Diplomarbeit

Einflussfaktoren auf mittels Energie-Iterationsverfahren bestimmte Gleisabklingraten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

Parameters influencing the track decay rate determined by the energy iteration method

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Paul Schlamberger, BSc

Matr.Nr.: 01605013

Betreuung: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Rüger**
Sen. Sc. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Maly**
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Spurgebundene Verkehrssysteme
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/230-02, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit Einflussfaktoren auf Gleisabklingraten, welche unter Anwendung des Energie-Iterationsverfahrens (EIV) nach DIN CEN/TR 16891 [3] ermittelt werden. Die Gleisabklingrate (englisch: Track Decay Rate oder TDR) ist ein Parameter zur akustischen Beurteilung der Schiene. Die Ermittlung erfolgt entweder direkt mittels Impulshammer-Verfahren oder indirekt auf Basis von (Schienenbeschleunigungs-)Messungen während Zugvorbeifahrten. Das hier behandelte Energie-Iterationsverfahren zählt zu den indirekten Verfahren. Es bietet den Vorteil, dass zur Ermittlung der Gleisabklingrate nur die Schienenbeschleunigung einer Zugfahrt sowie die im Zeitsignal verorteten Achspositionen benötigt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung der Gleisabklingrate über längere Perioden.

Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden Messdaten von Zugvorbeifahrten über einen Zeitraum von rund 2 Jahren. In einem ersten Schritt werden die Gleisabklingraten nach DIN CEN/TR 16891 [3] berechnet und mit Impulshammermessungen verglichen. Die ermittelten Gleisabklingraten werden dann in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussfaktoren untersucht. Diese umfassen sowohl Umgebungseinflüsse als auch Einflüsse auf das gewählte Ermittlungsverfahren. Die Auswahl der betrachteten Einflüsse erfolgt anhand einer Literaturrecherche und beinhaltet die folgenden Parameter: (Schienen-)Temperatur, Vorbeifahrtsgeschwindigkeit, Wahl des Berechnungsparameters L_2 und Zugtyp.

Das Resultat zeigt, dass die Schienentemperatur (bei Verwendung weicher Schienenzwischenlagen) einen großen Einfluss auf die mittels EIV bestimmten Gleisabklingraten haben kann. Dies gilt insbesondere im Bereich von niedrigen und mittleren Temperaturen. Es ist davon auszugehen, dass die Temperaturabhängigkeit der Gleisabklingrate unabhängig vom gewählten Ermittlungsverfahren ist. Bei Betrachtung der Einflüsse auf das gewählte Messverfahren (EIV) zeigt sich zudem, dass vor allem die Wahl der Länge L_2 einen großen Einfluss auf die Gleisabklingraten haben kann. Dies gilt vor allem für kleine Zuglängen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen keine eindeutige Beeinflussung der Gleisabklingrate durch den Einflussparameter Zuggeschwindigkeit. Auch bei der Betrachtung unterschiedlicher Zugtypen (Lokomotiven und Personenzüge) konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This diploma thesis investigates the factors influencing track decay rates (TDR), determined using the energy iteration method (EIV) in accordance with DIN CEN/TR 16891 [3]. The TDR is a key parameter for the acoustic characterization of railway tracks and can be determined either directly using the impulse hammer method or indirectly based on rail acceleration measurements during train passages. The EIV, an indirect method, offers the advantage of requiring only rail acceleration data from train movements and axle positions within the time signal. This enables the assessment of track decay rates over extended periods.

The study is based on rail acceleration data collected over a two-year period. Initially, TDRs are calculated in compliance with DIN CEN/TR 16891 [3] and compared with results obtained using the impulse hammer method. The TDRs are then analyzed with respect to various influencing factors. The selection of influencing factors is based on a comprehensive literature review and includes temperature, train pass-by speed, the choice of the calculation parameter L_2, and train type.

The findings indicate that rail temperature, particularly when soft rail pads are used, strongly affects TDRs determined by the EIV, especially in the low to medium temperature range. This temperature dependency appears to be independent of the measurement method used. Regarding methodological influences, the choice of the calculation parameter L_2 exerts a substantial impact on TDRs, particularly for shorter train lengths. By contrast, train speed has no notable effect on the TDRs. Similarly, comparisons between different train types, such as locomotives and passenger trains, reveal only minor variations in TDR values.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei allen Personen, welche mich im Rahmen meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gebührt meinen Betreuern Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Rüger und Sen. Sc. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Maly ohne deren Unterstützung die vorliegende Arbeit nicht umsetzbar gewesen wäre. Zudem bedanke ich mich bei Dr. Günter Dinhobl für die Unterstützung von Seiten der ÖBB-Infrastruktur AG, bei meinem Kollegen Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Markus Lagler für das umfassende Lektorat und bei Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christian Kirisits für die fachlichen Anmerkungen.

Abschließend bedanke ich mich bei allen Wegbegleitern, vor allem Tini, Sophie, meinen Eltern und allen Studienfreundinnen und -freunden (verzeiht mir das Unterlassen einer namentlichen Nennung) für die Unterstützung während dem Studium und wünsche viel Freude bei der Lektüre dieser Arbeit.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **10**
- 1.1 Ausgangslage . . . 10
- 1.2 Fragestellung und Aufbau . . . 11
- 1.3 Begriffsabgrenzung . . . 11
  - 1.3.1 Gleisabklingrate . . . 11
  - 1.3.2 Hammerschlag-Impulsverfahren . . . 12
  - 1.3.3 Energie-Iterationsverfahren . . . 12
  - 1.3.4 Effektive Gesamtrauheit und kombinierte Rauheit . . . 12
- 1.4 Methode . . . 13

2 Rollgeräusch **14**
- 2.1 Grundlagen . . . 14
- 2.2 Europäisches Berechnungsmodell . . . 15
- 2.3 Frequenzspektrum des Rollgeräusches . . . 16
- 2.4 Effektive Gesamtrauheit . . . 18
  - 2.4.1 Kontaktfilter . . . 19
  - 2.4.2 Schienenrauheit . . . 19
  - 2.4.3 Radrauheit . . . 19

3 Gleisabklingrate **20**
- 3.1 Grundlagen . . . 20
- 3.2 Ermittlung mit Hammerschlag-Impulsverfahren . . . 21
- 3.3 Einflüsse auf die Gleisabklingrate . . . 22
  - 3.3.1 Konstruktive Randbedingungen . . . 22
  - 3.3.2 Umgebungseinflüsse . . . 28
  - 3.3.3 Messverfahren . . . 28

4 Pass-by-Methode **31**
- 4.1 Historische Entwicklung . . . 31
- 4.2 Anwendungen . . . 31
- 4.3 Berechnungsmodell gemäß DIN CEN/TR 16891 . . . 31
  - 4.3.1 Energie-Iterationsverfahren . . . 31
  - 4.3.2 Ermittlung der kombinierten Rauheit . . . 34
- 4.4 Annahmen und Limitierungen . . . 34

5 Messdaten **35**
- 5.1 Messstelle und Datenbearbeitung . . . 35
- 5.2 Auswahl zu untersuchender Einflussfaktoren . . . 36
- 5.3 Randbedingungen . . . 38

6 Auswertung **41**
- 6.1 Datenqualität . . . 41
  - 6.1.1 Plausibilität der (Schienen-)Beschleunigungsverläufe . . . 41

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Wien Bibliothek Your knowledge hub

6.1.2 Unterer Grenzwert für die maximale Schienenbeschleunigung 44
6.1.3 Abweichungen zur Norm 44
6.2 Berechnung 44
6.3 Gegenüberstellung der Messverfahren 47
6.3.1 Randbedingungen 47
6.3.2 Vertikale Gleisabklingrate 47
6.3.3 Laterale Gleisabklingrate 49
6.4 Einflussfaktor Schienentemperatur 49
6.4.1 Randbedingungen 51
6.4.2 Vertikale Gleisabklingrate 53
6.4.3 Laterale Gleisabklingrate 54
6.5 Wahl der langen Länge L_2 58
6.5.1 Variantenvergleich 58
6.5.2 Randbedingungen 58
6.5.3 Vertikale Gleisabklingrate 60
6.5.4 Laterale Gleisabklingrate 63
6.6 Einflussfaktor Fahrgeschwindigkeit 63
6.6.1 Randbedingungen 65
6.6.2 Vertikale Gleisabklingrate 66
6.6.3 Laterale Gleisabklingrate 68
6.7 Einflussfaktor Zugtyp 69
6.7.1 Randbedingungen 69
6.7.2 Vertikale Gleisabklingrate 70
6.7.3 Laterale Gleisabklingrate 71

7 Zusammenfassung und Diskussion 75
7.1 Gegenüberstellung der Messverfahren 75
7.2 Einflussfaktor Schienentemperatur 76
7.3 Wahl der langen Länge L_2 79
7.4 Einflussfaktor Fahrgeschwindigkeit 81
7.5 Einflussfaktor Zugtyp 82
7.6 Streuung der Ergebnisse 82
7.7 Grenzen der vorliegenden Arbeit 83
7.8 Offene Forschungsfragen 83

A Ergänzungen 89
A.1 Einflussfaktor Schienentemperatur 90

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Pass-by-Analyse (PBA) ist eine Methode zur Ermittlung von akustischen Gleisparametern und ist seit März 2017 in der DIN CEN/TR 16891 [3] verankert. Sie beinhaltet drei aufeinander aufbauende Verfahren: Das sogenannte Energie-Iterationsverfahren (EIV) zur Berechnung der Gleisabklingrate während einer Zugvorbeifahrt, ein Verfahren zur Ermittlung von kombinierten Rauheiten sowie ein Verfahren für die Bestimmung von akustischen Transferfunktionen. Obwohl die Methode in ihren Grundzügen bereits 2006 von Janssens et al. [17] publiziert und in den Folgejahren weiterentwickelt wurde, sind wissenschaftliche Publikationen zur Thematik überschaubar. Bisherige Veröffentlichungen zur Pass-by-Methode thematisieren vor allem die Gegenüberstellung mit bereits etablierten Erhebungsmethoden. Hierbei zeigt sich, dass die Methode trotz einiger Vereinfachungen und Limitationen relativ gute Übereinstimmungen mit direkten Messungen liefert, insbesondere hinsichtlich der Ermittlung von Gleisabklingraten und kombinierten Rauheiten (vgl. [25, 26, 44]).

Die wesentliche Stärke der Pass-by-Methode liegt darin, dass als Eingangsgröße lediglich die Schienenbeschleunigungen während Zugvorbeifahrten und die im Messsignal verorteten Achspositionen des jeweiligen Zuges benötigt werden. Dies bietet Vorteile gegenüber alternativen Messverfahren zur Bestimmung von akustischen Streckenparametern, wie beispielsweise dem Impulshammer-Verfahren für Gleisabklingraten, da der Messvorgang deutlich vereinfacht wird und die Zeit, in der Messpersonal das Gleis betreten muss, reduziert wird [26]. Dies macht die Methode zu einem vielversprechenden, potentiellen Werkzeug für die Abschätzung von Eingangsparametern für die Lärmprognose im Eisenbahnwesen. Zusätzlich eröffnet es die Möglichkeit, Gleisparameter kontinuierlich bzw. in großer Quantität über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Dies erlaubt dem Anwender die vertiefte Untersuchung von akustischen Gleisparametern und deren Einflussgrößen über größere Zeitbereiche und in einem Ausmaß, welches mit direkten Messmethoden nur schwer erreichbar ist. Vor allem variable Einflussfaktoren wie Umgebungseinflüsse, können dadurch zuverlässiger abgeschätzt werden, als es mit einzelnen direkten Messungen möglich wäre.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an: Anhand zur Verfügung gestellter Messdaten wird die Pass-by-Gleisabklingrate eines Streckenabschnitts über einen Zeitraum von zwei Jahren erfasst. Dies ermöglicht eine umfangreiche Analyse dieses Gleisparameters und seiner potentiellen Einflussgrößen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ausgewählte Einflussfaktoren auf die Gleisabklingrate zu untersuchen und zu quantifizieren. Dadurch soll das Verständnis der akustischen Gleisparameter vertieft und die Interpretierbarkeit von Messergebnissen der Pass-by-Methode verbessert werden. Die Betrachtung soll hierbei nicht nur auf Einflüsse fokussieren, welche die Gleisabklingrate grundsätzlich beeinflussen können (Umgebungseinflüsse), sondern auch auf Einflussparameter eingehen, welche nur für das betrachtete Messverfahren von Relevanz sind. Letzteres betrifft bei der Pass-by-Methode vor allem Eigenschaften der vorbeifahrenden Züge.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.2 Fragestellung und Aufbau

Auf Basis der – im vorherigen Kapitel geschilderten – Ausgangslage, werden drei Forschungsfragen bearbeitet:

1. Wie unterscheiden sich Pass-by-Gleisabklingraten und Impulshammer-Gleisabklingraten voneinander?
2. Welche Einflussfaktoren kommen für die Analyse und Quantifizierung bei den zur Verfügung stehenden Messdaten in Frage? Betrachtet werden Einflussfaktoren auf
   a) die Gleisabklingrate
   b) die Messung der Gleisabklingrate
3. Wie beeinflussen die anhand von Forschungsfrage 2 ausgewählten Einflussfaktoren die gemessenen Pass-by-Gleisabklingraten?

Aus den Forschungsfragen ist ersichtlich, dass der Fokus dieser Arbeit auf der Ermittlung der Gleisabklingrate mittels Energie-Iterationsverfahren liegt. Die Ermittlung der kombinierten Rauheit wird im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse ebenfalls angeschnitten, da hier die Gleisabklingrate als Eingangsgröße einfließt. Obwohl die Pass-by-Analyse die Ermittlung von akustischen Übertragungsfunktionen ermöglicht, wird dieser Aspekt nicht behandelt.

Die Gliederung der Arbeit folgt in drei Teilen: Grundlagen (Kapitel 2 bis 4), Analyse (Kapitel 5 und 6) und Diskussion (Kapitel 7). In den Grundlagenkapiteln werden – die vom Autor für die vollumfängliche Betrachtung des behandelten Themengebiets als relevant erachteten – Begrifflichkeiten zur Thematik im Rahmen einer Literaturrecherche zusammengetragen und erläutert. Es werden Grundlagen zum Rollgeräusch generell, sowie zur Gleisabklingrate und deren Ermittlung, zur kombinierten Rauheit und zu bekannten Einflussgrößen auf die Gleisabklingrate und die kombinierte Rauheit behandelt. Die Messstelle, die zur Verfügung gestellten Daten, die Auswahl der Einflussparameter und die Randbedingungen werden in Kapitel 5 beschrieben. Auf Basis der Literaturrecherche einerseits und der verfügbaren Messgrößen andererseits werden Einflussfaktoren auf die Pass-by-Gleisabklingrate und deren Ermittlung ausgewählt (entsprechend Forschungsfrage 2). Darauf aufbauend beinhaltet Kapitel 6 die Beschreibung der Datenqualität, Auswertungen sowie die Ergebnisse zu Forschungsfrage 1, 2 und 3. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert und in Bezug auf die Forschungsfragen eingeordnet. Die Erkenntnisse der vorherigen Kapitel und deren Implikationen werden hierin zusammengefasst und hinsichtlich Aussagekraft und Verallgemeinerbarkeit diskutiert. Abschließend erfolgt eine Übersicht offener, auf die Erkenntnisse aufbauender Forschungsfragen.

1.3 Begriffsabgrenzung

Die in dieser Arbeit behandelte Thematik zeichnet sich durch eine uneinheitliche Begriffsverwendung in der Literatur aus. Um Missverständnissen vorzubeugen wird in diesem Kapitel die Wahl und die Abgrenzung der – für diese Arbeit – zentralen Begrifflichkeiten diskutiert und begründet.

1.3.1 Gleisabklingrate

Der Begriff der Gleisabklingrate hat sich als Ausdruck für die Track Decay Rate (TDR) durchgesetzt und wird auch in dieser Arbeit standardmäßig verwendet. Als Abkürzung wird das englische Kürzel TDR verwendet, da es kein vergleichbar gebräuchliches Kürzel in der deutschen Sprache gibt. Als Formelzeichen wird mit dem Kürzel D die Konvention der DIN CEN/TR 16891

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[3] übernommen. Der in frühen Publikationen (vor 2006) gebräuchliche Begriff Abklingrate bzw. Decay Rate wird in dieser Arbeit in Bezug auf den allgemeinen physikalischen Prozess abklingender Wellen verwendet. Dies geschieht in Kombination mit dem Formelzeichen Δ. In manchen Fällen wird die Gleisabklingrate durch Nennung des Messverfahrens spezifiziert (z.B. Impulshammer-Gleisabklingrate). Das Formelzeichen DR (ebenfalls von Decay Rate) wird noch in der DIN EN 15461 [5] angewendet und daher auch dann verwendet, wenn sich Formeln direkt auf das Ermittlungsverfahren der genannten Norm beziehen.

1.3.2 Hammerschlag-Impulsverfahren

Die direkte Messung der Gleisabklingrate am unbelasteten Gleis, gemäß DIN EN 15461 [5] kennt in fachspezifischen Publikationen unterschiedliche Namen. Die gebräuchlichsten, synonym verwendeten Begriffe sind Hammerschlag-Impulsverfahren, Impulshammer-Verfahren und direktes Verfahren (siehe [3]). Da alle genannten Begriffe eindeutige Synonyme darstellen, ist bei diesem Begriff keine Abgrenzung erforderlich.

1.3.3 Energie-Iterationsverfahren

Die Messung und Berechnung der Gleisabklingrate anhand der Zugvorbeifahrt („Train Pass-by“) kennt in der Literatur unterschiedliche Namen. Die DIN CEN/TR 16891 [3] bezeichnet die Methode als Energie-Iterationsverfahren, bleibt jedoch in seiner Bezeichnung der Methode nicht konsequent. Gebräuchlich sind beispielsweise auch die Bezeichnungen Pass-by-Methode bzw. Verfahren und indirektes Verfahren (siehe [3]). Im englischen Sprachraum ist auch das Kürzel PBA („Pass-by Analysis“) üblich (siehe [44]). Hierbei ist anzumerken, dass sich diese Begriffe sowohl auf die Ermittlung der Gleisabklingrate, auf die Ermittlung der Übertragungsfunktion des Rollgeräusches als auch auf die Ermittlung der kombinierten Rauheit beziehen können. Die genaue Bedeutung des Begriffs ergibt sich oftmals erst aus dem Kontext. Die Verwendung des Begriffs Pass-by-Methode ist zudem nicht eindeutig, da dieser Begriff sowohl für das Energie-Iterationsverfahren als auch für andere Pass-by Verfahren verwendet wird. Diese Bezeichnung dient daher eher als Oberbegriff für indirekte Messverfahren der Gleisabklingrate, welche sich auf die messtechnische Erfassung von Zugvorbeifahrten stützen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Konventionen verwendet: Für das Messverfahren der Gleisabklingrate gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] wird der Begriff Energie-Iterationsverfahren verwendet. Bei Erwähnung des gesamten Messverfahrens nach DIN CEN/TR 16891 [3] bzw. bei Bezug auf die Ermittlung der kombinierten Rauheit nach besagter Norm, wird als Abgrenzung zur reinen Messung der Gleisabklingrate der von Thompson et al. [44] geprägte Begriff Pass-by-Analyse (PBA) genutzt. Um die ermittelten Gleisabklingraten gemäß Energie-Iterationsverfahren von der Impulshammer-Gleisabklingrate abzugrenzen wird der Begriff Pass-by-Gleisabklingrate verwendet, da im Rahmen dieser Arbeit keine alternativen Pass-by Verfahren vorkommen und daher keine Verwechslungsgefahr besteht.

1.3.4 Effektive Gesamtrauheit und kombinierte Rauheit

Unter diesen beiden Begriffen wird die akustische Anregungsgröße des Rollgeräusches verstanden, welche sich aus der energetischen Addition der Rad- und Schienenrauheiten, unter Berücksichtigung des Kontaktfilters (siehe Kapitel 2.4), ergibt. Während der Begriff der effektiven Gesamtrauheit (englisch: total effective roughness) vor allem in Bezug auf das europäische Berechnungsmodell (siehe 2.2) verwendet wird (vgl. [14, 20]), findet sich der Begriff der kombinierten (effektiven) Rauheit (englisch: combined roughness) in Publikationen über die Pass-by-Methode (vgl. [17, 25]) sowie in der DIN CEN/TR 16891 [3].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

In vorliegender Arbeit wird folgende Konvention übernommen: Bei Bezug auf das europäische Berechnungsmodell wird der Begriff der effektiven Gesamtrauheit und bei Bezug auf die Inhalte der DIN CEN/TR 16891 [3] der Begriff kombinierte Rauheit verwendet. Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal wird in dieser Arbeit das Ermittlungsverfahren betrachtet: Im europäischen Berechnungsmodell wird der Kontaktfilter auf die tatsächlichen Rauheiten beaufschlagt um die effektive Gesamtrauheit zu ermitteln. Im Gegensatz dazu wird die kombinierte Rauheit nach DIN CEN/TR 16891 [5] indirekt aus der Schienenbeschleunigung ermittelt, wodurch der Kontaktfilter bereits berücksichtigt ist. Die Bedeutung entspricht in beiden Fällen der grundlegenden Anregungsgröße des Rollgeräusches unter Berücksichtigung des Kontaktfilters. Da keine einheitliche Formelbezeichnung existiert, orientiert sich diese Arbeit für die effektive Gesamtrauheit an den Konventionen der RVE 04.01.02 [14] und für die effektive Rauheit an der DIN CEN/TR 16891 [3]. Detailliertere Beschreibungen der hier erwähnten Begrifflichkeiten finden sich in Kapitel 2.

1.4 Methode

Ziel der Arbeit ist die Abschätzung der Wirkung von ausgewählten Einflussfaktoren auf die Pass-by-Gleisabklingrate nach DIN CEN/TR 16891 [3]. Die Auswahl der betrachteten Einflussfaktoren sowie die Ausarbeitung der theoretischen Grundlagen erfolgt auf Basis einer Literaturrecherche in den folgenden Datenbanken: ScienceDirect, Google Scholar, Web of Science, ResearchGate, Lärmforschung Eisenbahn, dem Normenkatalog Perinorm und dem Bibliothekskatalog der TU Wien. Die Suche der Literaturquellen erfolgte in deutscher und englischer Sprache. Für die Abschätzung der Wirkung ausgewählter Einflussparameter auf die Pass-by-Gleisabklingrate werden bereitgestellte Messdaten der Infrastruktur AG der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB-Infrastruktur) herangezogen und ausgewertet. Die Daten werden mittels Plausibilitätskriterien untersucht und gefiltert. Anhand der Messdaten wird die Pass-by-Gleisabklingrate aller Zugvorbeifahrten des betrachteten Streckenabschnitts im Messzeitraum ermittelt. Die Berechnung erfolgt mit der Software MATLAB. Hierbei wird das Energie-Iterationsverfahren nach DIN CEN/TR 16891 [3] angewendet. Die Berechnungsergebnisse werden hinsichtlich der potentiellen Einflussfaktoren untersucht. Die Auswertung und Quantifizierung der diversen Einflussfaktoren erfolgt in Form von Mittelwertbetrachtungen und statistischen Schätzfunktionen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 2

Rollgeräusch

Die Ursachen von Schallemissionen im System Bahn sind vielfältig, daher zählt die Identifizierung dominanter Schallquellen zu den grundlegenden Fragestellungen in der Lärmbekämpfung [42, S.3]. Für eine Vielzahl von Situationen ist der fahrende Zug die wesentliche Ursache bahnbedingter Lärmemissionen. Hierbei kann im Wesentlichen zwischen folgenden drei Entstehungsmechanismen unterschieden werden [34]:

1. Antriebsgeräuschen bzw. Aggregatgeräuschen,
2. Rollgeräuschen,
3. aerodynamischen Geräuschen.

Die Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt resultiert aus allen der drei genannten Entstehungsmechanismen, wobei in Abhängigkeit der Geschwindigkeit einzelne dieser Quellen meist überwiegen. Schallemissionen aus Traktionsgeräuschen und Nebenaggregaten dominieren im Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von ungefähr 60 km/h. Zwischen 60 und ca. 250 km/h ist das Rollgeräusch die dominante Schallquelle und in Geschwindigkeitsbereichen von Hochgeschwindigkeitsbahnen wird der Gesamtpegel durch aerodynamische Geräusche bestimmt (vgl. [36]). Für den Großteil der gefahrenen Geschwindigkeiten ist daher das Rollgeräusch die Emissionsquelle mit dem höchsten Anteil an der Schallabstrahlung [42, S.6 ff], weshalb dessen Modellierung in der Lärmprognose hohe Bedeutung zukommt.

2.1 Grundlagen

Die Entstehung des heute gültigen Berechnungsmodells für das Rollgeräusch reicht bis in die 1980er Jahre zurück. Zu dieser Zeit kamen mehrere Mechanismen für die Entstehung des Rollgeräusches in Frage: Aerodynamische Quellen, lokale Veränderung von Widerstandskräften, Kriechkräfte und mikroskopische Rauheiten waren nur einige der damals untersuchten Mechanismen hinter dem Rollgeräusch [40]. Die gesammelten Erkenntnisse bildeten die Grundlage der heute gültigen Modellvorstellung, nach der das Rollgeräusch durch mikroskopische Unebenheiten der Radlauffläche und der Schienenfahrfläche verursacht wird. Auch die Zuordnung der Anteile von Rad bzw. Schiene am Rollgeräusch galt lange Zeit als umstritten. Mittlerweile gilt es als Stand des Wissens, dass sowohl Rad als auch Schiene einen maßgeblichen Beitrag an den Rollgeräusch-Emissionen von Schienenfahrzeugen haben. [42]

Die gängige Modellvorstellung des Rollgeräusches lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Stärke der dem Rollgeräusch zugrunde liegenden Anregung ergibt sich in erster Linie durch die Rauheiten und Irregularitäten an den Oberflächen von Rad und Schiene [42, S.7]. Anregungen aus Rauheiten, deren Wellenlängen klein im Verhältnis zur Länge der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene (rd. 10–15 mm) sind, unterliegen einer starken Dämpfung. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird der sogenannte Kontaktfilter angewendet [42, S.148ff]. Aus der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

energetischen Addition der (messbaren) Rad- und Schienenrauheiten, unter Berücksichtigung des von Last und Raddurchmesser abhängigen Kontaktfilters, resultiert die sogenannte effektive Gesamtrauheit als grundlegende Anregungsgröße des modellierten Rollgeräusches [42, S.7]. Eine wesentliche Reduktion der Anregung ist dementsprechend nur durch die Verringerung des dominanten Rauheitsparameters zu erreichen. Aufgrund der Anregung (effektive Gesamtrauheit) und der Körperschallausbreitung werden Komponenten des Oberbaus (Schiene, Schwelle) und des Fahrwegs (Rad, Drehgestell, Aufbauten) in Schwingung versetzt und emittieren letztlich Schall. Abhängig von der Größe der schwingenden Fläche und der Schwingungsintensität ergibt sich die ermittelte Schallleistung. (vgl. [42]) Die Größe der schwingenden Fläche wird vor allem durch die sogenannte Gleisabklingrate stark beeinflusst [47], welche auch im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt.

2.2 Europäisches Berechnungsmodell

Die europäische Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [12] leitete im Jahr 2002 den Prozess zur Vereinheitlichung der Lärmbekämpfung in Europa ein [29]. Diese Richtlinie führte in den Mitgliedsstaaten zur verpflichtenden, alle 5 Jahre durchzuführenden, strategischen Lärmkartierung. Diese bildet die Grundlage für die ebenfalls verpflichtenden Aktionspläne mit Maßnahmen zur Lärmbekämpfung. Der strategischen Lärmkartierung liegen als Rechengröße sogenannte Lärmindizes zugrunde, welche sich aus den durch Verkehr und Industrie erzeugten Schallimmissionen über ein durchschnittliches Jahr ableiten lassen. [29] Mit der Europäischen Richtlinie 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden [13] wurde ein europaweit einheitliches Berechnungsverfahren für Lärmindizes eingeführt [29]. Der für dieses Berechnungsmodel oftmals verwendete Namen CNOSSOS-EU („**C**ommon **NO**ise A**SS**essment Meth**O**d**S** in **EU**rope“) leitet sich von der zugrunde liegenden Forschungsarbeit ab [29].

In diesem Berechnungsmodell wird das Rollgeräusch auf Basis der im vorherigen Kapitel geschilderten Erkenntnisse abgebildet. Die Modellbasis des Rollgeräusches ist in Abbildung 2.1 zusammengefasst. Das Berechnungsmodell kann, aufgrund seiner Verankerung im europäischen Recht, als europäischer Stand der Technik gewertet werden [21]. In Österreich erfolgte die Implementierung des Modells durch die Richtlinie RVE 04.01.02 [14] (vgl. [22]).

Ziel der europäischen Richtlinie ist es unter anderem, ein einheitliches Prognosemodell für Lärmimmissionen des Schienenverkehrs auf europäischer Ebene zu schaffen und gleichzeitig die Anpassung des Modells an individuelle Gegebenheiten unterschiedlicher Strecken sowie Fahrzeuge zu ermöglichen. Neben der bereits erwähnten effektiven Gesamtrauheit als Anregungsgröße werden sogenannte Transferfunktionen verwendet (siehe Abbildung 2.1). Diese setzen die Gesamtrauheit mit der resultierenden Schallleistung in Relation und beinhalten alle (Schallleistungs-)Beiträge des Fahrwegs und des Fahrzeugs [10, 20]. Für alle genannten Parameter des Modells stellt die Richtlinie Standardwerte bereit, welche unter anderem im Anhang der bereits erwähnten RVE 04.01.02 [14] zu finden sind. Eine Anpassung dieser Standardwerte an nationale Gegebenheiten ist möglich, bedarf jedoch aufwendiger Erhebungen [29]. In Österreich wurden die Standardparameter nach den Emissionen des bisherigen Prognosemodels, der ON-Regel 305011 [1], gewählt, welches letztlich auf messtechnischen Erhebungen beruht. Die Prognosegenauigkeit, welche aufgrund dieser Parameter erreicht werden kann, genügt den Ansprüchen der verpflichteten, strategischen Lärmkatierung gemäß Richtlinie (EU) 2015/996. Für Detaillärmschutzuntersuchungen sind diese Standardwerte hingegen nicht ausreichend. [23] Dies hat zur Folge, dass die Wahl sowie die Möglichkeiten der Anpassung der vorgegebenen Standardwerte bis dato Gegenstand fachlicher Diskussionen sind (vgl. [28, 29]).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

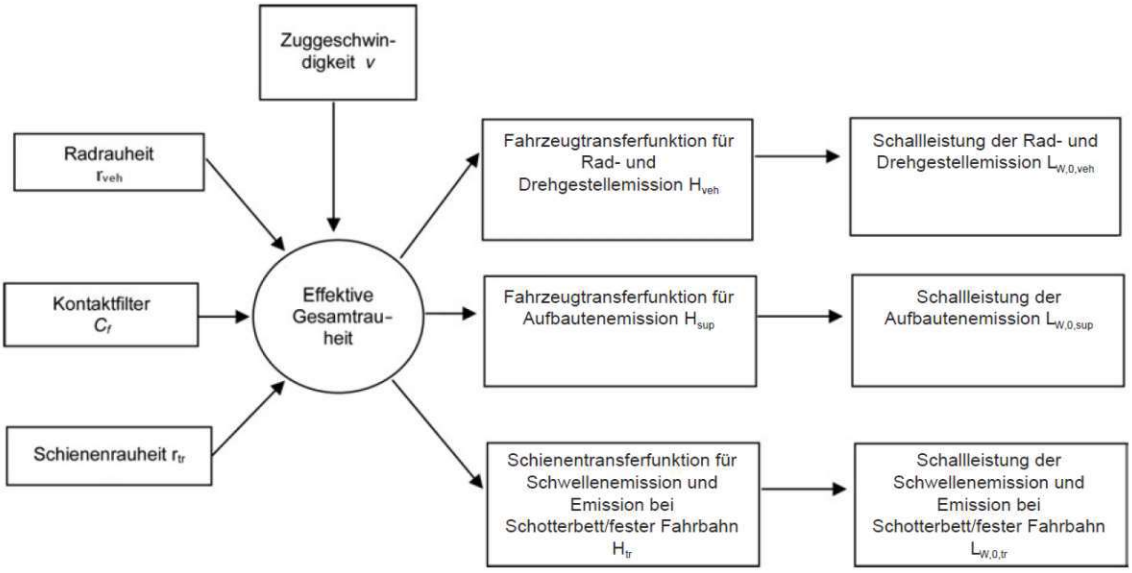


Abb. 2.1: Berechnungsmodell des Rollgeräusches nach RVE 04.01.02 [14]

2.3 Frequenzspektrum des Rollgeräusches

Die experimentelle Bestimmung der exakten Anteile von Rad und Schiene im Feld gestaltet sich schwierig, da bei den geläufigen Verfahren der Anteil des Rades tendenziell überschätzt wird ([42, S.23]). Jedoch ist eine indirekte Abschätzung des Rad- und Schienenanteil mittels sogenannter Seperationsverfahren oder anhand von Simulationen mittlerweile möglich. Auch das in vorliegender Arbeit behandelte Pass-by Verfahren kann für die Abschätzung von Rad- und Schienenanteil herangezogen werden. Nichtsdestotrotz sind die meisten der genannten Verfahren noch mit Unsicherheiten behaftet (vgl. [44]). Da der maßgebende Frequenzbereich des Schienenanteils für die spätere Interpretation der Ergebnisse essenziell ist, soll dieses Kapitel einen Abriss über den derzeitigen Wissensstand zu diesem Thema geben.

Der Hörbereich des Menschen reicht ungefähr von 16 Hz bis 16000 Hz, wobei vor allem der obere Grenzwert stark altersabhängig ist. Besonders sensitiv ist der mittlere Frequenzbereich, dieser liegt ungefähr zwischen 2000 Hz und 5000 Hz. Diese Erkenntnisse gründen auf Hörversuche und sind Gegenstand aktueller Diskussionen, da Messmethode und Messbedingungen einen Einfluss auf die Ergebnisse derartiger Versuche haben können [33].

Der maßgebende Frequenzbereich des Rollgeräusches wurde in der Vergangenheit mit einer Spanne zwischen 200 Hz und 2000 Hz relativ schmalbandig angenommen [15], mittlerweile geht man in der Regel von einem Frequenzbereich zwischen 100 und 5000 Hz aus. [42] Innerhalb dieses Frequenzbereichs können beim Rollgeräusch wiederum Teilbereiche in Abhängigkeit der überwiegenden Emissionsursache (Rad, Schiene oder Schwelle) zugeordnet werden. Da die Gleisabklingrate lediglich Auswirkungen auf den Schienenanteil des Rollgeräusches zeigt, ist im Rahmen dieser Arbeit vor allem jener Frequenzbereich von besonderem Interesse, in dem die Schienenemissionen dominieren.

Allerdings unterscheiden sich die konkreten Frequenzbereiche, in welchem der Rad- oder der Schienenanteil überwiegt, in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Berechnungsmodells. Zur Illustration wird ein Vergleich zwischen dem europäischen Modell und dem Berechnungsmodell TWINS gezogen, da letzteres Modell eine wesentliche Grundlage des derzeitigen Standardwerks von Thompson [42] zur Eisenbahnlärmmodellierung bildet (vgl. [42, S.217]).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

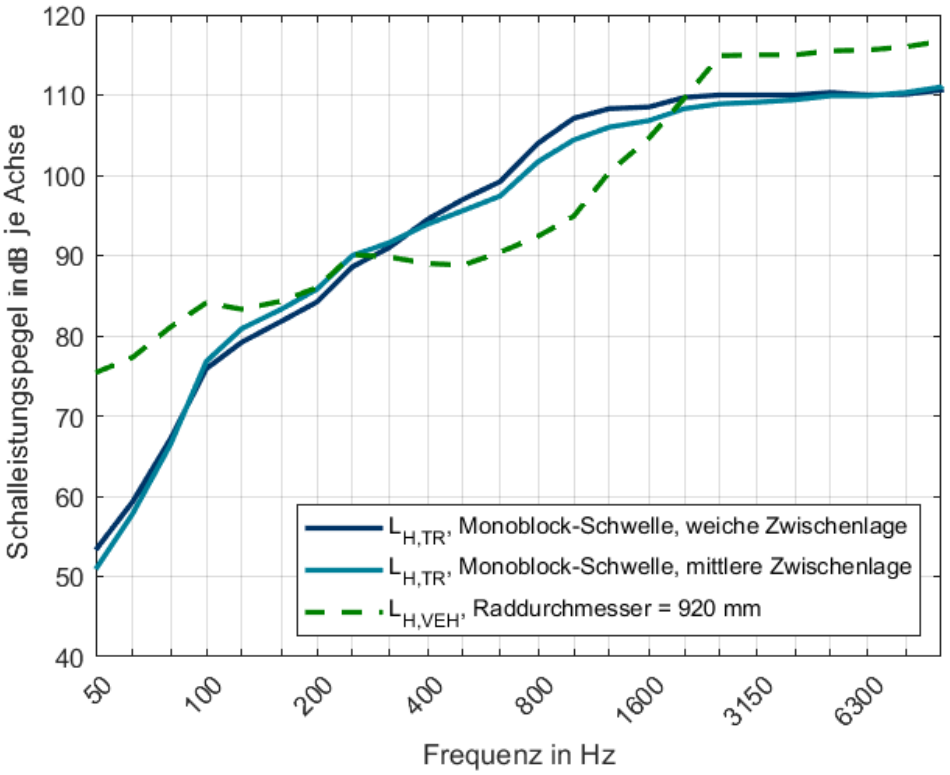


Abb. 2.2: Anteile am Rollgeräusch, eigene Darstellung nach RVE 04.01.02 [14]

Die Schallleistungspegel für Rad und Schiene ergeben sich gemäß dem europäischen Berechnungsmodell aus der Addition der jeweiligen Transferfunktionen mit der effektiven Gesamtrauheit. Daher können spektrale Beiträge von Rad- und Schiene am Rollgeräusch durch Gegenüberstellung der Transferfunktionen für Fahrweg $L_{\mathrm{H,TR}}$ und Fahrzeug $L_{\mathrm{H,VEH}}$ nach RVE 04.02.01 [14] abgeschätzt werden. Der Vergleich von ausgewählten Transferfunktionen (siehe Abbildung 2.2) zeigt, dass der Anteil der oberbauinduzierter Emissionen am Rollgeräusch im Frequenzbereich von 200 Hz bzw. 250 Hz bis 2000 Hz dominiert. Fahrzeugseitige Emissionen dominieren demzufolge den hochfrequenten Bereich ab 2000 Hz und Frequenzen unter 200 Hz. Abbildung 2.2 zeigt die Transferfunktion für einen Raddurchmesser von 920 mm und Monoblock-Schwellen mit mittlerer Zwischenlagensteifigkeit. Dies entspricht jenem Satz an Standardwerten, welche für das (durchschnittliche) österreichische Schienennetz heranzuziehen sind [14, 23]. Ergänzend wird noch die Transferfunktion für Monoblock-Schwellen mit weicher Zwischenlage dargestellt um die prognostizierten Unterschiede zwischen unterschiedlichen konstruktiven Randbedingungen zu illustrieren.

