungen abhängen.
- Wenn die Seilkonstellation eine geräuscharme Ausführung beinhaltet, d.h. mit höheren Querschnitten und höherer Seilbündelung und dadurch reduzierten Randfeldstärken einhergeht, sind auch Abstände von < 50 m je nach nächstliegendem Schutzanspruch realisierbar.
- In Fällen wo dies nicht gegeben ist, z.B. durch eine gegebene Bestandssituation mit einem vorhandenen privilegierten Trassenraum, kann bei notwendig werdender Erhöhung der Leistungsfähigkeit mit Verwendung „dicker“ Leiterseile mit höheren Querschnitten und möglichst hoher Bündelung mit daraus resultierend niedrigeren Randfeldstärken unter bestimmten Bedingungen ggf. auch die erforderliche Geräuschminderung erreicht werden.
- Dabei spielt es auch eine Rolle, wie geschickt die Wahl und Anordnung der jeweiligen Traversen- und Belegungshöhen getroffen wird, was sich u.U. günstig auf die nächstliegenden, d.h. in der Regel kritischsten und maßgeblichen Aufpunkte schutzwürdiger Bebauung auswirken kann.
- Die Erzeugung hydrophiler Leiterseiloberflächen durch Oberflächenbehandlungen in Form von z.B. Glasperlenbestrahlung gilt derzeit als Stand der Technik, die witterungsbedingte Alterung von Leiterseilen zeitlich vorwegzunehmen. Damit wird gleichzeitig auch die Korona-Abklingzeit (bis zur Trocknung) reduziert.
- Derzeitige, nicht abschließend erprobte und ausgereifte, Forschungs- und Entwicklungsversuche lassen anhand von Prüfstandsauswertungen erwarten, dass mit neu entwickelten Beschichtungen in der Leiterseiltechnologie zusätzliche, pegelreduzierende Wirkungen erreichbar werden.

## 10 Ausblick

Mit den gezeigten, hinlänglich abgesicherten Ergebnissen ist es möglich eine TALärm-konforme Prognose für einfachere Trassenkonstellationen mit z.B. je zwei Stromkreisen „dünner“ und/oder „dicker“ Leiterseile bzw. den angegebenen Randfeldstärken belastbar durchzuführen. Da die Ergebnisse insgesamt relativ gut mit Berechnungswerten aus empirisch ermittelten Gleichungen bzw. Angaben und Messdaten aus der Literatur übereinstimmen (siehe Kapitel 5.3), liegt es nahe für untergeordnete, weniger kritische Leiterseile auch Interpolationen zwischen den Ergebnissen auf Basis der Randfeldstärke durchzuführen. Hiermit können zunächst informatorische Lücken (abschätzend) geschlossen werden, um auch Prognosen für komplexere Trassengebilde mit verschiedensten Leiterseilkonstellationen zu berechnen, bis weitere gesicherte Messergebnisse (Erkenntnisse) vorliegen. Die vorliegenden Daten (Emissionsansätze) zeigen aber auch die vielfältige Abhängigkeit bzw. Unterschiedlichkeit der auftretenden Geräuschstrukturen (Tonalitäten), die offenbar nicht ausschließlich nur von den Randfeldstärken beeinflusst scheinen. Hinsichtlich der Prognosesicherheiten ist dabei auffällig, dass die gezeigten Messergebnisse eher über den empirisch ermittelten Werten aus der Literatur (siehe Abb. 42) liegen. Zusätzlich erhält man aus den Messungen ein entsprechend abgesichertes längenbezogenes Schalleistungspegelspektrum je Emissionsansatz (seiltypabhängig), weshalb insgesamt aus hiesiger Sicht Prognosen möglichst darauf aufbauen sollten. Aus Sicht der Messstelle des TÜV Hessen ergibt sich nach den bisherigen Erfahrungen, im Zusammenhang mit Prognosen für Neu-, Bestand- und Änderungsgenehmigungen, zusätzlicher Untersuchungsbedarf für beispielhaft angegebene Seilkonstellationen mit ca. Randfeldstärken (RFS):

- 220 kV, dünne Seile Al/St, 2er Bündel (RFS um die 13,5 kV/cm); es werden hier laute Emissionen erwartet, jedoch etwas leisere als mit 380 kV, dünne Seile, 4er Bündel (RFS um die 16 kV/cm).
- 380 kV, dünne Seile Typ TALACS / ALACS, 4er Bündel (RFS um die 16 kV/cm); sollten diese vermehrt eingesetzt oder als Standard geplant wer-

den, sind hierzu belastbare Messungen sinnvoll, da diese fehlen. Ein ähnliches Verhalten wie bei den hier dargestellten Leitungen „380 kV, dünne Seile, 4er Bündel“ darf vermutet werden.

- 110 kV, dünne Seile Al/St, Einfachseil (RFS um die 10,5 kV/cm); diese werden als sehr leise Seile erwartet, könnten aber dennoch im Zusammenwirken von „380 kV, dicke Seile, 4er Bündel (RFS um die 11 kV/cm)“ wirksame Beiträge liefern.
- 220 kV, dünne Seile Al/St, 4er Bündel (RFS um die 9,5 kV/cm); diese liegen zwar außerhalb des Diagramms (Abb. 42), können aber unter bestimmten Konstellationen noch relevant sein (Vorbelastung). Messungen hierzu verschaffen mehr Klarheit und Sicherheit.
- 380 kV oder 220 kV Leitungen mit 3er Bündel; nur wenn diese geplant oder als Bestand vorkommen, sollten diese messtechnisch untersucht werden.
- 110 kV, dünne Seile, 2er Bündel (RFS um die 7 kV/cm); diese liegen zwar außerhalb des Diagramms (Abb. 42), können unter bestimmten Konstellationen doch relevant werden (Vorbelastung Summenwirkung). Messungen hierzu verschaffen mehr Klarheit und Sicherheit.
- HGÜ Leitungen (RFS z.Zt. unbekannt); Untersuchungen an Gleichspannungsleitungen (DC) wurden vom TÜV Hessen bisher nicht durchgeführt.

Die zunehmende Planung von Höchstspannungs-Gleichspannungs-Übertragungsleitungen (HGÜ) ist dabei ein zusätzliches, gesondertes Thema welches Literaturangaben zufolge anderen Gesetzmäßigkeiten sowohl in der Frequenzlage, wie auch der Wetterabhängigkeit (Meteorologie) folgt. Hier liegen bislang keine belastbaren Messdaten in vergleichbarer Form vor. Gleichwohl wird dieses Thema mit dem Fortschreiten des Netzausbaues im Zuge der Energiewende an Bedeutung gewinnen.