Bei Betrachtung der Prognose nach TWINS sind vor allem bei geringen Frequenzen andere Ergebnisse als im europäische Berechnungsmodell zu erwarten, da hier die Schwelle als dominante Schallquelle identifiziert wird (siehe Abbildung 2.3). Das europäische Berechnungsmodell sieht wiederum keine Trennung von Schwelle und Schiene vor. Ähnliche Anteile liefern beide Rechenmodelle für Frequenzbereiche über 400 Hz.

Bei den Vergleichen zwischen den Standardwerten des europäischen Berechnungsmodells und der Prognose nach TWINS ist zu erwähnen, dass Letzteres (Abbildung 2.3) den Schalldruckpegel in 3,7 m Entfernung prognostiziert, wohingegen sich die Werte nach europäischem Modell (Abbildung 2.2) auf die emittierte Schallleistung beziehen. Des Weiteren wird bei der Wahl der Standardwerte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

nicht nach Fahrgeschwindigkeit unterschieden und auch bei den Zwischenlagensteifigkeiten wird nur eine grobe Differenzierung ohne konkrete Steifigkeitswerte vorgenommen. TWINS differenziert hierbei mehrere Parameter, wobei sich die Prognose nach Abbildung 2.3 auf einen Güterzug mit einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h und einer Zwischenlagensteifigkeit von 200 MN/m bezieht. Die Angabe des Schwellentyps fehlt hierbei. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass der dominante Frequenzbereich für den Schienenanteil des Rollgeräusches zwischen 400 Hz und 2000 Hz liegt.

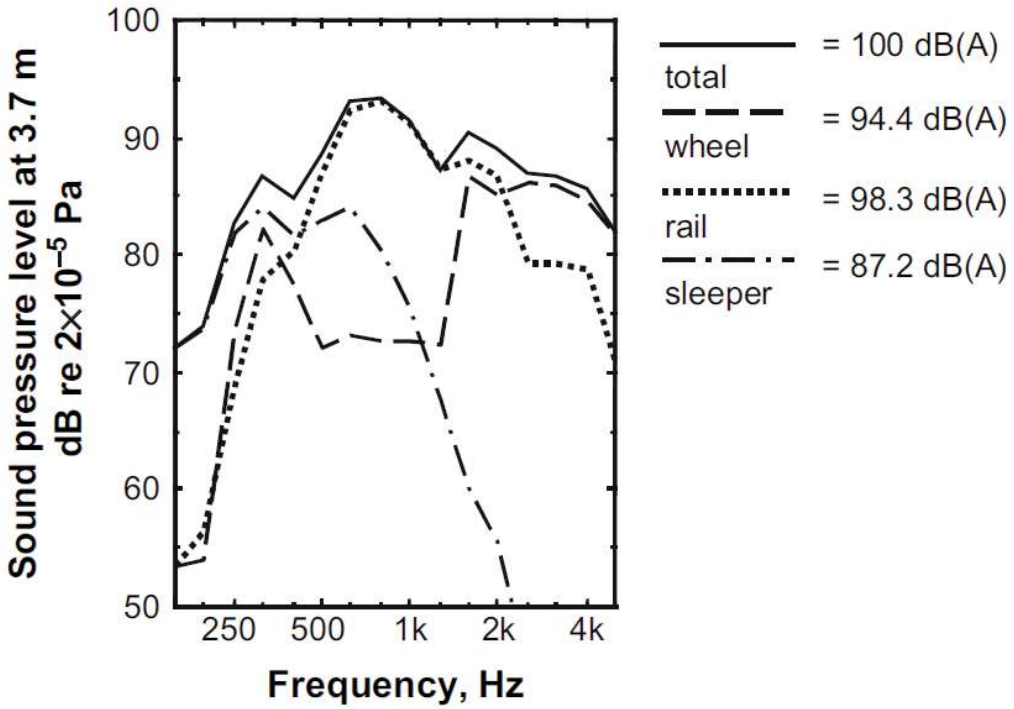


Abb. 2.3: Typische Anteile am Rollgeräusch nach dem TWINS-Modell für einen Güterzug (v = 100 km/h) und Zwischenlagensteifigkeiten von 200 MN/m, Quelle: Thompson [42, S.23]

2.4 Effektive Gesamtrauheit

Wie bereits in Kapitel 2.1 und 2.2 erwähnt, ist die effektive Gesamtrauheit $L_{\mathrm{R,TOT}}$ die wesentliche Anregungsgröße für das Rollgeräusch und ist auch im europäischen Berechnungsmodell verankert [14]. Die Ermittlung der Gesamtrauheit erfolgt gemäß Gleichung 2.1, wobei A_3 den Kontaktfilter bezeichnet. Der erste Teil der Gleichung kann durch direkte Messung der Radrauheit $L_{r,\mathrm{VEH}}$ und der Schienenrauheit $L_{r,\mathrm{TR}}$ und anschließender energetischer Addition ($\oplus$) ermittelt werden.

Um die direkten (tatsächlichen) Rauheiten in die effektive Gesamtrauheit zu konvertieren, wird der sogenannte Kontaktfilter A_3 angewendet (siehe Kapitel 2.4.1). Alternativ kann die Anregungsgröße für das Rollgeräusch auch indirekt mittels Pass-by Methode ermittelt werden und wird dann in der Regel als kombinierte Rauheit bezeichnet. Die Berechnung der kombinierten Rauheit wird in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

$$L_{\mathrm{R,TOT}} = L_{r,\mathrm{TR}} \oplus L_{r,\mathrm{VEH}} + A_3 \tag{2.1}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.4.1 Kontaktfilter

Rauheiten, unabhängig ob von Rad- oder Schiene, führen zu einer vertikalen Relativbewegung zwischen Rad und Schiene. Die Kontaktzone entspricht aber in der Realität keinem Punkt sondern einer Fläche. Die Hertz'sche Theorie geht von einer elliptischen Kontaktfläche aus, tatsächlich sind die auftretenden Formen komplexer. Bei Abschätzung der Kontaktfläche mittels Ellipse kann von Achslängen zwischen 10 mm und 15 mm ausgegangen werden. Rauheiten mit kleineren Wellenlänge werden in Ihrer Anregungswirkung abgeschwächt. Dieser Effekt wird im Rechenmodell mittels Kontaktfilter berücksichtigt. [42] Der Kontaktfilter kann analytisch durch die Geometrie der Kontaktfläche berechnet werden. Eine alternative Möglichkeit ist die numerische Berechnung anhand eines spezialisierten Federmodells, welche jedoch detaillierte Rauhigkeitsmessungen erfordert. Aufgrund des hohen Aufwandes der genannten Methoden werden Standardwerte oft bevorzugt. [42] Diesen Ansatz wählt auch das europäische Berechnungsmodell. Als Eingangsgrößen zur Differenzierung zwischen verschiedenen Kontaktfiltern dienen hierbei Radlast und Raddurchmesser. (vgl. [14])

2.4.2 Schienenrauheit

Die Ursachen für akustische Schienenrauheiten sind vielfältig und die zugrunde liegenden Entstehungsmechanismen sind weitestgehend unbekannt [2, S. 243]. Als mögliche Einflussfaktoren auf die zeitliche Entwicklung der (akustischen) Schienenrauheit werden in der Literatur unter anderem folgende Parameter vermutet: die Tonnage bzw. Achslasten, laterale Kräfte, Radsatzanordnung sowie Traktions- und Bremskräfte. Es wird zudem angenommen, dass es sich um nichtlineare Prozesse handelt [2, S. 247].

2.4.3 Radrauheit

Akustische Radrauheiten weisen grundsätzlich eine geringe Veränderungsdynamik in den akustisch relevanten Wellenlängen auf. Die Haupteinflussgröße auf die Radrauheit ist das verwendete Bremssystem: Während bei Scheibenbremsen und Klotzbremsen mit Komposit-Bremssohle geringere Radrauheiten auftreten, erhöht der Einsatz von Bremsklötzen mit Grauguss-Bremssohle die akustischen Radrauheiten. Auch große Hitze (Festbremsungen) kann die Entstehung von akustischen Radrauheiten fördern. (vgl. [16])

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 3

Gleisabklingrate

3.1 Grundlagen

Nach der gültigen Modellvorstellung kann das Rollgeräusch anhand von drei Größen vollständig beschrieben werden: der effektiven Gesamtrauheit $L_{\mathrm{R,TOT}}$ als zentrale Anregungsgröße und dem Emissionsverhalten (Transferfunktion) des Schienenfahrzeugs sowie des Fahrwegs (siehe Kapitel 2). Die Fragestellungen dieser Arbeit fokussieren auf Letzteres, weshalb die Schallabstrahlung der Schiene im Folgenden vertieft behandelt wird.

Im Gegensatz zum Rad kann die Schiene näherungsweise als „unendlicher Wellenleiter“ beschrieben werden. Die Abnahme der Schwingungsamplitude im Abstand zum Anregungspunkt beeinflusst die Länge der mitschwingenden Schiene. Eine geringe Abnahme der Amplitude führt zu einer Erhöhung der schallabstrahlenden Fläche und damit zu einer Zunahme der Schallemissionen bei gleicher Anregung. [43, S.3] Als Maßzahl wird die Gleisabklingrate (Englisch: Track Decay Rate bzw. TDR) herangezogen. Die Angabe der Gleisabklingrate erfolgt in der Regel als Terzspektrum und beschreibt die Abnahme der Schwingungsamplitude mit wachsendem Abstand zum Anregungspunkt in dB/m [34]. Grundsätzlich wird zwischen vertikaler und lateraler Gleisabklingrate unterschieden [34], wobei der vertikalen Gleisabklingrate eine höhere Bedeutung hinsichtlich der verursachten Schallemissionen zugeschrieben wird [42, S.37]. Neben der Reduktion der Rauheiten gilt die Erhöhung der Gleisabklingrate als wesentliche Möglichkeit die Schallabstrahlung der Schiene zu reduzieren [47]. Aufgrund ihrer Aussagekraft hinsichtlich der akustischen Eigenschaften von Eisenbahnstrecken wurde und wird die Gleisabklingrate als leicht messbarer Validierungsparameter für die Genauigkeit von Rollgeräusch-Simulationen herangezogen. Auch bei der Ermittlung von Schienenemissionen ist die Gleisabklingrate ein wichtiger Parameter für die korrekte Interpretation der Messergebnisse [18]. Des Weiteren ist die Gleisabklingrate auch im EU-Recht verankert: Die TSI-LÄRM [11] definiert bei Lärmmessungen für Fahrzeug-Neuzulassungen Mindestwerte für die Gleisabklingrate.

Mathematisch können Abklingraten mithilfe des komplexen Anteils der negativen Wellenzahl k_i beschrieben werden: Die Amplitude einer einzelnen Welle mit komplexer Wellenzahl $k = k_r + \mathrm{j} \cdot k_i$ mit $\mathrm{j} = \sqrt{-1}$ reduziert sich – unter Annahme einer näherungsweise exponentiellen Abnahme – über eine Distanz von einem Meter um e^{k_i}. [42, S.42] Daraus ergibt sich die sogenannte Abklingrate Δ in dB/m zu

$$\Delta = 20 \cdot \lg(e^{k_i}) \tag{3.1}$$

und wird bei Bezug auf die Schienenschwingung als Gleisabklingrate bezeichnet. Der beschriebene Zusammenhang ist exemplarisch in Abbildung 3.1 für eine einzelne harmonische Welle und zwei unterschiedliche Gleisabklingraten dargestellt.

Die Bestimmung der Gleisabklingrate kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, wobei die direkte Bestimmung mittels Impulshammer und Beschleunigungsmessung die gängigste Vorgangsweise ist [42, S.35]. In den letzten Jahren wurden jedoch alternative, indirekte Verfahren entwickelt, zu denen auch das in dieser Arbeit untersuchte Energie-Iterationsverfahren (EIV) zählt (siehe Kapitel 4). Obwohl sich diese Arbeit vordergründig mit Pass-by-Gleisabklingraten beschäftigt,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

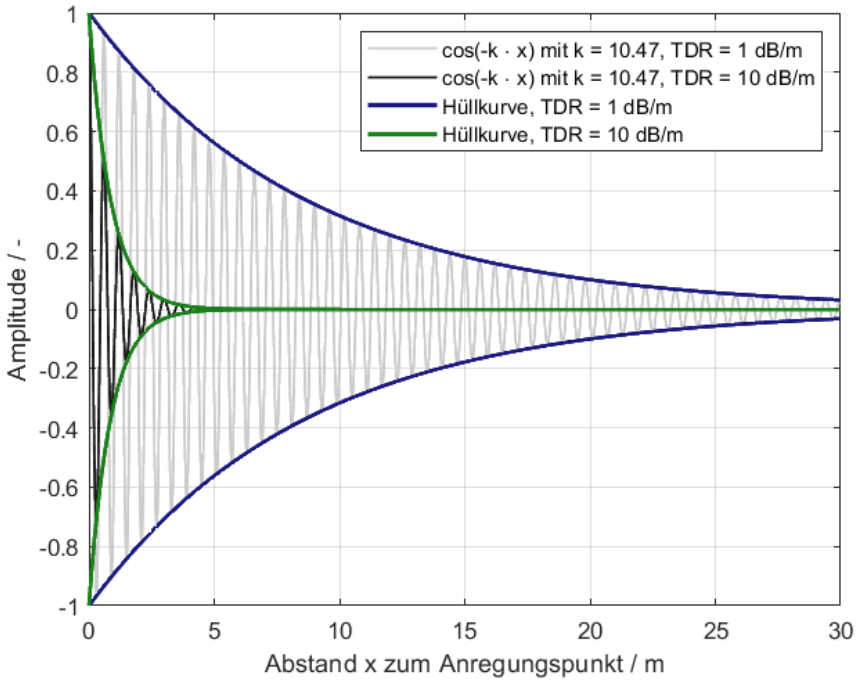


Abb. 3.1: Abnahme der Schwingungsamplitude einer eindimensionalen, harmonischen Welle (Wellenzahl k entspricht einer Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 6000 m/s und einer Frequenz f von 10 kHz) bei Variation der Abklingrate, eigene Darstellung

wird – zur besseren Einordnung von Vergleichen – im folgenden Kapitel ein Überblick über das direkte Messverfahren gegeben.

3.2 Ermittlung mit Hammerschlag-Impulsverfahren

Das Hammerschlag-Impulsverfahren oder Impulshammerverfahren ist in der DIN EN 15461 [5] verankert und stellt eine experimentelle Methode zur Ermittlung der Gleisabklingrate eines Streckenabschnitts dar. Da hierbei Gleisabklingraten „direkt“ am unbelasteten Gleis ermittelt werden, wird diese Vorgangsweise auch als direktes Verfahren bezeichnet. Mittels Impulshammer wird die Schiene in Schwingung versetzt und die Amplitude der Übertragungsfunktion (Frequency Response Function bzw. FRF) $A(x)$ in Abhängigkeit des Abstandes zum Anregungspunkt durch sequenzielle Beschleunigungsmessungen bestimmt. Hierbei wird $A(x)$ als exponentielle Funktion angenommen

$$A(x) = A(x = 0) \cdot (e^{-\beta \cdot x}) \tag{3.2}$$

wobei β den Abklingkoeffizienten bzw. die Abklingkonstante der Impulsantwort darstellt. Die Gleisabklingrate DR (Decay Rate, Abkürzung gemäß DIN EN 15461 [5]) wird nach Gleichung 3.1 definiert. Der negative, komplexe Anteil der Wellenzahl k_i entspricht hierbei der zuvor definierten Abklingkonstante $-\beta$:

$$DR = 20 \cdot \lg(e^{-\beta}) \tag{3.3}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Auf Basis der Gleichungen 3.2 und 3.3 kann das Integral über die quadratische Impulsantwort $A(x)^2$ durch die Abklingkonstante β ausgedrückt werden

$$\int_0^\infty \mid A(x)^2 dx \mid = \mid A(x=0) \mid^2 \int_0^\infty e^{-2\cdot\beta\cdot x} = \mid A(x=0) \mid^2 \cdot \frac{1}{2\cdot\beta} \tag{3.4}$$

Diese kann wiederum unter Berücksichtigung von Gleichung 3.3 auf die Gleisabklingrate DR umgeformt bzw. vereinfacht werden

$$DR \approx \frac{4.343}{\sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{\mid A(x_n)^2 \mid}{\mid A(x_0)^2 \mid} \cdot \Delta x_n} \tag{3.5}$$

x_n beschreibt hier eine Reihe von Punkten, wobei $n_{\max}$ jenen Punkt mit dem maximalen Messabstand definiert [5]. Da diese Methode gemäß DIN EN 15461 [5] für hohe Abklingraten verlässliche Ergebnisse liefert, bei schwachen Impulsantworten jedoch fehlerbehaftet ist, muss das Ergebnis von Gleichung 3.5 mit der Mindestabklingrate

$$DR_{\min} = \frac{4.343}{n_{\max}} \tag{3.6}$$

verglichen werden. Wenn ein Wert aus Gleichung 3.5 kleiner als die Hälfte eines Wertes aus aus einem beliebigen Terzband des Spektrums ist, muss die Schätzung der Gleisabklingrate als ungeeignet betrachtet werden [5]. Als wesentlicher Nachteil dieses Ermittlungsverfahrens kann der hohe streckenseitige Zeitaufwand im Rahmen des Messvorganges genannt werden [26]. Venghaus [48] kritisiert auch die unpräzise Festlegung der zugelassenen Impulshammer-Geräte, welche eine einheitliche Messung bei unterschiedlichen Anwendern erschwert.

3.3 Einflüsse auf die Gleisabklingrate

Die Höhe der Gleisabklingrate ist stark frequenzabhängig und wird vor allem von der Kopplung zwischen Schiene und Schwelle beeinflusst [47]. Auch Umgebungseinflüsse können sich auf die Gleisabklingrate auswirken. Zudem können verschiedene Messverfahren zu unterschiedlichen Gleisabklingraten führen. Der Vergleich von gemessenen Gleisabklingraten wird in Forschung und Praxis häufig dazu verwendet, Aussagen über Schallemissionen des Fahrwegs bzw. seiner Bestandteile zu treffen (vgl. [35, 37, 38]). Daher ist die Kenntnis der möglichen Einflussparameter für eine aussagekräftige Beurteilung unabdingbar. Folgend werden die, nach derzeitigem Wissensstand, wesentlichen Einflussfaktoren zusammengetragen und beschrieben. Eine Zusammenfassung findet sich in Tabelle 3.1. Die einzelnen Parameter werden im Rahmen der folgenden Kapitel detailliert beschrieben und dienen als Grundlage für die Analyse der gemessenen Pass-by-Gleisabklingraten in Kapitel 6.

3.3.1 Konstruktive Randbedingungen

3.3.1.1 Bauweise der Fahrbahn

Nach Menius und Matthews [32] lassen sich „Fahrbahnen der Schienenwege“ in zwei Kategorien unterteilen: Den Schotteroberbau und die Feste Fahrbahn (FF). Bei Ersterem ist die Schiene anhand von Kleineisen mit der Schwelle verbunden, welche wiederum in einem Schotterbett verlegt ist. Die Feste Fahrbahn unterscheidet sich dahingehend, dass die Schiene an vorgesehenen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 3.1: Einflussfaktoren auf die Gleisabklingrate und deren Messung (Parameterkatalog) nach [3, 7, 9, 18, 24–26, 30, 34, 35, 37–39, 41, 42, 46–48]

Kategorie	Parameter
Konstruktive Einflussfaktoren	Zwischenlagensteifigkeit
	Klemmkraft der Schienenbefestigung
	Schienenstegdämpfer
	Schienenstegabschirmung
	Masse der Schwelle
	Schwellenabstand
	Schottersteifigkeit
	Schienentyp und Schienengüte
Umgebungseinflüsse	Temperatur
Messtechnische Einflüsse Impulshammer	Wahl des Impulshammers
	Inhomogenitäten der Strecke
Messtechnische Einflüsse Pass-by Methode	Wahl des Längenparameters L_1
	Kontaktkraftverteilung
	Inhomogenitäten der Strecke
	Gesamtintegrationszeit
	Vorbeifahrtsgeschwindigkeit
	Belastung
	Zugtyp
	Position des Beschleunigungsaufnehmers im Querschnitt
	Position des Beschleunigungsaufnehmers im Längsschnitt
	Radlaufflächendefekte

Punkten auf einer Betonplatte oder einer bituminösen Tragschicht befestigt ist, die Anzahl möglicher Konstruktionen ist hierbei vielfältig. [32]

Global gesehen ist der Schotteroberbau, trotz steigender Popularität der festen Fahrbahn, die meistverbreitete Bauweise von Schienenwegen [42, S.29], dies gilt auch für das österreichische Schienennetz. Daher wird in den folgenden Abschnitten vertieft auf den Schotteroberbau eingegangen, die Feste Fahrbahn wird nur grob angeschnitten.

Grundsätzlich führt die Steifigkeit des Stützsystems der Schiene (Bettung, Schwelle etc.) bei geringen Frequenzen zu einer „Blockade“ der Transmission langwelliger Vibrationen in der Schiene ([42, S.36]). Ein Großteil der Steifigkeit des Stützsystems wird hierbei von der Schotterbettung beigetragen [26, 42]. Daraus resultiert, dass die Gleisabklingrate in tiefen Frequenzbereichen üblicherweise einen hohen Wert von ca. 10 dB/m aufweist [42, S. 36]. Zahlreiche publizierte Messergebnisse der Gleisabklingrate bestätigen diesen Wert, welcher sowohl bei der vertikalen als auch bei der lateralen Gleisabklingrate zu beobachten ist (vgl. [47], [35] und [34]). Stärkere Abweichungen von diesem Wert können durch geringe Schottersteifigkeiten erklärt werden. Thompson [42, S. 58] quantifiziert beispielsweise eine mögliche Reduktion der Abklingrate auf bis zu 3 dB/m bei 100 Hz für Schottersteifigkeiten von 50 MN/m² auf Basis eines einfachen, zweilagigen Masse-Feder-Modells des Fahrwegs.

Erst bei höheren Frequenzen entkoppelt sich die Schwingung der Schiene von jener des Stützsystems [26], was in weiterer Folge zu deutlich reduzierten Gleisabklingraten führen kann. Dies geschieht ab ungefähr 500 Hz bis 1000 Hz, weil dann von einer freien Wellenausbreitung in der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Schiene auszugehen ist [42, S. 33]. Auch in höheren Frequenzbereichen kann ein Einfluss der Schottersteifigkeit nicht vollends ausgeschlossen werden, da die Schotterbettung eine näherungsweise elastische Lagerung der Schwelle darstellt. Simulationen des Rollgeräusches konnten zeigen, dass eine Erhöhung der Schottersteifigkeit zu einer Steigerung der Eigenfrequenzen der Schwelle führt und dadurch auch das Schwingungsverhalten der Schwelle beeinflusst. [42]

Als alternativer Oberbautyp hat die Feste Fahrbahn in den letzten Jahren, aufgrund wachsender Hochgeschwindigkeitsnetze, an Popularität gewonnen. Grundsätzlich werden der Festen Fahrbahn geringere Instandhaltungskosten als der konventionellen Ausführung mit Schotterbett zugeschrieben. Dies geht jedoch einher mit potentiell größeren Schallemissionen. Thompson [42] quantifiziert eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 2 bis 4 dB. Ein kleiner Teil davon (ca. 1 dB) ist auf die fehlende akustische Absorptionswirkung des Schotters zurückzuführen. Hauptursache der großen Pegelunterschiede ist vor allem die unterschiedliche Steifigkeit der Schienenbefestigung, da die Feste Fahrbahn in der Regel geringere Zwischenlagensteifigkeiten (siehe Kapitel 3.3.1.4) aufweist. [42]

3.3.1.2 Schwelle

Die Schwelle hat ebenfalls einen Einfluss auf das Spektrum der Gleisabklingrate, da sie bei niedrigen Frequenzen als Schwingungsdämpfer (englisch: dynamic absorber) wirkt. Sie entspricht in diesem Zusammenhang einem Masse-Feder-System, dass einer tragenden Struktur hinzugefügt wird und diese effektiv bei ihrer Resonanzfrequenz stabilisiert. Im Fall von Betonschwellen liegt diese Resonanzfrequenz im Bereich von ungefähr 300 Hz und führt zu einer Erhöhung der Gleisabklingrate in der Schiene. Die Höhe des Effekts wird im Wesentlichen von der Schwellenmasse bestimmt und ist bei Betonschwellen dementsprechend stärker ausgeprägt als bei Holzschwellen. [42, S.36].

Auch der Abstand der Schwellen zu einander beeinflusst die Gleisabklingrate. Die periodische Lagerung der Schiene auf der Schwelle führt dazu, dass sich die Impulsantworten der Schiene zwischen, auf und nahe der Schwelle und damit auch gemessene Gleisabklingraten voneinander unterscheiden [18]. Jene Schwingungsform (Mode), welche sich genau in dem vorhandenen Schwellenabstand einordnet, ist dabei besonders leicht anzuregen und tritt bei Wellenlängen auf, die dem doppelten Schwellenabstand entsprechen [24]. Dieses Phänomen wird in der Fachliteratur als Pinned-pinned-Mode [24, 42] bezeichnet. Die erste (vertikale) Pinned-pinned-Eigenfrequenz (siehe Abbildung 3.2) liegt gemäß Fachliteratur im Bereich von ungefähr 800 Hz bis 1100 Hz [30, 42] und damit in einem Frequenzbereich in dem der Einfluss der Schiene am Rollgeräusch tendenziell als dominant angenommen wird. Die Einflussfaktoren auf die Pinned-pinned-Frequenz sind, neben dem Schwellenabstand, die Biegesteifigkeit sowie die Masse der Schiene: Mit steigender Biegesteifigkeit wächst die Pinned-pinned-Frequenz, mit zunehmender Masse reduziert sich die Frequenz wiederum [30]. In lateraler Schwingungsrichtung tritt die erste Eigenfrequenz bei ungefähr 500 Hz auf [42, S.32]. Im Bereich der Pinned-pinned-Frequenz bzw. in unmittelbar darüber und darunter liegenden Frequenzbereichen, kommt es zu einem Tiefpunkt der Gleisabklingrate mit jeweils darauf folgendem Hochpunkt. Die genaue Ausformung ist dabei stark vom gewählten Messpunkt auf oder zwischen den Schwellen abhängig. (vgl. [42, S.31], [41] und [18])

Abb. 3.2: Erste Pinned-pinned-Mode, Quelle: Man [30]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.3.1.3 Schiene

Auch wenn die Schiene in ihrer Geschichte viele Entwicklungen durchgemacht hat, ist heutzutage in den allermeisten Fällen die sogenannte Vignolschiene (Breitfußschiene) im Einsatz (vgl. [27]). Dies gilt in Österreich insbesondere für die Vollbahn. Deren genauen geometrischen Abmessungen und Materialeigenschaften unterscheiden sich je nach Schienentyp. Die Schiene dient im System Bahn als Fahrfläche, Träger und Führungselement in Einem. [27] Ihre Beschaffenheit hat dabei einen großen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des Fahrwegs. Diesbezüglich ist vor allem die Oberflächenrauheit der Schiene, als Teil der effektiven Gesamtrauheit ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Rollgeräusch (siehe Kapitel 2). Die Gleisabklingrate und damit die schallabstrahlende Fläche kann durch die Vignolschiene in den niederen bis mittleren Frequenzbereichen nur indirekt über die Kopplung zur Schwelle beeinflusst werden (siehe Kapitel 3.3.1.4). Höhere Frequenzen führen dazu, dass die Schiene sich nicht mehr wie ein einfacher Balken verhält, da das Ebenbleiben der Querschnitte (2. Bernoulli'sche Hypothese) nicht mehr gewährleistet ist. In vertikaler Richtung treten ab Frequenzen von 2000 Hz vermehrt Deformationen im Schienenfuß auf, welche als Foot-Flapping bezeichnet werden. [42] Dieses Phänomen kann einen erheblichen Einfluss auf die Gleisabklingrate haben: Jones et al. [18] führt in seiner Arbeit die Erhöhung der vertikalen Gleisabklingrate im Bereich von 5000 Hz auf das Foot-Flapping zurück. Auch in laterale Richtung ist bei höheren Frequenzen von starken Querschnittsdeformationen auszugehen [42, S.80], welche jedoch andere Moden aufweisen. Deren Einfluss auf die laterale Gleisabklingrate wird in der Fachliteratur nach Wissensstand des Autors nicht maßgeblich diskutiert. Zusätzlich hat die Steifigkeit sowie die Masse der Schiene einen Einfluss auf die Pinned-pinned-Frequenz (siehe Kapitel 2.3).

Eine Möglichkeit, die Schallabstrahlung der Schiene zu reduzieren, ist der Einbau von Schienenstegdämpfern (SSD oder alternativ: Schienendämpfer). Hierbei wird ein von dämpfendem Material umgebenes Massenelement (in der Regel aus Stahl) an den Schienensteg gekoppelt. Schwingungsenergie der Schiene wird an den Schienenstegdämpfer übertragen und über das Dämpfungselement der Dissipation zugeführt [9]. Heute geht man davon aus, dass die Wirksamkeit von Schienendämpfern zu großen Teilen von der Steifigkeit der Schienenzwischenlage abhängt: Während bei weichen Zwischenlagen starke Minderungen der Gleisabklingrate erzielt werden können, ist die Wirksamkeit bei harten Zwischenlagen eher gering [35].

Auch die Verwendung einer Schienenstegabschirmung (SSA) kann dämpfend auf das Schwingungsverhalten der Schiene wirken. Dabei wird ein absorbierendes Material mittels Stahlwinkelblechen derart an der Schiene befestigt, dass eine Ummantelung des Stegs stattfindet. Die Wirkung von Schienenstegabschirmung beruht demnach größtenteils auf Absorption und Abschirmung. [39] Projektberichte der Prose AG [39] deuten jedoch darauf hin, dass auch eine Reduktion der Schienenvibrationen (und damit auch der Gleisabklingrate) bewirkt wird. Dies gilt insbesondere für die laterale Schwingungsrichtung.

3.3.1.4 Schienenbefestigung

Die Schienenbefestigung verbindet die Schiene mit der Schwelle zum sogenannten Gleisrost. Im Laufe der Eisenbahngeschichte wurden unterschiedlichste Typen von Schienenbefestigungen entwickelt. Zwei besonders weit verbreitete Befestigungssysteme sind der K-Oberbau bei Holz- und Stahlschwellen sowie der W-Oberbau bei Betonschwellen. Bei beiden Systemen handelt es sich um indirekte Befestigungen, da die Schiene mittels Rippenplatte (K-Oberbau) oder Spannklemme (W-Oberbau) fixiert wird. Die Rippenplatte bzw. die Spannklemmen werden wiederum über Schrauben an der Schwelle befestigt. Unter der Schiene befindet sich zudem eine Zwischenlage, welche neben dem Federring (K-Oberbau) bzw. der Spannklemme (W-Oberbau)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

für die Elastizität des Systems sorgt. Zusätzlich wird ein erhöhter Reibungsbeiwert gewährleistet [32, S.182 ff].

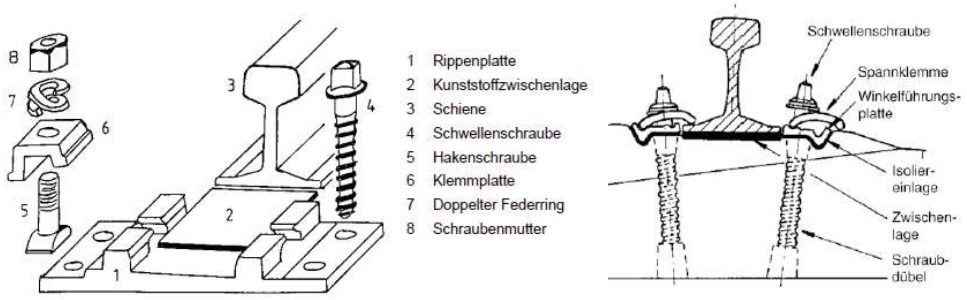


Abb. 3.3: Skizze eines K-Oberbaus (links) und eines W-Oberbaus (rechts), Quelle: Matthews [31] und Menius und Matthews [32]

Abseits niedriger Frequenzen schwindet die – in Kapitel 3.3.1.1 erwähnte – „blockierende Wirkung“ der Gleisbettung und der dämpfende Einfluss der Schienenbefestigung nimmt zu. Die zwei wesentlichen Mechanismen dieser Dämpfung sind zum einen die Energieverluste, welche in den elastischen Schienenbefestigungen auftreten und zum anderen jene Energie, welche über die Schwellen in den Boden übertragen wird. Das Ausbreitungsverhalten der Schienenschwingungen hängt dementsprechend maßgeblich von der Kopplung zwischen Schiene und Schwelle ab. Als wesentlicher Parameter für das Ausmaß dieser Kopplung wird in der Fachliteratur (vgl. [42, 47]) die Zwischenlagensteifigkeit der Schienenbefestigung identifiziert. Eine weiche Zwischenlage führt aufgrund der geringen Energieübertragung zu einer Entkopplung der Vibrationen von Schiene und Schwelle und verursacht dadurch geringe Gleisabklingraten. Vice versa führt eine hohe Zwischenlagensteifigkeit zu hoher Dämpfung, da ein Großteil der Vibrationen von den Schwellen abgetragen wird. [42, S.33 ff.]

Die Charakterisierung von Zwischenlagen für oberbautechnische Anforderungen erfolgt in der Regel nach der statischen Steifigkeit, akustisch relevant sind aber die dynamische Steifigkeiten, insbesondere jene bei höheren Frequenzen (vgl. [37]). Die Kategorisierung in weiche, mittlere und harte Zwischenlagen erfolgt meistens ohne Quantifizierung der zugrunde liegenden Steifigkeitswerte. Eine Ausnahme bildet die DIN CEN/TR 16891 [3], welche eine konkrete Differenzierung in Abhängigkeit der Zwischenlagensteifigkeit als auch des Schwellentyps vornimmt (siehe Tabelle 3.2). Auch hier fehlt wiederum die Information, ob es sich um eine statische oder dynamische Zwischenlagensteifigkeit handelt (siehe [3, S.28]). Zahlreiche publizierte Vergleichsmessungen

Tab. 3.2: Bereiche von Zwischenlagensteifigkeiten nach DIN CEN/TR 16891 [3]

Schwelle	Weiche Auflage	Mittlere Auflage	Harte Auflage
Bi-Blockschwellen	$\leq$ 400 MN/m	400 – 800 MN/m	$\geq$ 800 MN/m
Einzelschwellen	$\leq$ 800 MN/m	$\geq$ 800 MN/m	–
Holzschwellen	alle	–	–

der Gleisabklingrate zwischen Strecken mit unterschiedlichen Zwischenlagensteifigkeitswerten haben gezeigt, dass es sich hierbei um den quantitativ einflussreichsten Parameter hinsichtlich der Gleisabklingrate handelt [34, 35, 42, 47]. Bei sehr weichen Zwischenlagensteifigkeiten ist ein starker Abfall der Gleisabklingrate bei niedrigen Frequenzen zu erwarten. Mit steigender Zwischenlagensteifigkeit erfolgt der Abfall der Gleisabklingrate erst bei höheren Frequenzen. Der beschriebene Zusammenhang zwischen Gleisabklingrate und Steifigkeit der Kopplung ist

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

in Abbildung 3.4 beispielhaft dargestellt und wird auch durch die DIN CEN/TR 16891 [3] aufgegriffen. Diese schlägt ein Verfahren zur Abschätzung der Zwischenlagensteifigkeit auf Basis der Gleisabklingrate vor. Jener Frequenzbereich, bei welchem die Gleisabklingrate auf 4 dB/m abfällt definiert die geschätzte („äquivalente“) Zwischenlagensteifigkeit. Die zuvor erwähnte Kategorisierung der Zwischenlagensteifigkeit (Tabelle 3.2) entspringt diesem Verfahren.

Ergänzend sei erwähnt, dass eine hohe Gleisabklingrate, durch die bessere Kopplung mit der Schwelle, auch zu höheren Schallemissionsanteilen ebenjener führt. Im Gesamtpegel des Rollgeräusches ergeben harte Zwischenlagen dennoch wesentlich geringere Schallemissionen. [42, S.256]

Da sich weiche Zwischenlagen aus Sicht der Instandhaltung vorteilhaft auswirken, wohingegen hohe Steifigkeiten geringere Schienenemissionen hervorrufen, wird vermehrt versucht, die dynamische Steifigkeit der Zwischenlage frequenzabhängig zu gestalten (siehe [37]).

Es ist hervorzuheben, dass die Zwischenlagensteifigkeit einen instationären Parameter darstellt und aufgrund der jeweiligen Verkehrsbelastungen zeitabhängigen Veränderungen unterliegt. Das genaue Ausmaß des Einflusses der „Walkarbeit“ auf die Steifigkeit der Zwischenlage ist jedoch noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen [47]. Venghaus [47] schätzt den Einfluss der Steifigkeitsabnahme einer Zwischenlage auf eine Erhöhung des A-bewerteten Schallemissionspegels von 1 dB für die „derzeitig übliche Nutzungsdauer“ von Zwischenlagen. Dies würde einen verhältnismäßig geringen Einfluss der zeitlichen Reduktion der Zwischenlagensteifigkeit bedeuten, allerdings bezieht sich die Schätzung auf in der Schweiz übliche Zwischenlagen aus Ethylen-Vinyl-Acetat.