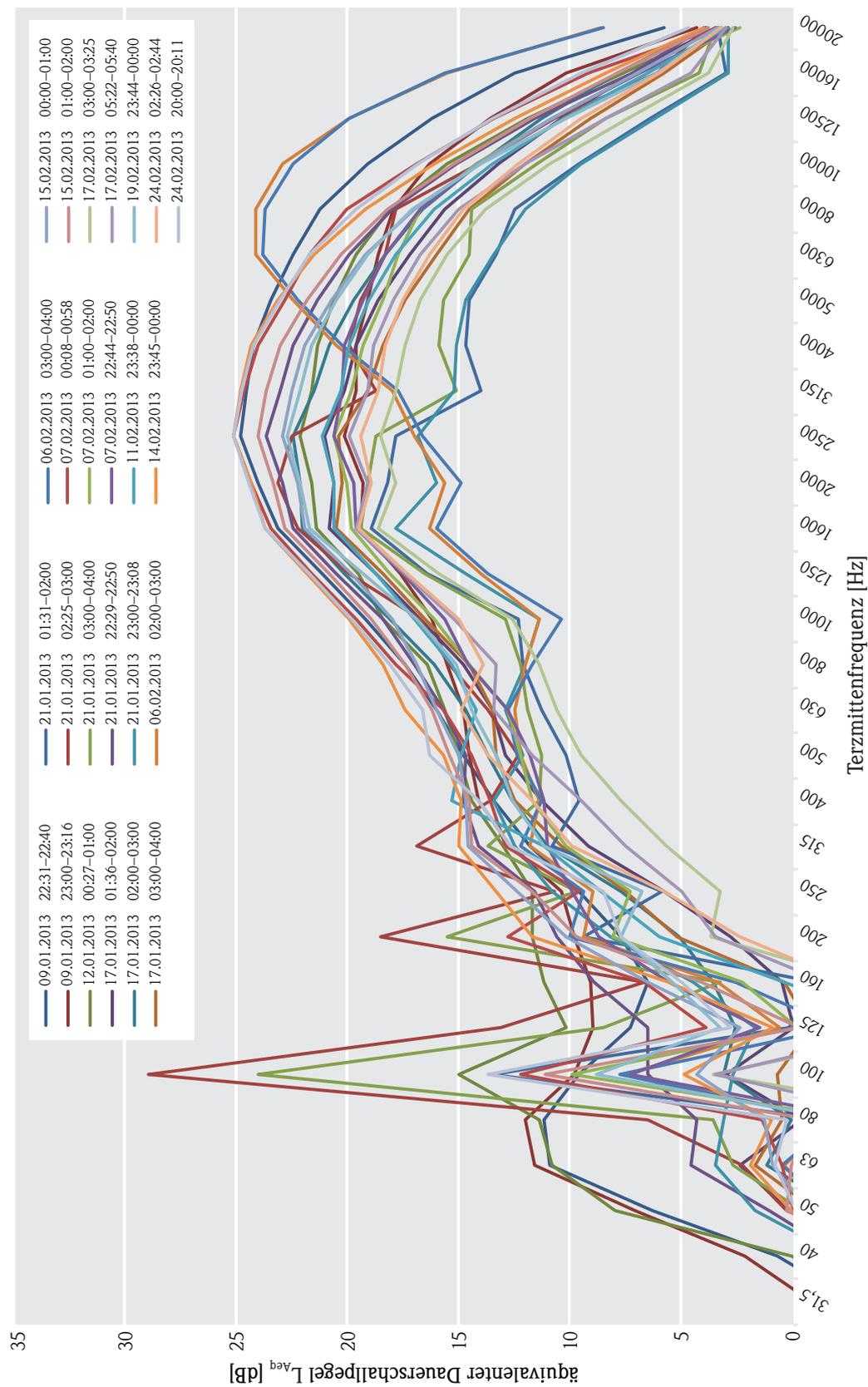
## 11 Literatur

- [1] BEER, D., BRIX, S., & BRANDENBURG, K. (2005). Analyse und Ausarbeitung von Vorschlägen hinsichtlich der Schallbelastung bei Hochspannungsfreileitungen. Ilmenau: Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT.
- [2] FISCHER, R., & KIESSLING, F. (1989). Freileitungen: Planungen, Berechnung, Ausführung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [3] IEEE Standard 539-2005: IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines, September 2005, IEEE Power Engineering Society
- [4] VDI 3786-9: Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Visuelle Wetterbeobachtungen, Oktober 2007, Normenausschuss Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN
- [5] VDI 3723-1: Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen, Mai 1993, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [6] VDI 2714: Schallausbreitung im Freien, Januar 1988, VDI Kommission Lärminderung
- [7] DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft, März 1997, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [8] Beiblatt 1 zu DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft - Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen, März 1997, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [9] Müller BBM Schalltechnisches Beratungsbüro: Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TALärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren – Mustergutachten und Handlungsanleitung, 13.02.2001, Bericht Nr. 44 932/7
- [10] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, August 1987, VDI-Kommission Lärminderung Ausschuss Schalldämmung von Fenstern
- [11] OSWALD, B. R. (2005). Vorlesung Elektrische Energieversorgung I: Skript Freileitungen. Hannover: Universität Hannover Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik.
- [12] SEMMLER, M., STRAUMANN, U., ROERO, C., & TEICH, T. H. (2005). Tonale Schallemissionen von Hochspannungsfreileitungen. Bulletin SEV/VSE Ausgabe 15, S. 13–17.
- [13] DIN 45680 - Entwurf: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschemissionen, September 2013, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI und Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN
- [14] ENGELEN, J., FISCHER, K., HETTIG, C., KRAPF, K.-G., KURZ, R., MEYER, K., et al. (Juli 2012). Ermittlung und Beurteilung von Koronageräuschen an Höchstspannungsfreileitungen. Lärmbekämpfung, S. 166–182.
- [15] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TALärm), vom 26. August 1998, (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)
- [16] DIN 45645-1: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 1: Geräuschemissionen in der Nachbarschaft, Juli 1996, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [17] DIN 45681: Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschemissionen, März 2005, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [18] PARIS, N. (2014). Vergleichende Untersuchung zur DIN 45680 von 1997 und 2013 mit typisierender Gegenüberstellung von Bewertungsunterschieden anhand von Praxisbeispielen. Bingen: Bachelorarbeit, FH Bingen, FB 1 Life Sciences and Engineering.

- [19] <https://www.google.de/maps/@52.4670591,7.5416819,680m/data=!3m1!1e3>; abgerufen am 19.10.15
- [20] <https://www.google.de/maps/@51.3900884,8.4945803,1392m/data=!3m1!1e3>; abgerufen am 19.10.15
- [21] <https://www.google.de/maps/@48.3730033,8.8733707,1482m/data=!3m1!1e3>; abgerufen am 19.10.15
- [22] DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, Oktober 1999, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [23] TÜV Hessen Industrie Service GmbH: Informationsumlauf vom 23.10.2012: Empfehlung zur Bestimmung der meteorologischen Dämpfung Cmet gemäß DIN ISO 9613-2 aus NRW
- [24] Dialog Netzbau, Team Netzstrategie Anlagenmanagement TransnetBW GmbH. (2013). Frage-Antwort-Katalog: Neubau einer 380-kV-Leitung Bünzwangen-Goldshöfe. Abgerufen am 16. August 2013 von [www.transnetbw.de](http://www.transnetbw.de)
- [25] GOOSSENS, M., PARIS, N. (Februar 2015). Ist der Entwurf der DIN45680 vom September 2013 das bessere Verfahren zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche? – Erfahrungsbericht der Messstelle nach § 29b des TÜV Hessen. Lärmbekämpfung.
- [26] DIN VDE 0873-1 Entwurf: Maßnahmen gegen Funkstörungen durch Anlagen der Elektrizitätsversorgung – Funkstörungen durch Anlagen ab 10 kV Nennspannung, März 2012, DKE Deutsch Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
- [27] DIN SPEC 8987: Koronageräusche von Hochspannungsfreileitungen, Entwurf vom November 2014, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
- [28] <https://www.google.de/maps/place/Inheiden,+35410+Hungen/@50.4598153,8.8947829,86m/d ata=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x47bce4da26f8d1d3:0xa224352a7b25cd0?hl=de>; abgerufen am 24.02.15

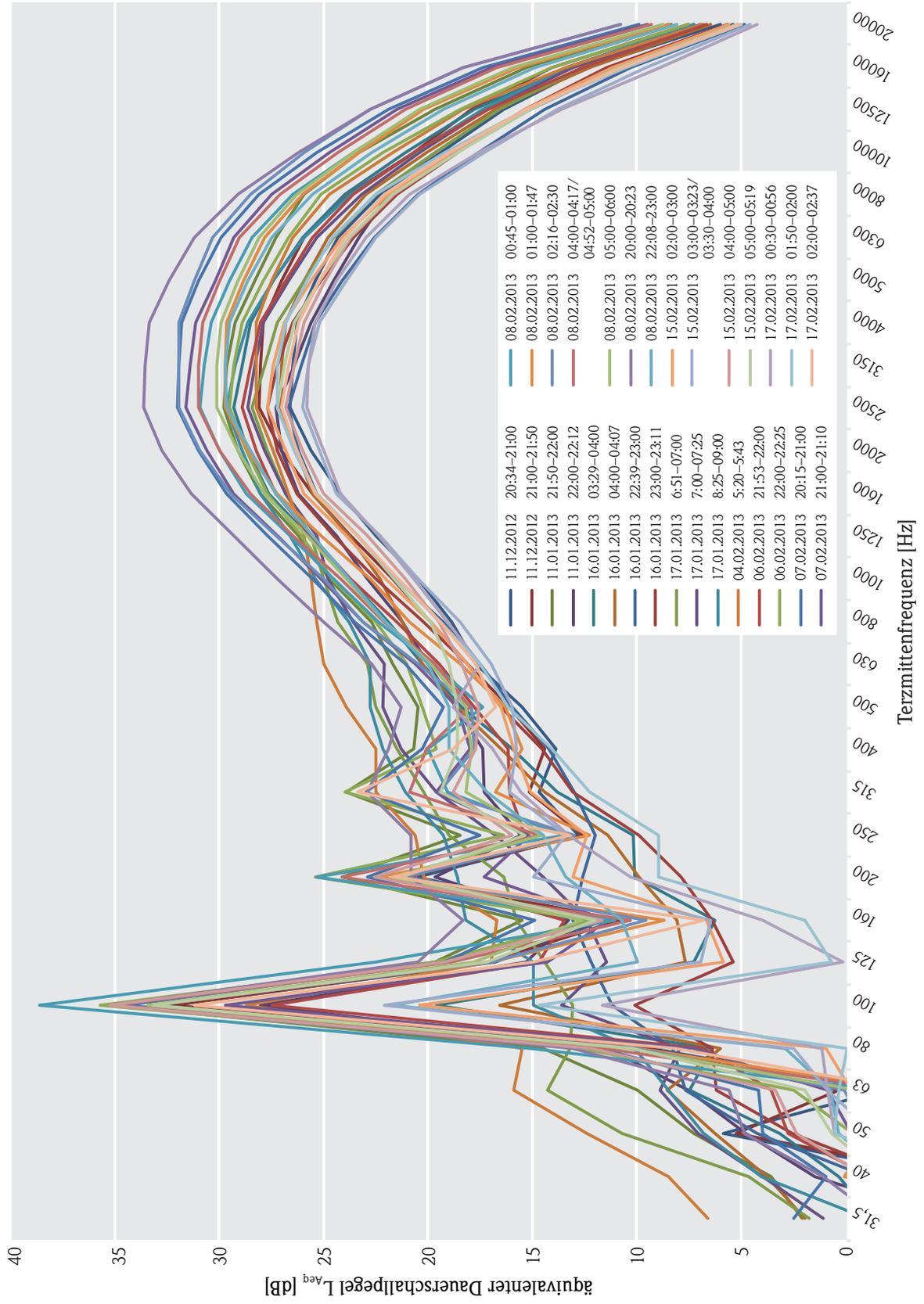
## Anhang 1

25 Terzspektren von „leisen/mittleren“ Ereignissen, welche am MP 0 in Rangdingen einen Schalldruckpegel von  $\leq 35$  dB(A) erzeugt haben - bewertet als leichter Schneenieder-schlag



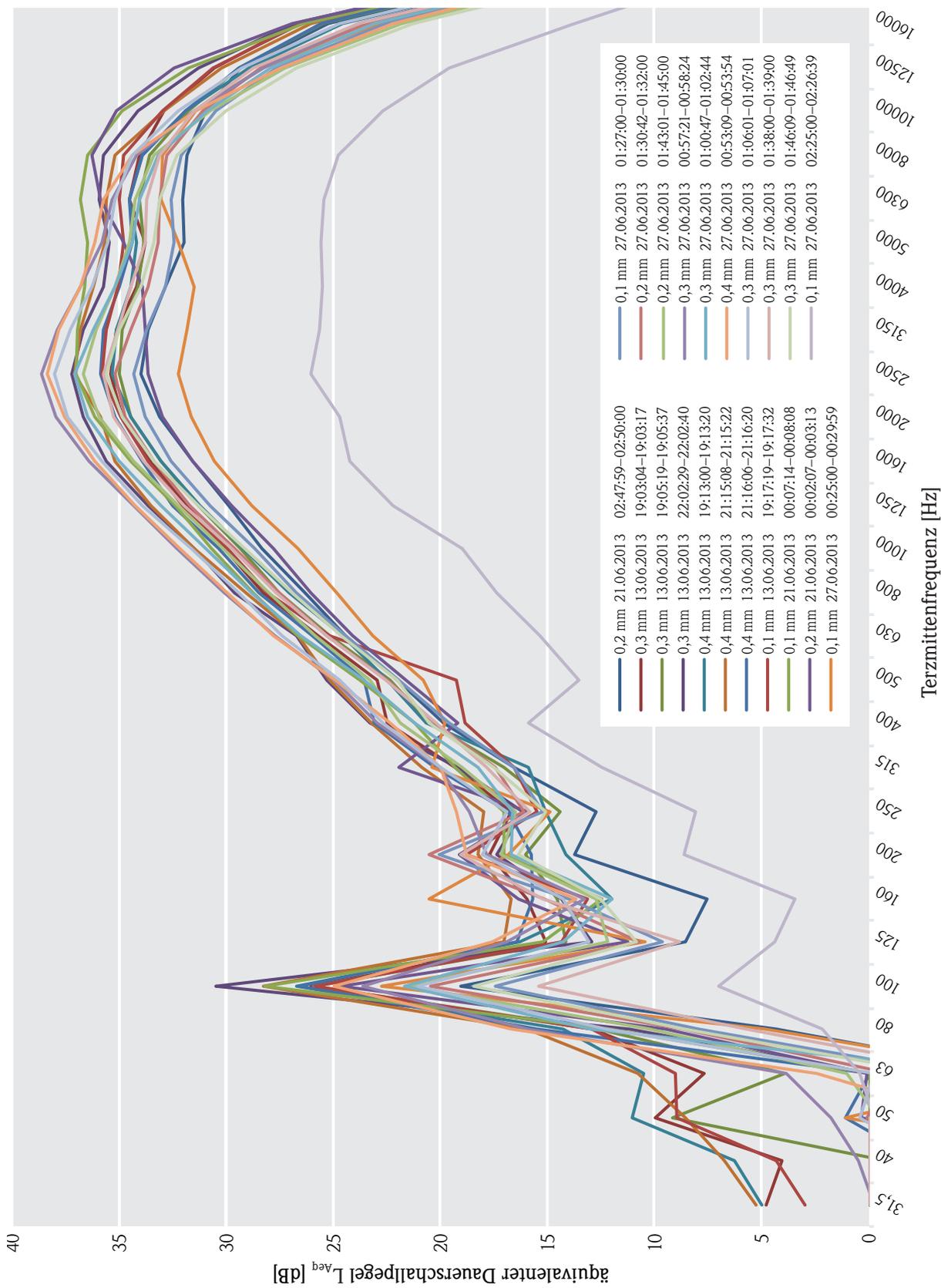
Anhang 2

30 Terzspektren von „lauten“ Ereignissen, welche am MP 0 in Rangendingen einen Schalldruckpegel von > 35 dB(A) erzeugt haben - bewertet als starker Schneeniederschlag



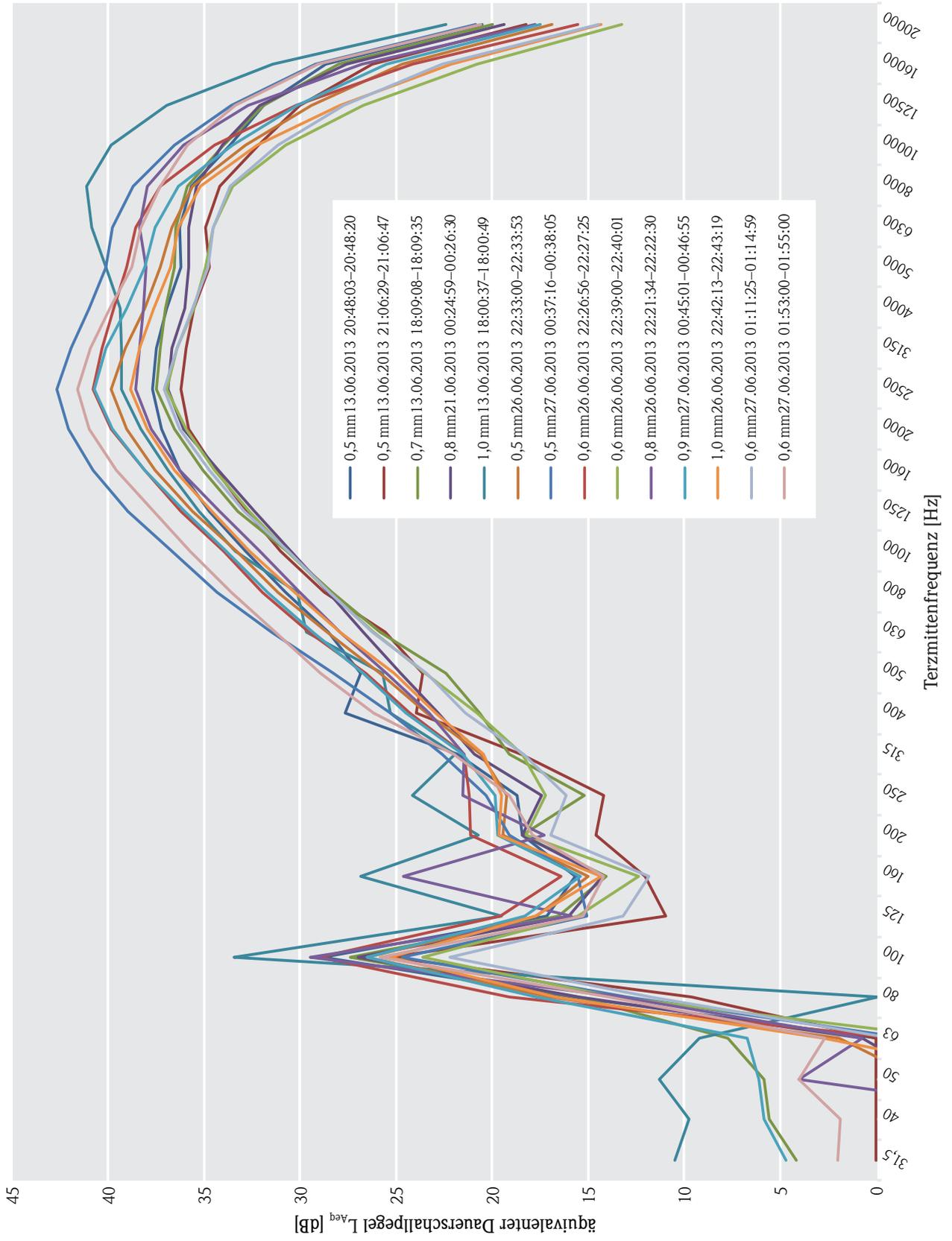
Anhang 3

21 verschiedene fremdgeräuschkorrigierte Terzspektren am MP 0 bei Regenereignissen mit 0,1–0,4 mm/5 min in Brilon

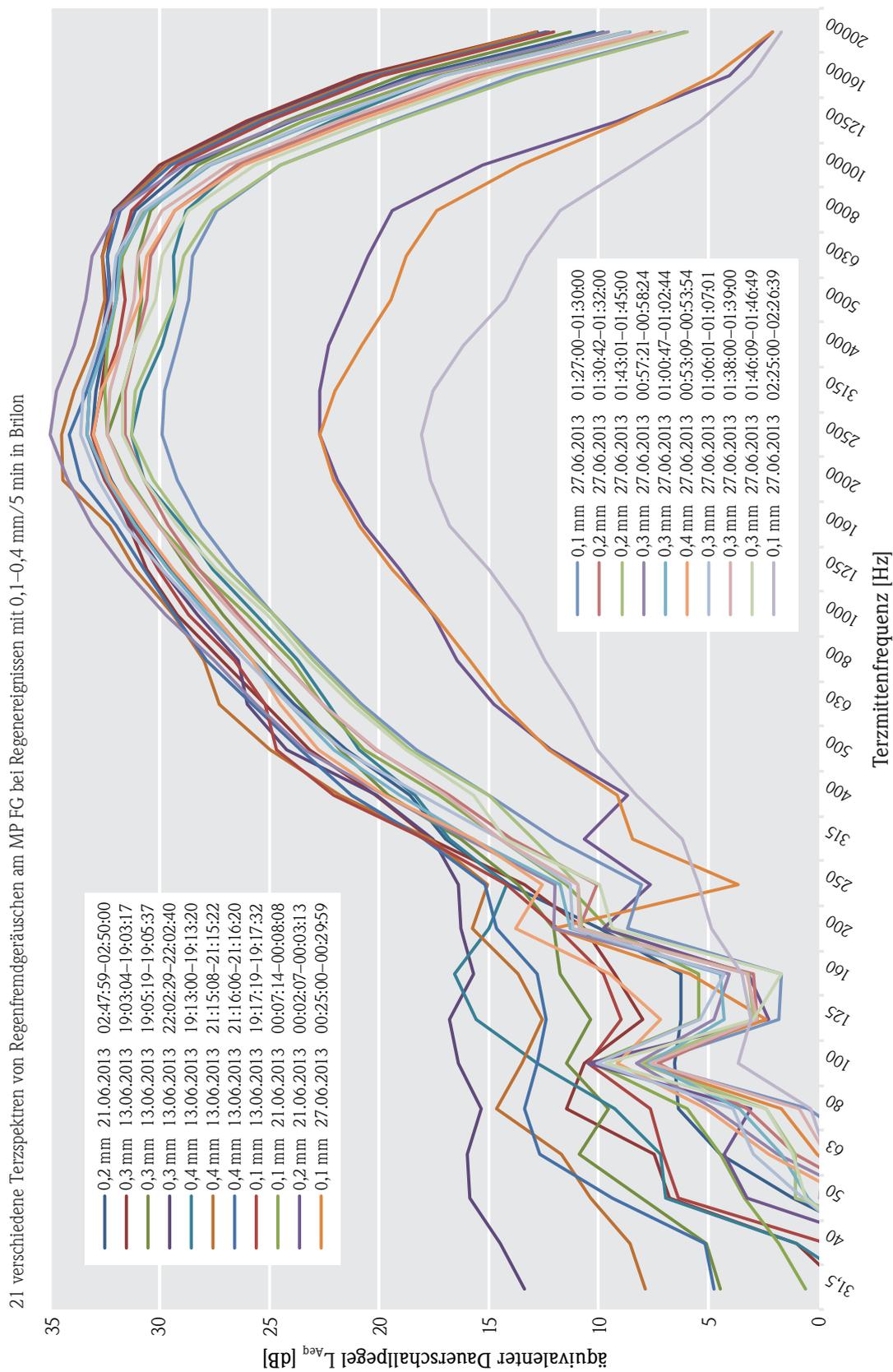


Anhang 4

14 verschiedene fremdgeräuschkorrigierte Terzspektren am MP 0 bei Regeneignissen mit 0,5–1,0 mm/5 min in Brilon