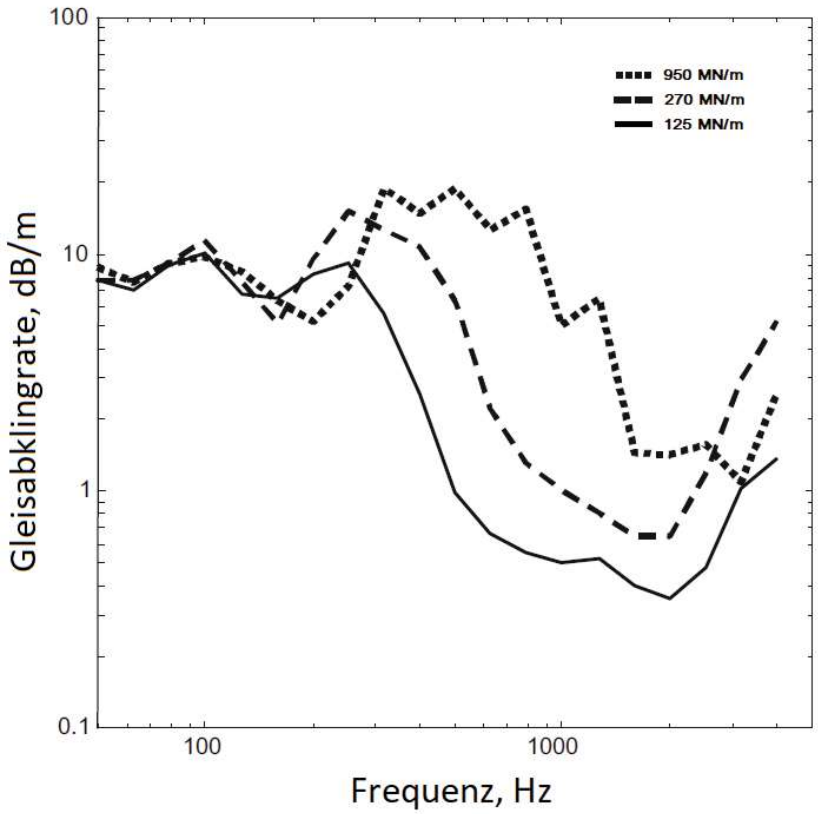


Abb. 3.4: Typische Verläufe der Gleisabklingrate in Abhängigkeit der Zwischenlagensteifigkeit, übersetzte Darstellung nach Thompson [42, S.37]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Neben der Zwischenlagensteifigkeit wird auch der Haltekraft von Klammern am Schienenfuß ein Einfluss auf die Abklingrate zugeschrieben [47]. Eine Studie der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) zur Wirkung von Schienendämpfern [35] konnte Unterschiede bei der Messung der Gleisabklingrate bei zwei unterschiedlichen Typen von Betonschwellen mit harten Zwischenlagen eruieren, welche einer A-bewerteten Schalldruckpegeldifferenz von 2 bis 3 dB entsprechen. Eine Untersuchung der möglichen Ursachen erklärt die gemessenen Differenzen durch Klemmkraftunterschiede: Eine reduzierte Klemmkraft der Schienenbefestigung führt demnach zu reduzierten effektiven, dynamischen Steifigkeitswerten der Zwischenlage und damit auch zu niedrigen Gleisabklingraten. [35]

Aktuelle Untersuchungen von van Damme [46] zeigen, dass der Einfluss der Klemmkraft auf die gemessene Gleisabklingrate ebenfalls stark von der Zwischenlagensteifigkeit abhängig ist. Bei Messungen auf einem Testgleis wurde der Einfluss von Klemmkraftverlusten auf die Gleisabklingrate untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Klemmkraftverluste bei harten Zwischenlagen einen wesentlich größeren (negativen) Einfluss haben, als bei weichen Zwischenlagen. Erklärt wird dieser Zusammenhang durch den Umstand, dass die Schienenschwingungen bei weichen Zwischenlagen bereits von jenen der Schwellen entkoppelt sind und durch eine weitere Reduktion der Kopplung keine maßgeblichen Veränderungen des Schwingungsverhaltens herbeigeführt werden. [46]

3.3.2 Umgebungseinflüsse

Die vorherigen Kapitel fassen im Wesentlichen die bis dato bekannten oberbautechnischen Einflussfaktoren auf die Gleisabklingrate und damit auch auf die Rollgeräuschanteile der Schiene zusammen. Neben diesen konstruktiven Parametern gibt es auch Umgebungseinflüsse, welche die Gleisabklingrate oder auch nur deren Messung beeinflussen können. Die DIN CEN/TS 16891 [3] nennt in Anhang B einige Beispiele für nicht-konstruktive Einflussfaktoren auf die Pass-by Messung der Gleisabklingrate. Neben Einflüssen, welche primär aus dem gewählten Messvorgang resultieren, wird unter anderem die Temperatur der Zwischenlage als möglicher Einflussfaktor auf die Gleisabklingrate genannt: Es „können sich deshalb zu verschiedenen Zeiten oder an verschiedenen Orten vorgenommene Messungen mit einem signifikanten Unterschied bei der Schienen- und Zwischenlagentemperatur unterscheiden.“ [3, S.53] Quantitative Angaben zum Einfluss der Temperatur werden hierbei nicht angegeben. Oertli [35] führt diesbezüglich aus, dass der Einfluss der Temperatur bei harten Zwischenlagen als gering einzustufen ist. Ähnliches ist einem Forschungsbericht der Prose AG [38] zu entnehmen. Was die Temperaturabhängigkeit weicher Schienenzwischenlagen betrifft, gibt es wenige quantifizierbare Angaben. Steifigkeitsmessungen von Schienenzwischenlagen bei Temperaturen von -10 °C, 10 °C und 40 °C zeigen, dass sich die Zwischenlagensteifigkeit durch Temperaturerhöhung – je nach Frequenzbereich und Ausgangssteifigkeit – stark reduzieren kann [38]. Die Auswirkungen dieser Steifigkeitsverluste auf die Höhe der Gleisabklingrate sowie die Schallemissionen der Schiene sind jedoch kein Gegenstand wissenschaftlicher Publikationen.

3.3.3 Messverfahren

Bei der Betrachtung von Einflussfaktoren auf die Gleisabklingrate sind Einflüsse auf die Schallabstrahlung der Schiene von jenen zu trennen, welche nur oder in großen Teilen die Messung bzw. die Vergleichbarkeit der Messergebnisse betreffen. Im Folgenden wird ein Überblick über die Einflüsse jener beider Messverfahren gegeben, für welche Messdaten für die nachfolgende Untersuchung vorliegen: der direkten Messung mittels Hammerschlag-Impulsverfahren und der indirekten Messung mittels Energie-Iterationsverfahren. Unterschiede in den jeweiligen Verfahren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

können vordergründig auf die Präsenz bzw. Abwesenheit des Zuges während der Messung und Vereinfachungen innerhalb der Berechnungsmodelle zurückgeführt werden.

3.3.3.1 Hammerschlag-Impulshammerverfahren

Venghaus [48] diskutiert in seiner Veröffentlichung die Unsicherheiten des Impulshammerverfahrens nach DIN EN 15461 [5] und kritisiert Messunsicherheiten, welche aus der Wahl des Impulshammers resultieren, da es hinsichtlich der Impulseinleitung keine normierten Vorgaben gibt. Einen weiteren Einflussfaktor beim Impulshammerverfahren stellt die Distanz dar, über welche sich der Messvorgang erstreckt. Je geringer die Gleisabklingrate eines Streckenabschnitts ist, umso länger fällt auch die benötigte Messstrecke aus und kann teilweise Distanzen über 40 m erreichen. Diesbezüglich kritisiert Venghaus [48], dass die Forderung nach Reziprozität nicht erfüllt ist, da der Untersuchungsgegenstand (die Schiene) keine ausreichende Homogenität über die benötigte Messdistanzen aufweisen kann.

3.3.3.2 Pass-By Methode

Da im Rahmen der Pass-by-Analyse auch fahrzeugseitige Einflüsse eine Rolle spielen ist die Liste der potentiellen Einflussgrößen wesentlich länger. Anhand der Arbeiten von Dittrich et al. [7], Li et al. [25] und der DIN CEN/TR 16891 [3] können folgende Parameter als potentielle Einflussfaktoren der Pass-by Gleisabklingrate genannt werden:

1. Wahl der „kurzen Länge“ L_1 [25]
2. Aufteilung der Kontaktkräfte auf die einzelnen Räder [25]
3. Homogenität des betrachteten Streckenabschnitts [25]
4. Gesamtintegrationszeit [3]
5. Vorbeifahrtsgeschwindigkeit, Belastung und Zugtyp [3, 7]
6. Lage des Beschleunigungssensors im Querschnitt der Schiene [3, 7]
7. Lage des Beschleunigungssensors im Längsschnitt der Schiene [3, 7]
8. Einflüsse durch Radlaufflächendefekte [3]

Die Norm DIN CEN/TR 16891 [3] und die zu Grunde liegende Benchmark-Studie von [7] gehen relativ detailliert auf die Einflussgrößen Vorbeifahrtsgeschwindigkeit und Sensorposition ein, welche auch durch Vergleichsmessungen untermauert sind. Die Sensorposition zeigt einen klar erkennbaren Einfluss auf die ermittelte Pass-by Gleisabklingrate. Hierbei kann zwischen Position im Längsschnitt und Position im Querschnitt differenziert werden. Für Erstere behandelt die DIN CEN/TR 16891 [3] in ihrer Benchmark-Studie die Unterschiede der Pass-by Gleisabklingrate aufgrund der Positionierung mittig zwischen den Schwellen sowie direkt neben der Schwelle. Die Messergebnisse zeigen teilweise deutliche Unterschiede von mehreren Dezibel im Frequenzbereich unter 250 Hz aber auch im 1600 Hz Frequenzband, welches sich im von der Schiene dominierten Frequenzbereich des Rollgeräusches befindet. Höhere Frequenzen ab 4000 Hz weisen ebenfalls große relative Unterschiede in Abhängigkeit der Sensorposition auf. Hinsichtlich der Lage im Querschnitt betrachtet die Norm die Montage am Schienenkopf und mittig unterhalb des Schienenfußes. Hierbei sind vor allem bei Frequenzen über 4000 Hz eindeutige Unterschiede

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

bemerkbar. Ein verallgemeinerbares Muster zur Abschätzung der Wirkung ist anhand der geschilderten Vergleichsmessungen nicht erkennbar. Als maßgebliche Ursache wird das Auftreten unterschiedlicher Wellentypen aufgrund von Querschnittverformungen angeführt. (vgl. [3])

Auch eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Pass-by Gleisabklingrate ist nach DIN CEN/TR 16891 [3] potentiell möglich und wird auch anhand von gemittelten Vergleichsmessungen für drei Fahrgeschwindigkeiten (60 km/h, 80 km/h und 160 km/h) dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass der Zug mit der geringsten Vorbeifahrtsgeschwindigkeit auch die geringste Pass-by Gleisabklingrate verursacht, zwischen den anderen höheren Geschwindigkeiten ist jedoch kein nennenswerter Unterschied in der Gleisabklingrate bemerkbar. (vgl. [3])

Der Einfluss der Belastung wird in der DIN CEN/TR 16891 [3] ebenfalls hervorgehoben, jedoch nicht durch Messergebnisse gestützt. Es wird angeführt, dass der Einfluss am befahrenen Gleis gering ist. Größere Unterschiede der Gleisabklingrate können demnach bei Vergleich zwischen belastetem und unbelastetem Gleis (direkte Messung) beobachtet werden. Ein weiterer Einflussfaktor, welcher mit Beispielen untermauert wird, ist der Zugtyp. Unterschiede werden hier nicht nur zwischen Güterzügen und Personenzügen identifiziert, auch unterschiedliche Personenzüge können zu erkennbaren Unterschieden in den Pass-by-Gleisabklingraten führen. (vgl. [3])

Ein weiterer Einflussfaktor nach DIN CEN/TR 16891 [3] sind Radlaufflächendefekte, welche die Analyse der Gleisabklingrate „wesentlich beeinträchtigen“ [3, S.52] können.

Abschließend sind noch zwei Einflussparameter zu nennen, welche dem Formelapparat des Energie-Iterationsverfahren entspringen: die „kurze Länge“ L_1 und die „lange Länge“ L_2. Pass-by-Gleisabklingraten werden gemäß dem Energie-Iterationsverfahren ermittelt, indem die summierten Schienenbeschleunigungen in unmittelbarer Nähe der Räder, den summierten Schienenbeschleunigungen der gesamten Zugvorbeifahrt gegenübergestellt werden. L_1 und L_2 definieren hierbei die Integrationsbereiche in unmittelbarer Nähe der Räder (L_1) bzw. über die gesamte Zugvorbeifahrt (L_2). Eine detaillierte Beschreibung beider Parameter erfolgt in Kapitel 4.3.1. Li et al. [25] erwähnen in Ihrer Arbeit, dass die Pass-by Methode vor allem in den Frequenzbereichen zwischen 500 Hz und 3000 Hz robuste Ergebnisse liefert und in allen Frequenzbändern mit potentiell hoher Gleisabklingrate starken Unsicherheiten unterliegt. Die Wahl der sogenannten „kurzen Länge“ L_1 wird als sehr einflussreicher Parameter identifiziert, dessen Wahl vor allem bei geringen Frequenzen zu großen quantitativen Unterschieden in den Rechenergebnissen führen kann. Hinsichtlich der Gesamtintegrationszeit, welche sich aus L_2 ergibt, wird durch die Norm lediglich angedeutet, dass eine zu niedrige Wahl der Länge L_2 zu Ausreißern in den Messergebnissen führen kann [3, S.36], Richtwerte für die Festlegung von L_2 oder deren Dokumentation werden hierbei nicht gegeben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 4

Pass-by-Methode

4.1 Historische Entwicklung

Die EU-Projekte METARAIL und STAIRRS in den frühen 2000er-Jahren lieferten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der experimentellen Ermittlung des Rollgeräusches von Schienenfahrzeugen [17]. Einige der Erkenntnisse dieser Projekte wurden 2006 von Janssens et al. [17] publiziert und beinhalten ein Berechnungsverfahren für die kombinierte Rauheit, die Gleisabklingrate während Zugvorbeifahrten und akustische Transferfunktionen. Die Berechnung der genannten Gleisparameter erfolgt auf Basis von gemessenen vertikalen sowie lateralen Schienenbeschleunigungen. Es folgten einige Standardisierungsbemühungen in den 2010er Jahren (siehe Dittrich et al. [7]) und im Jahr 2016 wurde die Beschreibung des Messverfahrens in der CEN/TR 16891 publiziert (vgl. [8]). Die vorliegende Arbeit bezieht sich vordergründig auf die darauf aufbauende Deutsche Fassung DIN CEN/TR 16891[3]. Die aktuellsten Publikationen zur Thematik erschienen Ende der 2010er und befassen sich einerseits mit der Validierung der neuen Messmethode (siehe Li et al. [25]) anderseits auch mit den Anwendungsmöglichkeiten der Pass-by-Analyse (siehe Thompson et al. [44]).

4.2 Anwendungen

Die Besonderheit dieser Methode liegt in der vereinfachten Ermittlung von effektiven Gesamtrauheiten und Gleisabklingraten [26]. Im Gegensatz zum Impulshammer-Verfahren eignet sich die Methode nicht zur Prüfung der Gleisabklingrate bzw. der akustischen Schienenrauheit auf Referenzgleisen im Rahmen von Bauartzulassungsprüfungen [3]. Zudem ist das Verfahren nur auf herkömmlichen Gleisen anwendbar. Diese umfassen nach DIN CEN/TR 16891 [3] Schotteroberbau, Beton- und Holzschwellen sowie schotterlose Gleisanlagen.

Mögliche Anwendung findet die Pass-by-Methode in der Bewertung und Abschätzung von akustischen Gleisparametern. Li et al. [26] nennen beispielsweise die Möglichkeit die Methode als Alternative zum Impulshammer-Verfahren für die Beurteilung der Wirkung von Schienendämpfern als auch für die Abschätzung der akustischen Abstrahlung von Streckenabschnitten zu verwenden.

4.3 Berechnungsmodell gemäß DIN CEN/TR 16891

4.3.1 Energie-Iterationsverfahren

Die Ermittlung der Gleisabklingrate anhand der Zugvorbeifahrt wurde von Dittrich et al. [7] Energie-Iterationsverfahren (EIV) benannt, da die Anteile der benachbarten Räder mit Hilfe eines Iterationsverfahrens berücksichtigt werden [25]. Dies unterscheidet dieses Verfahren von anderen Pass-by-Methoden, wie dem Slope-Verfahren [3]. Das Energie-Iterationsverfahren ähnelt dem Hammerschlag-Impulsverfahren nach DIN EN 15461 [5] mit dem Unterschied, dass die Anregung der Schiene nicht durch einen Impulshammer, sondern durch die Räder des überfahrenden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zuges („Train-Pass-by“) erfolgt. Dies führt zu einer tatsächlichen Belastung der Schienen und dementsprechend höheren Signalenergien während der Messung [3]. Die Beschreibung des Energie-Iterationsverfahren erfolgt nach DIN CEN/TR 16891 [3] und wird im Folgenden zusammengefasst.

Analog zur Annahme der DIN EN 15461 [5] für das Hammerschlag-Impulsverfahren [5, S.15] wird die Impulsantwort der Schiene anhand einer Exponentialfunktion und dem Abklingexponenten β beschrieben. Mit $A(0)$ als Amplitude der Schienenschwingung an der Position des Radkontaktpunktes ergibt sich die Schwingungsamplitude an der Position x zu

$$A(x) = A(0) \cdot e^{(-\beta \cdot x)} \tag{4.1}$$

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben kann die Gleisabklingrate über die komplexe Wellenzahl k_i ermittelt werden. Die DIN CEN/TR 16891 setzt hierbei den komplexen Anteil k_i mit dem bereits zuvor eingeführten Abklingexponenten β gleich und erhält dadurch die Gleisabklingrate D_z (siehe [3, S.12]).

$$D_z = 20 \cdot \lg(e^{\beta}) \approx 8.868 \cdot \beta \tag{4.2}$$

Beim Hammerschlag-Impulsverfahren wird das Verhältnis aus der quadratischen Übertragungsfunktion $A(x_n)^2$ am Ort x_n und der gemessenen, quadratischen Impulshammer Anregungsschwingung $A(x_0)^2$ als Basisgröße zur Ermittlung der Gleisabklingrate herangezogen. Die Pass-by-Methode unterscheidet sich hier insofern, dass als Basisgröße das sogenannte Verhältnis der Schwingungsenergie R verwendet wird

$$R = \frac{A^2_{\sum_{L_1}}}{A^2_{\sum_{L_2}}} \tag{4.3}$$

Der Zähler aus Gleichung 4.3 beschreibt jene aufsummierten, quadratischen Schienenbeschleunigungen, welche in unmittelbarer Nähe der Räder gemessen werden und ermittelt sich gemäß

$$A^2_{\sum_{L_1}} = \sum_{n=1}^{N} A^2_{n,\,L_1} = \sum_{n=1}^{N} \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \left(A_n(0) \cdot e^{(-\beta \cdot |x|)} \right)^2 dx = \frac{1 - e^{-\beta \cdot L_1}}{\beta} \sum_{n=1}^{N} A_n^2(0) \tag{4.4}$$

Die „kurze Länge“ L_1 entspricht dem minimalen Achsabstand eines Zuges (oder eines Teils des Zuges) und kann in vielen Fällen mit 1.8 m angenommen werden [3]. Nach Li et al. [25] beruht Gleichung 4.4 auf der Annahme, dass die Kontaktkräfte in allen Rädern gleich sind und dass keine Interferenzen durch benachbarte Räder entstehen.

Im Nenner von Gleichung 4.3 befindet sich die aufsummierte, quadratische Schienenbeschleunigung der gesamten Zugvorbeifahrt. Zur Ermittlung dieses Terms wird folgende Approximation vorgenommen, welche für ausreichend große Längen L_2 gilt:

$$A^2_{\sum_{L_2}} = \sum_{n=1}^{N} A^2_{n,L_2} = \sum_{n=1}^{N} \int_{L_2} \left(A_n(0) \cdot e^{(-\beta \cdot |x|)} \right)^2 dx \approx \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^{N} A_n^2(0) \tag{4.5}$$

Zur „langen Länge“ L_2 macht die EN CEN/TR 16891 keine genauen Vorgaben, gibt jedoch Beispiele für „ausreichend große L_2“ vor: „eine Zuglänge oder die Länge eines Fahrzeugs/einer Gruppe von Fahrzeugen“ [3, S.13]. Bild 2 der DIN CEN/TR 16891 [3, S. 14] impliziert jedoch die Wahl einer Länge L_2, welche eindeutig über der Zuglänge liegt und das nahezu vollständige Abklingen der Schienenbeschleunigungen miteinbezieht. Die Ermittlung von $A_{\sum_{L_1}}$ bzw. $A_{\sum_{L_2}}$ erfolgt aus den gemessenen Beschleunigungssignalen, wobei das Zeitsignal zunächst mittels Terz-Bandpassfilter in ein Terzbandspektrum gewandelt wird [3, S.13]. Die Eigenschaften des zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

verwendenden Bandpassfilters sind in der DIN CEN/TR 16891 nicht näher definiert. Das Verhältnis der Schwingungsenergie R gemäß Gleichung 4.3 ist somit ebenfalls ein Terzbandspektrum. Einsetzen von 4.4 und 4.5 in 4.3 ergibt

$$R \approx 1 - e^{-\beta \cdot L_1} \tag{4.6}$$

Gleichung 4.6 gilt unter Annahme eines konstanten Abklingexponenten β innerhalb des betrachteten Gleisabschnitts [25]. Um diese Annahme zu gewährleisten fordert die Norm die Abwesenheit von Unregelmäßigkeiten (Schweißnähte, Dehnfugen, hoch liegende Schwellen und beschädigte oder fehlende Schienenspannklemmen) im Bereich des Gleisabschnitts und gibt auch genaue Vorgaben hinsichtlich erforderlicher Mindestabstände zu den genannten Unregelmäßigkeiten.

Aus Gleichung 4.2 und 4.6 kann die Gleisabklingrate durch das Verhältnis der Schwingungsenergie R und somit direkt aus den Beschleunigungsmessungen für jedes Terzband mit der Mittenfrequenz f_c abgeleitet werden

$$D_z(f_c) = -\frac{8.868}{L_1} \cdot \ln(1 - R(f_c)) \tag{4.7}$$

Da die gemessenen Beschleunigungspegel auch Beiträge benachbarter Räder enthalten, muss Gleichung 4.7 mittels Iterationsverfahren angepasst werden. Dies geschieht durch die iterative Berechnung mit dem Gewichtungskoeffizienten $w_k(f_c)$

$$w_k(f_c) = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} e^{-2 \cdot \beta_{k-1} \cdot |x_j - x_i|} \tag{4.8}$$

welcher in Gleichung 4.7 folgendermaßen berücksichtigt wird

$$D_z(f_c) = -\frac{8.868}{L_1} \cdot \ln\left(1 - \frac{R(f_c) \cdot N}{w_k(f_c)}\right) \tag{4.9}$$

Als Anfangswert für die Iteration ist gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] die doppelte Achszahl ($w_0 = 2N$) zu verwenden. Dies entspricht der Annahme, dass die Hälfte der Schwingungsenergie in der Umgebung eines jeden Rades von den benachbarten Rädern induziert wird. Anschließend wird auf Basis von Gleichung 4.2 der Abklingexponent β berechnet, mit

$$\beta(f_c) = \frac{D_z(f_c)}{8.868} \tag{4.10}$$

Aufbauend darauf wird $w_k(f_c)$ nach Gleichung 4.8 ermittelt und dieser Vorgang wiederholt sich in einer Iterationsschleife, bis der Fehler aus $\mid \beta_k(f_c) - \beta_{k-1}(f_c) \mid$ einen Wert von $\varepsilon = 0.1$ unterschreitet. Der Parameter ε wird im Rahmen dieser Arbeit als Fehlertoleranz bezeichnet. Nach DIN CEN/TR 16891 [3] werden im Regelfall bis zu 4 Iterationen benötigt. Hierbei unterscheidet sich die Norm von der Ursprungspublikation von Janssens et al. [17], in welcher eine Iteration erst bei geringen Gleisabklingraten (unter 3 dB/m) und nicht bei jedem Berechnungsvorgang vorgeschlagen wird. Zusätzlich wird im Falle einer Iteration ein Anfangswert von $w_0 = N$ vorgegeben, was einem fehlenden Energieeintrag durch benachbarte Räder entspricht.

Nach Durchführung des Iterationsvorganges erhält man die Pass-by-Gleisabklingrate einer Zugvorbeifahrt. Die Norm DIN CEN/TR 16891 [3] fordert für die endgültige Abschätzung der Gleisabklingrate eine arithmetische Mittelung über mindestens drei Vorbeifahrten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.3.2 Ermittlung der kombinierten Rauheit

Die Ermittlung der kombinierten Rauheit L_{Rtot} erfolgt auf Basis der Gleisabklingraten D_z aus dem Energie-Iterationsverfahren und den gemessenen Schienenbeschleunigungen. Letztere fließen in Form des äquivalenten Beschleunigungsspektrum $L_{\mathrm{aeq,tp}}$ in die Berechnung ein. A_1 und A_2 sind Korrekturterme. Ersterer berücksichtigt Abweichungen der Schienenbeschleunigungen, welche sich aus der tatsächlichen Messposition im Vergleich zum Schienenkopf ergeben. Die Ermittlung kann mittels Impulshammer erfolgen, berechnet werden oder im Falle von kleinen Differenzen vernachlässigt werden. A_2 berücksichtigt den Effekt der Kontaktpunktverschiebung und die Norm stellt für konventionelle Gleiskonfigurationen der Vollbahn Standardwerte zur Verfügung. Diese Tabellenwerte sind in Abhängigkeit der Zwischenlagensteifigkeit zu wählen.

$$L_{\mathrm{Rtot}}(f_{\mathrm{c}}, v) = L_{\mathrm{aeq,tp}}(f_{\mathrm{c}}, v) + 10 \cdot \lg\left(\frac{D_z(_{\mathrm{c}}) \cdot l}{8.868 \cdot N_{\mathrm{ax}}}\right) - A_1 - A_2 - 40 \cdot \lg(2 \cdot \pi \cdot f_{\mathrm{c}}) \tag{4.11}$$

Die auf diese Weise erhaltenen Rauheiten beziehen sich auf das Frequenzspektrum. Um die Rauheit als Funktion der Wellenlänge zu erhalten muss die Beziehung $\lambda = v/f$ angewendet werden, wobei v die Zuggeschwindigkeit und f die Frequenz bezeichnet. Für die Umrechnung in Standardwellenlängen schlägt die DIN CEN/TR 16891 [3] ein Verfahren vor, in welchem die Bandenergie proportional zu ihrem Anteil aufgeteilt wird.

4.4 Annahmen und Limitierungen

Sowohl der Ermittlung der Gleisabklingrate als auch der Ermittlung der kombinierten Rauheit mittels Pass-by-Analyse liegen einige Vereinfachungen zugrunde. Einen guten Überblick zu den jeweiligen Annahmen bzw. daraus resultierenden Limitierungen dieser Methode bieten Li et al. [25], welche nachfolgend zusammengefasst sind:

1. Es wird angenommen, dass die Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene auf allen Rädern gleich groß sind.

2. Es wird angenommen, dass der Verlauf der Schienenschwingung im Abstand zum Rad für jedes Frequenzband durch eine abnehmende Exponentialfunktion beschrieben werden kann.

3. Da die quadratische Schienenbeschleunigung nach Gleichung 4.4 im Gegensatz zu Gleichung 4.5 über eine sehr kurze Länge summiert wird, setzt das Kürzen des Abklingexponenten β in Gleichung 4.3 voraus, dass die Gleisabklingrate über die gesamte betrachte Länge (L_2) konstant bleibt.

4. Im Bereich kleiner Wellenlängen ist die Genauigkeit der mittels Pass-by-Methode ermittelten kombinierten Rauheiten stark von der richtigen Wahl der Korrekturspektren A_1 und A_2 abhängig.

Es ist hierbei zu erwähnen, dass sich in der verfügbaren Literatur keine Hinweise dazu finden, inwiefern sich die genannten Vereinfachungen auf das Ergebnis der Pass-by-Analyse auswirken. Nach DIN CEN/TR 16891 [3] wurde das Verfahren auch noch nicht für kleine Radtypen (< 600 mm Durchmesser) sowie Straßenbahnräder und alternative Gleisarten (Rillenschienen, eingedeckte Schienen) validiert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 5

Messdaten

5.1 Messstelle und Datenbearbeitung

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messdaten wurden von einer Fremdfirma erhoben und von der Infrastruktur AG der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB-Infra) zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten für jede Zugvorbeifahrt unter anderem folgende Informationen:

1. vertikale und laterale Schienenbeschleunigung in m/s^2 (Zeitsignal mit einer Abtastrate von 32 kHz)
2. in Zeitsignalen verortete Achspositionen
3. Schienentemperatur und Lufttemperatur in °C
4. Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten in km/h
5. Zuglängen in m
6. Zugtyp

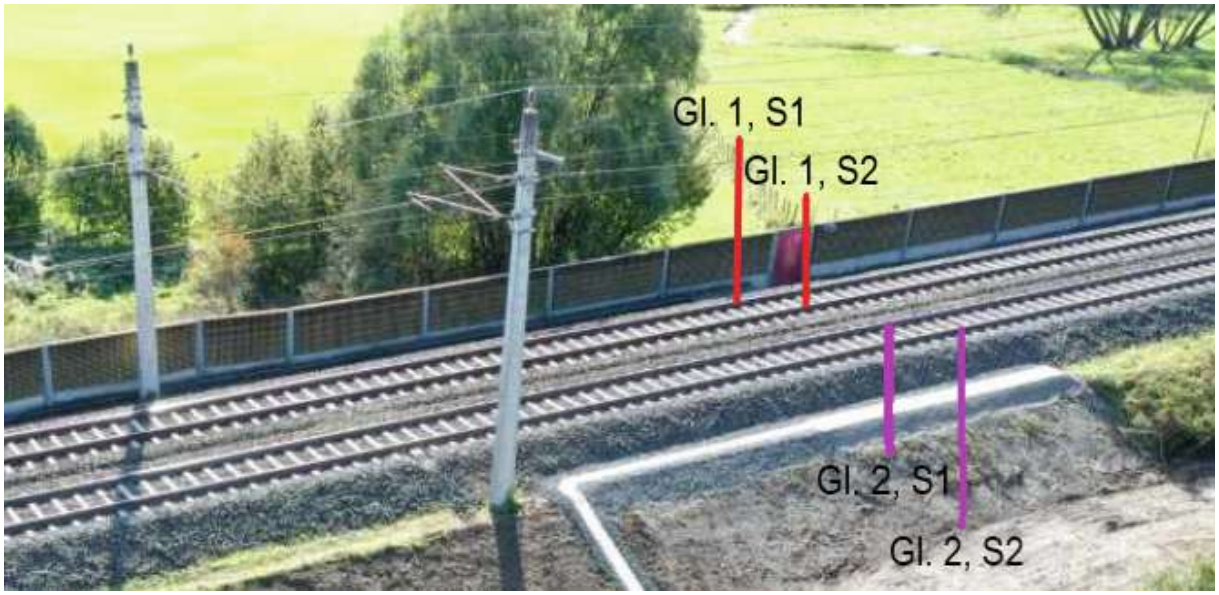


Abb. 5.1: Messstelle und Gleisbezeichnung, Lind ob Velden (Gl. = Gleis, S = Schiene)

Die Messungen wurden im Bereich einer Messstelle für Schallemissionen des Eisenbahnverkehrs an der Südstrecke am Wörthersee im Bundesland Kärnten durchgeführt (siehe [49]). Es handelt sich hierbei um eine zweigleisige Strecke mit Schotteroberbau und Betonschwellen. Als

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zwischenlage ist – gemäß Auskunft der ÖBB-Infra – die Standard-Zwischenlage ZW 700 der Firma Semperit verbaut, deren Steifigkeitseigenschaften Tabelle 5.1 zu entnehmen sind. Diese

Tab. 5.1: Statische und dynamische Zwischenlagensteifigkeit der ZW 700, Messung nach EN 13146-9:2011 [4] durch die TU München im Jahr 2013, Quelle: ÖBB-Infra

Parameter	Steifigkeit in MN/m
Statische Steifigkeit	86
Dynamische Steifigkeit bei 5 Hz	95
Dynamische Steifigkeit bei 10 Hz	99
Dynamische Steifigkeit bei 20 Hz	100

Zwischenlage ist gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] (siehe Tabelle 3.2 in Kapitel 3.3.1.4) als weiche Zwischenlage zu bezeichnen. Der Messzeitraum erstreckt sich über die Jahre 2022 und 2023, wobei Zugfahrten beider Richtungsgleise erfasst wurden. Sowohl auf Gleis 1 als auch auf Gleis 2 wurden Beschleunigungsaufnehmer auf Schiene 1 platziert, Schiene 2 wurde messtechnisch nicht berücksichtigt. Die Position der Beschleunigungsaufnehmer wurde auf Höhe des Schienenkopfs bzw. auf der Unterseite des Schienenfußes und in der Mitte eines Schwellenfaches gewählt. Die Durchführung der Messung wurde nicht vom Verfasser dieser Arbeit begleitet.

5.2 Auswahl zu untersuchender Einflussfaktoren

Anhand der zusammengetragenen Einflussparameter aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.3) wird unter Abgleich mit den zur Verfügung gestellten Messdaten eine Auswahl an zu untersuchenden Parametern erstellt. Die Begründung der ausgewählten Einflussparameter erfolgt in diesem Kapitel.

Aus der Literatur ist ersichtlich, dass konstruktive Parameter einen sehr großen Einfluss auf die Höhe der Gleisabklingrate haben. Hierbei ist vor allem der Einfluss der Schienenzwischenlage hervorzuheben. Eine Untersuchung konstruktiver Einflüsse auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten wird jedoch aus zwei Gründen nicht in Erwägung gezogen: Einerseits erlauben die zu Verfügung gestellten Messdaten keine Vergleiche von unterschiedlichen konstruktiven Konstellationen, da die Messungen lediglich einen zweigleisigen Streckenabschnitt mit ähnlichen Randbedingungen umfassen. Andererseits sind viele der Einflüsse durch die Erstellung von Berechnungsmodellen des Rollgeräusches bereits gut bekannt und im Standardwerk von Thompson [42] zusammengefasst. Auch die von der schweizerischen Forschungsinitiative „Lärmforschung Eisenbahn“ publizierten Projektberichte beinhalten viele Forschungsergebnisse hinsichtlich konstruktiver Einflussparameter der Gleisabklingrate (siehe z.B. Oertli [35], Prose AG [37, 38] und van Damme [46]).

Nach Ausschluss der großen Kategorie konstruktiver Parameter bleiben noch Einflussfaktoren aus dem Messverfahren sowie Umgebungseinflüsse. Bei letzteren wird in der Literatur lediglich der Faktor Temperatur genannt, dessen Wirkungsmechanismus auf die Temperaturvariabilität der Zwischenlagensteifigkeit zurückzuführen ist. Die genaue Quantifizierung des Parameters hinsichtlich seiner Auswirkung auf die Gleisabklingrate wurde bis dato jedoch nur punktuell untersucht, dies gilt insbesondere für weiche Zwischenlagen. Da die zur Verfügung gestellten Messdaten auf einem Streckenabschnitt mit weicher Schienenzwischenlage erhoben wurden und da diese auch Temperaturmessungen beinhalten, wird der Einflussparameter in die Liste der zu untersuchenden Faktoren aufgenommen. Zwar ist die Temperatur der Zwischenlage nicht exakt bekannt, jedoch kann für die Quantifizierung dieses Effekts die Schienentemperatur als

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Indikator gewählt werden. Die Verwendung der Umgebungstemperatur als alternativer Indikator wäre zwar denkbar und einfacher in der Erhebung, die Berücksichtigung externer Faktoren wie der Beschattung des Streckenabschnitts oder der Sonneneinstrahlung wäre aber hierbei nicht gegeben.

Des Weiteren sind noch Einflussfaktoren von Interesse, welche aus dem gewählten Messverfahren resultieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Energie-Iterationsverfahren betrachtet, potentielle Einflüsse darauf sind in Kapitel 3.3 zusammengetragen. Die Position des Beschleunigungsaufnehmers, Inhomogenitäten der Strecke sowie Einflüsse aus der Kontaktkraftverteilung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da die verfügbaren Messdaten derartige Analysen nicht zulassen. Die Wahl des Längenparameters L_1 wird ebenfalls nicht näher untersucht, da bereits publizierte Forschung von Li et al. [25] dazu vorliegt und die DIN CEN/TR 16891 [3] hierzu relativ genaue Empfehlungen hinsichtlich der Wahl von L_1 vorgibt. Im Gegensatz dazu gibt es hinsichtlich der Gesamtintegrationszeit bzw. der Wahl der langen Länge L_2 in der Norm keine genauen Vorgaben und auch wissenschaftliche Publikationen zum Einfluss dieses Berechnungsparameters liegen dem Autor nicht vor. Diese Umstände begründen die Entscheidung auch diesen Parameter in die Liste der betrachteten Einflussfaktoren aufzunehmen.

Darüber hinaus können auch Einflüsse identifiziert werden, die aus den Eigenschaften der vorbeifahrenden Züge resultieren. In der Literatur finden sich Informationen zu den Parametern Belastung der Schiene, Fahrgeschwindigkeit und Zugtyp, wobei abseits der Benchmark-Studie der DIN CEN/TR 16891 [3] keine genaueren Untersuchungen diesbezüglich publiziert wurden. Gewisse Parameter wie der Zugtyp sind nicht als primären Einflussfaktoren zu werten, sondern vielmehr Indikatoren für andere Einflussfaktoren wie z.B. Belastung, Achsdichte, Geschwindigkeit oder eventuell unbekannte Einflussgrößen die mit dem Zugtyp zusammenhängen können. Während ein etwaiger Einfluss der Vorbeifahrtsgeschwindigkeit direkt mit den gemessenen Daten untersucht werden kann, verhält es sich beim Einflussfaktor Belastung differenzierter, da die Belastung des Gleises nicht als Parameter in den Messdaten erhalten ist. Daher muss die Auswirkung dieses Einflussfaktors indirekt abgeschätzt werden. Hierfür kann und wird der Vergleich der Pass-by Methode am belasteten Gleis mit der direkten Messung am unbelasteten Gleis herangezogen. Dies eignet sich jedoch nur begrenzt um belastbare Erkenntnisse daraus abzuleiten, da beide Messverfahren unterschiedliche Limitationen und Vereinfachungen aufweisen. Ein weiterer, ergänzender Zugang zur Abschätzung des Einflusses durch Belastung besteht in der Verwendung des Parameters Zugtyp. Auch hier sind gewisse Limitationen vorhanden, da Unterschiede in der Gleisabklingrate, welche eine Korrelation zum Parameter Zugtyp aufweisen, nicht zwingend nur auf Belastungsunterschiede der unterschiedlichen Zugtypen zurückzuführen sind, da auch andere, mit dem Zugtyp korrelierenden Einflussfaktoren vorhanden sein können. Die Betrachtung einzelner Zugtypen ermöglicht jedoch eine grobe Abschätzung der vorhandenen Achslasten und kann damit zumindest als Indikator für den Einfluss der Belastung auf die Pass-by-Gleisabklingrate dienen.

Zusammenfassend werden in dieser Arbeit folgende Einflussfaktoren auf die Gleisabklingrate bzw. Pass-by-Gleisabklingrate untersucht:

1. Einfluss des gewählten Messverfahrens (Kapitel 6.3)
2. Einflussfaktor Schienentemperatur (Kapitel 6.4)
3. Wahl der langen Länge L_2 (Kapitel 6.5)
4. Einflussfaktor Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.6)
5. Einflussfaktor Zugtyp (Kapitel 6.7)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.3 Randbedingungen

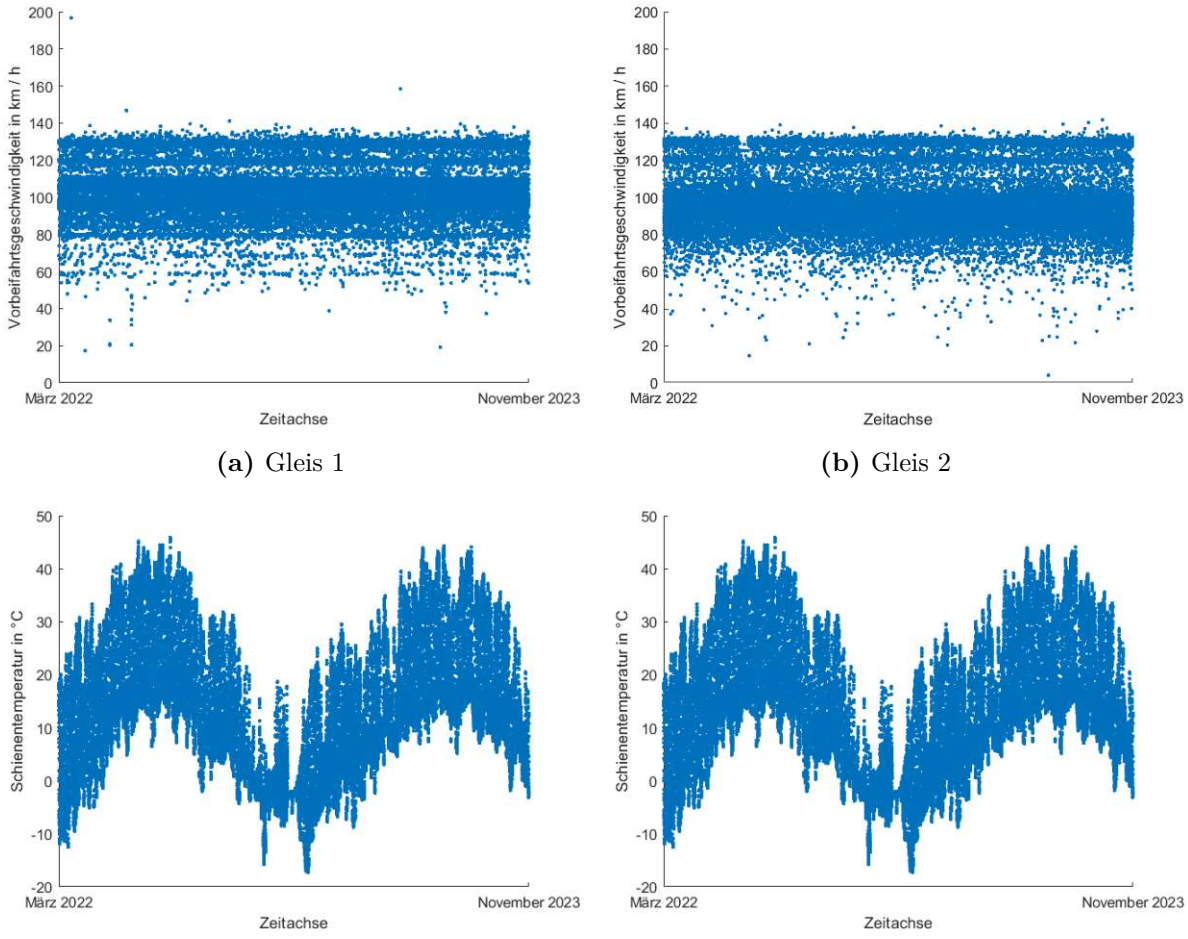
Im betrachteten Streckenabschnitt wurden im Messzeitraum rd. 46700 Zugfahrten auf Gleis 1 sowie rd. 46150 Zugfahrten auf Gleis 2 erfasst. Ausgewertet werden jedoch nur jene Zugvorbeifahrten, deren Messdaten den Plausibilitätskriterien von Kapitel 6.1 entsprechen. Genauere Angaben zu den in die Auswertung einfließenden Zugzahlen finden sich in den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2.

Abbildung 5.2a und 5.2b zeigen die gemessenen Fahrgeschwindigkeiten für die beiden Gleise der betrachteten Strecke. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten näherungsweise konstant über das Jahr verteilt sind. Ausnahmen bilden einzelne Züge geringer Fahrgeschwindigkeit.

In Abbildung 5.2c und 5.2d sind die Temperaturschwankung der Schiene im Messzeitraum dargestellt. Es zeigen sich (naheliegenderweise) sehr ähnliche Verteilungen für beide Gleise. Auffällig ist die Phase konstanter Schienentemperatur in der Mitte des betrachteten Messzeitraums. Dieses Zeitintervall weist eine äußerst geringe Variation der Schienentemperatur bei ungefähr -2 °C auf und unterscheidet sich dadurch von den Temperaturschwankungen der restlichen Messpunkte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die dargestellten Abbildungen nur Messungen berücksichtigen, welche den Plausibilitätskriterien in Kapitel 6.1 entsprechen. Ein ausgedünnter Temperaturbereich deutet darauf hin, das nur Messungen dieser Temperaturbänder in diesem Zeitraum zu plausiblen Messergebnissen geführt haben. Zusätzlich sind Fehlmessungen auch nicht zur Gänze ausgeschlossen.

Abbildung 5.3 zeigt die Aufteilung der Zugvorbeifahrten nach Zugtyp. Es ist erkennbar, dass die meisten Zugtypen ohne größere Unterbrechungen über das gesamte Jahr hinweg verkehren. Dies gilt insbesondere für die am häufigsten vorkommenden Personenzüge. Geringere Stichprobengrößen finden sich (erwartungsgemäß) bei Lokomotiven. Hier finden sich einzelne Lokomotivtypen, welche nur in bestimmten Zeitabschnitten des Jahres verkehren, diese sind jedoch hinsichtlich ihrer Häufigkeit unterrepräsentiert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

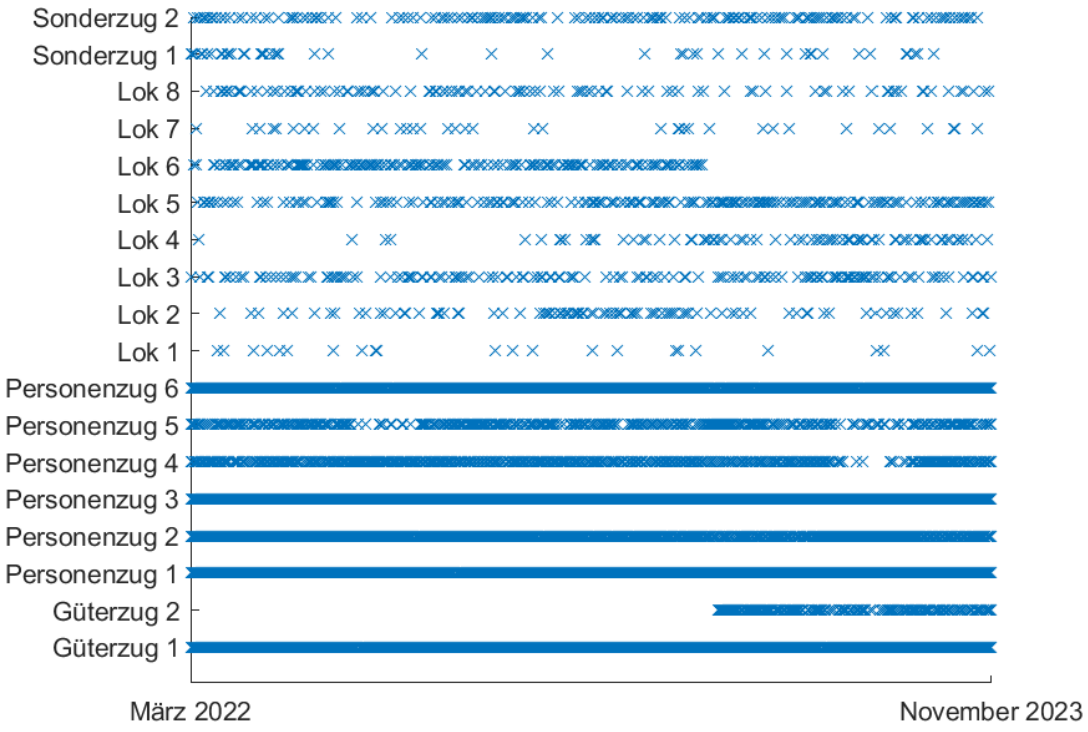


(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

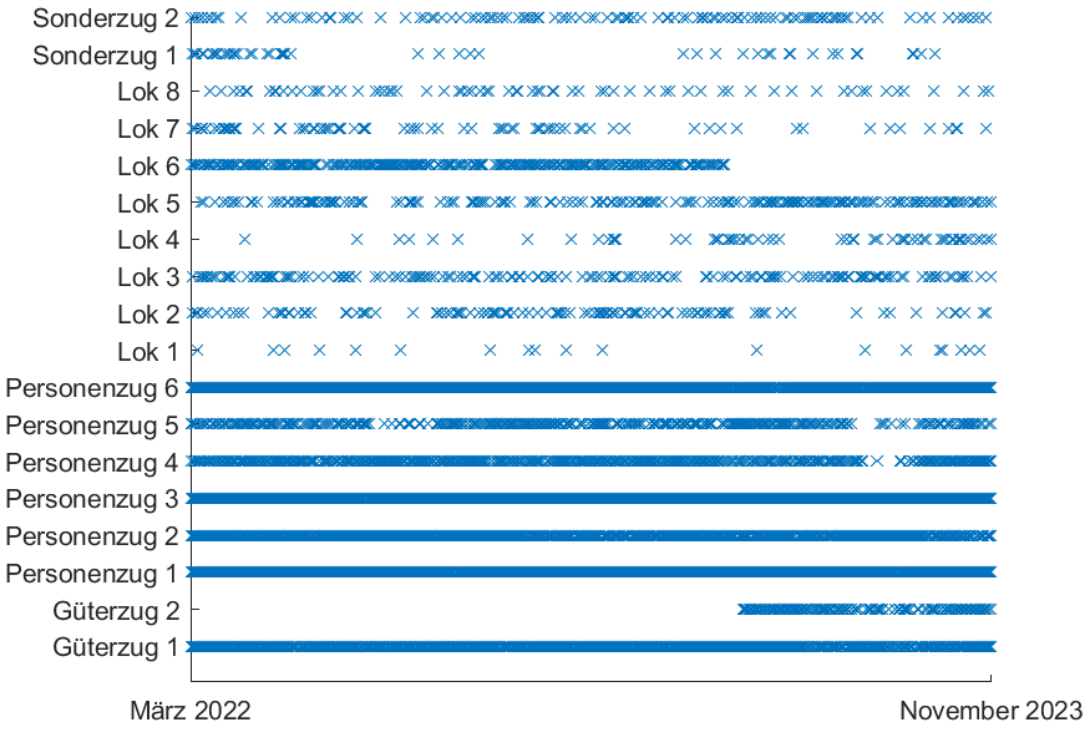
(c) Gleis 1 **(d)** Gleis 2

Abb. 5.2: Fahrgeschwindigkeit und Schienentemperatur der betrachteten Strecke im Zeitverlauf

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

Abb. 5.3: Zugtypen der betrachteten Strecke im Zeitverlauf

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 6

Auswertung

In diesem Kapitel werden die Auswertung der Messdaten beschrieben und die daraus ableitbaren Erkenntnisse dargestellt. Die Anzahl jener Zugüberfahrten, deren gemessene Schwingungsverläufe in der Berechnung der Ergebnisse berücksichtigt wurden, wird in diesem Kapitel als Stichprobe bezeichnet.

6.1 Datenqualität

Da die Messung unabhängig von der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde, kann die Einhaltung der Vorgaben gemäß Norm DIN CEN/TR 16891 [3] nur bedingt überprüft werden. Aus den zur Verfügung gestellten Schienenbeschleunigungen wurden gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] Gleisabklingraten ermittelt. Sowohl die Schwingungsverläufe als auch die berechneten Gleisabklingraten wurden dabei auf ihre Plausibilität geprüft. Konkret werden daher 2 Kriterien definiert, welche sich bei Bearbeitung der Messdaten als zweckmäßig erwiesen haben:

1. Plausibilität der (Schienen-)Beschleunigungsverläufe
2. Unterer Grenzwert für die maximale Schienenbeschleunigung

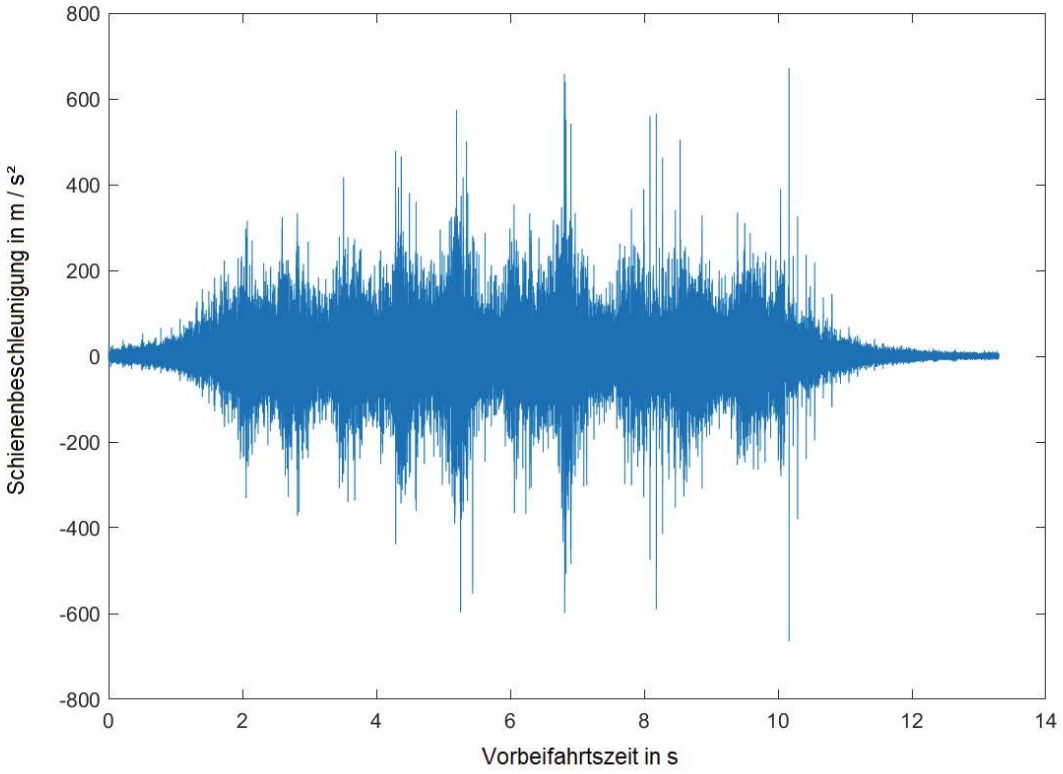
Die genannten Kriterien werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Auch die ermittelten Gleisabklingraten, wurden anhand typischer Merkmale (Pinned-pinned-Frequenz, foot-flapping etc.) auf augenscheinliche Plausibilität geprüft. Genauere Informationen zu den typischen Merkmalen finden sich in Kapitel 3.3.3.2.

6.1.1 Plausibilität der (Schienen-)Beschleunigungsverläufe

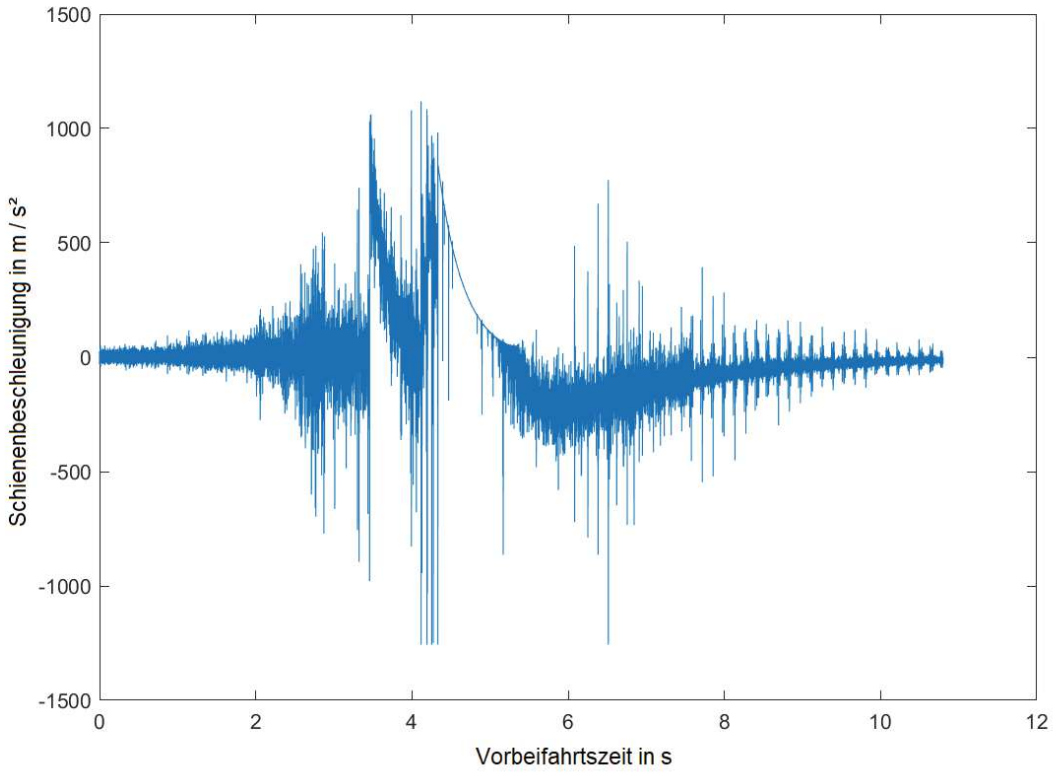
Grundsätzlich ist die Plausibilität der Schwingungsverläufe ohne Einblick in die Messdurchführung schwierig und kann nur anhand von augenscheinlichen Mängeln in den aufgezeichneten Messschrieben erfolgen. Ein charakteristischer Verlauf der Schienenbeschleunigung ist in Abbildung 6.1a dargestellt und zeichnet sich durch näherungsweise Symmetrie sowie erkennbare Spitzen im Bereich der Achsen auf. Bei Analyse der zur Verfügung gestellten Daten konnten in zahlreichen Zeitverläufen grobe Abweichungen vom typischen Schwingungsmuster festgestellt werden, welche anhand von Asymmetrien und der Abwesenheit von Oszillationen erkennbar sind (Beispiel, siehe Abbildung 6.1b). Die Ursache für derartige Mängel in den Messdaten konnte nicht endgültig eruiert werden. Es scheint jedoch eine Beschleunigungsabhängigkeit vorzuliegen, da bei hohen Schienenbeschleunigungen vermehrt Unstimmigkeiten in den Messschrieben vorliegen. Der Schweregrad dieser atypischen Schwingungsverläufe variiert stark innerhalb der Messdaten und kann wenige Zehntelsekunden aber auch ganze Zugvorbeifahrten umfassen. Um derartige Auffälligkeiten identifizieren zu können, wird das Faltungsintegral $a_m(t)$ der Zeitreihe der Schienenbeschleunigungen $a(t)$ mit einer Rechteckfunktion $R(t)$ gebildet (gleitender Durchschnitt):

$$a_m(t) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot a(t-\tau) d\tau \tag{6.1}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Plausibler Schienenschwingungsverlauf



(b) Unplausibler Schienenschwingungsverlauf

Abb. 6.1: Beispielhafte, vertikale Schwingungsverläufe aus den zur Verfügung gestellten Messdaten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

mit

$$N = F_s \cdot t_R = 32000 \cdot 0.2 = 6400 \tag{6.2}$$

F_s beschreibt hierbei die Abtastrate und t_R entspricht einem Zeitfenster von 0.2 s. Die in Gleichung 6.1 vorkommende Rechteckfunktion $R(t)$ wird folgendermaßen definiert:

$$R(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, N] \\ 0, & t \notin [0, N] \end{cases} \tag{6.3}$$

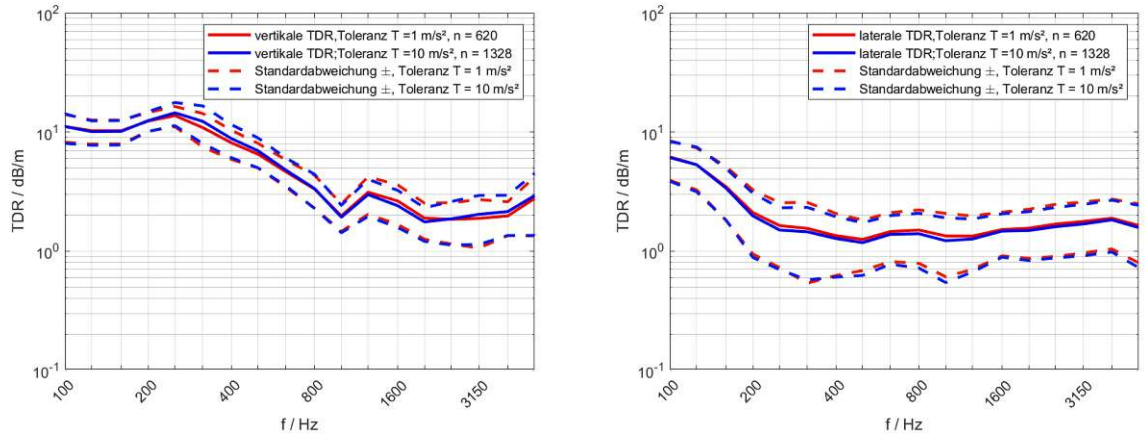
Für einen um die x-Achse ideal symmetrischen Schwingungsvorgang gilt $a_m(t) \approx 0$, starke Abweichungen vom Nullpunkt sind ein Indiz für potentielle Fehlmessungen im Sinne von Abbildung 6.1b. Um eine automatisierte Ausmusterung unplausibler Verläufe zu ermöglichen, wurde das Plausibilitätskriterium mit der Toleranz T

$$\max(|\ a_m\ |) \leq T \tag{6.4}$$

eingeführt. Die Auswahl eines plausiblen Grenzwertes für die Toleranz T muss die Konsequenzen einer unsachgemäßen Auswahl mitberücksichtigen: Ein zu hoher Wert für T beinhaltet das Risiko, das Endergebnis durch fehlerhafte Messungen zu verfälschen, wohingegen zu geringe Werte für T plausible Verläufe fälschlicherweise aussortieren, die Stichprobengröße reduzieren und dadurch negative Einflüsse auf die Repräsentativität der Arbeit mit sich bringen können. Um derartigen Mängeln vorzubeugen wird der Wert für die Toleranz T anhand einer Varianzanalyse ausgewählt. In einem ersten Schritt wird anhand einer manuellen Analyse der Schwingungsverläufe jenes Toleranzmaß bestimmt, ab welchem die analysierten Verläufe keine erkennbaren Mängel mehr aufweisen. Dies ist bei einem Wert von $T \approx 10$ m/s^2 der Fall. In einem zweiten Schritt wird die Pass-by-Gleisabklingrate für Gleis 1, bei einer konstanten Schienentemperatur ermittelt um temperaturbedingte Schwankungen auszuschließen. Die Ermittlung der Pass-by-Gleisabklingrate erfolgt bei 0 °C ±0.5 °C. Anschließend wird die Pass-by-Gleisabklingrate zweimal berechnet: Das erste Mal werden nur Schwingungsverläufe für $T = 1$ m/s^2 berücksichtigt, beim zweiten Berechnungsdurchlauf wird die Toleranz auf $T = 10$ m/s^2 angehoben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.2 dargestellt und zeigen geringe Unterschiede (< 1 dB/m) in den ermittelten Gleisabklingraten. Tief- sowie Hochpunkte sind in allen Durchläufen an den gleichen Stellen erkennbar und plausibel. Im Bereich niederer Frequenzen kann überall eine hohe Gleisabklingrate ausgemacht werden, die Pinned-pinned-Frequenz ist bei ungefähr 1000 Hz anzutreffen und auch der Effekt des foot-flappings ist in allen Durchläufen – in den hohen Frequenzen – erkennbar. Zusätzlich wird im Rahmen der Varianzanalyse die Streuung der Ergebnisse gegenüber gestellt, wobei als Maß für die Streuung die Standardabweichung pro Frequenzband herangezogen wird. Auch hier halten sich die Unterschiede in Grenzen, bemerkenswerterweise sind die Standardabweichungen des zweiten Berechnungsdurchlaufes ($T = 10$ m/s^2) in einigen Frequenzbändern sogar unter jenen des ersten Durchlaufs ($T = 1$ m/s^2). Anhand dieser Ergebnisse wird die Toleranz T des Plausibilitätskriterium gemäß Gleichung 6.4 mit $T = 10$ m/s^2 festgelegt.

Die Anzahl der auf diese Weise aussortierten Verläufe der vertikalen Schienenbeschleunigung ist als sehr hoch einzustufen: Bei den Messungen sind sowohl auf Gleis 1 als auch auf Gleis 2 über 50% der vertikalen (Schienen-)Beschleunigungsmessungen betroffen. Bei den horizontalen Schienenbeschleunigungen sind derartige Verläufe weit seltener zu beobachten, was auf eine Korrelation der Häufigkeit des Messfehlers mit hohen Signalenergien hindeutet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Vertikale TDR und Standardabweichung **(b)** Laterale TDR und Standardabweichung

Abb. 6.2: Varianzanalyse der vertikalen und lateralen Pass-by-Gleisabklingrate in Abhängigkeit von T, Gleis 1, Schienentemperatur $= 0 \pm 0.5$ °C

6.1.2 Unterer Grenzwert für die maximale Schienenbeschleunigung

Die maximalen vertikalen Schienenbeschleunigungen können gemäß der DIN CEN/TR 16891 [3] Werte von bis zu 5000 m/s^2 aufweisen. In den ausgewerteten Messungen liegen die Spitzenwerte zwischen 500 m/s^2 und 1200 m/s^2, die Höchstwerte der Norm werden nicht erreicht. Unter den Messdaten konnten einige potentielle Fehlmessungen eruiert werden, deren maximalen Beschleunigungen weit unter den genannten Spitzenwerten liegen (Beispiel siehe Abbildung 6.3). Als mögliche Ursache wird eine fehlerhafte Achsenerkennung vermutet. Als Kriterium, um derartige Messfehler nicht in den automatisierten Berechnungsdurchläufen zu berücksichtigen, wurde ein Minimalkriterium für die maximale Schienenbeschleunigung von 100 m/s^2 gewählt.

6.1.3 Abweichungen zur Norm

Hinsichtlich der Ermittlung der Gleisabklingrate fordert die DIN CEN/TR 16891 [3] in Kapitel 11.1: „Die Ergebnisse müssen rechnerisch über mindestens drei Vorbeifahrten ermittelt werden. Der Mittelwert muss das arithmetische Mittel des Abklingratenpegels in jedem Terzfrequenzband sein. Ergebnisse, die sich in einem beliebigen Terzfrequenzband um mehr als 5 dB voneinander unterscheiden, sollten zumindest in dem betreffenden Frequenzbereich verworfen werden.“ [3, S. 12]. Die vorliegende Arbeit stellt hier einen Sonderfall dar, da die Gleisabklingrate in einem langen Zeitraum von zwei Jahren ermittelt wird und die mittleren Gleisabklingraten demnach aus hunderten Vorbeifahrten ermittelt werden. Welche Gleisabklingraten miteinander gemittelt werden, hängt hierbei (meistens) nicht von der zeitlichen Abfolge, sondern von definierten Parametern (Schienentemperatur, Zugtyp etc.) ab. Diese Vorgangsweise gründet auf der Annahme, dass die gemittelten Gleisabklingraten (Ergebnisse) in Abhängigkeit zu den jeweiligen Einflussparametern stark variieren können. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit auf das Verwerfen von Messdaten gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] verzichtet.

6.2 Berechnung

Die Berechnung der Pass-by-Gleisabklingrate basiert auf den Vorgaben der DIN CEN/TR 16891 [3] (siehe Kapitel 4.3.1) und wurde mit der Software Matlab durchgeführt. Die Basis der Berechnung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

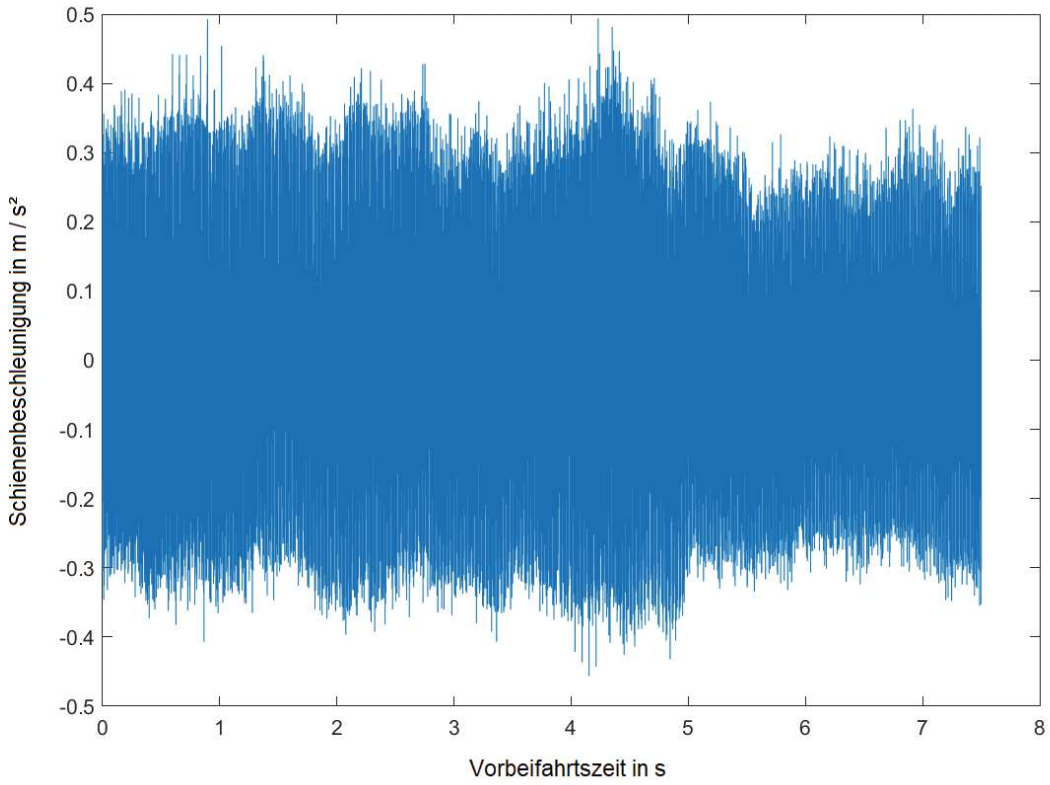


Abb. 6.3: Beispiel eines Beschleunigungssignals mit zu geringen Werten

bilden die Schienenbeschleunigungsmessungen von rd. 46700 Zugfahrten auf Gleis 1 und rd. 46150 Zugfahrten auf Gleis 2. Aufgrund der im vorherigen Kapitel definierten Plausibilitätskriterien können nicht alle Vorbeifahrten verwertet werden. Die in die Ergebnisse einfließenden Zugzahlen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Schwingungsrichtung (lateral oder vertikal) und sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tab. 6.1: Anzahl n der in der Berechnung betrachteten Zugfahrten in Abhängigkeit der Schwingungsrichtung

Gleis	Schienenbeschleunigung	berücksichtigte Zugvorbeifahrten
1	vertikal	rd. 16730
1	lateral	rd. 39540
2	vertikal	rd. 21670
2	lateral	rd. 33424

Für die Berechnung der Pass-by-Gleisabklingrate mittels Energie-Iterationsverfahren nach DIN CEN/TR 16891 [3] müssen im Wesentlichen 3 Berechnungsparameter definiert werden: die Längen L_1 und L_2 sowie die Fehlertoleranz ε. Die gewählten Berechnungsparameter sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Dies dient der besseren Vergleichbarkeit mit zukünftigen Arbeiten.

L_1 und L_2 definieren die Grenzen für die Summation der gemessen Schienenbeschleunigungen. (siehe Kapitel 4.3.1). Für L_1 gibt die DIN CEN/TR 16891 [3, S.12] den kürzesten Achsabstand eines Zuges bzw. einen Wert von 1.8 m vor: „L_1 wird als der kürzeste Achsabstand im Zug

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

(oder in einem Teil des Zuges) angenommen. Der übliche geringste Radabstand beträgt 1.8 m, wobei sich die Analyselänge L_1 von -0.9 m bis +0.9 m um jede Radposition erstreckt“. Auf Basis dieser Vorgabe wird L_1 in der vorliegenden Arbeit konstant mit $L_1 = 1.8$ m angenommen. Die in den Messdaten hinterlegten Mindestachsabstände unterschreiten diesen Wert teilweise geringfügig, was auf Messunsicherheiten zurückzuführen ist. Dies kann in der Berechnung bei benachbarten Achsen dazu führen, dass Signalbereiche doppelt einfließen, wenn der angenommene kleinste Mindestachsabstand L_1 über dem gemessenen Achsabstand liegt. Um Berechnungsfehler klein zu halten, werden nur Zugfahrten von Zügen berücksichtigt, deren kleinster, gemessener Achsabstand mehr als 1.75 m beträgt. Bei Annahme einer (vereinfachten) gleichmäßigen Verteilung der quadratischen Schienenbeschleunigung entspricht dies einem Rechenfehler von 2.78 %. Da bei der Achsabstandsbestimmung Messunsicherheiten dieser Größenordnung bei weniger als einem Prozent der betrachteten Zugüberfahrten vorkommen, kann die daraus resultierende Beeinflussung der Ergebnisse als vernachlässigbar angenommen werden. Die Zahlen in Tabelle 6.1 berücksichtigen diesen Umstand bereits und beinhalten lediglich Zugüberfahrten von Zügen, deren gemessener Mindestachsabstand über 1.75 m liegt.

Hinsichtlich der zu wählenden Länge L_2 ist die DIN CEN/TR 16891 [3] uneindeutig. An einer Stelle wird angegeben, dass die vorgenommenen Approximationen des Berechnungsverfahrens nur für ausreichend große L_2 gelten. Als Beispiel für ausreichende Längen nennt die DIN CEN/TR 16891 [3] „eine Zuglänge oder die Länge eines Fahrzeugs/einer Gruppe von Fahrzeugen“. An anderer Stelle heißt es: Die „Gleisabklingrate wird aus der Bewertung des Verhältnisses der integrierten Schwingungsenergie über eine Länge L_2 abgeleitet, möglicherweise einschließlich der gesamten Vorbeifahrt des Zuges [...] “ [3, S. 12]. Bild 2a [3, S. 14] suggeriert wiederum eine Länge L_2, die zwischen der Zuglänge und jener Länge liegt, welche vom gesamten Messsignal umfasst wird: Hier wird L_2 nicht durch eine Länge definiert sondern durch einen Zeitraum T, welcher der Länge L_2 entspricht (siehe [3, S. 13]). Die unklaren Vorgaben der Norm sprechen für die Annahme, dass die Beeinflussung des Ergebnisses durch die Wahl von L_2 als äußerst gering ist. Aus Sicht des Autors scheint es sinnvoll die Länge L_2 so groß zu wählen, dass die Schwingungsamplitude innerhalb der Integrationsgrenzen bereits zu großen Teilen abklingen kann. L_2 wird daher größer als die Zuglänge gewählt. In Anlehnung an Bild 2a [3, S. 14] der Norm wird L_2 durch einen Zeitraum T definiert. Diese Zeit T entspricht bei allen Zügen der Zugvorbeifahrt inklusive einem Zeitfenster von 1.5 Sekunden vor und nach der ersten bzw. letzten Achse. Bei manueller Durchsicht der Messschriebe wurde festgestellt, dass ein Großteil der gemessenen Schienenbeschleunigung innerhalb dieses Zeitfensters abklingt.

Für die Fehlertoleranz ε gibt die DIN CEN/TR 16891 [3] einen Wert von $\varepsilon = 0.1$ vor (siehe Kapitel 4.3.1).

Tab. 6.2: Eingangparameter für die Berechnung der Gleisabklingrate mittels DIN CEN/TR 16891

Eingangparameter	Gewählter Wert
L_1	1.8 m
L_2	Entspricht T
T	3 s + Zeitraum der Überfahrt von erster bis letzter Achse
ε	0.1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.3 Gegenüberstellung der Messverfahren

Die vorliegende Arbeit trachtet unter anderem danach, die Datengrundlage für die Beurteilung der unterschiedlichen Messverfahren von Gleisabklingraten zu erweitern. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Impulshammermethode und des Energie-Iterationsverfahren miteinander verglichen. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7.

6.3.1 Randbedingungen

Die Impulshammer-Messungen stammen vom 23.11.2022 und wurden im Bereich der zuvor erwähnten Messstelle (Kapitel 5) auf beiden Gleisen durchgeführt. Der Autor dieser Arbeit war nicht an der Durchführung beteiligt.