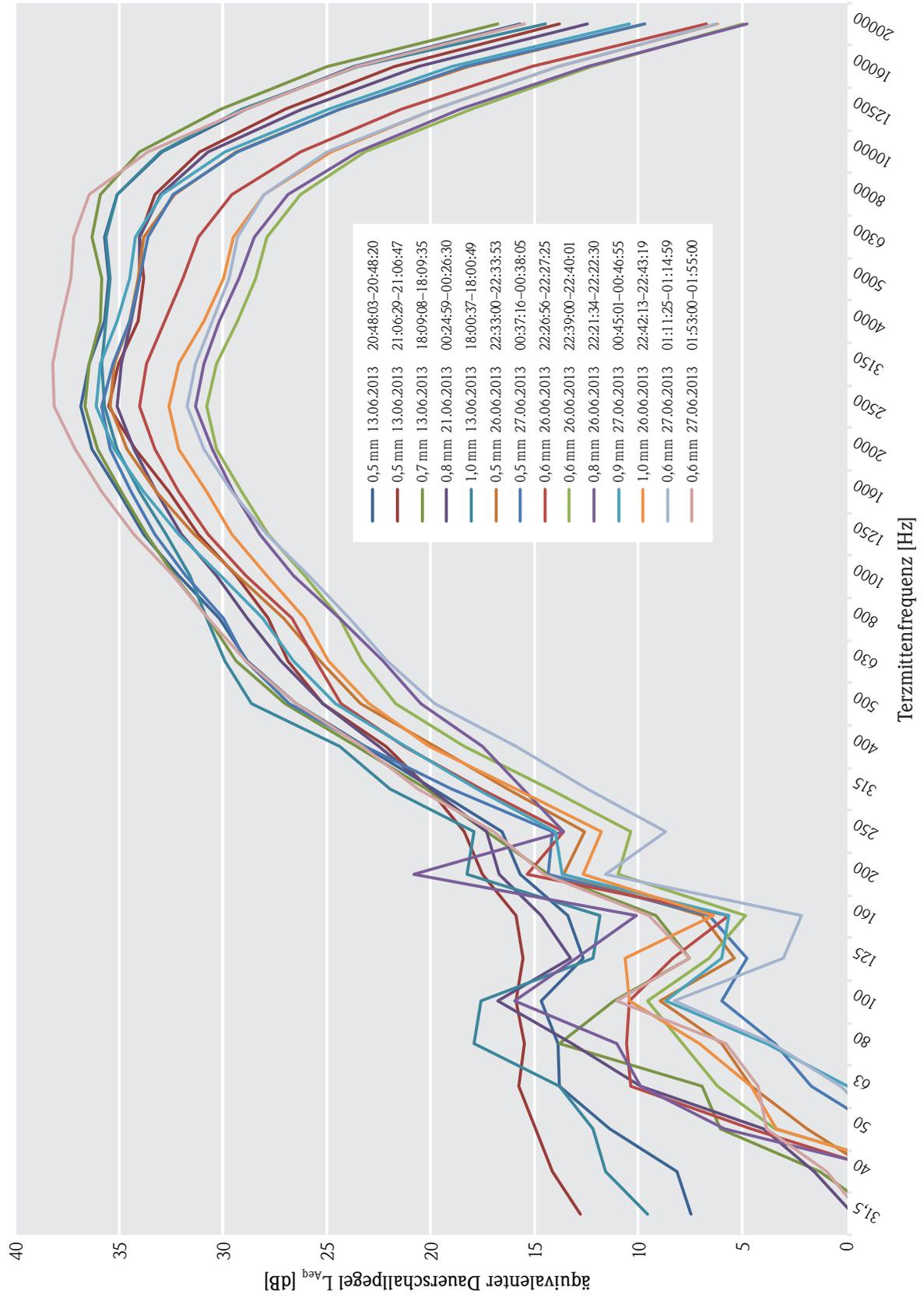


## Anhang 5



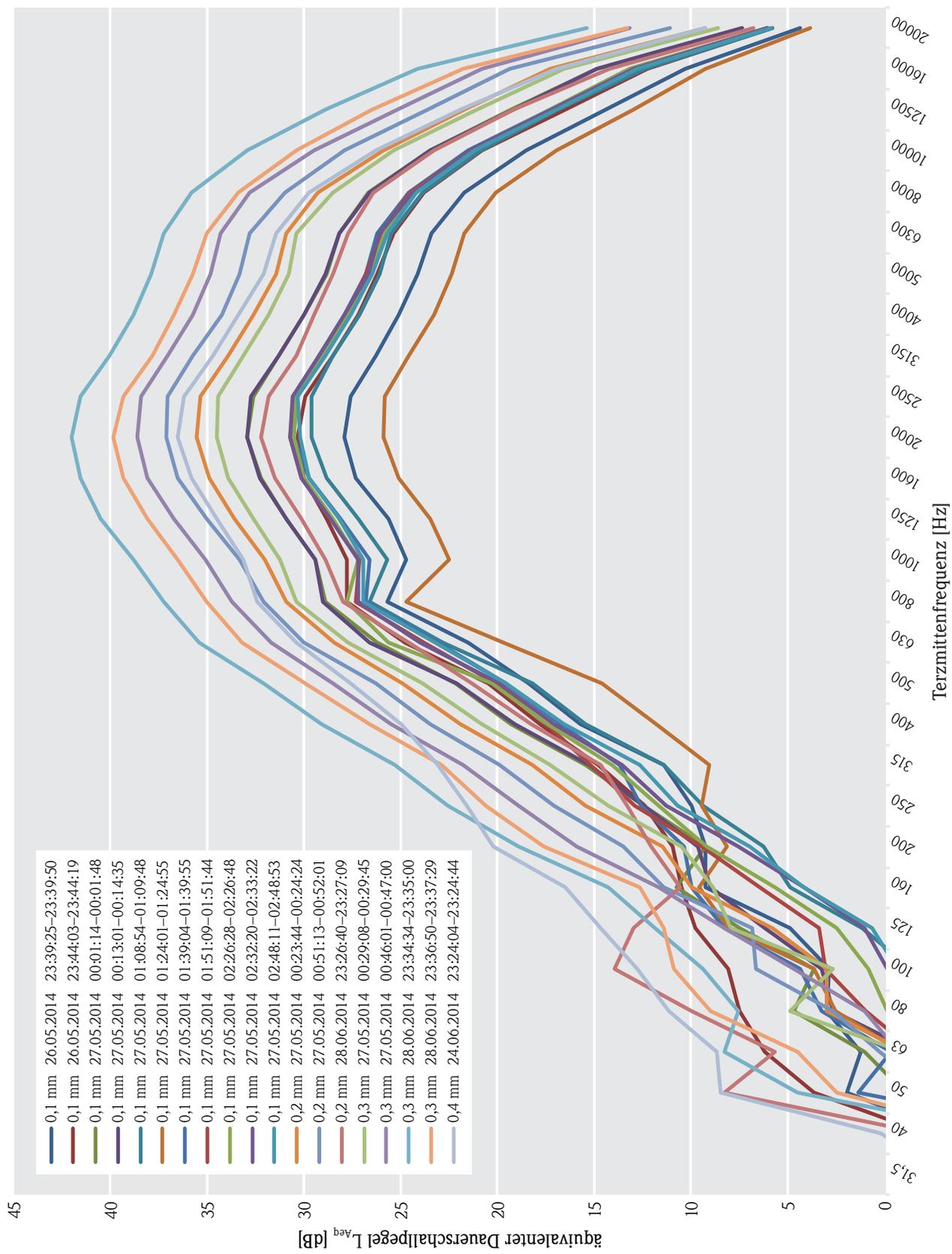
Anhang 6

14 verschiedene Terzspektren von Regenfremdgeräuschen am MP FG bei Regenereignissen mit 0,5–1,0 mm/5 min in Brilon