Die Messung mittels Energie-Iterationsverfahren (EIV) umfasst alle Zugvorbeifahrten des genannten Tages. Auf Gleis 1 sowie auf Gleis 2 wurden an diesem Messtag insgesamt 80 Zugvorbeifahrten registriert, unplausible Messungen wurden aussortiert. Die Anzahl der berücksichtigten Zugvorbeifahrten ist in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tab. 6.3: Anzahl n der berücksichtigten Zugvorbeifahrten für das EIV am 23.11.2022

Gleis	Schienenbeschleunigung	Zugvorbeifahrten gesamt	berücksichtigte Zugvorbeifahrten
1	vertikal	77	31
1	lateral	77	23
2	vertikal	74	14
2	lateral	74	24

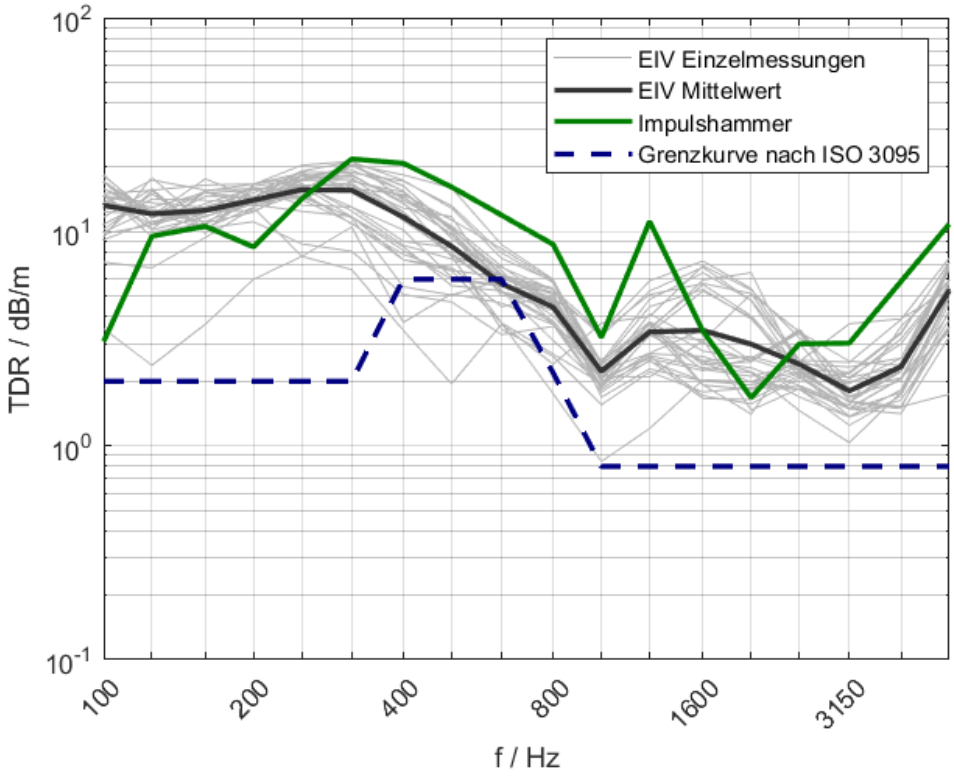
Die konkrete Uhrzeit der Messung der Gleisabklingrate mittels Impulshammer ist dem Autor nicht dezidiert bekannt. Aufgrund einer einmaligen und – für diese Strecke – ungewöhnlich langen Unterbrechung der Zugvorbeifahrten im Zeitraum zwischen 09:00 und 11:30 (Gleis 1) bzw. 12:30 Uhr (Gleis 2) kann davon ausgegangen werden, dass die Impulshammermessungen in diesem Zeitbereich stattgefunden haben müssen. Die Schienentemperatur lag in diesem Zeitraum zwischen −2.8 °C und 2.0 °C ($\Delta T = 4.8$ °C). Die Tagesschwankungen der Schienentemperaturen betrugen am Messtag 6.4 °C (−3.3 °C ... 3.1 °C). Es wird daher angenommen, dass der Einfluss der Temperatur den Vergleich der beiden unterschiedlichen Messverfahren nicht maßgeblich beeinflusst.

6.3.2 Vertikale Gleisabklingrate

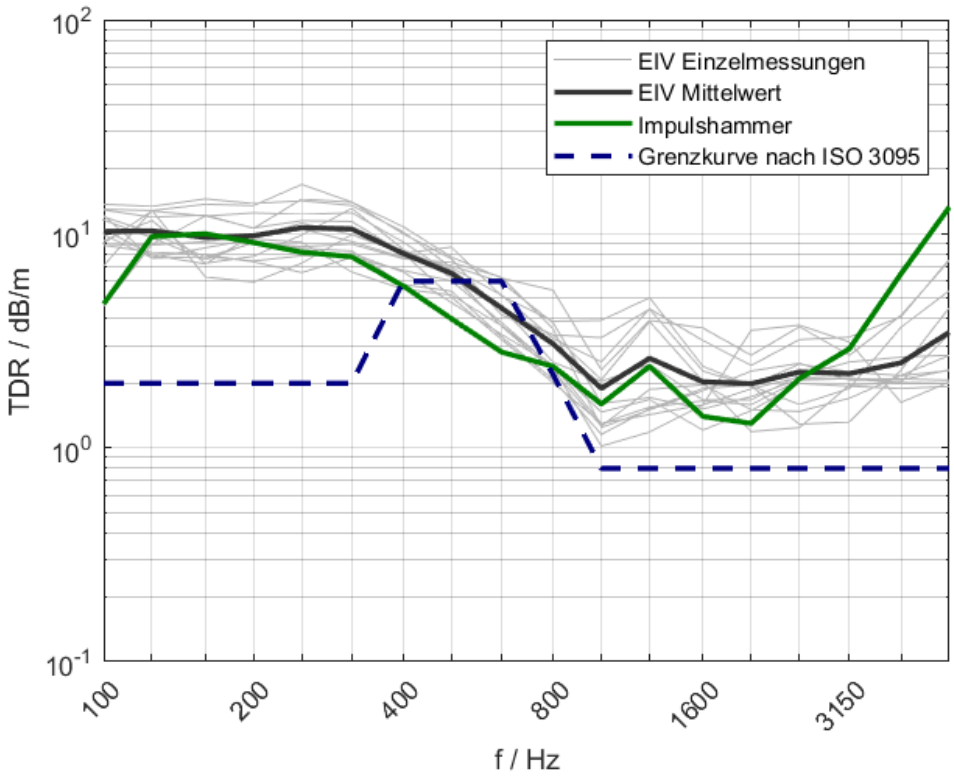
Die vertikalen Gleisabklingraten für Gleis 1 und 2 sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Zur besseren Einordnung ist die vertikale Grenzkurve nach ISO 3095 [6] eingefügt. Bei der EIV-Messung sind sowohl die Ergebnisse der einzelnen Zugvorbeifahrten, als auch der gemittelte Wert dargestellt, welcher der Pass-by-Gleisabklingrate entspricht. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der Berechnung zwischen den einzelnen Zugvorbeifahrten stark variieren können. Auffallend ist die Gegenüberstellung zwischen den Einzelmessungen und der gemittelten Pass-by-Gleisabklingrate in den Terzbandmittenfrequenzen 1600 Hz und 2000 Hz (Gleis 1) bzw. bei 1250 Hz (Gleis 2), da hier zwei Häufungsbereiche in den Einzelmessungen identifizierbar sind, welche eindeutig über bzw. eindeutig unter der mittleren Pass-by-Gleisabklingrate liegen.

Bei Betrachtung der vertikalen Gleisabklingrate von Gleis 2 können zwischen beiden Messverfahren vor allem auf qualitativer Ebene viele Gemeinsamkeiten identifiziert werden. Die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Vertikale Gleisabklingraten, Gleis 1



(b) Vertikale Gleisabklingraten, Gleis 2

Abb. 6.4: Vergleich der vertikalen Gleisabklingraten in Abhängigkeit des gewählten Messverfahrens, Messungen vom 23.11.22

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Pinned-pinned-Frequenz wird sowohl vom Impulshammer als auch mittels Pass-by-Analyse (siehe EIV Mittelwert in Abbildung 6.4) bei ca. 1000 Hz verortet, was durchaus plausibel erscheint. Anstiege und Abfälle der Gleisabklingrate stimmen überein. Es ist anhand der größeren Gradienten ersichtlich, dass die Impulshammer-Gleisabklingrate größeren Schwankungen im Spektrum unterliegt. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass durch die (arithmetische) Mittelung mehrerer Vorbeifahrten beim EIV eine gewisse Glättung der Ergebnisse erzielt wird, wohingegen sich die Impulshammer-Gleisabklingrate aus einem einzelnen Messdurchlauf ergibt. Quantitativ liegen die Pass-by-Gleisabklingraten von Gleis 2 größtenteils über den Impulshammer-Gleisabklingraten. Relativ gesehen beträgt die Pass-by-Gleisabklingrate das ein- bis zweifache der Impulshammer-Gleisabklingrate. Über 3150 Hz steigt die Impulshammer-Gleisabklingrate stark an, wohingegen bei der Pass-by Abklingrate nur ein leichter Anstieg zu bemerken ist.

Der Vergleich der Gleisabklingraten auf Gleis 1 zeigt geringfügig schlechtere Übereinstimmungen zwischen den Messverfahren. Vor allem im Bereich zwischen 1000 und 2000 Hz sind gröbere Abweichungen in den Verläufen zu erkennen. Während die Impulshammer-Gleisabklingrate in diesem Bereich zwei markante lokale Minima und einen markantes lokales Maximum aufweist, ist bei der Pass-by Abklingrate nur ein lokales Minimum im Bereich der Pinned-pinned-Frequenz bei 1000 Hz zu beobachten. Quantitativ liegt die Pass-by Abklingrate in großen Teilen des Frequenzspektrums unter der Impulshammer Abklingrate, die Differenzen betragen bis zu 5 dB/m. Relativ gesehen beträgt die Pass-by-Gleisabklingrate zumeist das 0.5- bis 2-fache der Impulshammer-Gleisabklingrate.

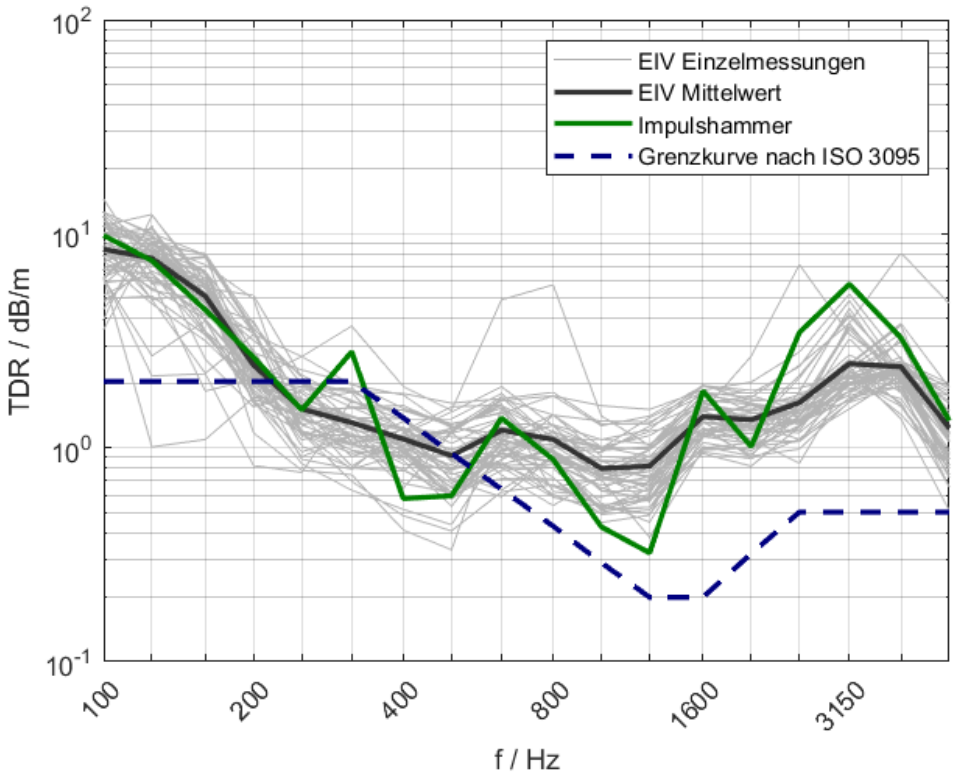
6.3.3 Laterale Gleisabklingrate

Die lateralen Gleisabklingraten für Gleis 1 und 2 sind in Abbildung 6.5 inklusive der Grenzkurve nach ISO 3095 [6] dargestellt. Im Vergleich mit den vertikalen Gleisabklingraten zeigen beide Messverfahren größere qualitative und quantitative Unterschiede. Besonders auffällig ist die starke Variabilität der lateralen Impulshammer-Gleisabklingrate zwischen verschiedenen Frequenzbereichen, wohingegen die Pass-by-Gleisabklingrate nur sehr geringen Schwankungen unterliegt. Letztere können nicht auf die Mittelung der EIV-Messungen zurückzuführen sein, da auch die Einzelmessungen geringere Variabilitäten aufweisen. Die mittels Energie-Iterationsverfahren bestimmten Gleisabklingraten liegen hierbei mehrheitlich über jenen aus den Impulshammer-Messungen. Werden die Größenordnungen zwischen Pass-by und direkter Gleisabklingrate betrachtet (siehe Abbildung 6.5), sind große Unterschiede zwischen Gleis 1 und 2 erkennbar. Die Pass-by-Gleisabklingrate auf Gleis 1 liegt mehrheitlich um den Faktor 1 – 2 über der Impulshammer-Gleisabklingrate. Auf Gleis 2 unterscheiden sich die beiden Gleisabklingraten um ein Vielfaches (Faktoren zwischen 2 und 6).

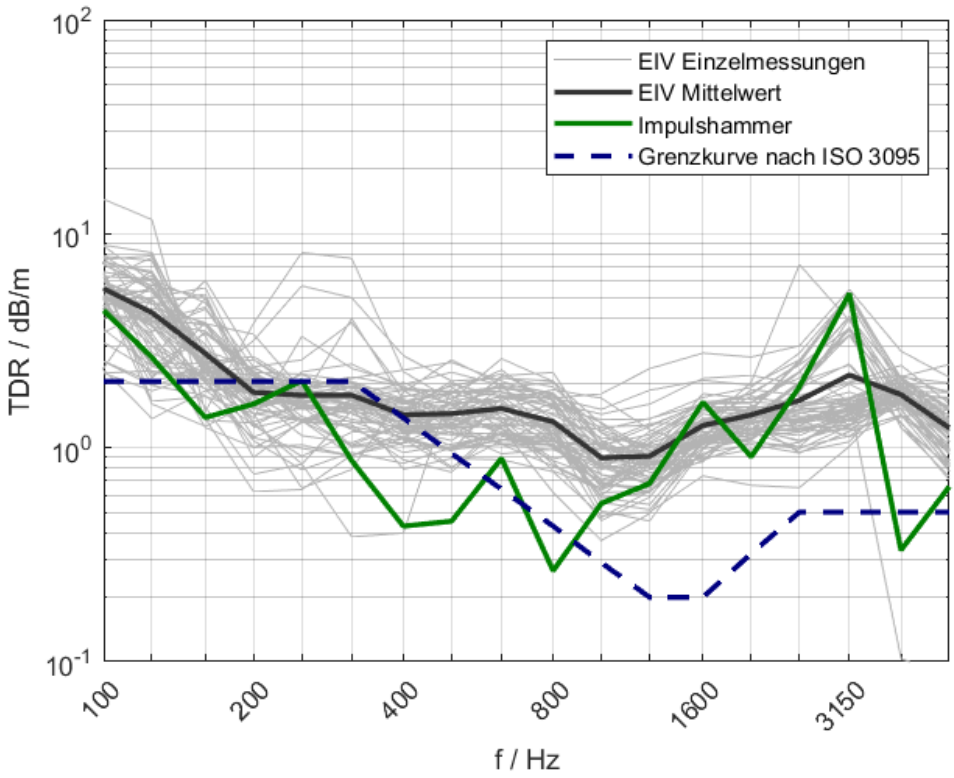
6.4 Einflussfaktor Schienentemperatur

In den bereitgestellten Messdaten ist jeder Zugvorbeifahrt eine Schienentemperatur zugeordnet. Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem den Einfluss unterschiedlicher Schienentemperaturen auf die Pass-by-Gleisabklingrate zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurden Pass-by-Gleisabklingraten näherungsweise gleicher (Schienen-)Temperaturen arithmetisch gemittelt (mittlere Pass-by-Gleisabklingraten) und gegenübergestellt. Diese Bereiche näherungsweise gleicher Temperatur umfassen eine Bandbreite von 1 °C und werden im Folgenden als Temperaturbänder bezeichnet. Das 15 °C-Temperaturband umfasst demnach alle Schienentemperaturen zwischen 14.5 °C und 15.5 °C, das 16 °C-Temperaturband den Bereich von 15.5 °C bis 16.5 °C usw. Diese Vorgangsweise wurde für vertikale sowie laterale Gleisabklingraten auf Gleis 1 und 2 angewendet. Es wird aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 5.3 angenommen, dass die Verteilung anderer Einflussfaktoren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Laterale Gleisabklingrate, Gleis 1



(b) Laterale Gleisabklingrate, Gleis 2

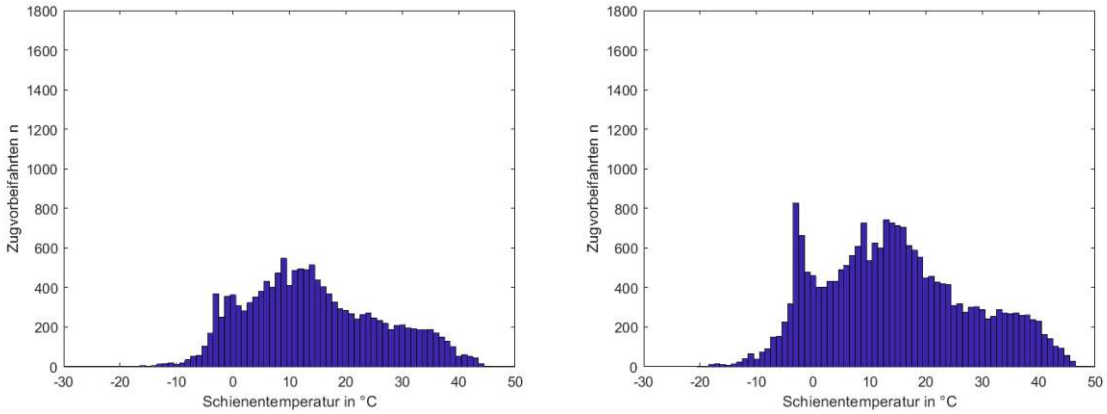
Abb. 6.5: Vergleich der laterale Gleisabklingraten in Abhängigkeit des gewählten Messverfahrens, Messungen vom 23.11.22

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

wie Fahrgeschwindigkeit und Belastung der Schiene eine gleichmäßige Verteilung innerhalb der einzelnen Temperaturbänder aufweisen und keine nennenswerte Verzerrung der Ergebnisse bewirken.

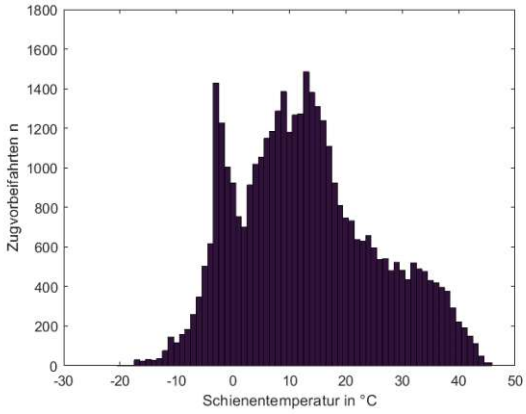
6.4.1 Randbedingungen

Aufgrund der Plausibiltätskriterien gemäß Kapitel 6.1.1 bis 6.1.3 unterscheiden sich die für in die Berechnung einfließenden Zugfahrten zwischen Gleis 1 und 2 bzw. zwischen der lateralen und vertikalen Gleisabklingrate: Für die Ermittlung der vertikalen Pass-by Abklingraten auf Gleis 1 konnten rd. 14000 Zugvorbeifahrten genutzt werden, bei Gleis 2 sind es rd. 21500. Für die Berechnung der lateralen Gleisabklingraten konnten wesentlich mehr Schwingungsverläufe berücksichtigt werden, hier liegt der Stichprobenumfang bei über 39300 Fahrten auf Gleis 1 bzw. bei über 33200 Fahrten auf Gleis 2. Dementsprechend kann auch die Verteilung der Schienentemperatur auf den jeweiligen Gleisen etwas variieren. Die Häufigkeit der unterschiedlichen Schienentemperaturen ist in Abbildung 6.6 in Form von Histogrammen dargestellt.

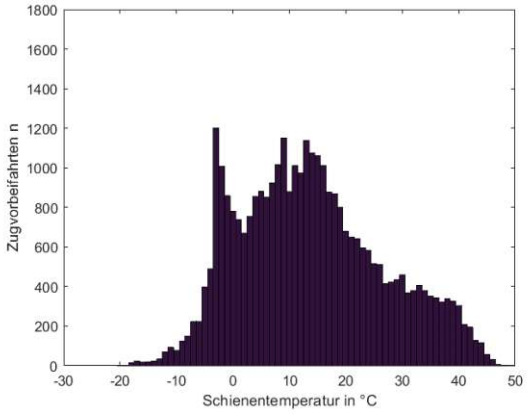


(a) Gleis 1, vertikale TDR, $n = 13938$

(b) Gleis 2, vertikale TDR, $n = 21554$



(c) Gleis 1, laterale TDR, $n = 39351$

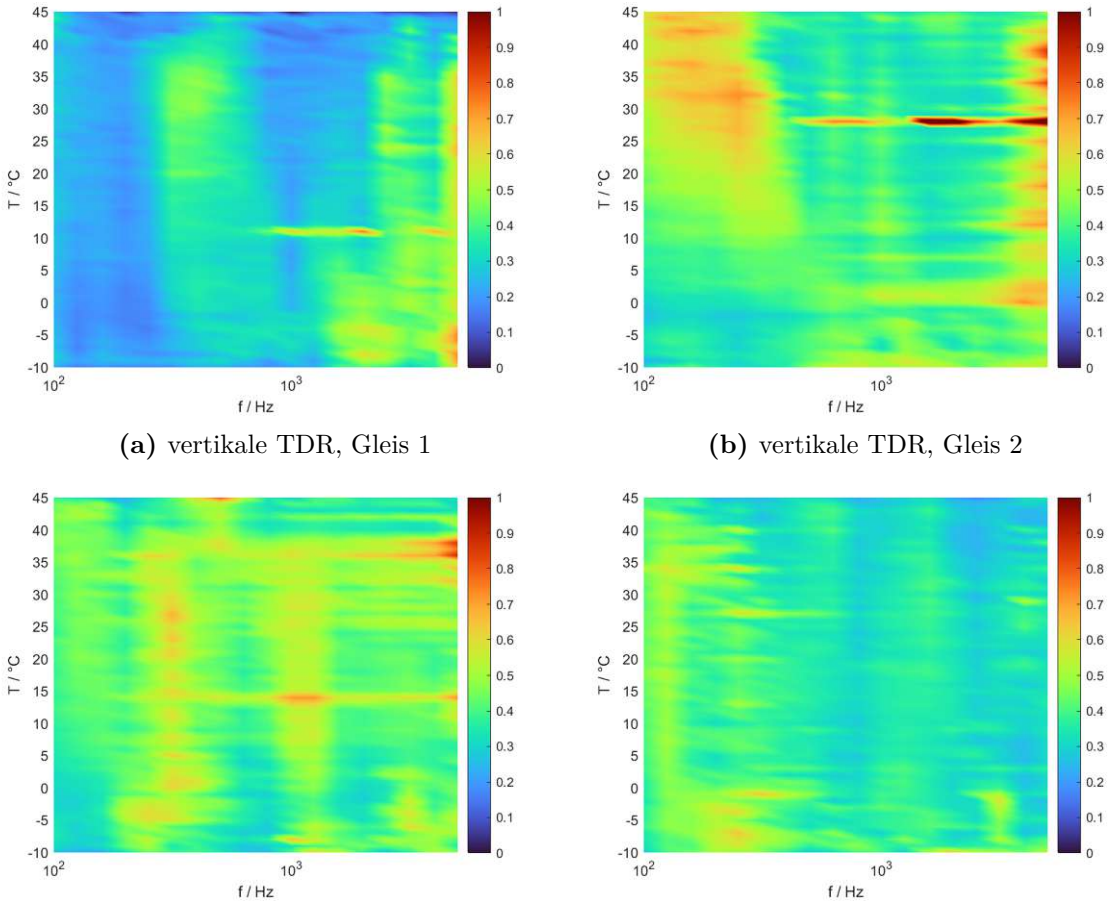


(d) Gleis 2, laterale TDR, $n = 33212$

Abb. 6.6: Häufigkeit unterschiedlicher Schienentemperaturen

Aus den Histogrammen lässt sich erkennen, dass die mittleren Pass-by-Gleisabklingraten in den Temperaturbändern von –5 °C bis 35 °C stets aus mehreren 100 Zugvorbeifahrten ermittelt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) vertikale TDR, Gleis 1

(b) vertikale TDR, Gleis 2

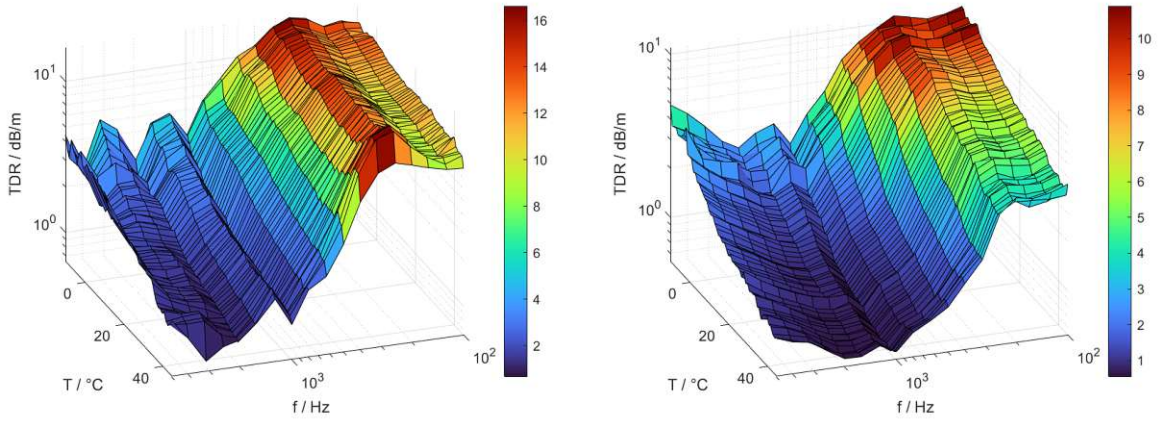
(c) laterale TDR, Gleis 1

(d) laterale TDR, Gleis 2

Abb. 6.7: Variationskoeffizient (dimensionslos)

Für die Beurteilung der Streuung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Höhe der Gleisabklingrate stark frequenzabhängig ist und die höchsten Werte tendenziell bei geringen Frequenzen auftreten. Daher empfiehlt es sich, die Streuung anhand des Variationskoeffizienten (Standardabweichung bezogen auf das arithmetische Mittel) zu beurteilen. Dies ermöglicht die Darstellung der Streuung ohne die Höhe der zugrunde liegenden mittleren Gleisabklingrate kennen zu müssen. Die ermittelten Variationskoeffizienten für jedes Terzband findet sich in Abbildung 6.7. Bei Betrachtung der Streuung der vertikalen Gleisabklingrate auf Gleis 1 (siehe Abbildung 6.7a) zeichnen sich niedrige Frequenzen (< 160 Hz) durch eine geringe relative Streuung aus (Variationskoeffizient < 30 %). Hohe Frequenzen (> 2000 Hz) weisen einen Variationskoeffizienten von über 50 % auf. Im dominanten Frequenzbereich des Schienenanteils liegt der Variationskoeffizient größtenteils zwischen 20 % und 50 %. Ein Zusammenhang zwischen der Streuung und der Schienentemperatur lässt sich nicht erkennen. Die vertikale Gleisabklingrate auf Gleis 2 (Abbildung 6.7b) unterscheidet sich grundsätzlich durch eine höhere Streuung: Der Variationskoeffizient liegt hier (im Frequenzbereich des dominanten Schienenanteils) ungefähr zwischen 30 % und 60 %, in hohen und niedrigen Frequenzen erreicht er Werte von über 70 %. Auch hier ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der gemessenen Schienentemperatur und der Streuung der Ergebnisse beobachtbar. Hervorzuheben ist hier die außergewöhnlich hohe Streuung im 28 °C-Temperaturband (siehe Abbildung 6.7b), die nicht durch eine geringe Stichprobe (n=306) erklärt werden kann. Die laterale Gleisabklingrate zeigt auf beiden Gleisen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

Abb. 6.8: Temperaturabhängigkeit der vertikalen Pass-by-Gleisabklingrate

Variationskoeffizienten zwischen 30 und 70 %, wobei auf Gleis 1 tendenziell größere Streuungsmaße zu erkennen sind.

6.4.2 Vertikale Gleisabklingrate

Die Auswertung der gemittelten, vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten zeigt eine klare Abhängigkeit von der gemessenen Schienentemperatur (siehe Abbildung 6.8a und 6.8b). Je höher die gemessene Schienentemperatur, desto geringer fällt die berechnete Gleisabklingrate aus. Nur auf Gleis 1 kann im Bereich niedriger Frequenzen kein Zusammenhang zwischen der Gleisabklingrate und der Schienentemperatur identifiziert werden. Das Spektrum der Pass-by-Gleisabklingrate bleibt qualitativ weitgehend gleich, Tiefpunkte und Hochpunkte sind in allen Temperaturbändern in den gleichen Frequenzbändern aufzufinden. Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass die Gleisabklingraten auf Gleis 1 wesentlich über jenen auf Gleis 2 liegen, obwohl die Zwischenlagen nach Angaben der Österreichischen Bundesbahnen die gleiche Zwischenlagensteifigkeit aufweisen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.3.2, insbesondere mit den Impulshammer-Vergleichsmessungen.

Um den Zusammenhang zwischen der Pass-by-Gleisabklingrate und der zum Zeitpunkt der Messung vorhandenen Schienentemperatur zu modellieren, wird eine Kurvenanpassung mittels der Methode der kleinsten Quadrate vorgenommen. Die detaillierten Ergebnisse für die Terzbänder von 400 Hz bis 5000 Hz sind in Abbildung 6.9a für Gleis 1 und in Abbildung 6.9b für Gleis 2 dargestellt. Jeder (blaue) Datenpunkt entspricht der (arithmetisch) gemittelten Pass-by-Gleisabklingrate aller Zugvorbeifahrten innerhalb des jeweiligen Temperaturbandes.

Anhand von Abbildung 6.9 lässt sich erkennen, dass eine Kurvenanpassung mittels Polynomfunktion vom Grad 2 eine gute Übereinstimmung mit den ermittelten, vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten ergibt. Dies gilt insbesondere für Temperaturen über 0 °C, im Bereich niedriger Temperaturen sind die Abweichungen vom Kurvenmodell wesentlich größer. Einen Ausreißer bilden die Ergebnisse des 5000 Hz Terzbandes auf Basis der Messungen von Gleis 1. Hier könnte die Temperaturabhängigkeit vereinfacht auch mittels linearer Regression nachgebildet werden. Ein Nachteil der Modellierung als Polynomfunktion zweiten Grades ist, dass bei Fortführung des Temperaturstrahls über Schienentemperaturen von 45 °C ein Anstieg der Gleisabklingrate prognostiziert wird. Vergleichbar gute Ergebnisse liefert eine Modellierung als Polynomfunktion vom Grad 3 (siehe Abbildung A.1 im Anhang A). Dies bietet den Vorteil, dass hiermit auch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 6.4: Koeffizienten der angepassten Polynomfunktion ax^2 + bx + c, vertikale Gleisabklingrate

f	a, Gleis 1	b, Gleis 1	c, Gleis 1	a, Gleis 2	b, Gleis 2	c, Gleis 2
400 Hz	0.0033	-0.1776	9.5494	0.0030	-0.2363	6.0757
500 Hz	0.0016	-0.1559	8.0040	0.0031	-0.2064	4.2990
630 Hz	0.0009	-0.1019	5.2936	0.0019	-0.1250	2.8420
800 Hz	0.0011	-0.1009	4.0453	0.0013	-0.0894	2.1887
1000 Hz	0.0009	-0.0619	2.3621	0.0008	-0.0542	1.4992
1250 Hz	0.0014	-0.0997	3.5893	0.0011	-0.0729	1.9006
1600 Hz	0.0012	-0.0943	3.1640	0.0008	-0.0578	1.6278
2000 Hz	0.0003	-0.0360	1.9753	0.0006	-0.0484	1.6250
2500 Hz	0.0010	-0.0774	2.6347	0.0008	-0.0624	1.9265
3150 Hz	0.0018	-0.1140	3.0243	0.0010	-0.0731	2.1893
4000 Hz	0.0003	-0.0313	2.1982	0.0012	-0.0885	2.5622
5000 Hz	-0.0002	-0.0476	3.7512	0.0015	-0.1107	3.1298

bei hohen Temperaturen eine Reduktion der Gleisabklingrate prognostiziert werden kann. Ein Nachteil ist die geringfügig höhere Komplexität. Für Temperaturen unter 10 °C liefert eine lineare Regression ebenfalls sehr gute Ergebnisse, diese kann durch Weglassen des quadratischen Terms der Polynomfunktion zweiten Grades erhalten werden (siehe Tabelle 6.4). In Tabelle 6.4 sind die Polynomkoeffizienten, für die optimale Anpassung im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate, für jedes Frequenzband dargestellt. Die Koeffizienten zeigen, dass die optimale Kurvenanpassung gemäß Methode der kleinsten Quadrate stark von der betrachteten Frequenz abhängig ist.

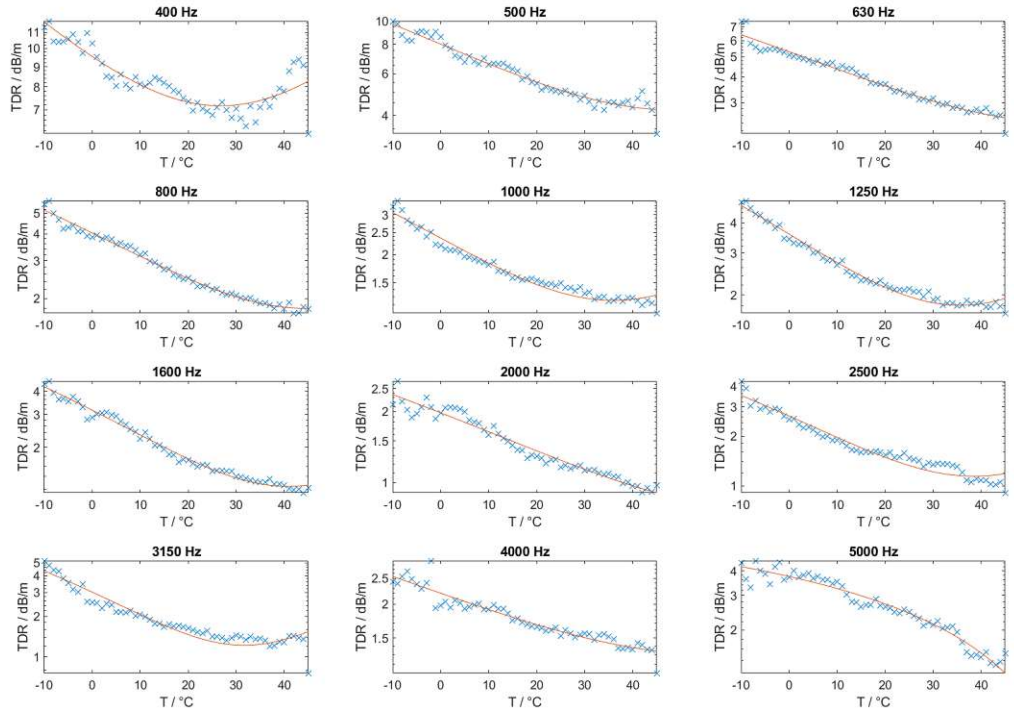
Es ist anzumerken, dass die zugrunde liegende Stichprobe an Zugvorbeifahrten n vom jeweiligen Temperaturband abhängig ist. Gerade in den Randbereichen < -5 °C und > 35 °C sind deutlich weniger Vorbeifahrten erfasst (siehe Abbildung 6.6). Daher unterliegen diese Bereiche höheren statistischen Unsicherheiten.

6.4.3 Laterale Gleisabklingrate

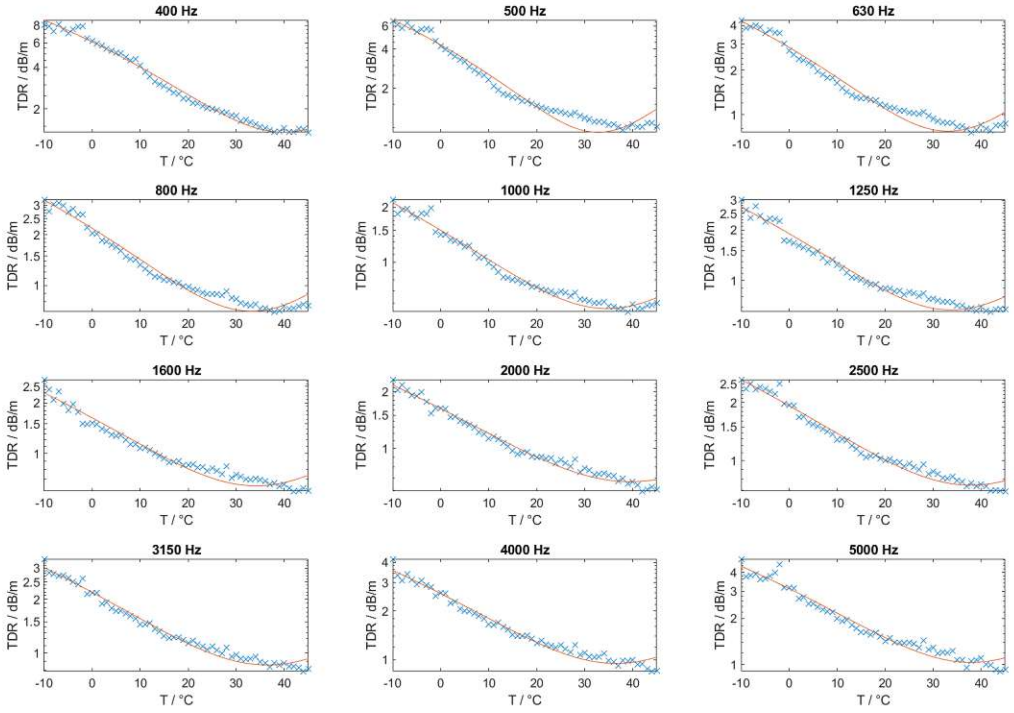
Die Auswertung der gemittelten, lateralen Gleisabklingraten zeigt ebenfalls einen klaren Zusammenhang zu der gemessenen Schienentemperatur (siehe Abbildung 6.10a bis 6.10b). Der qualitative Frequenzverlauf der TDR bleibt auch hier weitgehend gleich. Einen Ausreißer diesbezüglich bilden die Temperaturbänder über 40 °C von Gleis 2, wo ein Plateau bei Frequenzen unter 200 Hz erkennbar ist, welches bei niedrigeren Temperaturen nicht auftritt. Ein zweiter Ausreißer betrifft die Gleisabklingrate bei einer Frequenz von 3150 Hz im −2 °C-Temperaturband. Dies ist insofern bemerkenswert, da er auf beiden Gleisen in der lateralen Gleisabklingrate auftritt und nicht durch eine zu geringe Stichprobe erklärbar ist (n>1000).

Bei Vergleich der lateralen Gleisabklingrate beider Gleise, kann analog zur vertikalen Gleisabklingrate ein höheres Dämpfungsverhalten von Gleis 1 abgeleitet werden. Auch für die Messergebnisse der lateralen Gleisabklingrate wird eine Kurvenanpassung mittels der Methode der kleinsten Quadrate vorgenommen (siehe Abbildung 6.11). Ebenfalls lassen sich gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messung mittels polynomialer Kurvenanpassung zweiten Grades erreichen. Dies gilt insbesondere für die Messergebnisse in Gleis 2, welche eine besonders gute Übereinstimmung mit der modellierten Polynomfunktion zeigen und sich diesbezüglich stark von den Ergebnissen von Gleis 1 unterscheiden. Letztere weisen größere Diskrepanzen zwischen den Messpunkten und der gefitteten Polynomfunktion auf. Dies zeigt sich vor allem in den Frequenz-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



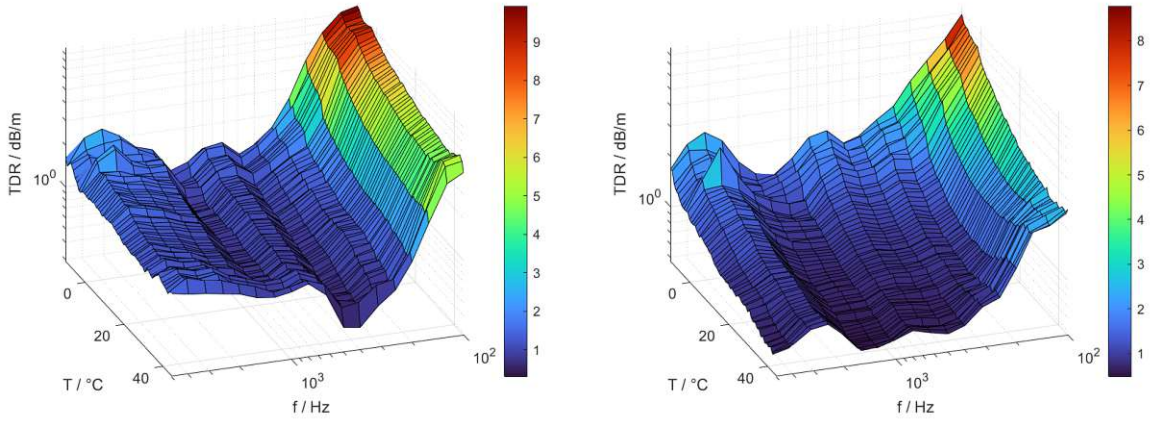
(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

Abb. 6.9: Modellierung der Temperaturabhängigkeit der vertikalen Pass-by-Gleisabklingrate mittels polynomialer Kurvenanpassung vom Grad 2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

Abb. 6.10: Temperaturabhängigkeit der lateralen Pass-by-Gleisabklingrate

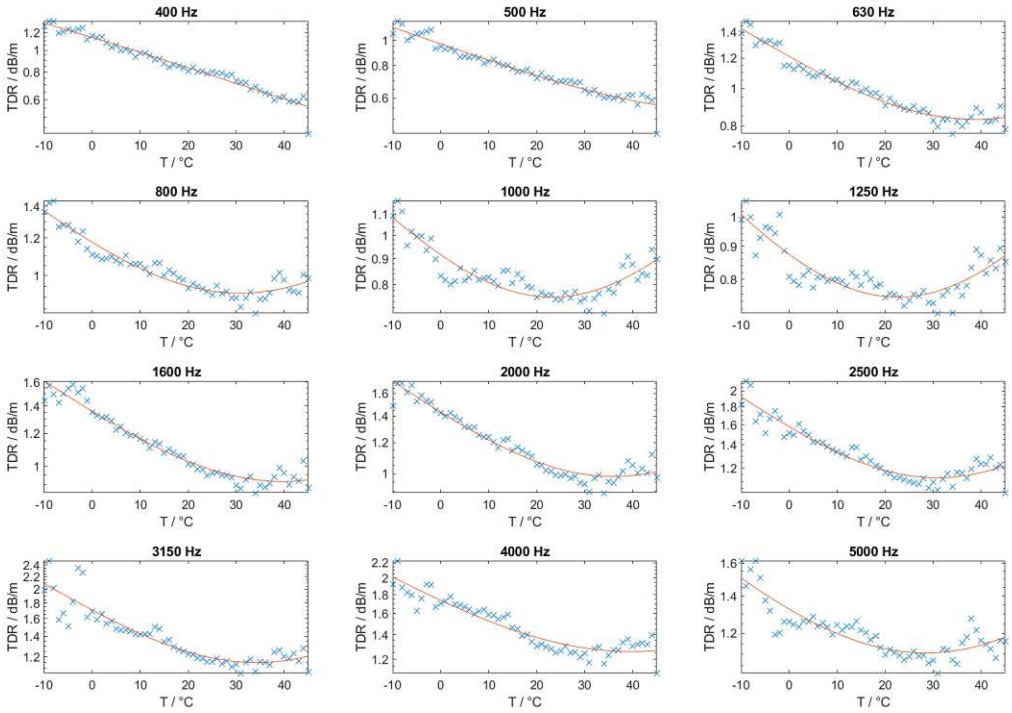
Tab. 6.5: Koeffizienten der angepassten Polynomfunktion $ax^2 + bx + c$, laterale Gleisabklingrate

f	a, Gleis 1	b, Gleis 1	c, Gleis 1	a, Gleis 2	b, Gleis 2	c, Gleis 2
400 Hz	0.0001	-0.0172	1.1410	0.0005	-0.0385	1.3461
500 Hz	0.0001	-0.0140	0.9681	0.0005	-0.0351	1.3045
630 Hz	0.0002	-0.0194	1.2108	0.0007	-0.0478	1.4759
800 Hz	0.0003	-0.0167	1.1759	0.0007	-0.0427	1.3560
1000 Hz	0.0003	-0.0138	0.9163	0.0004	-0.0300	1.0988
1250 Hz	0.0002	-0.0110	0.8754	0.0003	-0.0219	1.0313
1600 Hz	0.0003	-0.0222	1.3590	0.0003	-0.0220	1.0434
2000 Hz	0.0003	-0.0251	1.4347	0.0003	-0.0229	1.1545
2500 Hz	0.0005	-0.0294	1.5800	0.0004	-0.0313	1.5000
3150 Hz	0.0005	-0.0328	1.7091	0.0006	-0.0442	1.7269
4000 Hz	0.0003	-0.0242	1.7391	0.0005	-0.0422	1.5473
5000 Hz	0.0003	-0.0154	1.3256	0.0003	-0.0255	1.1895

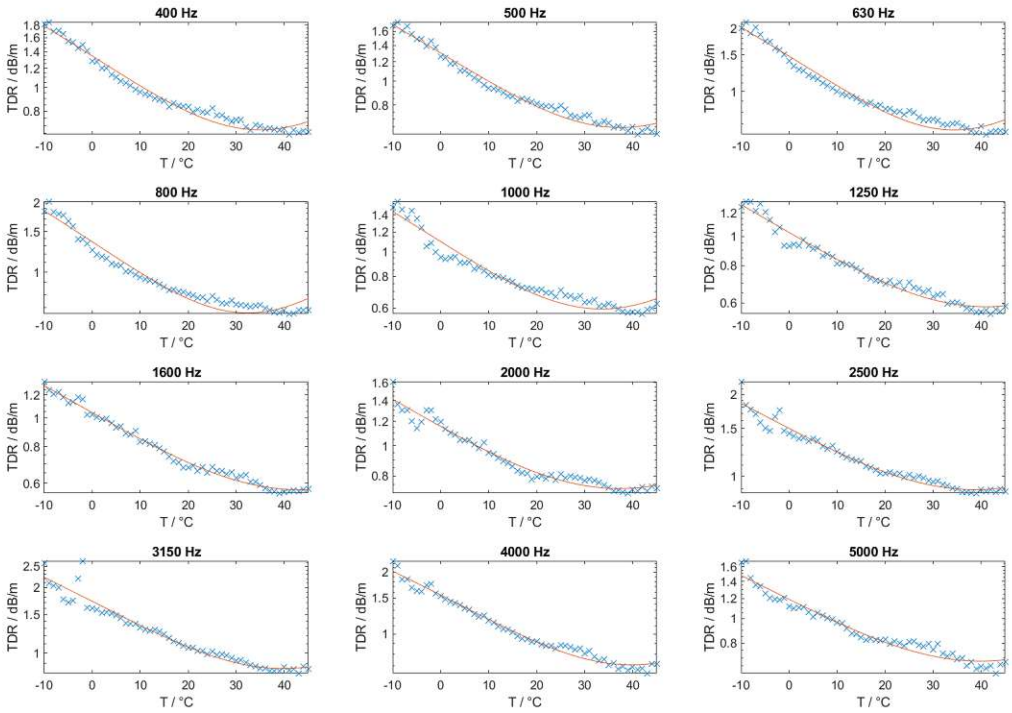
bändern bei 1000 Hz, 1250 Hz und 5000 Hz. Hervorzuheben ist die Tendenz der Gleisabklingraten von Gleis 1, bei hohen Temperaturen (>35 °C) anzusteigen. Diesbezüglich unterscheiden sie sich deutlich von den Ergebnissen auf Gleis 2, wo der Abstiegstrend der Gleisabklingrate auch bei hohen Temperaturen tendenziell fortgeführt wird, als auch von den Ergebnissen der vertikalen Gleisabklingrate. Vergleichbar gute Ergebnisse liefert eine Modellierung als Polynomfunktion vom Grad 3 (siehe Abbildung A.2, Anhang A), wobei hier der Anstieg der Gleisabklingrate bei hohen Temperaturen (siehe Gleis 1) schlechter modelliert werden kann.

Die Polynomkoeffizienten der Kurvenanpassung sind in Tabelle 6.5 dargestellt. Es ist auf Basis der Koeffizienten leicht erkennbar, dass die Temperaturabhängigkeit der lateralen Gleisabklingrate nicht so stark ausgeprägt ist wie jene der vertikalen Gleisabklingraten. Zudem sind Unterschiede zwischen den einzelnen Frequenzen erkennbar, die Variabilität ist jedoch wesentlich geringer als bei den vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

Abb. 6.11: Modellierung der Temperaturabhängigkeit der lateralen Pass-by-Gleisabklingrate mittels polynomialer Kurvenanpassung vom Grad 2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.5 Wahl der langen Länge L_2

Die lange Länge L_2 definiert die Integrationsgrenzen des Energie-Iterationsverfahren. Eine erhöhtes L_2 erhöht die aufsummierte, quadratische Schienenbeschleunigung nach Gleichung 4.5. Diese findet als Nenner Eingang in die Berechnung des Verhältnisses R der Schwingungsenergie nach Gleichung 4.3. Eine Erhöhung von L_2 führt daher zu einer Reduktion von R und in weiterer Folge auch zu einer verminderten Pass-by-Gleisabklingrate. Die Norm DIN CEN/TR 16891[3] gibt keine konkreten Bandbreiten für die Wahl von L_2 vor, weshalb der Einfluss einer Variation der langen Länge L_2 in diesem Abschnitt untersucht wird. Fokus liegt hierbei nicht auf der Suche eines quantifizierbaren Zusammenhangs zwischen L_2 und der Pass-by-Gleisabklingrate. Vielmehr soll die Frage beantwortet werden, ob die Wahl des Parameters einen starken Einfluss auf die Pass-by-Gleisabklingraten hat. Als Vorgangsweise wird die Gegenüberstellung der mittleren Pass-by-Gleisabklingrate bei Variation von L_2 gewählt.

6.5.1 Variantenvergleich

Es werden zwei Varianten miteinander verglichen: Variante 1 ist die Standardkonfiguration, anhand derer die mittleren Pass-by-Gleisabklingraten in anderen Kapiteln dieser Arbeit berechnet wurden. Diese Variante definiert das Gesamtintegral nicht anhand der Länge, sondern anhand der Zeit, über welche das Gesamtintegral integriert wird. Sie wird derart gewählt, dass von einem nahezu vollständigen Abklingen der Schwingungsamplitude innerhalb von L_2 auszugehen ist. Sie stützt sich lose an den (nicht sehr konkreten) Empfehlungen der DIN CEN/TR 16891. Eine genauere Erläuterung dieser Vorgangsweise findet sich in Kapitel 6.2.

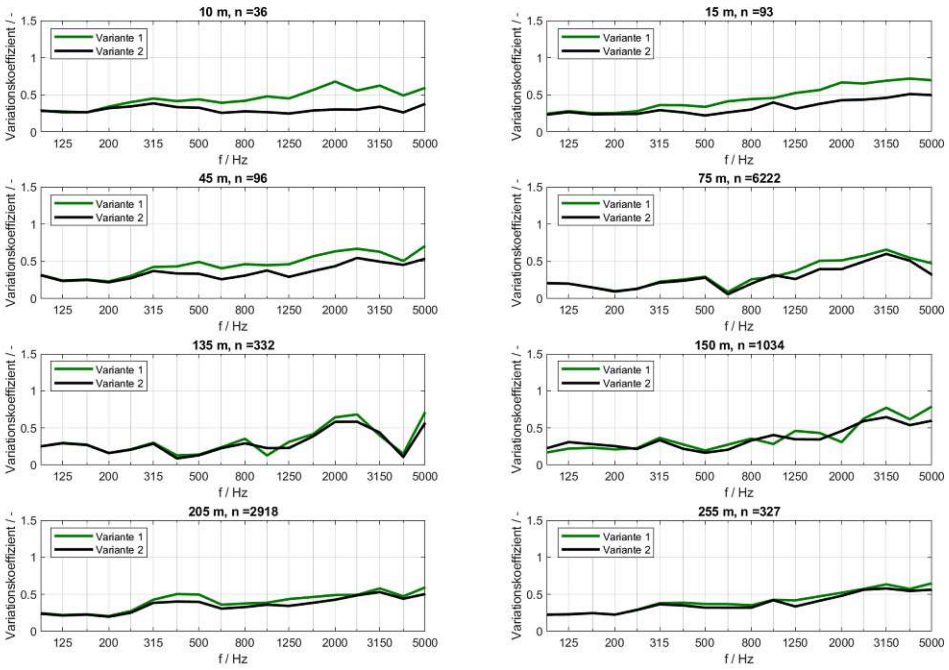
Bei Variante 2 beträgt die Gesamtintegrationszeit in etwa die Länge des vorbeifahrenden Zuges, von der ersten bis zur letzten Achse. Auf beiden Seiten werden 1.8 m hinzugerechnet, dies entspricht der Länge L_1. Ziel dieser Vorgangsweise ist L_2 möglichst kurz zu halten aber dennoch den Bereich unmittelbar vor bzw. nach der ersten bzw. letzten Achse noch miteinzubeziehen.

Bei (zu) kleiner Wahl von L_2 ist davon auszugehen, dass ein Teil der Schienenbeschleunigung der Zugüberfahrt nicht in die Berechnung der Gleisabklingrate einfließt und damit zu erhöhten Gleisabklingraten führt. Dies ist vor allem bei kleinen Zuglängen von Relevanz, da hier von relativ niedrigen aufsummierten, quadratischen Beschleunigungen der Zugvorbeifahrt auszugehen ist. Der Anteil von nicht berücksichtigter (Schienen-)Beschleunigung zur Gesamtbeschleunigung ist demnach potenziell höher als bei langen Zügen. Auf Basis dieser Annahme wird der Variantenvergleich bei unterschiedlichen Zuglängen vorgenommen. Zu diesem Zweck werden alle gemessenen Zugfahrten ähnlicher Zuglänge zusammengefasst. Es wird eine Bandbreite von 5 m gewählt. Eine angegebene Zuglänge von 10 m beinhaltet demnach Züge mit einer Länge zwischen 7.5 m und 12.5 m, eine Zuglänge von 15 m beinhaltet Zuglängen zwischen 12.5 und 17.5 m usw. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden nicht alle berechneten Zuglängen dargestellt. Die Auswahl erfolgt einerseits nach der Höhe der Stichprobe und hat anderseits eine näherungsweise Gleichverteilung der vorhandenen Zuglängen (bis zu einer Länge von 255 m) zum Ziel. Größere Zuglängen werden aufgrund der geringen Stichprobe nicht detailliert behandelt, der Einfluss von L_2 kann in diesem Längenbereich jedoch als vernachlässigbar gering betrachtet werden.

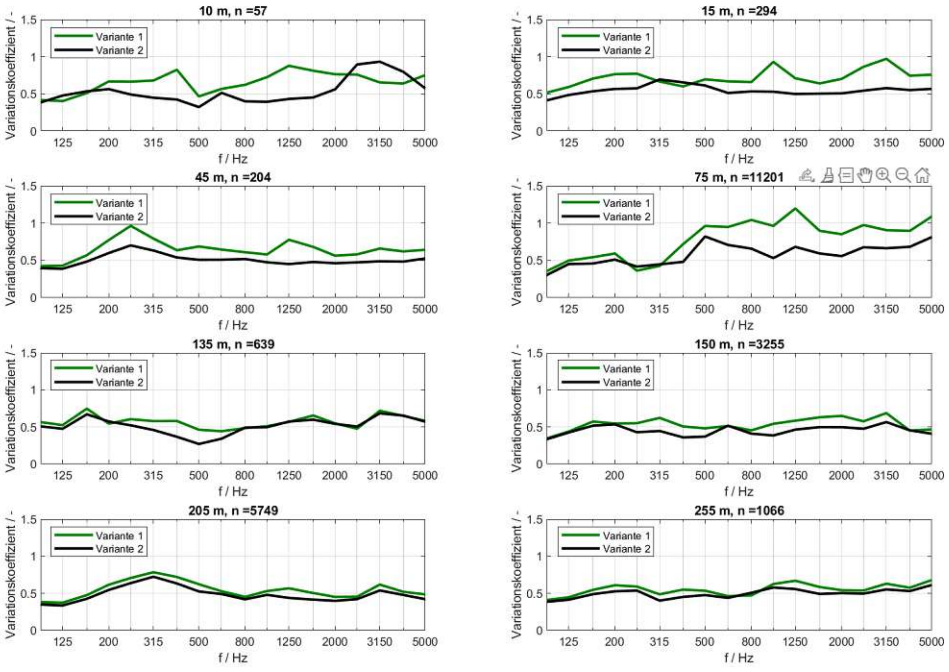
6.5.2 Randbedingungen

Die Ergebnisse der Berechnung entsprechen auch in diesem Szenario mittleren Pass-by-Gleisabklingraten, welche zumeist auf Basis mehrerer hundert Vorbeifahrten berechnet wurden. Die Anzahl der überfahrenden Züge findet sich in Tabelle 6.1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) vertikale Gleisabklingraten



(b) laterale Gleisabklingraten

Abb. 6.12: Streuung der Pass-by-Gleisabklingraten auf Gleis 1 in Abhängigkeit von L_2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Streuung wird erneut anhand des Variationskoeffizienten beurteilt und ist in Abbildung 6.12 für Gleis 1 sowie in Abbildung 6.13 für Gleis 2 dargestellt. Es zeigen sich eindeutige Unterschiede zwischen den betrachteten Varianten. Variante 2 weist bei beiden Gleisen und über alle Zuglängen hinweg verhältnismäßig ähnliche Streuungsmaße auf. Die Größenordnung der Variationskoeffizienten liegt ungefähr zwischen 30 % und 60 %. Eine Ausnahme bildet die vertikale Gleisabklingrate auf Gleis 1. Hier sind bei niedrigen Frequenzen tendenziell niedrigere Variationskoeffizienten (<30 %) zu beobachten. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Streuungsmaß und der Zuglänge erkennbar.

Bei Variante 1 ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten und der Zuglänge identifizierbar: Vor allem bei kleinen Zuglängen (<45 m) ist eine stark erhöhte Streuung beobachtbar (Variationskoeffizient bis über 100 %). Bei höheren Zuglängen gleichen sich die Ergebnisse an jene von Variante 2 an. Dieser Zusammenhang ist auf beiden Gleisen identifizierbar und betrifft sowohl die vertikale als auch die laterale Gleisabklingrate.

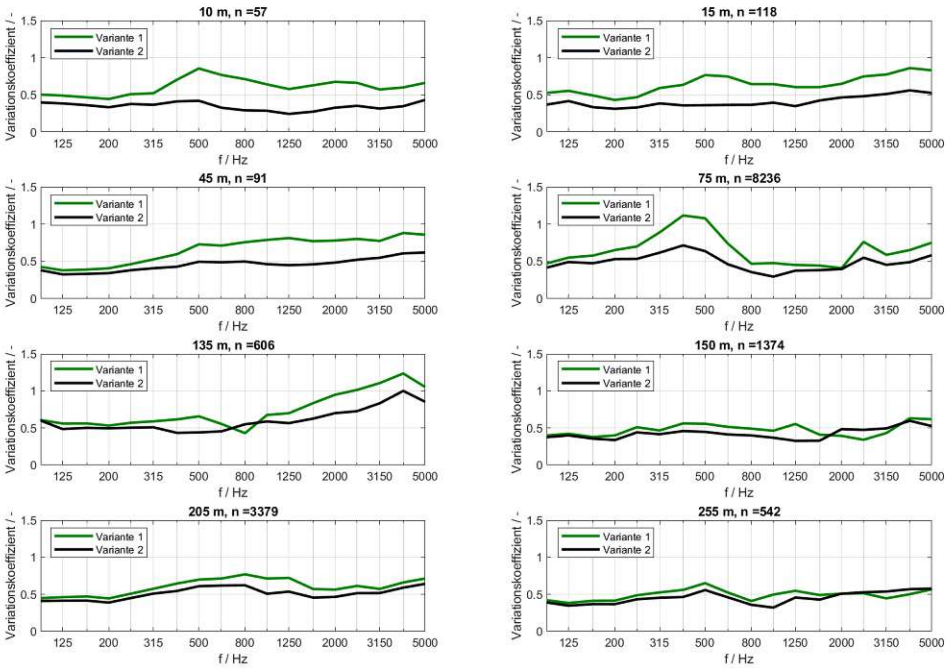
6.5.3 Vertikale Gleisabklingrate

Bei Gegenüberstellung der vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten von Variante 1 und Variante 2 zeigen sich große Unterschiede. Während die Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 1 keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Zuglänge aufweist, nimmt die Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 2 mit steigender Zuglänge deutlich ab. Dies führt zu großen relativen Unterschieden zwischen den Varianten. Die größten Abweichungen finden sich in Frequenzen zwischen 630 Hz und 4000 Hz, also in jenen Frequenzen in denen die Gleisabklingrate die niedrigsten Werte aufweist. Erwartungsgemäß liegen die Gleisabklingraten von Variante 2 deutlich unter jenen von Variante 1. Dies gilt insbesondere für sehr kleine Zuglängen bis ungefähr 15 m, wo sehr große Unterschiede in den Gleisabklingraten erkennbar sind. Ab Zuglängen von 135 m reduziert sich der Einfluss der Gleisabklingrate merklich. Der Zusammenhang ist in Abbildung 6.14 dargestellt.

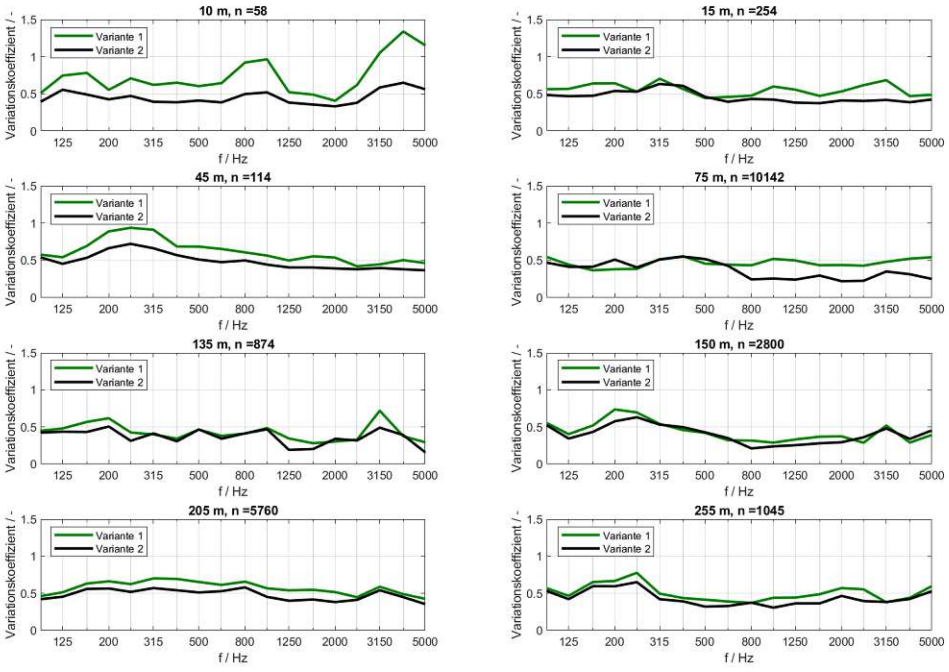
Aufgrund der niedrigen Pass-by-Gleisabklingrate bei mittleren und hohen Frequenzen wird die relative Gegenüberstellung der Ergebnisse gewählt. Hierfür wird der Quotient der Gleisabklingraten $TDR_{\mathrm{V1}}/TDR_{\mathrm{V2}}$ (siehe Abbildung 6.15) bei unterschiedlichen Zuglängen miteinander verglichen. TDR_{V1} entspricht der mittleren Pass-by-Gleisabklingrate von Variante 1 und TDR_{V2} entspricht der mittleren Pass-by-Gleisabklingrate von Variante 2. Für kleine Zuglängen (10 m und 15 m) erreicht der Quotient Werte von über 50 %. Der Zusammenhang ist auch bei wachsender Zuglängen erkennbar, fällt jedoch wesentlich geringer aus: Für Zuglängen von 75 m liegt der relative Unterschied zwischen den Gleisabklingraten von Variante 1 und Variante 2 unter 30 %, bei Längen von 255 m unter 10 %. Bei größeren Zuglängen ist davon auszugehen, dass sich der dargestellte Trend weiter fortsetzt. Aus der Gegenüberstellung der beiden Varianten ist erkennbar, dass sich die relativen Unterschiede auf beiden Richtungsgleisen geringfügig unterscheiden. Auf Gleis 2 zeigt sich hierbei ein stärkerer Einfluss der Zuglängenvariation auf die Ergebnisse. Eine mögliche Erklärung dieser Unterschiede ist die geringere Gleisabklingrate von Gleis 2 gegenüber jener von Gleis 1. Aufgrund der langsamer abklingenden Schwingungsamplitude führt eine zu geringe Wahl der Länge L_2 dazu, dass ein größerer Teil der gemessenen Schienenbeschleunigung unberücksichtigt bleibt. Dies führt zu vermeintlich höheren Pass-by-Gleisabklingraten.

Wie bereits beschrieben, wurde $L_{2,\mathrm{V1}}$ so gewählt, dass die Berechnung den Großteil der Schienenbeschleunigung beinhaltet, wohingegen bei $L_{2,\mathrm{V2}}$ ein Teil jener Beschleunigung unberücksichtigt bleibt, welcher vor und nach der letzten Achse gemessen wurde. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass sich die dargestellten Ergebnisse der größtmöglichen Auswirkung einer Parametervariation von L_2 gut annähern. Eine weitere Erhöhung von L_2 in Variante 1 dürfte demnach nur noch geringfügige Veränderungen im Ergebnis bewirken. Gleichzeitig ist eine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



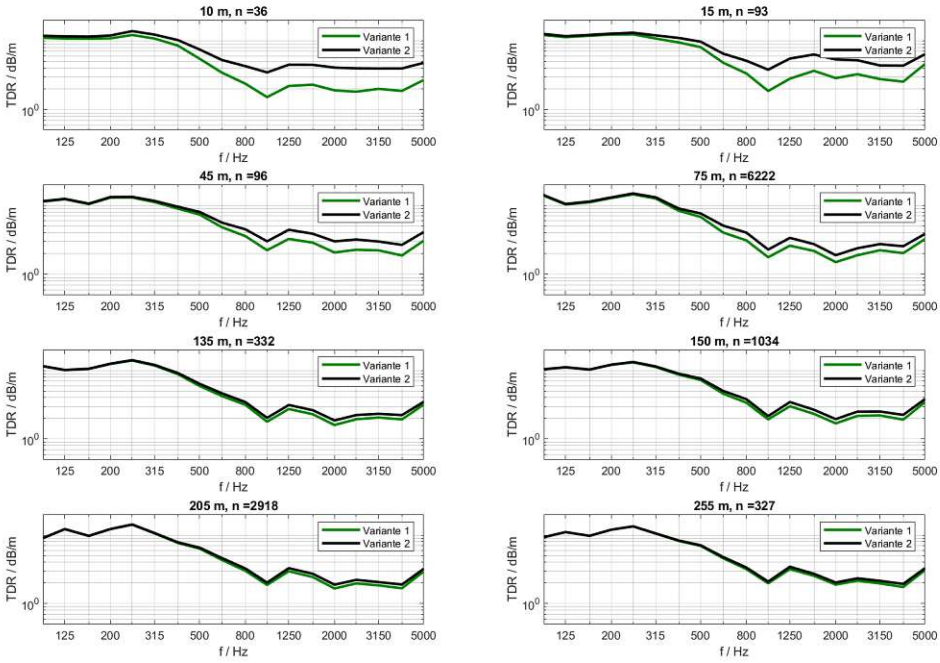
(a) vertikale Gleisabklingraten



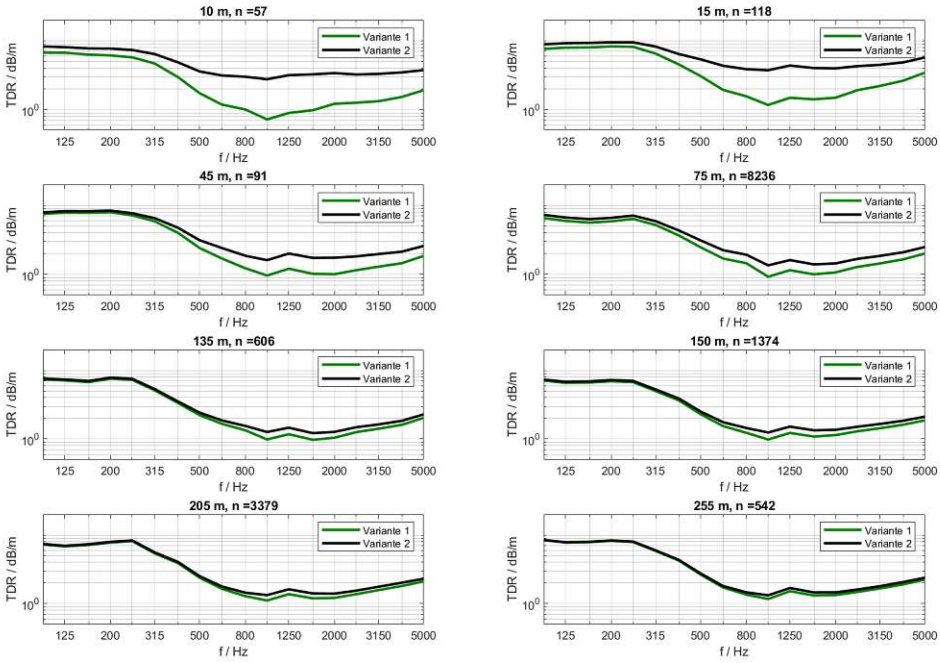
(b) laterale Gleisabklingraten

Abb. 6.13: Streuung der Pass-by-Gleisabklingraten auf Gleis 2 in Abhängigkeit von L_2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) vertikale Gleisabklingraten

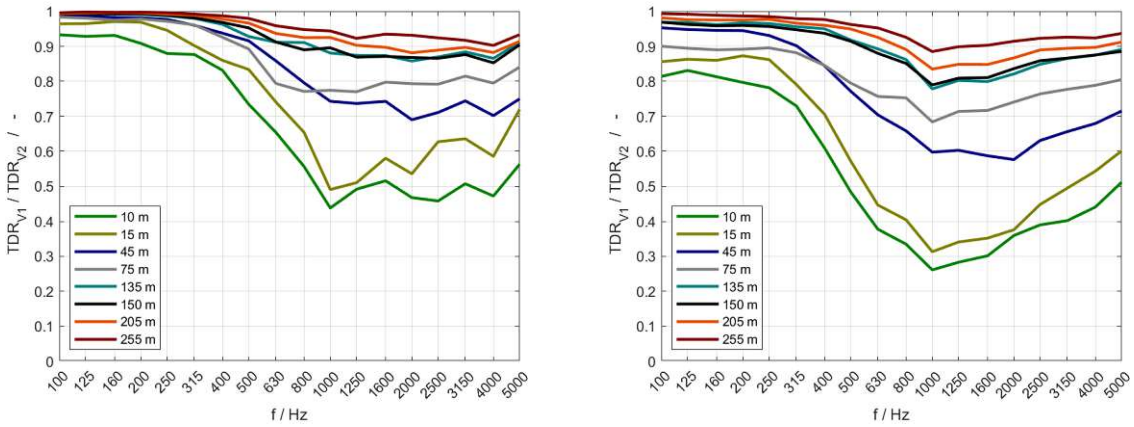


(b) laterale Gleisabklingraten

Abb. 6.14: Pass-by-Gleisabklingraten auf Gleis 1 in Abhängigkeit von L_2 und der Zuglänge

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

weitere Reduktion von L_2 in Variante 2 gemäß der Empfehlungen der DIN CEN/TR 16891 [3] nicht mehr vorgesehen.



(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

Abb. 6.15: Relativer Vergleich der mittleren, vertikalen Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 1 und 2

6.5.4 Laterale Gleisabklingrate

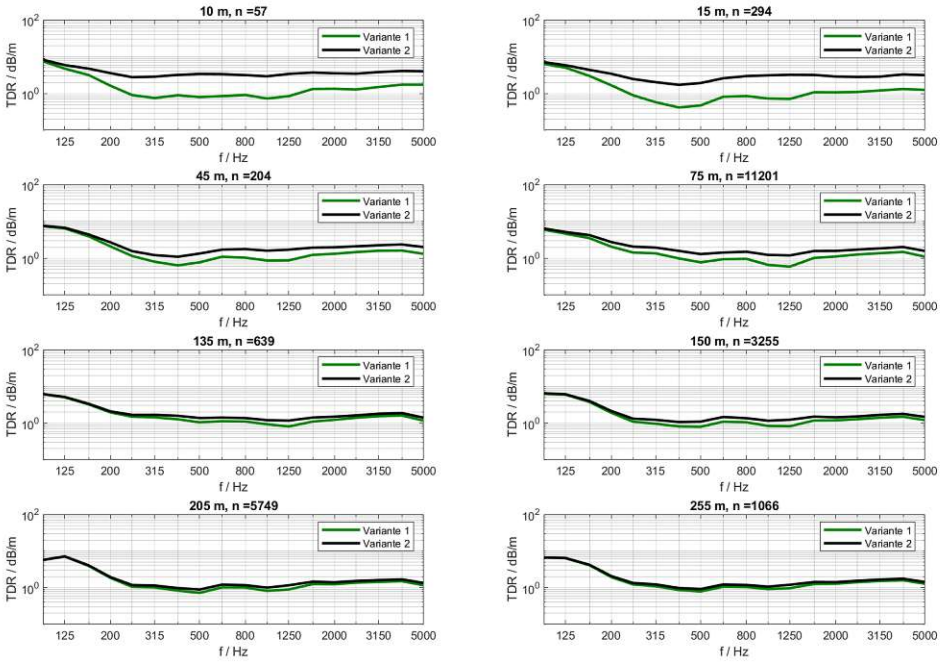
Auch in der lateralen Schwingungsrichtung zeigen die Pass-by-Gleisabklingraten von Variante 2 einen eindeutigen und etwas ausgeprägteren Zusammenhang mit der zugrunde liegenden Zuglänge. Bis zu einer Zuglänge von 135 m sind große Unterschiede zwischen den Gleisabklingraten beider Varianten, bei größeren Zuglängen nur noch kleine Unterschiede bemerkbar. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.16 zusammengefasst.