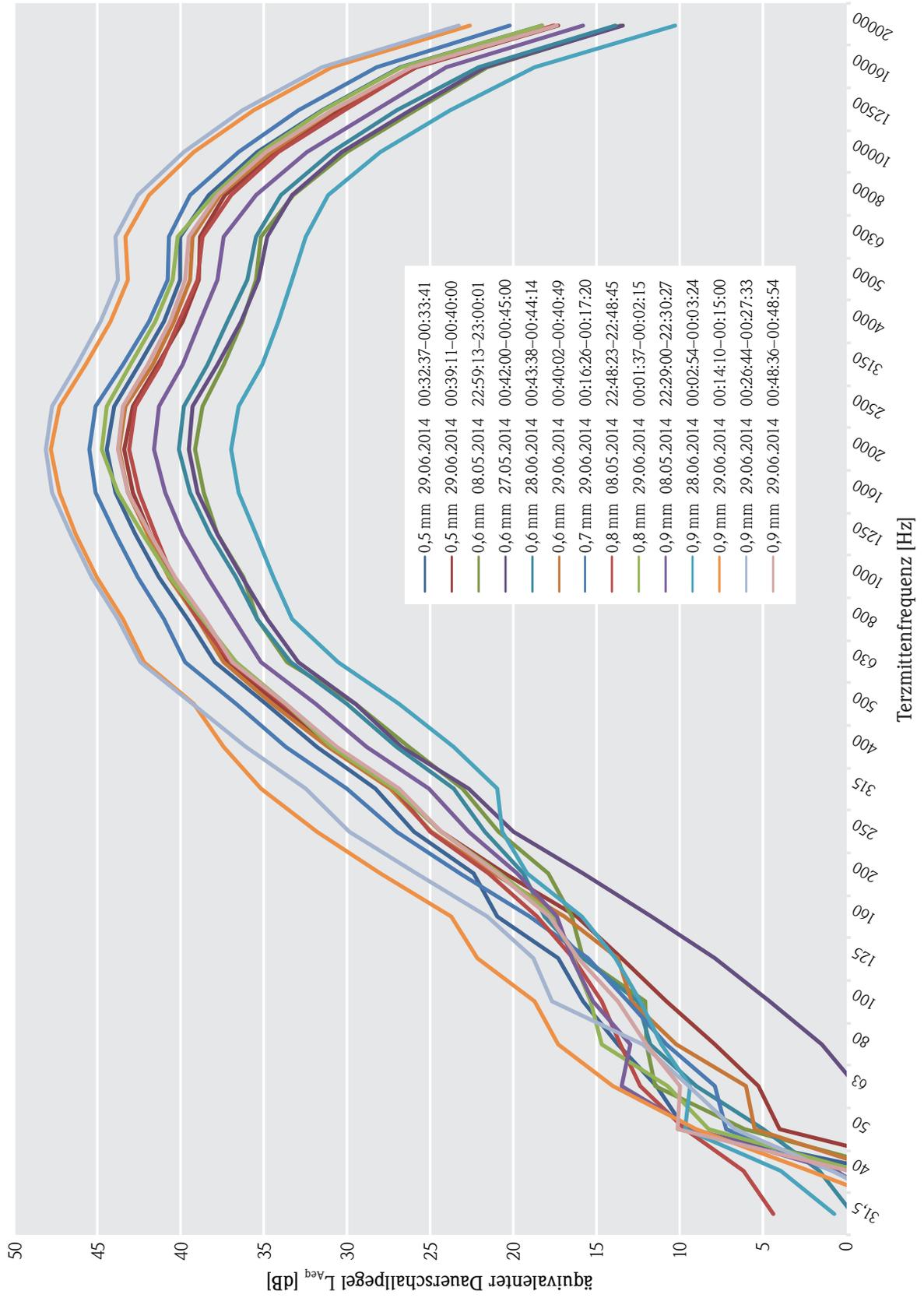
Anhang 7

19 Messungen bei 0,1–0,4 mm/5 min, reines Fremdgeräusch bei Regen an einem Wohnhaus in typisch dörflicher Ortsrandlage



## Anhang 8

14 Messungen bei 0,5-1,0 mm/5 min, reines Fremdgeräusch bei Regen an einem Wohnhaus in typisch dörflicher Ortsrandlage



## Anhang 9

### Vorgehensweise bei der Beurteilung Tieffrequenter Geräusche anhand eines Fallbeispiels für den Emissionsansatz „leichter Niederschlag“

Mit berücksichtigt: geplante neue Trasse und bestehende Trasse im Planzustand  
 Nachfolgend zuerst Berechnung nach Handlungsanleitung - Bericht 44932/7, danach nach DIN (alt)

#### Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt
Kommentar:	bestehende Trasse mit 2 x 380kV (Al/St 240/40, 4er Bü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4er Bü) Außenpegel $L_r$ am Immissionsort terzspektral in dB(A) berechnet

Umrechnung Außenpegel [dB(A)] in Außenpegel [dB]														
Frequenz in Hz	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	$\Sigma$
$L_r$ [dB(A)]	-31,2	-25,2	-19,5	-13,7	-9,6	-6,7	-4,7	-2,9	3,4	3,1	11,0	23,9	12,8	24,5
A-Bewertung addiert	77,6	70,4	63,4	56,7	50,5	44,7	39,4	34,6	30,2	26,2	22,5	19,1	16,1	
Schalldruckpegel außen [dB]	<b>46,4</b>	<b>45,2</b>	<b>43,9</b>	<b>43,0</b>	<b>40,9</b>	<b>38,0</b>	<b>34,7</b>	<b>31,7</b>	<b>33,6</b>	<b>29,3</b>	<b>33,5</b>	<b>43,0</b>	<b>28,9</b>	<b>52,3</b>

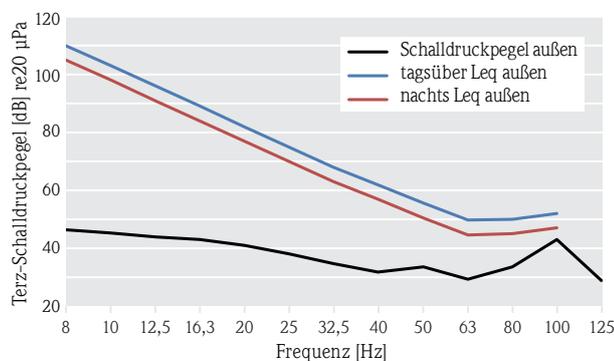
## Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7

### Prognose 1. Schritt

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt
Kommentar:	bestehende Trasse mit 2 x 380kV (Al/St 240/40, 4erBü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4erBü)

Außenpegel [dB(lin)] im Vergleich mit Grenzkurven für die Terzbänder [Hz]														
Frequenz [Hz]	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	Σ
Schalldruckpegel außen [dB]	46,4	45,2	43,9	43,0	40,9	38,0	34,7	31,7	33,6	29,3	33,5	43,0	28,9	52,3
Grenzkurven außen nach Bericht 44932/7 [dB]														
Leq Grenzkurve tags	110	103	96	89	82	75	68	62	55,5	49,7	50	52		
Leq Grenzkurve nachts	105	98	91	84	77	70	63	57	50,5	44,5	45	47		

Außenpegel Vergleich mit Grenzkurven



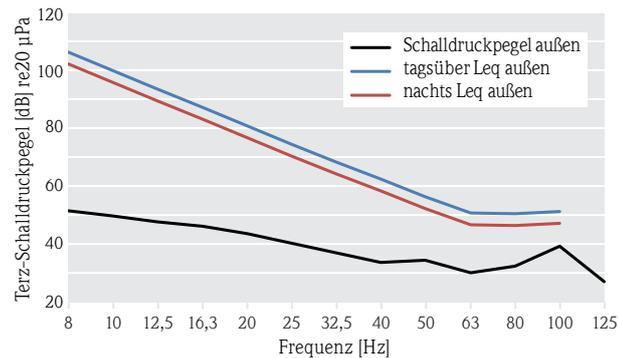
Überschreitung der Grenzkurven?	Ja	➔	weitere Untersuchungen notwendig (Schritt 2 + 3)
	Nein	➔	keine weitere Untersuchung notwendig

**Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7**  
**Prognose 2. Schritt**

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Berechnung Schalldruckpegel "innen" für mittlere Schalldämmung der Außenbauteile														
Frequenz in Hz	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	Σ
Schalldruckpegel außen [dB(lin)]	46,4	45,2	43,9	43,0	40,9	38,0	34,7	31,7	33,6	29,3	33,5	43,0	28,9	52,3
Pegeldifferenz für mittlere Schalldämmung	-7,0	-8,1	-9,2	-10,3	-11,4	-12,5	-13,5	-14,6	-15,7	-16,8	-17,9	-19,0	-20,0	
Schalldruckpegel innen LTerz,eq [dB]	39,4	37,1	34,7	32,7	29,5	25,5	21,2	17,1	17,9	12,5	15,6	24,0	8,9	43,1
Hörschwelle [dB]	103	95	87	79	71	63	55	48	40,5	33,5	28	23,5		
Überschreitung der Hörschwelle [dB]	-63,6	-57,9	-52,3	-46,3	-41,5	-37,5	-33,8	-30,9	-22,6	-21,0	-12,4	0,5		
A-Bewertung	77,6	70,4	63,4	56,7	50,5	44,7	39,4	34,6	30,2	26,2	22,5	19,1		
A-bewerteter Schalldruckpegel der Überschreitung [dB(A)]	-141,2	-128,3	-115,7	-103,0	-92,0	-82,2	-73,2	-65,5	-52,8	-47,2	-34,9	-18,6		-18,5
Anhaltswert tags/nachts [dB(A)]														25/35
Grenzkurven außen nach Bericht 44932/7 [dB]														
Leq Grenzkurve tags	108	100	92	84	76	68	60,5	53	45,5	38,5	38	39		
Leq Grenzkurve nachts	103	95	87	79	71	63	55,5	48	40,5	33,5	33	34		

Innenpegel Vergleich mit Grenzkurven



Überschreitung der Grenzkurven?	Ja		- bei anregenden tonhaltigen Geräuschen sind schädliche Umwelteinwirkungen zu erwarten
			- bei anregenden breitbandigen Geräuschen können schädliche Umwelteinwirkungen auftreten
		➔	weitere Untersuchungen sollten durchgeführt werden
	Nein	➔	bei anregenden breitbandigen Geräuschen sind schädliche Umwelteinwirkungen weniger zu erwarten

## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680

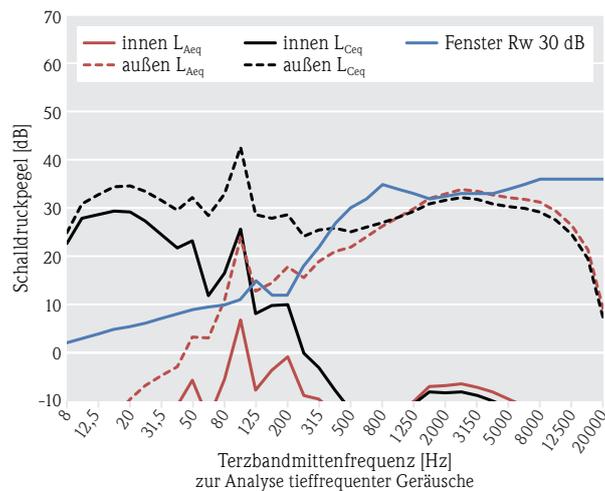
Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Kommentar: bestehende Trasse mit 2 x 380kV (Al/St 240/40, 4erBü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4erBü)  
 Außenpegel  $L_r$  am Immissionsort terzspektral in dB(A) berechnet; auf Innenpegel umgerechnet; Umrechnung Außenpegel auf Innenpegel auf nächster Seite

C-bewerteter Pegel (IO innen)	36,9	dB(C)
A-bewerteter Pegel (IO innen)	9,6	dB(A)
Differenz	27,3	dB

Ist das Geräusch tieffrequent im Sinne der DIN 45680? Ja  
 Ist eine Terzanalyse nach Abschn. 5.2 durchzuführen? Ja

Grafische Darstellung der Terzspektren



## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680 Umrechnung Außenpegel auf Innenpegel

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Innenpegelberechnung mit Glg. 5 VDI 2719 mit:

$$L_{\text{innen}} = L_{\text{außen}} + 10 \log (S/A) - R_w$$

mit  $S = 2 \text{ m}^2$

Innenpegelberechnung in Anlehnung an Glg. 5 der VDI 2719 mit:

$$L_{\text{innen}} = L_{\text{außen}} + 10 \log (S/A) - R_w$$

mit  $S = 2 \text{ m}^2$

mit  $A = 0,163 \cdot V/T$

mit  $V = 32 \text{ m}^3$

mit  $T =$  typische Messwerte hochgerechnete Werte zur Prüfung nach DIN 45680

Frequenz [Hz]	Pegel außen		2fach Fenster Rw 30 dB	T [sec]	10*logS/A [dB]	Pegel innen	
	L <sub>Aeq</sub> [dB]	L <sub>Ceq</sub> [dB]				L <sub>Aeq</sub> [dB]	L <sub>Ceq</sub> [dB]
8	-31,2	24,9	2,2			-33,4	22,7
10	-25,2	30,9	3			-28,2	27,9
12,5	-19,5	32,7	4			-23,5	28,7
16	-13,7	34,5	5			-18,7	29,5
20	-9,6	34,7	5,5			-15,1	29,2
25	-6,7	33,6	6,2			-12,9	27,4
31,5	-4,7	31,7	7,2			-11,9	24,5
40	-2,9	29,7	8			-10,9	21,7
50	3,4	32,3	9			-5,6	23,3
63	3,1	28,5	9,5	0,50	-7,17	-13,6	11,8
80	11,0	33,0	10	0,59	-6,45	-5,5	16,5
100	23,9	42,7	11	0,66	-5,97	6,9	25,7
125	12,8	28,7	15	0,73	-5,53	-7,7	8,2
160	14,6	27,9	12	0,64	-6,10	-3,5	9,8
200	17,8	28,7	12	0,57	-6,60	-0,8	10,1
250	15,6	24,2	18	0,61	-6,31	-8,7	-0,1
315	19,0	25,6	22	0,58	-6,53	-9,5	-2,9
400	21,0	25,8	27	0,58	-6,53	-12,5	-7,7
500	21,9	25,1	30	0,52	-7,00	-15,1	-11,9
630	24,1	26,0	32	0,56	-6,68	-14,6	-12,7
800	26,2	27,0	35	0,57	-6,60	-15,4	-14,6
1000	28,1	28,1	34	0,60	-6,38	-12,3	-12,3
1250	30,0	29,4	33	0,54	-6,84	-9,8	-10,4
1600	32,0	30,9	32	0,52	-7,00	-7,0	-8,1
2000	33,0	31,6	32,5	0,49	-7,26	-6,8	-8,2
2500	33,9	32,3	33	0,48	-7,35	-6,5	-8,1
3150	33,5	31,8	33	0,46	-7,54	-7,0	-8,7
4000	32,7	30,9	33	0,44	-7,73	-8,0	-9,8
5000	32,2	30,4	34	0,43	-7,83	-9,6	-11,4
6300	31,8	29,9	35	0,43	-7,83	-11,0	-12,9
8000	31,2	29,3	36	0,43	-7,83	-12,6	-14,5
10000	29,5	27,6	36	0,43	-7,83	-14,3	-16,2
12500	26,4	24,5	36	0,43	-7,83	-17,4	-19,3
16000	21,4	19,5	36	0,43	-7,83	-22,4	-24,3
20000	9,3	7,4	36	0,43	-7,83	-34,5	-36,4
Summe	42,8	47,3				9,6	36,9
Δ L <sub>Ceq</sub> - L <sub>Aeq</sub>	4,5					27,3	

untere Hüllkurve Abb. 6 nach M-BBM 44932/7

praktisch heutige Mindestanforderung

Näherung nach VDI 2719

## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680

### Terzanalyse

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 1 (leichter Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Tab. 1: Terzanalyse nach Abschnitt 5.2 der DIN 45680.

Frequenz [Hz]	Einzelton vorhanden?	$L_{TerzF}$ [dB]	$L_{TerzF,r}$ [dB]	$L_{HS}$ [dB]	$L_{Terz,r} - L_{HS}$ [dB]
8		44,2	44,2	103	0,0
10		42,2	42,2	95	0,0
12,5		39,9	39,9	87	0,0
16		38,0	38,0	79	0,0
20		35,4	35,4	71	0,0
25		31,8	31,8	63	0,0
31,5		27,5	27,5	55,5	0,0
40		23,7	23,7	48	0,0
50		24,6	24,6	40,5	0,0
63		12,6	12,6	33,5	0,0
80		17,0	17,0	28	0,0
100	ja	26,0	26,0	23,5	2,5

Beurteilungszeitraum: nachts  
 Beurteilungszeit: 60 min  
 Einwirkzeit: 60 min

### Beurteilung nach Beiblatt 1 der DIN 45680

Hinweis auf Einzelton im Übergangsbereich von benachbarten Terzen vorhanden:

Wieviele deutlich hervortretende Einzeltöne besitzt das Geräusch?  $N = 1$

Sind Einzeltöne vorhanden, erfolgt die Beurteilung nach den Differenzen  $\Delta L_1$  bzw.  $\Delta L_2$ , (Tab. 2) ansonsten nach  $L_T$  und  $L_{AFmax}$  (Tab. 3).

Tab. 2

Frequenz [Hz]	Einzelton	$\Delta L_1$ [dB]	Anhaltswert [dB]	Überschreitung des Anhaltswertes
8		0,0	0	nein
10		0,0	0	nein
12,5		0,0	0	nein
16		0,0	0	nein
20		0,0	0	nein
25		0,0	0	nein
31,5		0,0	0	nein
40		0,0	0	nein
50		0,0	0	nein
63		0,0	0	nein
80		0,0	5	nein
100	ja	2,5	10	nein

Im allgemeinen liegen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräusche vor, wenn die Anhaltswerte nicht überschritten werden.

Mit dem Begriff "Anhaltswerte" soll zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich nicht um gesicherte Grenzwerte handelt, sondern um empfohlene Werte, die sich auf die bisherigen Erfahrungen bei der Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft gewerblicher Anlagen stützen.

Wenn Einzeltöne vorhanden sind, wird die Überschreitung der Anhaltswerte in Tab. 2 angezeigt, ansonsten in Tab. 3 (jeweils in der letzten Tabellenspalte).

Tab. 3

	Messung dB(A)	Anhaltswert dB(A)	Überschreitung des Anhaltswertes
$L_T$		25	ja / nein

## Anhang 10

### Vorgehensweise bei der Beurteilung Tieffrequenter Geräusche anhand eines Fallbeispiels für den Emissionsansatz „starker Niederschlag“

Mit berücksichtigt: geplante neue Trasse und bestehende Trasse im Planzustand

Nachfolgend zuerst Berechnung nach Handlungsanleitung – Bericht 44932/7, danach nach DIN (alt)

#### Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt
Kommentar:	bestehende Trasse mit 2 x 380 kV (Al/St 240/40, 4er Bü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4er Bü) Außenpegel $L_r$ am Immissionsort terzspektral in dB(A) berechnet

Umrechnung Außenpegel [dB(A)] in Außenpegel [dB]														
Frequenz in Hz	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	$\Sigma$
$L_r$ [dB(A)]	-27,7	-21,5	-16,3	-10,7	-6,4	-2,7	-0,1	1,3	4,1	4,1	14,9	30,9	17,6	31,2
A-Bewertung addiert	77,6	70,4	63,4	56,7	50,5	44,7	39,4	34,6	30,2	26,2	22,5	19,1	16,1	
Schalldruckpegel außen [dB]	<b>49,9</b>	<b>48,9</b>	<b>47,1</b>	<b>46,0</b>	<b>44,1</b>	<b>42,0</b>	<b>39,3</b>	<b>35,9</b>	<b>34,3</b>	<b>30,3</b>	<b>37,4</b>	<b>50,0</b>	<b>33,7</b>	<b>56,4</b>