Bei Betrachtung des Quotienten $TDR_{\mathrm{V1}}/TDR_{\mathrm{V2}}$ (siehe Abbildung 6.17) für die laterale Schwingungsrichtung, lassen sich zwei wesentliche Unterschiede zu Ergebnissen der vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten erkennen: Erstens sind Unterschiede zwischen den Gleisabklingraten beider Varianten bereits ab sehr niedrigen Frequenzen von 125 Hz erkennbar. Zweitens werden die lateralen Gleisabklingraten noch stärker durch die Wahl von L_2 beeinflusst. Die Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 1 liegt hierbei bei geringen Zuglängen (10 m und 15 m) bis zu 75 % unter der Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 2. Bei höheren Zuglängen liegen die relativen Unterschiede zwischen den Varianten wiederum in den gleichen Größenordnungen wie bei der vertikalen Gleisabklingrate. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss kleiner L_2 bei niedrigen Pass-by-Gleisabklingraten verstärkt wird. Es ist zudem erkennbar, dass sich die Ergebnisse der lateralen Pass-by-Gleisabklingrate zwischen den Richtungsgleisen nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

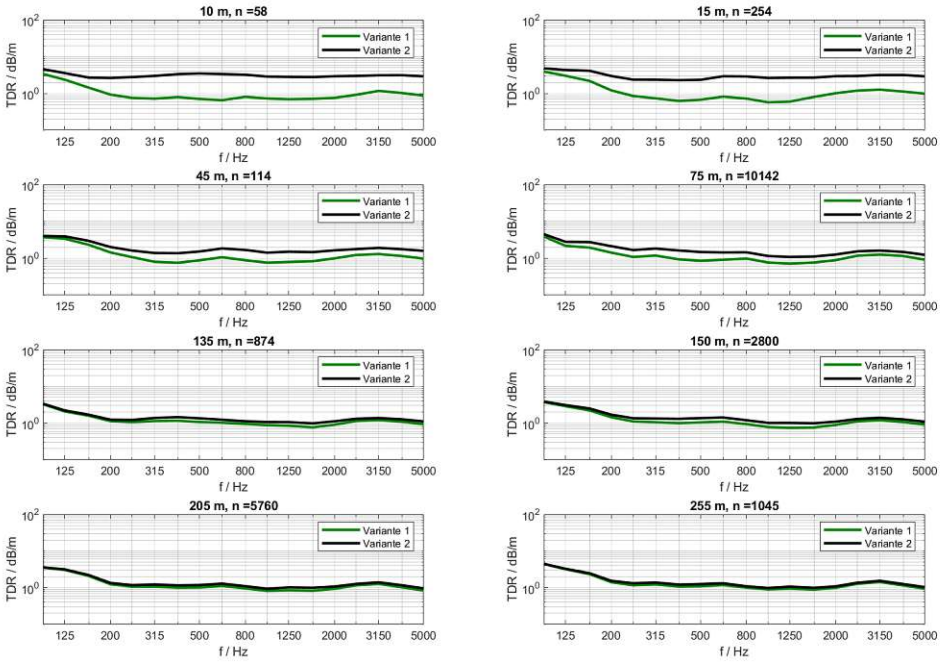
6.6 Einflussfaktor Fahrgeschwindigkeit

Im Anhang der DIN CEN/TR 16891 [3] wird angedeutet, dass die Fahrgeschwindigkeit der Züge einen Einfluss auf die gemessene Pass-by-Gleisabklingrate haben kann. Inwiefern die Fahrgeschwindigkeit die Pass-by-Gleisabklingrate genau beeinflussen kann, ist nach Kenntnisstand des Autors unbekannt. In den folgenden Kapiteln wird untersucht, ob die mittleren Pass-by-Gleisabklingraten für die untersuchten Daten eine Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



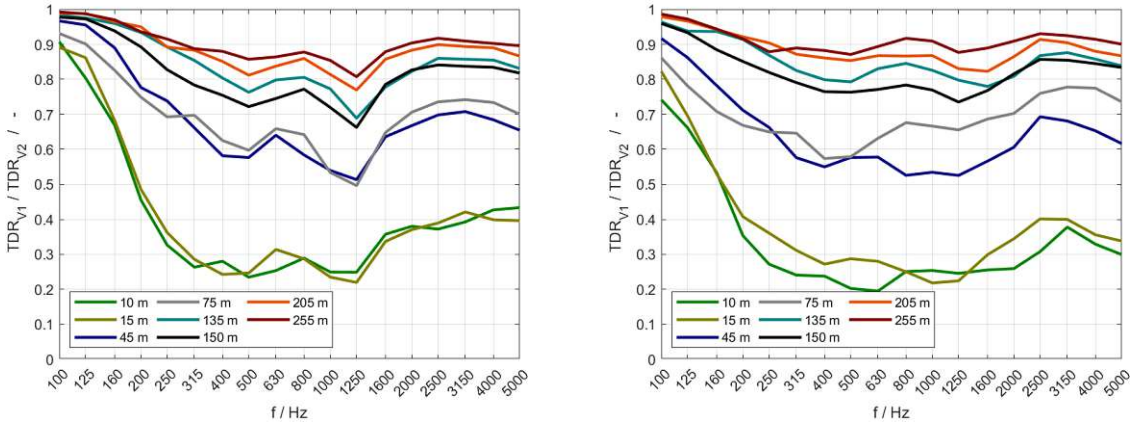
(a) vertikale Gleisabklingraten



(b) laterale Gleisabklingraten

Abb. 6.16: Pass-by-Gleisabklingraten auf Gleis 1, in Abhängigkeit von L_2 und der Zuglänge

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

Abb. 6.17: Relativer Vergleich der mittleren, lateralen Pass-by-Gleisabklingrate nach Variante 1 und 2

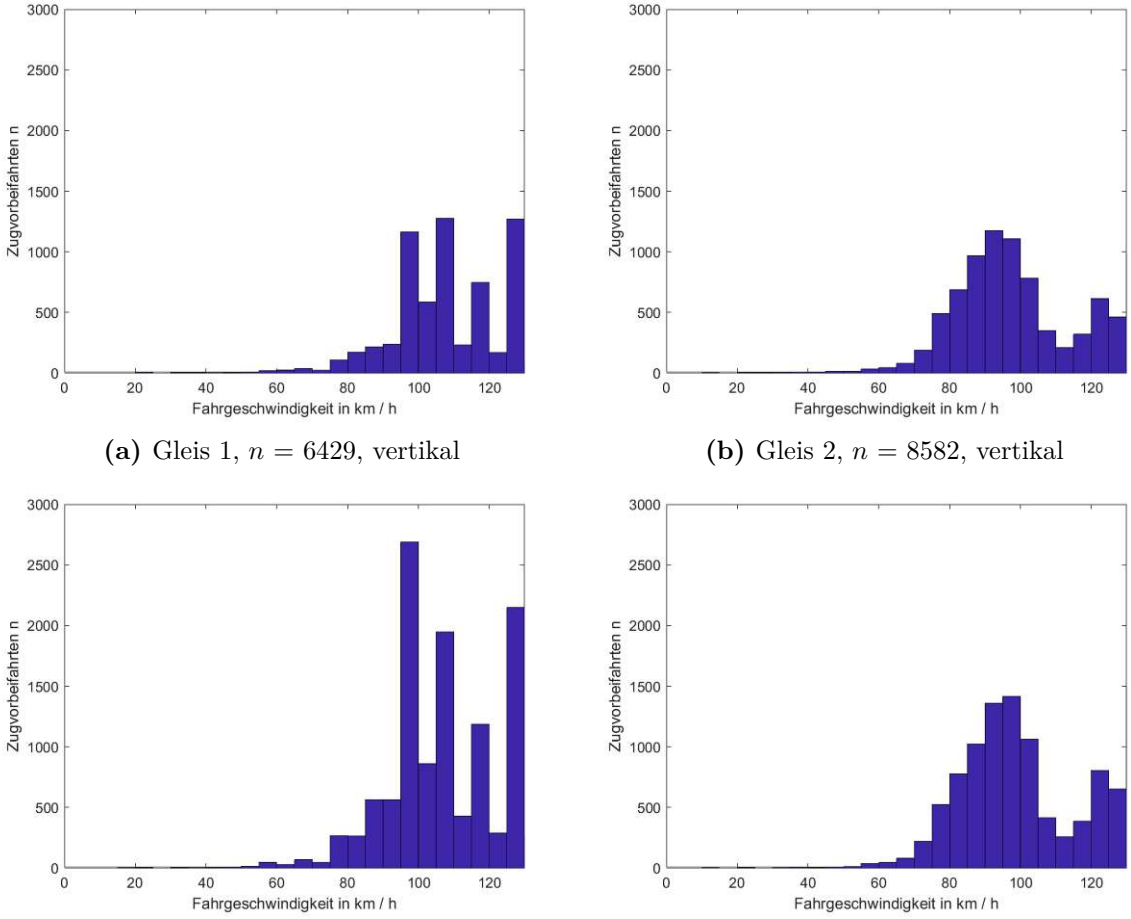
aufweisen. Die Gleisabklingraten werden für einen Personenzugtyp und bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten ermittelt und gegenüberstellt. Es wird jener Personenzugtyp (Personenzug 3) gewählt, für den die größte Stichprobengröße vorhanden ist. Durch die isolierte Betrachtung eines Zugtypen sollen Einflussparameter des Fahrzeuges, wie zB Achsdichte, Achslast etc. aus der Betrachtung ausgeschlossen werden um eine möglichst unverzerrte Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Pass-by-Gleisabklingrate zu erhalten. Die Fahrgeschwindigkeiten werden in Geschwindigkeitsbänder zusammengefasst, wobei jedes Band eine Bandbreite von 5 km/h umfasst. Das 80 km/h-Geschwindigkeitsband beinhaltet demnach alle Fahrgeschwindigkeiten zwischen 77.5 km/h und 82.5 km/h. Diese gewählte Bandbreite soll verhindern, dass in einzelnen Geschwindigkeitsbändern zu geringe Stichproben vorhanden sind. Andererseits sollen auch Unsicherheiten in der Geschwindigkeitsermittlung dadurch ausgeglichen werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 untermauern die Annahme, dass keine Proportionalität zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten und den jeweiligen Schienentemperaturen besteht. Auf eine konstante Schienentemperatur der berechneten Zugfahrten wird daher verzichtet, auch weil diese Vorgangsweise die Stichprobengröße zu stark einschränken würde.

6.6.1 Randbedingungen

Anhand der Informationen aus Kapitel 5.3 ist erkennbar, dass einige wenige Geschwindigkeitsbereiche überaus stark vertreten sind und insbesondere niedrigere Geschwindigkeitsbereiche unterrepräsentiert sind. Dieser Sachverhalt zeigt sich auch in der Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit des betrachteten Personenzugs. Diese ist in Abbildung 6.18 in Form eines Histogramms zusammengefasst. Auch hier sind wieder mehr Zugvorbeifahrten für die Messung der lateralen Gleisabklingrate vorhanden, da die lateralen Beschleunigungsmessungen häufiger den Plausibilitätskriterien entsprechen.

Die Variationskoeffizienten der Berechnung sind in Abbildung 6.19 dargestellt. Vergleichbar mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.4 unterscheiden sich die beiden betrachteten Gleise hinsichtlich der Streuung der vertikalen Gleisabklingrate deutlich: In einigen Bereichen ist der Variationskoeffizient des zweiten Gleises fast doppelt so groß wie der Koeffizient von Gleis 1. Die Streuung unterscheidet sich stark in Abhängigkeit von der Frequenz. Ein eindeutiges Muster lässt sich daraus nicht ableiten: Während die vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten auf Gleis 1 mit wachsender Frequenz

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1, $n = 6429$, vertikal

(b) Gleis 2, $n = 8582$, vertikal

(c) Gleis 1, $n = 10614$, lateral

(d) Gleis 2, $n = 11728$, lateral

Abb. 6.18: Häufigkeit unterschiedlicher Zugfahrgeschwindigkeiten für Personenzugtyp 3

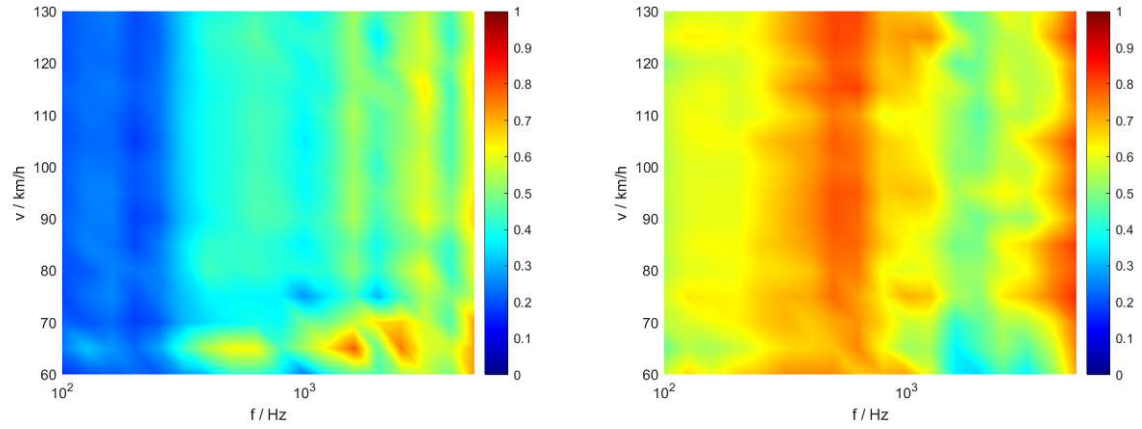
höhere Streuungsmaße aufweisen, ist auf Gleis 2 kein eindeutiger Zusammenhang erkennbar. Hinsichtlich der Größenordnung liegt der Variationskoeffizient bei Frequenzen unter 500 Hz bei ungefähr 20 % auf Gleis 1 und bei ungefähr 60 % auf Gleis 2. Frequenzbereiche über 500 Hz weisen auf Gleis 1 Variationskoeffizienten zwischen 40 % und 65 % auf, auf Gleis 2 werden teilweise Variationskoeffizienten von bis zu 75 % ermittelt. Eine Abhängigkeit der Streuung von der Fahrgeschwindigkeit ist nicht eindeutig erkennbar.

Die Variationskoeffizienten der lateralen Gleisabklingrate umfassen auf beiden Gleisen eine Bandbreite von 20 % bis 60 % und liegen damit tendenziell unter der Streuung der vertikalen Gleisabklingrate von Gleis 2 aber über jener von Gleis 1. Niedrige Frequenzen korrelieren hierbei mit hohen Variationskoeffizienten, wohingegen hohe Frequenzen eine geringere Streuung aufweisen.

6.6.2 Vertikale Gleisabklingrate

Die Gegenüberstellung der vertikalen Pass-by-Gleisabklingrate für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche ist in Abbildung 6.20 für einen einzelnen Personenzugtyp dargestellt. Bereits ohne lineare Regression lässt sich ein nahezu konstant bleibender Verlauf der Gleisabklingrate über die Geschwindigkeit erkennen. Die Schwankungen im Bereich der niedrigen Frequenzen liegen mehrheitlich in der Größenordnung von 1 dB/m bei hohen Frequenzen in der Größenordnung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Gleis 1, $n = 6429$, vertikal

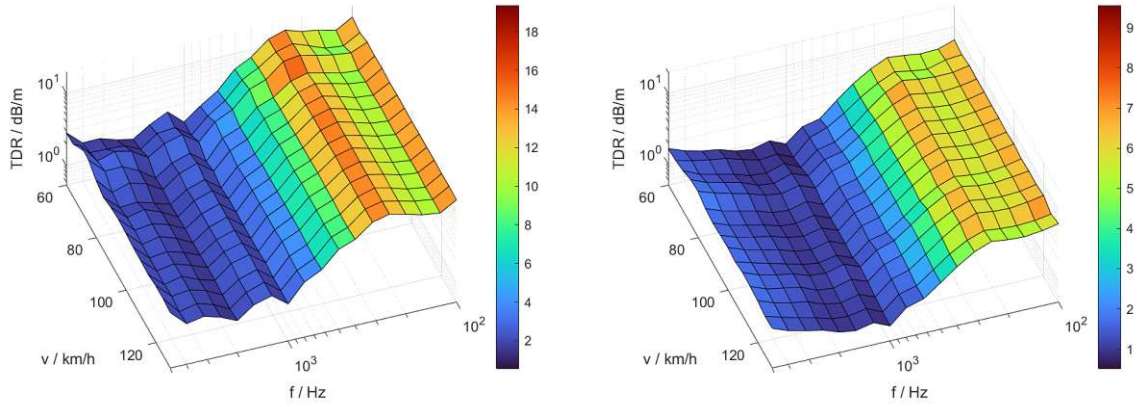
(b) Gleis 2, $n = 8582$, vertikal

(c) Gleis 1, $n = 10614$, lateral

(d) Gleis 2, $n = 11728$, lateral

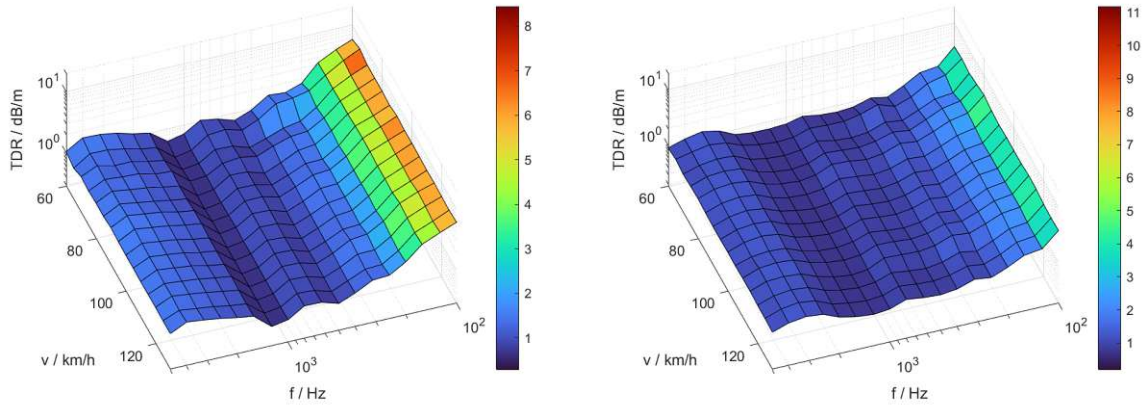
Abb. 6.19: Variationskoeffizient der Pass-by-Gleisabklingrate von Personenzugtyp 3 in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1, $n = 6429$ **(b)** Gleis 2, $n = 8582$

Abb. 6.20: Vertikale Pass-by-Gleisabklingrate in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, gemessen anhand der Vorbeifahrten von Personenzugtyp 3



(a) Gleis 1, $n = 10614$ **(b)** Gleis 2, $n = 11728$

Abb. 6.21: Laterale Pass-by-Gleisabklingrate in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, gemessen anhand der Vorbeifahrten von Personenzugtyp 3

von ungefähr 0.3 dB/m. Eine Tendenz der Schwankungen in Bezug auf die Fahrgeschwindigkeit kann nicht identifiziert werden. Für die betrachteten Messungen ist daher von keinem wesentlichen Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und vertikaler Pass-by-Gleisabklingrate auszugehen.

6.6.3 Laterale Gleisabklingrate

Abbildung 6.21 veranschaulicht den Effekt unterschiedlicher Geschwindigkeiten für die laterale Pass-by-Gleisabklingrate. Die Berechnung erfolgt auch in diesem Fall anhand der Zugvorbeifahrten eines einzelnen Personenzugtyps um vom Zugtyp abhängige Einflüsse auszublenden. Vergleichbar mit den Ergebnissen der vertikalen Gleisabklingrate ist auch bei der lateralen Gleisabklingrate kein Zusammenhang mit der Fahrgeschwindigkeit ableitbar. Kleinere Schwankungen in den Ergebnissen finden sich vor allem bei niedrigeren Geschwindigkeitsbändern und sind vermutlich auf die geringere Stichprobengröße in diesem Bereich zurückzuführen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.7 Einflussfaktor Zugtyp

Neben den Fahrgeschwindigkeiten eines Zuges gibt es etliche weitere potenzielle Einflussfaktoren, welche die Ermittlung der Pass-by-Gleisabklingraten mittels Energie-Iterationsverfahren beeinflussen können. Hierbei sind in erster Linie die Belastung der Schiene und etwaige Raddefekte von Fahrzeugen zu nennen. Aufgrund der dem Modell zugrunde liegenden Vereinfachungen hinsichtlich der Lastverteilung in den Kontaktflächen (siehe Kapitel 4 oder Li et al. [25]), sind auch andere fahrdynamische und/oder konstruktive Einflussparameter denkbar. Da fahrzeugspezifische Parameter oder Informationen zur Belastung durch die in den Messungen vorkommenden Züge oft nicht verfügbar sind, wird in diesem Kapitel der verfügbare Parameter Zugtyp untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem zwei Arten von Zugtypen gegenübergestellt: Lokomotiven und Personenzüge. Diese Auswahl liegt darin begründet, dass die Achslast einzelner Lokomotiven leichter abschätzbar ist, als die Achslast von Güterzügen und in der Regel wesentlich über der durchschnittlichen Achslast von Personenzügen liegt. Daher kann vermutet werden, dass Unterschiede in der Pass-by-Gleisabklingrate zwischen Güterzügen und Lokomotiven zumindest teilweise auf die erhöhte Belastung zurückzuführen sind. Lokomotiven bieten bei betrachtetem Datensatz zudem den Vorteil, dass sie – nach Anwendung der Plausibilitätskriterien – in größerer Anzahl verfügbar sind als Güterzüge.

Die Hauptfragestellung lautet in diesem Zusammenhang: Zu welchem Grad kann der Zugtyp die mittleren Pass-by-Gleisabklingraten beeinflussen? Für die Beantwortung der Fragestellung wird ein Vergleich der gemittelten Pass-by-Gleisabklingrate in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Schienenfahrzeuges gewählt. Da einige der untersuchten Schienenfahrzeuge in manchen Jahreszeiten stärker im Einsatz sind als in anderen, muss der Einfluss der Schienentemperatur so gut wie möglich ausgeblendet werden. Dies gestaltet sich vor allem bei den unterschiedlichen Lokomotiven als schwieriges Unterfangen, da die Einschränkungen der Messergebnisse auf bestimmte Schienentemperaturen eine große Reduktion der verfügbaren Stichprobe zur Folge hat. Die Temperatureinschränkung muss derart erfolgen, dass die Stichprobengröße (insbesondere jene der Lokomotiven) nicht zu stark eingeschränkt wird. Dies ist erforderlich um zum einen die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erhalten, zum anderen müssen die normativen Vorgaben der DIN CEN/TR 16891 [3] eingehalten werden. Diese fordern für die Ermittlung der Pass-by-Gleisabklingrate die Mittelung der Ergebnisse über mindestens drei Zugvorbeifahrten [3].

6.7.1 Randbedingungen

Um den Aspekt der Temperaturabhängigkeit von Gleisabklingraten möglichst auszublenden, wird auf die Erkenntnisse von Kapitel 6.4 zurückgegriffen. Darin ist ersichtlich, dass der Einfluss der Schienentemperatur auf die ermittelte Pass-by-Gleisabklingrate mit steigenden Temperaturen sinkt. Ein Abgleich mit der verfügbaren Stichprobengröße zeigt, dass bei isolierter Betrachtung von Messungen mit dazugehöriger Schienentemperatur von über 20 °C, eine verhältnismäßig große Anzahl an Zugfahrten für die Analyse herangezogen werden kann. Gleichzeitig kann anhand der bereits bekannten Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass temperaturbedingte Einflüsse reduziert sind. Die Messdaten suggerieren, dass die Reduktion der Gleisabklingrate in diesem Temperaturbereich im Mittel deutlich unter 1 dB/m liegen, eine weitere Reduktion der Unsicherheiten aufgrund von Temperaturschwankungen ist bei gleichzeitigem Erhalt einer möglichst großen Stichprobe, welche gleichzeitig Zugfahrten aller Personenzugtypen und Lokomotiven beinhaltet, nicht erreichbar. Auf Basis dieser Argumentation werden für die nachfolgenden Betrachtungen nur jene Messungen herangezogen, welche bei Schienentemperaturen von mehr als 20 °C ermittelt wurden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Achslasten der betrachteten Personenzugtypen kann nur grob geschätzt werden, da sie zu nicht vernachlässigbaren Anteilen vom Füllgrad abhängig sind. Auf der betrachteten Strecke liegt die Bandbreite der Personenzug-Achslasten zwischen 10 bis 15 t. Die Achslasten der unterschiedlichen Lokomotiven, können grundsätzlich besser abgeschätzt werden, die Variation zwischen den unterschiedlichen Lok-Typen ist dennoch relativ groß und liegt zwischen 18 t und 23 t. Eine ungefähre Aufschlüsselung der Lokomotiven nach Achslast ist in Tabelle 6.6 dargestellt.

Tab. 6.6: Achslast der betrachteten Lokomotiven

Lokomotive	Achslast
Typ 1	rd. 20.5 t
Typ 2	rd. 21 t
Typ 3	rd. 21 t
Typ 4	rd. 19 t
Typ 5	rd. 22.5 t
Typ 6	rd. 20.5 t
Typ 7	rd. 20 t
Typ 8	rd. 18 t

Abbildung 6.22 veranschaulicht die Streuung der berücksichtigten vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten, wobei zwischen Lokomotiven und Personenzügen unterschieden wird. Lok 4 (Gleis 1) bzw. Lok 6 (Gleis 1) scheiden aufgrund der Einschränkung hinsichtlich der Schienentemperatur aus den weiteren Betrachtungen aus, da sie die Mindestanzahl benötigter Zugvorbeifahrten gemäß DIN CEN/TR 16891 [3] nicht erfüllen. Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass Gleis 1 eine tendenziell geringere Streuung der Ergebnisse aufweist als Gleis 2. Das gleiche gilt für die vertikale Gleisabklingrate gegenüber der lateralen Gleisabklingrate. Zwischen Personenzügen und Güterzügen ist der Unterschied der Streuung gering, wobei Personenzüge geringfügig kleinere Variationskoeffizienten aufweisen. Auffallend ist, dass sich das Streuungsmaß der vertikalen und lateralen Gleisabklingrate zwischen den einzelnen Lokomotiven deutlicher unterscheidet als zwischen einzelnen Personenzügen. Grundsätzlich muss beachtet werden, dass die zugrunde liegende Stichprobe im Falle der Lokomotiven besonders gering ist.

6.7.2 Vertikale Gleisabklingrate

Abbildung 6.23 zeigt die gemittelten, vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten in Abhängigkeit des Zugtyps. Für die Berechnung werden alle Personenzugtypen und Lokomotiven betrachtet, deren Schienenbeschleunigungen bei Schienentemperaturen über 20 °C gemessen wurden. Die Legende gibt an, wieviele Zugüberfahrten von jedem Zugtypen gemessen wurden. Zugtypen, welche bei den betrachteten Temperaturen und im betrachteten Zeitraum seltener als dreimal beobachtet wurden, werden in Abbildung 6.23 zwar im Sinne der Vollständigkeit dargestellt, eine Analyse dieser Zugvorbeifahrten ist jedoch nicht aussagekräftig und wird unterlassen.

Es ist erkennbar, dass Gleisabklingraten zwischen den verschiedenen Lokomotiven geringfügig größeren Schwankungen unterworfen sind als zwischen unterschiedlichen Personenzugtypen. Bei Lokomotiven beträgt die Variation zwischen unterschiedlichen Typen rund $1 - 5$ dB/m, während die Bandbreite bei den Personenzugtypen in fast allen Frequenzbändern unter 3 dB/m liegt. Hierbei muss wiederum beachtet werden, dass im betrachteten Messzeitraum, wesentlich mehr Personenzüge vorgekommen sind.

Abbildung 6.24 zeigt die Gegenüberstellung der mittleren Gleisabklingrate zwischen Lokomotiven und Personenzügen. Quantitativ unterscheiden sich die vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

von Lokomotiven und Personenzügen kaum, es sind jedoch Unterschiede zwischen den Gleisen erkennbar. Auf Gleis 1 ist die mittlere, vertikale Pass-by-Gleisabklingraten über alle Personenzüge ähnlich jener über alle Lokomotiven. Auf Gleis 2 sind die vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten der Lokomotiven etwas höher als jene der Personenzüge. Dies gilt jedoch nur für niedrige Frequenzen unter 630 Hz bzw. für hohe Frequenzen ab ca. 3150 Hz, wobei die Unterschiede in den hohen Frequenzen nicht sehr ausgeprägt sind.

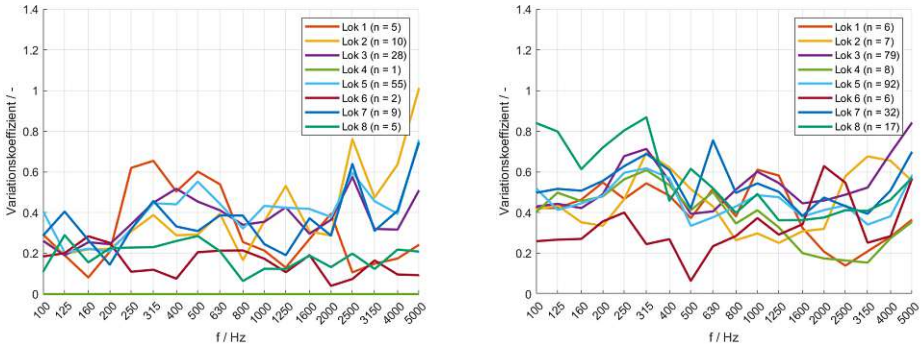
Einschränkend muss auch die Schienentemperatur als möglicher, verzerrender Einflussfaktor in Betrachtung gezogen werden: Trotz der Bestrebungen den Faktor Schienentemperatur möglichst auszublenden ist nicht auszuschließen, dass eine gewisse Beeinflussung der Ergebnisse durch Temperaturschwankungen in den Ergebnissen vorhanden sein kann.

6.7.3 Laterale Gleisabklingrate

Abbildung 6.25 zeigt die gemittelten, lateralen Pass-by-Gleisabklingraten in Abhängigkeit des Zugtyps. Analog zu der Vorgangsweise für die vertikalen Gleisabklingraten, werden alle Personenzug- und Lokomotivtypen betrachtet, deren Schienenbeschleunigungen bei Schienentemperaturen über 20 °C gemessen wurden. Es ist erneut erkennbar, dass für die Berechnung mehr laterale als vertikale Schwingungsverläufe zur Verfügung stehen.

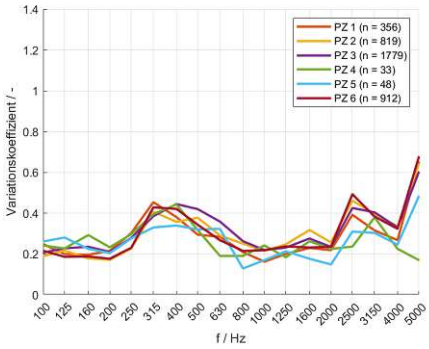
Die Ergebnisse der lateralen Pass-by-Gleisabklingraten weisen einige Gemeinsamkeiten mit den Ergebnissen der vertikalen Pass-by-Gleisabklingraten auf: Zum einen ist auch hier die Bandbreite der Ergebnisse zwischen Lokomotivtypen höher als zwischen Personenzugtypen, zum anderen zeigt Abbildung 6.26, dass die Pass-by-Gleisabklingraten von Lokomotiven in den meisten Frequenzbereichen, der Pass-by-Gleisabklingraten von Personenzügen ähnelt. Eine Ausnahme bilden Frequenzen, zwischen 200 Hz und 500 Hz. Hier liegen die mittleren, lateralen Gleisabklingraten von Personenzügen eindeutig über jenen der Lokomotiven. Dieser Effekt ist auf beiden Gleisen beobachtbar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

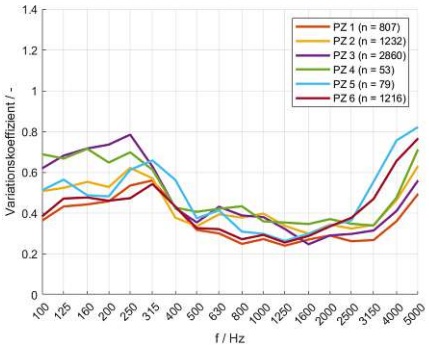


(a) Gleis 1, Lokomotiven, vertikal

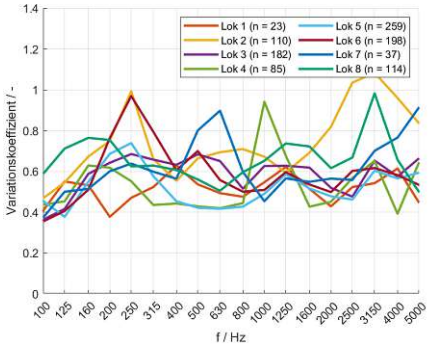
(b) Gleis 2, Lokomotiven, vertikal



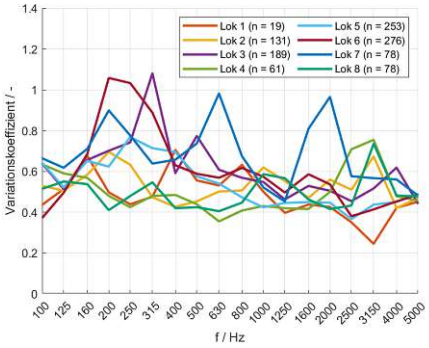
(c) Gleis 1, Personenzüge, vertikal



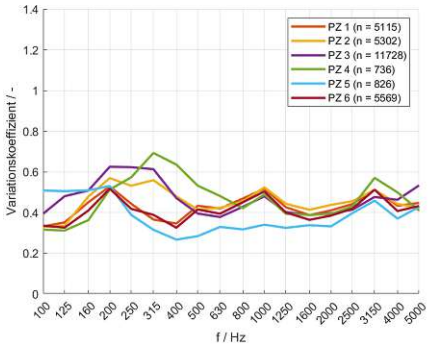
(d) Gleis 2, Personenzüge, vertikal



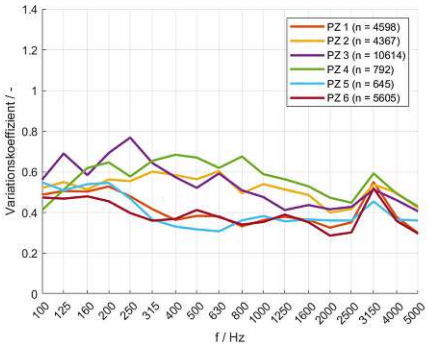
(e) Gleis 1, Lokomotiven, lateral



(f) Gleis 2, Lokomotiven, lateral



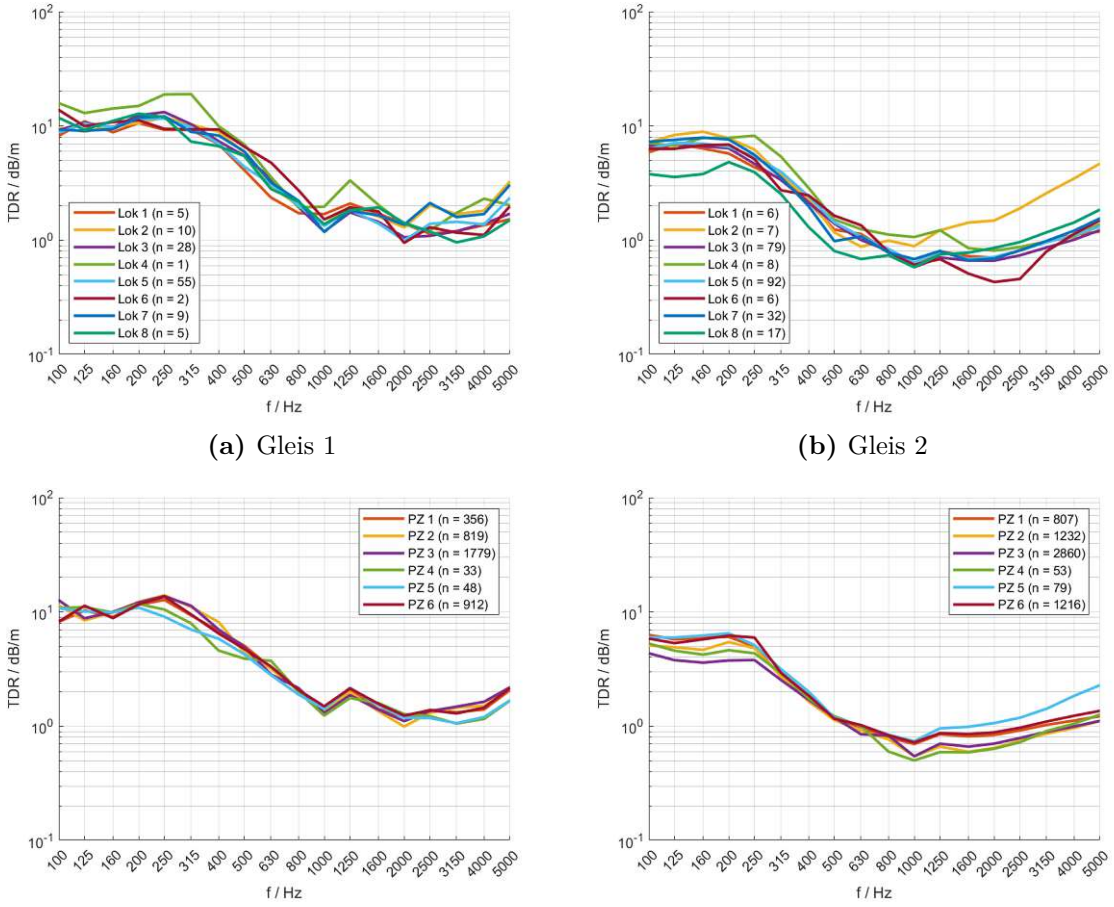
(g) Gleis 1, Personenzüge, lateral



(h) Gleis 2, Personenzüge, lateral

Abb. 6.22: Streuung der Pass-by-Gleisabklingrate von verschiedenen Lokomotiven-Typen und Personenzugtypen bei Schienentemperaturen > 20 °C

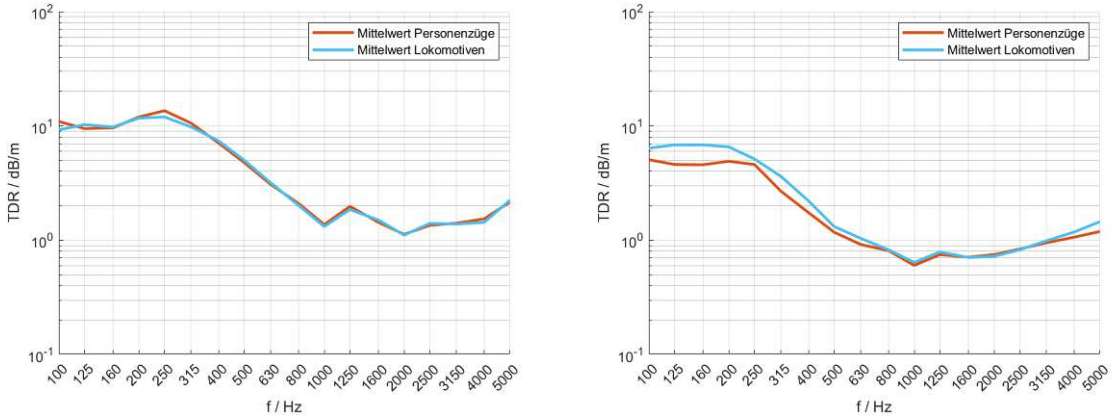
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

(c) Gleis 1 **(d)** Gleis 2

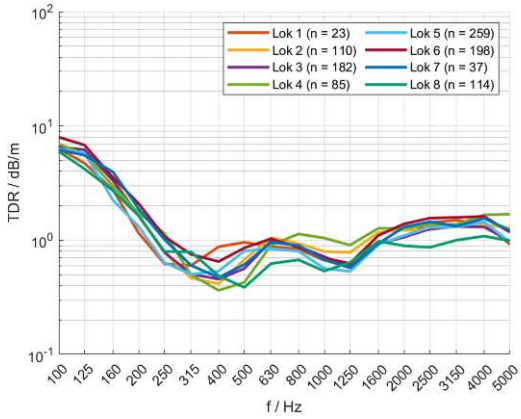
Abb. 6.23: Mittlere vertikale Pass-by-Gleisabklingrate von verschiedenen Lokomotiv- und Personenzugtypen bei Schienentemperaturen > 20 °C



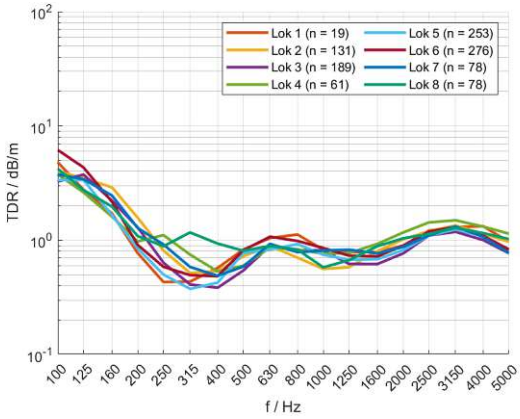
(a) Gleis 1 **(b)** Gleis 2

Abb. 6.24: Mittlere vertikale Pass-by-Gleisabklingrate von Lokomotiven und Personenzügen auf dem betrachten Streckenabschnitt, bei Schienentemperaturen > 20 °C

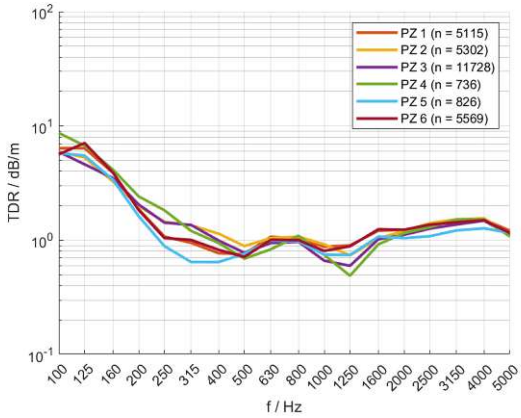
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



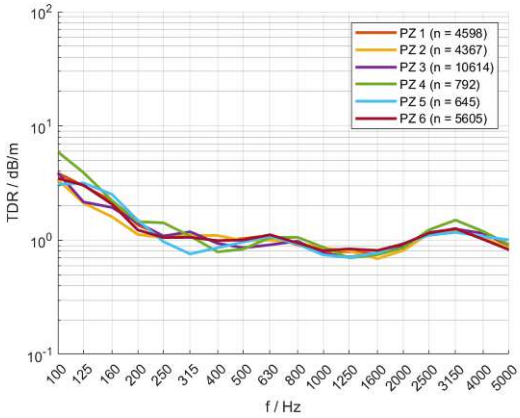
(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

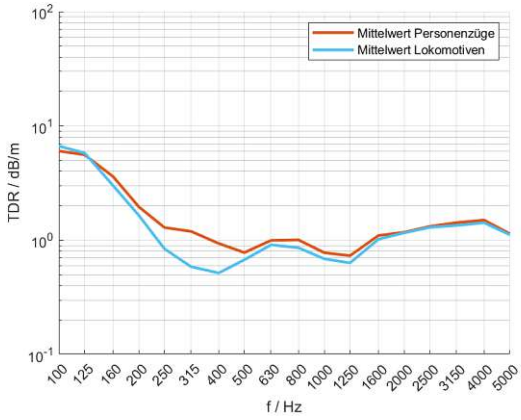


(c) Gleis 1

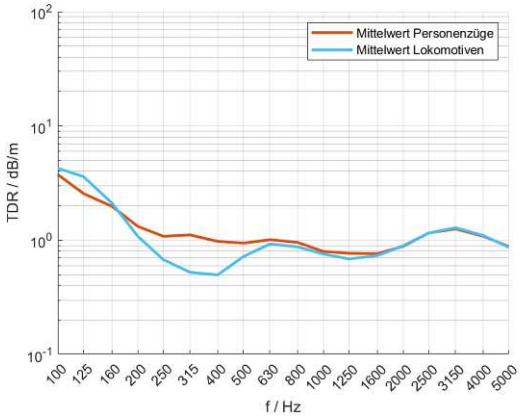


(d) Gleis 2

Abb. 6.25: Mittlere laterale Pass-by-Gleisabklingrate von verschiedenen Lokomotive- und Personenzugtypen, bei Schienentemperaturen > 20 °C



(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

Abb. 6.26: Mittlere laterale Pass-by-Gleisabklingrate von Lokomotiven und Personenzügen auf dem betrachten Streckenabschnitt, bei Schienentemperaturen > 20 °C

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Diskussion

7.1 Gegenüberstellung der Messverfahren

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, wurde die vertikale und die laterale Gleisabklingrate des betrachteten Streckenabschnitts einmal mittels Impulshammer-Verfahren und einmal mittels Energie-Iterationsverfahren (EIV) bestimmt und gegenübergestellt. Die Pass-by-Gleisabklingrate nach EIV wurde hierbei durch Mittelung der Ergebnisse der einzelnen Zugvorbeifahrten berechnet. Diese Vorgangsweise wurde für beide Richtungsgleise des betrachteten Streckenabschnitts durchgeführt.