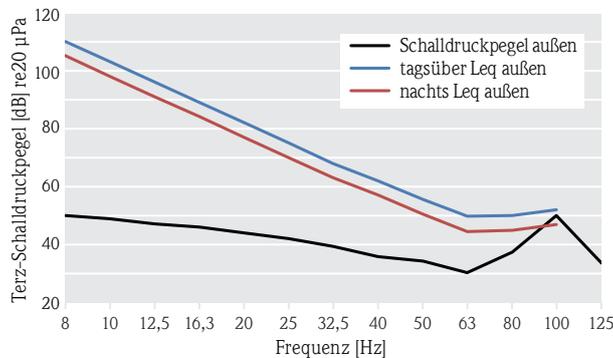
## Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7

### Prognose 1. Schritt

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt
Kommentar:	bestehende Trasse mit 2 x 380kV (Al/St 240/40, 4er Bü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4er Bü)

Außenpegel [dB] im Vergleich mit Grenzkurven für die Terzbänder [Hz]														
Frequenz [Hz]	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	Σ
Schalldruckpegel außen [dB]	49,9	48,9	47,1	46,0	44,1	42,0	39,3	35,9	34,3	30,3	37,4	50,0	33,7	56,4
Grenzkurven außen nach Bericht 44932/7 [dB]														
L <sub>eq</sub> Grenzkurve tags	110	103	96	89	82	75	68	62	55,5	49,7	50	52		
L <sub>eq</sub> Grenzkurve nachts	105	98	91	84	77	70	63	57	50,5	44,5	45	47		

Außenpegel Vergleich mit Grenzkurven



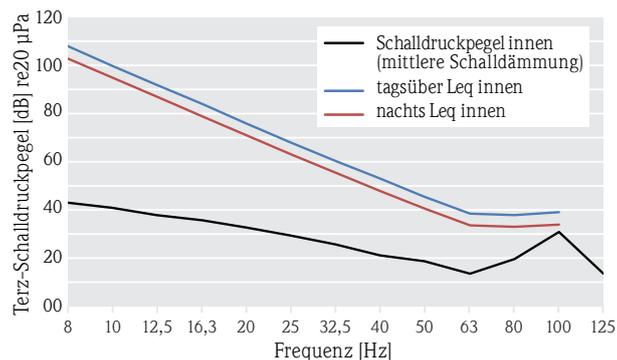
Überschreitung der Grenzkurven?	Ja	➔	weitere Untersuchungen notwendig (Schritt 2 + 3)
	Nein	➔	keine weitere Untersuchung notwendig

**Tieffrequente Geräusche - Auswertung nach Bericht 44 932 / 7**  
**Prognose 2. Schritt**

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Berechnung Schalldruckpegel "innen" für mittlere Schalldämmung der Außenbauteile														
Frequenz in Hz	8	10	12,5	16,3	20	25	32,5	40	50	63	80	100	125	Σ
Schalldruckpegel außen [dB]	49,9	48,9	47,1	46,0	44,1	42,0	39,3	35,9	34,3	30,3	37,4	50,0	33,7	56,4
Pegeldifferenz für mittlere Schalldämmung	-7,0	-8,1	-9,2	-10,3	-11,4	-12,5	-13,5	-14,6	-15,7	-16,8	-17,9	-19,0	-20,0	
Schalldruckpegel innen $L_{Terz,eq}$ [dB]	42,9	40,8	37,9	35,7	32,7	29,5	25,8	21,3	18,6	13,5	19,5	31,0	13,7	46,6
Hörschwelle [dB]	103	95	87	79	71	63	55	48	40,5	33,5	28	23,5		
Überschreitung der Hörschwelle [dB]	-60,1	-54,2	-49,1	-43,3	-38,3	-33,5	-29,2	-26,7	-21,9	-20,0	-8,5	7,5		
A-Bewertung	77,6	70,4	63,4	56,7	50,5	44,7	39,4	34,6	30,2	26,2	22,5	19,1		
A-bewerteter Schalldruckpegel der Überschreitung [dB]	-137,7	-124,6	-112,5	-100,0	-88,8	-78,2	-68,6	-61,3	-52,1	-46,2	-31,0	-11,6		-11,5
Anhaltswert tags/nachts [dB]														25/35
Grenzkurven außen nach Bericht 44932/7 [dB]														
$L_{eq}$ Grenzkurve tags	108	100	92	84	76	68	60,5	53	45,5	38,5	38	39		
$L_{eq}$ Grenzkurve nachts	103	95	87	79	71	63	55,5	48	40,5	33,5	33	34		

Innenpegel Vergleich mit Grenzkurven



Überschreitung der Grenzkurven?	Ja		- bei anregenden tonhaltigen Geräuschen sind schädliche Umwelteinwirkungen zu erwarten
			- bei anregenden breitbandigen Geräuschen können schädliche Umwelteinwirkungen auftreten
		➔	weitere Untersuchungen sollten durchgeführt werden
	Nein	➔	bei anregenden breitbandigen Geräuschen sind schädliche Umwelteinwirkungen weniger zu erwarten

## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680

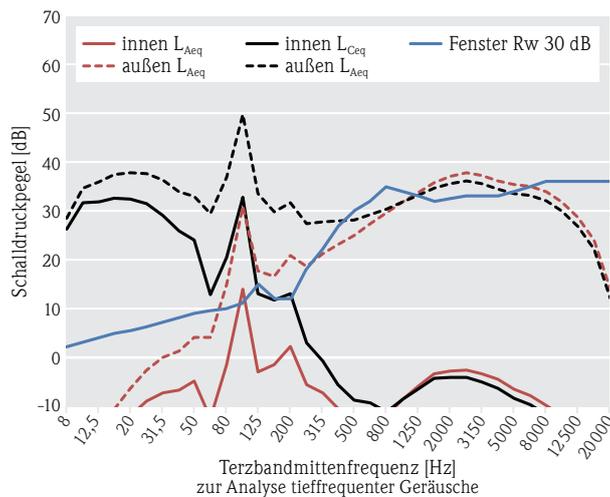
Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Kommentar: bestehende Trasse mit 2 x 380kV (Al/St 240/40, 4er Bü), geplante Trasse mit 4 x 380kV (Al/St 550/70, 4er Bü)  
 Außenpegel  $L_r$  am Immissionsort terzspektral in dB(A) berechnet; auf Innenpegel umgerechnet; Umrechnung Außenpegel auf Innenpegel auf nächster Seite

C-bewerteter Pegel (IO innen)	40,7	dB(C)
A-bewerteter Pegel (IO innen)	15,2	dB(A)
Differenz	25,5	dB

Ist das Geräusch tieffrequent im Sinne der DIN 45680? Ja  
 Ist eine Terzanalyse nach Abschn. 5.2 durchzuführen? Ja

Grafische Darstellung der Terzspektren



## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680 Umrechnung Außenpegel auf Innenpegel

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

Innenpegelberechnung mit Glg. 5 VDI 2719 mit:

$$L_{\text{innen}} = L_{\text{außen}} + 10 \log (S/A) - R_w$$

mit  $S = 2 \text{ m}^2$

Innenpegelberechnung in Anlehnung an Glg. 5 der VDI 2719 mit:

$$L_{\text{innen}} = L_{\text{außen}} + 10 \log (S/A) - R_w$$

mit  $S = 2 \text{ m}^2$

mit  $A = 0,163 \cdot V/T$

mit  $V = 32 \text{ m}^3$

mit  $T =$  typische Messwerte hochgerechnete Werte zur Prüfung nach DIN 45680

Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen

Frequenz [Hz]	Pegel außen		2fach Fenster Rw 30 dB	T [sec]	10*logS/A [dB]	Pegel innen	
	L <sub>Aeq</sub> [dB]	L <sub>Ceq</sub> [dB]				L <sub>Aeq</sub> [dB]	L <sub>Ceq</sub> [dB]
8	-27,7	28,4	2,2			-29,9	26,2
10	-21,5	34,6	3			-24,5	31,6
12,5	-16,3	35,9	4			-20,3	31,9
16	-10,7	37,5	5			-15,7	32,5
20	-6,4	37,9	5,5			-11,9	32,4
25	-2,7	37,6	6,2			-8,9	31,4
31,5	-0,1	36,3	7,2			-7,3	29,1
40	1,3	33,9	8			-6,7	25,9
50	4,1	33,0	9			-4,9	24,0
63	4,1	29,5	9,5	0,50	-7,17	-12,6	12,8
80	14,9	36,9	10	0,59	-6,45	-1,6	20,4
100	30,9	49,7	11	0,66	-5,97	13,9	32,7
125	17,6	33,5	15	0,73	-5,53	-2,9	13,0
160	16,5	29,8	12	0,64	-6,10	-1,6	11,7
200	20,8	31,7	12	0,57	-6,60	2,2	13,1
250	18,7	27,3	18	0,61	-6,31	-5,6	3,0
315	21,2	27,8	22	0,58	-6,53	-7,3	-0,7
400	23,1	27,9	27	0,58	-6,53	-10,4	-5,6
500	25,0	28,2	30	0,52	-7,00	-12,0	-8,8
630	27,4	29,3	32	0,56	-6,68	-11,3	-9,4
800	29,6	30,4	35	0,57	-6,60	-12,0	-11,2
1000	31,8	31,8	34	0,60	-6,38	-8,6	-8,6
1250	33,8	33,2	33	0,54	-6,84	-6,0	-6,6
1600	35,7	34,6	32	0,52	-7,00	-3,3	-4,4
2000	37,0	35,6	32,5	0,49	-7,26	-2,8	-4,2
2500	37,8	36,2	33	0,48	-7,35	-2,6	-4,2
3150	37,2	35,5	33	0,46	-7,54	-3,3	-5,0
4000	36,2	34,4	33	0,44	-7,73	-4,5	-6,3
5000	35,3	33,5	34	0,43	-7,83	-6,5	-8,3
6300	35,0	33,1	35	0,43	-7,83	-7,8	-9,7
8000	33,9	32,0	36	0,43	-7,83	-9,9	-11,8
10000	31,8	29,9	36	0,43	-7,83	-12,0	-13,9
12500	28,7	26,8	36	0,43	-7,83	-15,1	-17,0
16000	24,1	22,2	36	0,43	-7,83	-19,7	-21,6
20000	14,0	12,1	36	0,43	-7,83	-29,8	-31,7
Summe	46,4	52,3				15,2	40,7
$\Delta L_{Ceq} - L_{Aeq}$	5,9					25,5	

untere Hüllkurve Abb.6 nach M-BBM 44932/7

praktisch heutige Mindestanforderung

Näherung nach VDI 2719

## Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680

### Terzanalyse

Projekt:	Beispielprojekt
Quelle:	Geräuschbelastung einer bestehenden Trasse (Überspannung am IO) + Geräuschbelastung einer geplanten Trasse
Betriebszustand:	Emissionsansatz 2a/b (starker Niederschlag)
Immissionsort:	kritischster IO in vorliegendem Beispielprojekt

**Tab. 1: Terzanalyse nach Abschnitt 5.2 der DIN 45680.**

Frequenz [Hz]	Einzelton vorhanden?	$L_{TerzF}$ [dB]	$L_{TerzF,r}$ [dB]	$L_{HS}$ [dB]	$L_{Terz,r} - L_{HS}$ [dB]
8		47,7	47,7	103	0,0
10		45,9	45,9	95	0,0
12,5		43,1	43,1	87	0,0
16		41,0	41,0	79	0,0
20		38,6	38,6	71	0,0
25		35,8	35,8	63	0,0
31,5		32,1	32,1	55,5	0,0
40		27,9	27,9	48	0,0
50		25,3	25,3	40,5	0,0
63		13,6	13,6	33,5	0,0
80		20,9	20,9	28	0,0
100	ja	33,0	33,0	23,5	9,5

Beurteilungszeitraum: nachts  
 Beurteilungszeit: 60 min  
 Einwirkzeit: 60 min

### Beurteilung nach Beiblatt 1 der DIN 45680

Hinweis auf Einzelton im Übergangsbereich von benachbarten Terzen vorhanden:

Wieviele deutlich hervortretende Einzeltöne besitzt das Geräusch?  $N = 1$

Sind Einzeltöne vorhanden, erfolgt die Beurteilung nach den Differenzen  $\Delta L_1$  bzw.  $\Delta L_2$ , (Tab. 2) ansonsten nach  $L_T$  und  $L_{AFmax}$  (Tab. 3).

**Tab. 2**

Frequenz [Hz]	Einzelton	$\Delta L_1$ [dB]	Anhaltswert [dB]	Überschreitung des Anhaltswertes
8		0,0	0	nein
10		0,0	0	nein
12,5		0,0	0	nein
16		0,0	0	nein
20		0,0	0	nein
25		0,0	0	nein
31,5		0,0	0	nein
40		0,0	0	nein
50		0,0	0	nein
63		0,0	0	nein
80		0,0	5	nein
100	ja	9,5	10	nein

Im allgemeinen liegen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräusche vor, wenn die Anhaltswerte nicht überschritten werden.

Mit dem Begriff "Anhaltswerte" soll zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich nicht um gesicherte Grenzwerte handelt, sondern um empfohlene Werte, die sich auf die bisherigen Erfahrungen bei der Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft gewerblicher Anlagen stützen.

Wenn Einzeltöne vorhanden sind, wird die Überschreitung der Anhaltswerte in Tab. 2 angezeigt, ansonsten in Tab. 3 (jeweils in der letzten Tabellenspalte).

**Tab. 3**

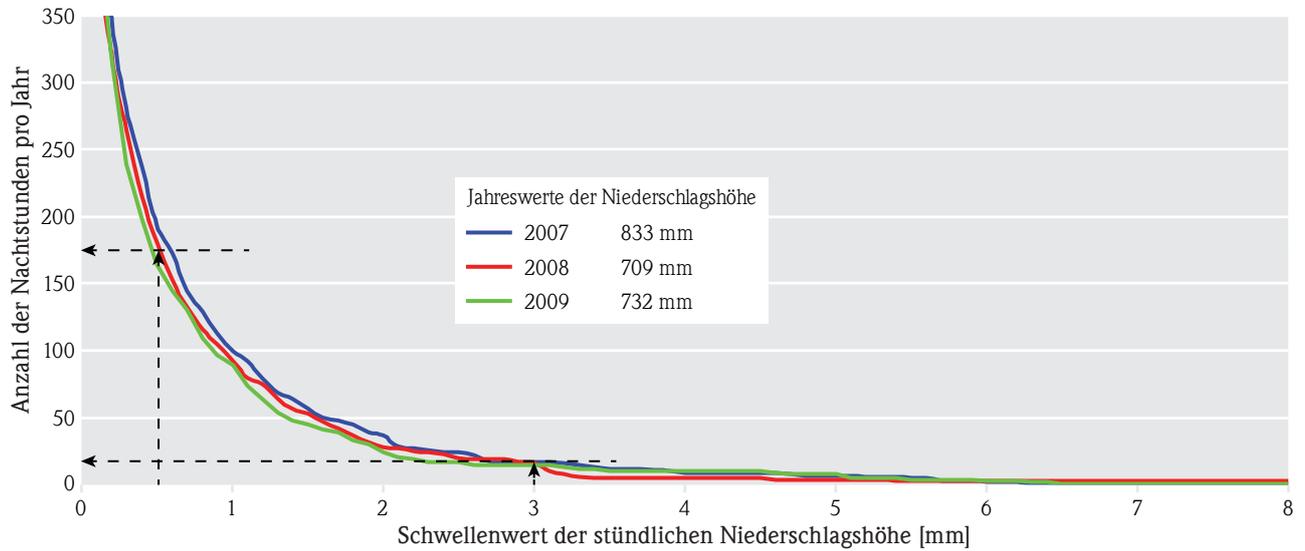
	Messung dB(A)	Anhaltswert dB(A)	Überschreitung des Anhaltswertes
$L_T$		25	ja / nein

## Anhang 11

### Wetterstatistik für den Standort Freiburg [14]

#### Kumulative Häufigkeit von Nachtstunden mit Niederschlagshöhen $\geq$ Schwellenwert

Station: Massenbachhausen (49°11'N, 09°03'E, 220 mü.NN, Jahre: 2007–2009)



## Anhang 12

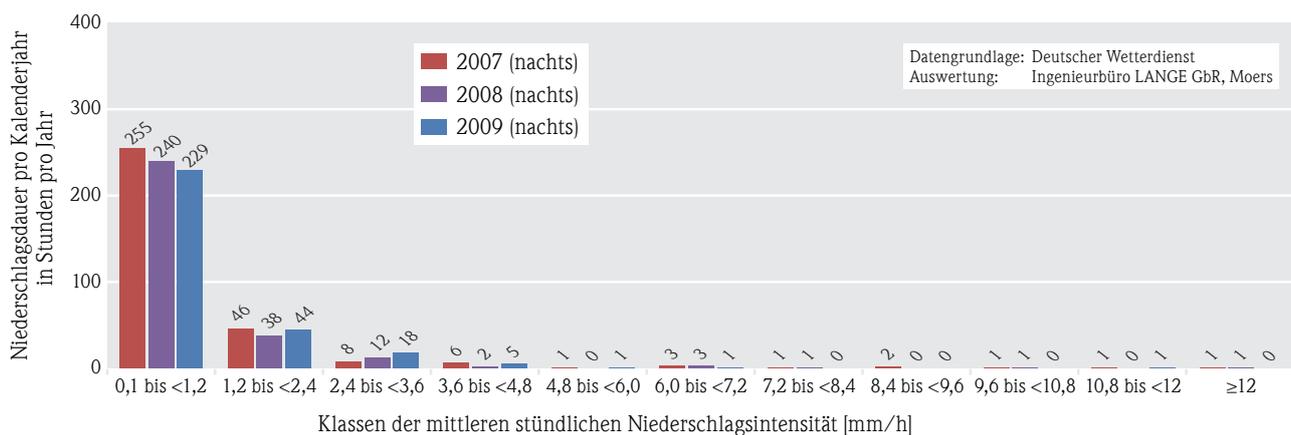
### Wetterstatistik für den Standort Köln-Bonn

#### Niederschlagsstatistik zu Emissionsansatz „starker Niederschlag“

Niederschlagsmengen für den Emissionsansatz starker Niederschlag bei >4,8 mm/h

- Im Betrachtungszeitraum von drei Jahren (2007–2009) sind diese Niederschlagsmengen im Mittel jeweils 6,3 h pro Jahr in der Nachtzeit aufgetreten.
- Gerundet damit max. 7 h im Jahr.
- Übertragen auf den „worst case“ damit max. 7 Nächte im Jahr mit Niederschlagsmengen >4,8 mm/h über die Dauer einer vollen Stunde (lauteste Nachtstunde i.S. der TA Lärm).
- Insgesamt im Mittel über die drei Jahre 307,3 Regenstunden im Jahr zur Nachtzeit, entspricht 10,5 % der gesamten Nachtstunden in einem Jahr (2920), in denen Niederschläge aufgetreten sind, demgegenüber 89,5 % der Nachtstunden ohne Niederschlag.

Niederschlagsauswertung für die Messstation Köln-Bonn der Jahre 2007–2009 (Nachtzeit: 22:00–06:00 Uhr)



Die Datengrundlage des Deutschen Wetterdienstes beinhaltet festen Niederschlag (Schnee), sowie flüssigen Niederschlag (Regen).

Im Vergleich zum Mittelwert langjähriger Messreihen ist im Mittel der drei Kalenderjahre 2007–2009 eine überdurchschnittliche Niederschlagshöhe registriert worden (auch im Vergleich zu den Jahren 2010–2012); daher wurden die drei Jahre 2007–2009 für die vorliegende Niederschlagsstatistik im Sinne eines „worst case“ zugrunde gelegt.