Es zeigt sich, dass die vertikalen Gleisabklingrate bei beiden Messverfahren vergleichbare Ergebnisse liefern. Dies gilt insbesondere für den qualitativen Verlauf entlang des Frequenzspektrums: Plateaus, Abfälle und Anstiege der Gleisabklingrate sowie lokale Maxima und Minima fallen bei beiden Messverfahren in ähnliche Frequenzbereiche. Größere Unterschiede zeigen sich bei der Variabilität der Gleisabklingrate zwischen den Terzbändern. Hier zeigen sich in der Impulshammer-Gleisabklingrate große Schwankungen, welche in der Pass-by-Gleisabklingrate nicht identifizierbar sind. Quantitativ lassen sich anhand der betrachteten Messungen keine Regelmäßigkeiten ableiten: Während bei der Messung auf Gleis 1 die Impulshammer-Gleisabklingrate höhere Werte als das EIV aufweist, ist dieser Sachverhalt auf Gleis 2 umgekehrt. Der Quotient zwischen Pass-by-Gleisabklingrate und Impulshammer-Gleisabklingrate liegt für die betrachteten Messungen im Bereich zwischen 0.5 und 2.

Die laterale Gleisabklingrate zeigt, im Gegensatz zu den Ergebnissen der vertikalen Gleisabklingrate, kaum Gemeinsamkeiten zwischen den unterschiedlichen Messverfahren. Die laterale Pass-by-Gleisabklingrate zeichnet sich dabei – über das gesamte Frequenzspektrum hinweg – durch einen äußerst glatten Verlauf ohne nennenswerte Schwankungen aus. Konträr dazu zeigt die Impulshammer-Gleisabklingrate auf beiden Gleisen sehr starke Schwankungen entlang des Spektrums. Hinsichtlich der Größenordnung liegt die Pass-by-Gleisabklingrate in den meisten Frequenzen über den Impulshammer-Gleisabklingraten.

Obwohl das Energie-Iterationsverfahren bereits im Jahr 2006 publiziert wurde und das Berechnungsverfahren jenem des Hammerschlag-Impulsverfahren (siehe Kapitel 3.2) grundsätzlich ähnelt, gibt es wenige (öffentlich zugängliche) Publikationen welche die Gegenüberstellung der beiden Verfahren behandeln. Ausnahmen bilden die Arbeiten von Li et al. [25], Li et al. [26], Kalivoda [19] sowie die DIN CEN/TR 16891 [3]. Hervorzuheben ist vor allem letztere, da im Anhang einige Messungen mit beiden Verfahren gegenübergestellt werden. Aus den erwähnten Publikationen lassen sich wenige verallgemeinerbaren Aussagen zu den Unterschieden und Gemeinsamkeiten ableiten. Während die Messergebnisse nach Pass-by Verfahren bei Kalivoda [19] und Li et al. [26] tendenziell unter den Ergebnissen des Hammerschlag-Impulsverfahrens liegen, kann bei den Vergleichsmessungen nach DIN CEN/TR 16891 [3] kein Trend erkannt werden. Bei der Arbeit von Li et al. [25] liegt die Pass-by-Gleisabklingrate tendenziell über jener aus der direkten Messung. Die Aussagekraft dieser Ergebnisse sind jedoch eingeschränkt, da die Impulshammermessung im Mai und somit bei völlig anderen Bedingungen erfolgte, als die Messung der Schienenschwingungen, welche im Dezember durchgeführt wurden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die qualitativen Verläufe der Gleisabklingrate beider Messverfahren stimmen im Anhang der DIN CEN/TR 16891 [3] sehr gut überein, Tief- und Hochpunkte liegen größtenteils in den gleichen Frequenzbändern und auch quantitativ sind große Ähnlichkeiten erkennbar. Ähnliches gilt für die Arbeit von Li et al. [25]. Im Gegensatz dazu, weisen die Vergleichsmessungen von Kalivoda [19] und Li et al. [26] wenige Ähnlichkeiten zwischen den Gleisabklingraten der Messverfahren auf.

Einige der Erkenntnisse der Literaturrecherche ordnen sich gut in die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ein. Auch auf dem betrachteten Streckenabschnitt kann anhand der Vergleichsmessungen nicht festgestellt werden, ob vertikale Pass-by-Gleisabklingraten tendenziell über oder tendenziell unter den direkt ermittelten Gleisabklingraten liegen. Qualitativ sind die Pass-by-Gleisabklingraten sowie die Impulshammer-Gleisabklingraten entlang des Frequenzspektrums durchaus gut vergleichbar, größere Abweichungen sind vor allem im Bereich niedriger Frequenzen (<300 Hz) und hoher Frequenzen (>3150 Hz) erkennbar. Diesbezüglich decken sich die Ergebnisse gut mit der Arbeit von Li et al. [25], als auch mit der Benchmark-Studie der DIN CEN/TR 16891 [3]. In den vorliegenden Ergebnissen sind manche der lokalen Hoch- bzw. Tiefpunkte bei Ermittlung mittels Energie-Iterationsverfahren schwächer ausgeprägt. Gemäß der Arbeit von Li et al. [25] kann diese Abweichung zwischen den Ermittlungsverfahren durch eine Anpassung des Rechenparameters L_1 reduziert werden. Diese Option wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht, da L_1 einheitlich auf den in der DIN CEN/TR 16891 [3] geforderten Mindestabstand (1.8 m) festgelegt wurde.

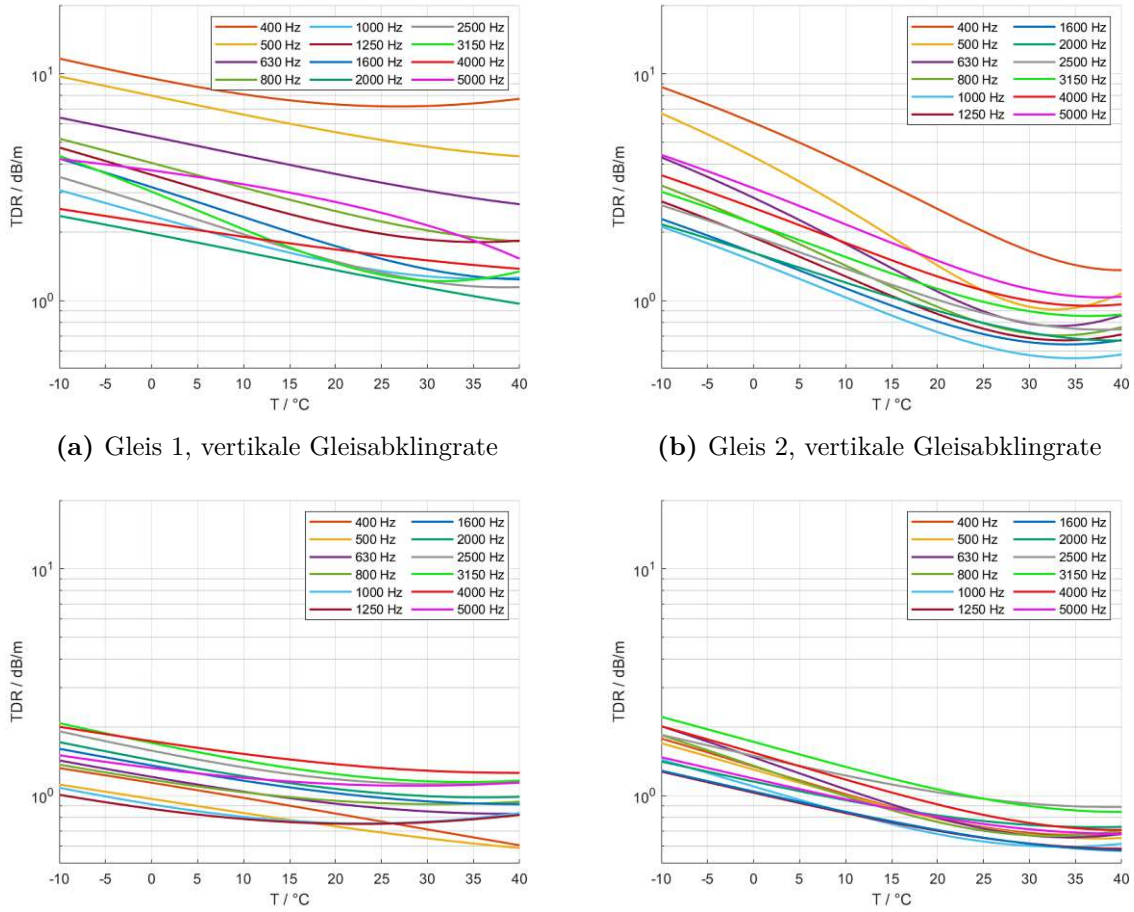
Hinsichtlich der ermittelten lateralen Gleisabklingraten ergibt sich ein komplementäres Bild. Vergleiche zwischen den Messverfahren zeigen nur geringe Übereinstimmungen, sowohl quantitativ als auch qualitativ. Dies ist bemerkenswert, da die visuell feststellbare Datenqualität der lateralen Schwingungsmessungen wesentlich über jener der vertikalen Messungen liegt (siehe Kapitel 6.1). Messfehler können jedoch sowohl bei der direkten als auch bei der indirekten Ermittlung der Gleisabklingrate nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Zusätzlich muss beachtet werden, dass sich die Pass-by-Gleisabklingraten aus dem Mittelwert vieler Messungen ergeben, wohingegen das Impulshammer-Verfahren nur auf einem einzelnen Messdurchgang basiert. Während sich die Variabilität der Ergebnisse aus dem Energie-Iterationsverfahren daher gut abschätzen lässt, ist über die Variabilität des Impulshammer Messverfahrens abseits der Kritik von Venghaus [48] (siehe Kapitel 3.3.3.1) wenig bekannt.

7.2 Einflussfaktor Schienentemperatur

In Kapitel 6.4 wird der Zusammenhang zwischen der Schienentemperatur während einer Zugvorbeifahrt und der dazugehörigen Gleisabklingrate untersucht. Messungen gleicher Schienentemperatur wurden dabei zu mittleren Pass-by-Gleisabklingraten zusammengefasst und bei verschiedenen Temperaturen (–10 °C bis 40 °C) miteinander verglichen. Die Schienentemperatur dient hierbei als Indikator für die Temperatur der Schienenzwischenlage. Im untersuchten Streckenabschnitt ist eine weiche Schienenzwischenlage des Typs ZW 700 (Hersteller: Semperit) in Verwendung.

Die Schienentemperatur weist in den untersuchten Messungen beider Richtungsgleise eine äußerst starke Abhängigkeit mit der mittleren Pass-by-Gleisabklingrate auf. Dies gilt sowohl für die vertikale als auch für die laterale Gleisabklingrate. Hohe Temperaturen führen zu niedrigen Gleisabklingraten und vice versa. Besonders stark ausgeprägt ist dieser Einfluss in den Temperaturbändern zwischen –10 °C und 20 °C. Der kausale Zusammenhang lässt sich sehr gut mit einer polynomialen Kurvenanpassung zweiten oder dritten Grades modellieren. Die gefitteten, polynomialen Kurvenmodelle zweiten Grades sind in Abbildung 7.1 für beide Gleise und beide Schwingungsrichtungen (vertikal und lateral) zusammengefasst. Auf beiden Gleisen kann zudem gezeigt werden, dass die Intensität und die Ausformung der Temperaturabhängigkeit stark von der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Gleis 1, vertikale Gleisabklingrate

(b) Gleis 2, vertikale Gleisabklingrate

(c) Gleis 1, laterale Gleisabklingrate

(d) Gleis 2, laterale Gleisabklingrate

Abb. 7.1: Poynomiale Kurvenanpassung (Grad 2) für die Korrelation zwischen Schienentemperatur und Pass-by-Gleisabklingrate

betrachteten Frequenz abhängt. Dies gilt vor allem für die vertikale Gleisabklingrate, wo große Unterschiede in den modellierten Funktionen erkennbar sind. Auffällig ist beispielsweise die Tendenz der mittleren Gleisabklingraten bei hohen Temperaturen (über 35 °C) wieder anzusteigen. Dieser Trend ist nicht in allen Frequenzen gleich stark ausgeprägt, zudem gibt es auch einige Terzbänder in denen eine fortlaufende Abnahme der Gleisabklingrate bei hohen Temperaturen beobachtbar ist (siehe Abbildung 7.1). Auch die Steigung der modellierten Funktionen unterscheidet sich stark innerhalb des Frequenzspektrums: Während kleine Frequenzen tendenziell höhere Gradienten aufweisen, sind die Steigungen bei höheren Frequenzen etwas geringer. Größere Ähnlichkeiten zwischen unterschiedlichen Frequenzen zeigen sich zwar bei den lateralen Gleisabklingraten, die Übereinstimmung des Kurvenmodells mit den Messdaten ist jedoch schwächer. Dies gilt vor allem für die laterale Gleisabklingrate auf Gleis 1.

Als ursächlicher Mechanismus für die Temperaturabhängigkeit der Gleisabklingrate gilt die Reduktion der Zwischenlagensteifigkeit bei steigender Temperatur. Projektberichte aus der Schweiz [35, 37] zeigen, dass die Sensitivität der Zwischenlagensteifigkeit auf Temperatureinflüsse von der Ausgangssteifigkeit der Zwischenlage abhängig ist. Bei harten Zwischenlagen ist der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Steifigkeit als gering einzustufen [35], wohingegen weiche Zwischenlagen stärkeren temperaturabhängigen Steifigkeitsschwankungen unterliegen [37]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

und demnach auch großen Einfluss auf die Gleisabklingrate haben können. Auch die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, da Gleis 1 (höhere Zwischenlagensteifigkeit) eine geringere Temperatursensivität aufweist als Gleis 2 (niedrigere Zwischenlagensteifigkeit).

Eine Veränderung der Gleisabklingrate hat in erster Linie Implikationen auf die Schallabstrahlung der Schiene und damit auf den Schallleistungspegel des Rollgeräusches. Da die Gleisabklingrate als Maßzahl ungeeignet ist um konkrete Schallleistungspegel abzuleiten, wird im Folgenden eine Schätzmethode von Toward und Thompson [45] zur Abschätzung der Schallleistungspegeldifferenz aufgrund veränderter Gleisabklingraten herangezogen: Demnach kann die Änderung des Schallleistungspegels des Schienenanteils $\Delta L_{\mathrm{W,\,R}}$ zwischen Strecken mit zwei unterschiedlichen Gleisabklingraten D und D_{ref} anhand von Gleichung 7.1 abgeschätzt werden.

$$\Delta L_{\mathrm{W,R}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{D}{D_{\mathrm{ref}}}\right) \tag{7.1}$$

Um eine Schätzung des Einflusses der Schienentemperatur auf $\Delta L_{\mathrm{W,\,R}}$ zu erhalten, wird für D_{ref} die gemittelte Pass-by-Gleisabklingrate aller berücksichtigten Zugvorbeifahrten bei 15 °C eingesetzt. Die Wahl dieser Referenztemperatur liegt in ihrer Summenhäufigkeit gemäß Histogramm in Abbildung 6.6 begründet, in welcher sich die Temperatur von 15 °C ungefähr in der Mitte des betrachteten Temperaturspektrums befindet. Für die Variable D gemäß Gleichung 7.1 werden die gemittelten Pass-by-Gleisabklingraten aller – in den Messdaten vorhandener – Temperaturbänder eingesetzt. Das Ergebnis ergibt die geschätzte Schallleistungspegeldifferenz $\Delta L_{\mathrm{W,R}}$ zwischen dem jeweiligen Temperaturband und der Referenztemperatur 15 °C (siehe Abbildung 7.2). Eine negative Pegeldifferenz entspricht hierbei einer Abnahme gegenüber der Referenz-Gleisabklingrate D_{ref} und vice versa.

Die Abschätzung der Schallleistungspegeldifferenz kann auch als Maßzahl herangezogen werden, um die relative Veränderung der Gleisabklingrate in Bezug auf eine Referenztemperatur darzustellen. Eine hohe Pegeldifferenz entspricht demnach hohen Relativunterschieden zwischen den gegenübergestellten Gleisabklingraten.

Es zeigt sich, dass die größten, geschätzten Pegeldifferenzen durch die Temperaturabhängigkeit der vertikalen Gleisabklingrate verursacht werden (siehe Abbildung 7.2b und 7.2d). Die größte Pegeldifferenzen im Vergleich mit der Referenz-Gleisabklingrate erreichen Werte von über 4 dB bei besonders tiefen Temperaturen. Hohe Temperaturen sind – wie bereits die Kurvenanpassung zeigen konnte – unsensibler auf (Schienen-)Temperaturveränderungen: Hier sind maximale, geschätzte Pegeldifferenzen von 3 dB beobachtbar. Die Ergebnisse für Gleis 2 liegen hierbei mehrheitlich über jenen von Gleis 1. Auch wenn die maximalen Pegeldifferenzen auf Gleis 1 ähnliche Größenordnungen aufweisen, so sind hier oft nur einzelne Terzbänder betroffen. Im Gegensatz dazu sind erhöhte Pegeldifferenzen auf Gleis 2 über das gesamte Spektrum hinweg vorhanden. Trotz gleicher Schienenzwischenlage (ZW 700, Semperit) wird auf Gleis 1 eine deutlich höhere Gleisabklingrate (sowohl direkt als auch mittels EIV) gemessen. Dies deutet darauf hin, dass die tatsächliche, effektive Steifigkeit auf Gleis 1 über jener von Gleis 2 liegt. Zwar sind Gründe vielfältig und können ohne vertiefte Untersuchung nur vermutet werden. Jedoch liegt es nahe, dass durch die höhere Zwischenlagensteifigkeit die Sensitivität auf Temperaturerhöhungen reduziert wird.

Bei der lateralen Gleisabklingrate sind ähnliche Tendenzen erkennbar: Sowohl auf Gleis 1 und Gleis 2 lassen sich temperaturabhängige Pegeldifferenzen erkennen. Die Ergebnisse für Gleis 2 erreichen hierbei Werte von über 2.5 dB und liegen damit deutlich über jenen von Gleis 1, welche Maximalwerte von 1.6 dB aufweisen. Quantitativ befinden sich die temperaturbedingten, geschätzten Schallleistungspegeldifferenzen damit deutlich unter jenen der vertikalen Gleisabklingrate.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zu beachten ist, dass sich die Pegeldifferenzen auf die Mitte des betrachteten Temperaturspektrums beziehen. Werden Randbereiche verglichen, so vergrößert sich die Pegeldifferenz. Dies kann von Relevanz sein, sollte die Messung der Gleisabklingrate bzw. des Schallleistungspegel in unterschiedlichen Jahreszeiten erfolgen.

Bei Interpretation der ermittelten Pegeldifferenzen muss einschränkend festgehalten werden, dass es sich bei der angewandten Formel um eine grobe Schätzung handelt. Die tatsächliche Schallleistungspegeldifferenz hängt von vielen Faktoren ab. Eine nennenswerte Änderung des Gesamtschallpegels durch eine Veränderung der akustischen Eigenschaften der Schiene kann beispielsweise nur dann erfolgen, wenn der Radanteil des Rollgeräusches nicht dominierend ist (vgl. [34]). Trotz der vorhandenen Unsicherheiten, kann im betrachteten Gleisabschnitt von einem, nicht zu vernachlässigbaren Temperatureinfluss auf die gemessene Gleisabklingrate und letztendlich auch auf die Höhe des Schallleistungspegel ausgegangen werden. Andererseits können auch Temperaturbereiche – im oberen Bereich der Temperaturskala – identifiziert werden, die robuster auf Schwankungen der Temperatur reagieren.

Für die Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse spricht, dass beide Gleise gut vergleichbare Ergebnisse hervorbringen und dass einige der oben beschriebenen Zusammenhänge bereits in der Fachliteratur publiziert wurden (vgl. Oertli [35] und Prose AG [37]). In einigen Aspekten weichen die dokumentierten Ergebnisse dennoch deutlich von den Erwartungen ab. Zum einen kann in einigen Frequenzbändern ein erneuter Anstieg der mittleren Gleisabklingraten bei Temperaturen von über 30 °C beobachtet werden. Hervorzuheben sind zum anderen auch die Ergebnisse der lateralen Gleisabklingrate auf Gleis 1, welche sich durch eine verhältnismäßig geringe Übereinstimmung von Modell und Messungen auszeichnen.

7.3 Wahl der langen Länge L_2

Kapitel 6.5 beinhaltet eine Variationsanalyse des Parameters L_2, welcher im Rahmen des Energie-Iterationsverfahrens dafür verwendet wird, die Integrationsgrenzen über eine Zugvorbeifahrt festzulegen. Es wurden zwei Varianten miteinander verglichen: Variante 1 geht von einer geschwindigkeitsabhängigen Länge L_2 aus und umfasst eine Länge, bei welcher davon ausgegangen wird, dass ein Großteil der verzeichneten Schienenbeschleunigungen wieder abgeklungen ist. Variante 2 beinhaltet die Zuglänge gemessen von der ersten bis zur letzten Achse inklusive einer Zusatzlänge von 1.8 m vor der ersten und nach der letzten Achse.

Es zeigt sich, dass die Pass-by-Gleisabklingraten gemäß Variante 2 stark von der zugrunde liegenden Zuglänge abhängen, wohingegen die Ergebnisse nach Variante 1 kaum auf die Variation der Zuglänge reagieren. Dies führt zu großen relativen Unterschieden zwischen den Varianten, insbesondere bei Zuglängen von 7.5 m bis 17.5 m. Dieser Zusammenhang kann für die laterale und die vertikale Gleisabklingrate gezeigt werden, wobei Erstere stärker von der zugrunde liegenden Zuglänge abhängen. Dies ist auf die Höhe der Gleisabklingrate zurückzuführen. Auch bei der Streuung ist ein Zusammenhang mit der Zuglänge erkennbar: Die Streuung der Ergebnisse von Variante 1 hängen hierbei stark von der Zuglänge ab und sinkt mit steigender Zuglänge. Die Variationskoeffizienten von Variante 2 zeigen wiederum keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Zuglänge. Dies ist insofern bemerkenswert, da sich die Streuung der Ergebnisse gegenläufig zu den zuvor genannten Ergebnissen verhält. Während ein größeres L_2 zu stabileren Pass-by-Gleisabklingraten führt, bedingt es auch eine höhere Streuung. Vice versa führt ein kleineres L_2 zu stark variierenden Gleisabklingraten in Abhängigkeit der Zuglänge aber auch zu kleineren Variationskoeffizienten. Für ein vertieftes Verständnis dieses Zusammenhangs sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
-10 °C	-1.0	-0.9	-1.0	-0.9	-0.9	-0.5	-1.0	-1.0	-1.6	-1.6	-1.3	-1.1
-5 °C	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.4	-1.2	-1.0	-0.6	-0.4	-0.5	-0.3
0 °C	-0.7	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	0.0
5 °C	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	-0.5	-0.5	-0.3	-0.4	-0.6	-0.2
10 °C	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	0.0
15 °C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20 °C	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
25 °C	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4
30 °C	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.5	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4
35 °C	0.8	0.4	0.2	0.3	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.4
40 °C	0.9	0.3	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	0.4	0.3	0.1	0.4	0.5	0.1
45 °C	2.2	1.0	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.6	0.6	0.7	0.8	1.1	0.1

(a) Gleis 1, laterale TDR

	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
-10 °C	-1.3	-1.8	-2.3	-2.7	-3.1	-2.7	-3.5	-2.6	-4.6	-4.8	-2.0	-2.6
-5 °C	-1.0	-1.3	-1.1	-1.8	-2.2	-2.1	-2.7	-1.9	-3.0	-3.3	-1.6	-1.8
0 °C	-0.9	-1.2	-0.9	-1.4	-1.5	-1.5	-1.8	-1.6	-2.0	-1.7	-0.7	-1.6
5 °C	0.1	-0.3	-0.6	-1.1	-0.9	-1.1	-1.8	-1.5	-1.4	-1.1	-0.6	-1.5
10 °C	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.5	-0.9	-1.0	-0.5	-1.3
15 °C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20 °C	0.4	0.5	0.3	0.2	0.0	0.2	0.6	0.4	0.1	0.1	0.2	0.0
25 °C	0.7	0.8	0.8	0.8	0.2	0.4	1.2	0.9	0.3	0.8	0.6	0.3
30 °C	0.6	0.9	0.8	1.0	0.5	0.8	1.4	0.9	0.6	0.7	0.6	0.9
35 °C	0.5	1.2	1.2	1.5	0.9	1.2	1.7	1.0	0.8	1.0	0.7	1.3
40 °C	0.2	1.4	1.5	1.8	0.7	0.9	1.8	1.6	1.6	1.1	1.1	2.4
45 °C	1.1	2.2	2.6	2.0	1.1	1.3	2.0	1.6	2.4	3.3	2.0	2.3

(b) Gleis 1, vertikale TDR

	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
-10 °C	-2.6	-2.3	-2.8	-2.7	-2.3	-1.6	-1.8	-2.2	-2.6	-3.0	-3.2	-2.6
-5 °C	-1.9	-1.9	-2.3	-2.3	-1.9	-1.5	-1.1	-0.8	-1.0	-1.3	-1.8	-1.4
0 °C	-1.2	-1.2	-1.4	-1.1	-0.6	-0.6	-1.0	-1.0	-0.8	-1.0	-1.6	-1.0
5 °C	-0.7	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-1.0	-0.7
10 °C	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.5	-0.5
15 °C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20 °C	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.2	0.0
25 °C	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.8	0.6	0.2
30 °C	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.2	0.6	1.0	0.7	0.3
35 °C	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.9	1.5	1.3	0.7
40 °C	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8	0.5	1.0	1.5	1.5	1.0
45 °C	1.0	1.0	1.2	1.0	0.8	0.8	0.7	0.5	1.0	1.5	1.3	0.7

(c) Gleis 2, laterale TDR

	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
-10 °C	-3.9	-5.1	-4.5	-3.8	-3.2	-3.8	-3.7	-3.1	-3.3	-3.8	-4.1	-4.2
-5 °C	-3.3	-4.3	-3.8	-3.4	-2.4	-2.7	-2.3	-2.4	-2.9	-3.0	-3.0	-3.2
0 °C	-2.8	-3.4	-2.9	-2.3	-1.7	-1.7	-1.6	-1.7	-2.0	-2.1	-2.3	-2.6
5 °C	-2.0	-2.4	-2.0	-1.5	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.6
10 °C	-1.3	-1.2	-1.0	-0.6	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.7
15 °C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20 °C	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6
25 °C	1.4	1.0	0.8	0.6	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6
30 °C	1.8	1.3	1.0	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
35 °C	2.8	1.9	1.6	1.2	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3
40 °C	2.9	1.9	1.6	1.3	1.1	1.4	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
45 °C	3.2	2.2	1.6	1.3	1.0	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.7	2.0

(d) Gleis 2, vertikale TDR

Abb. 7.2: Abschätzung der Schallleistungspegeldifferenz in dB aufgrund temperaturbedingter Änderungen der Gleisabklingrate

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Der Rechenparameter L_2 unterscheidet sich von allen anderen Einflussfaktoren, da er vergleichsweise frei festgelegt werden kann. Die Benchmark-Studie der DIN CEN/TR 16891 [3] zeigt, dass eine zu kleine Wahl der Gesamtintegrationszeit große Abweichungen in der Pass-by-Gleisabklingrate verursachen kann. Die Ergebnisse der Studie deuten jedoch darauf hin, dass sich der Einfluss der Gesamtintegrationszeit vor allem auf niedrige Frequenzen unter 250 Hz bezieht (siehe [3, S.36]). Hinsichtlich der zu wählenden Mindestlänge ist die DIN CEN/TR 16891 [3] uneindeutig, gibt jedoch an, dass es sich bei der Zuglänge bzw. der Länge eines Fahrzeugs oder der Länge einer Gruppe von Fahrzeugen um eine „ausreichend große“ Länge L_2 handelt. Auswirkungen unterschiedlicher Längen von L_2 werden von der DIN CEN/TR 16891 [3] nicht beschrieben, auch in anderen Publikationen konnten keine Vergleichswerte für die Variation von L_2 gefunden werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Wahl des Parameters L_2 einen großen Einfluss auf die ermittelten Pass-by-Gleisabklingraten haben kann. Als relevanter Parameter für die Festlegung von L_2 wird die Zuglänge identifiziert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine zu kleine Wahl von L_2 vor allem bei kurzen Zügen zu einer deutlichen Überschätzung der vertikalen und lateralen Pass-by-Gleisabklingrate führen kann. Dies betrifft nicht nur niedrige Frequenzen, sondern beinahe das gesamte betrachtete Frequenzspektrum. In diesem Punkt unterscheiden sich die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit deutlich von der Benchmark-Studie der DIN CEN/TR 16891 [3].

Neben der Zuglänge hat auch die Höhe der Pass-by-Gleisabklingrate einen Einfluss auf den beschriebenen Zusammenhang. Dies liegt daran, dass durch die schlechtere Dämpfung der Schiene, ein größeres L_2 erforderlich ist um den Großteil der gemessenen Schienenbeschleunigungen aufzunehmen. Diese Erkenntnis wird auch durch die vorliegenden Ergebnisse gestützt, da die laterale Pass-by-Gleisabklingrate (niedrige TDR) besonders sensitiv auf die Variation von L_2 reagiert.

Eine ausreichende Vergleichbarkeit von Gleisabklingraten gemäß Energie-Iterationsverfahren ist demnach nur bei adäquater Wahl von L_2 gegeben, wobei letztere maßgeblich von der zugrunde liegenden Zuglänge abhängt. Dies entspricht nicht der gängigen Praxis des Berechnungsverfahrens nach DIN CEN/TR 16891 [3], da hier aktuell keine konkreten Richtwerte für L_2 vorgegeben werden. Dies kann sich einerseits verzerrend auf die Vergleichbarkeit von Gleisabklingraten auswirken und andererseits auch einen (unerwünschten) Einfluss auf die kombinierte Rauheit gemäß Pass-by Methode haben, da hier die Pass-by-Gleisabklingrate als Eingangsgröße fungiert.

7.4 Einflussfaktor Fahrgeschwindigkeit

Die Gegenüberstellung der mittleren Pass-by-Gleisabklingraten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (im Bereich zwischen 60 km/h und 130 km/h) in Kapitel 6.6 zeigt für die untersuchten Messungen keine Beeinflussung. Vielmehr sind die gemittelten Pass-by-Gleisabklingraten über die betrachteten Geschwindigkeiten hinweg nahezu konstant.

Die DIN CEN/TR 16891 [3, S.49] nennt die Geschwindigkeit als mögliche Einflussgröße und begründet dies mit der Beeinflussung der Signalenergie. Diese These kann anhand der untersuchten Messungen nicht gestützt werden.

Im Unterschied zur Benchmarkstudie der DIN CEN/TR 16891 [3] wurden in der vorliegenden Arbeit eine größere Anzahl an unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen miteinander verglichen. Die Stichprobengröße der Untersuchungen kann nicht gegenübergestellt werden, da die DIN CEN/TR 16891 [3] diesbezüglich keine Angaben macht.

Um Unsicherheiten im Ergebnis zu reduzieren, wurde – in der vorliegenden Arbeit – der Einflussfaktor Zugtyp ausgeblendet, in dem nur die Pass-by-Gleisabklingraten von Zugfahrten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

eines einzelnen Personenzugtyps miteinander verglichen wurden. Einflüsse aus Temperaturschwankungen können zwar nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Da der betrachtete Personenzug über das gesamte Jahr hinweg einigermaßen gleichmäßig verkehrt, sind jedoch keine übermäßig großen Verzerrungen zu erwarten. Einschränkend muss festgehalten werden, dass ein großer Teil der Messungen (insbesondere bei den vertikalen Beschleunigungen) aufgrund unplausibler Schwingungsverläufe nicht berücksichtigt wurde. Da ein Zusammenhang zwischen den Fehlmessungen und der Signalenergie einer Vorbeifahrt vermutet wird (siehe Kapitel 6.1.1), kann auch ein Einfluss auf die hier diskutierten Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden.

7.5 Einflussfaktor Zugtyp

In Kapitel 6.7 wird der Einflussfaktor Zugtyp untersucht, indem gemittelte Pass-by-Gleisabklingraten in Abhängigkeit der verschiedenen Lokomotiv- und Personenzugtypen miteinander verglichen werden.

Die untersuchten Messungen legen nahe, dass der Zugtyp keinen großen Einfluss auf die gemessene, vertikale Pass-by-Gleisabklingrate hat. Es kann gezeigt werden, dass die vertikale Pass-by-Gleisabklingraten von Lokomotiven auf beiden Gleisen jener der Personenzugtypen ähneln. Es sind jedoch kleinere Unterschiede zwischen den betrachten Gleisen erkennbar. Während auf Gleis 1 der Zugtyp keinen Einfluss auf die vertikale Pass-by-Gleisabklingrate hat, sind auf Gleis 2 kleinere Unterschiede im Bereich niedriger (unter 250 Hz) und hoher Frequenzen (über 4000 Hz) zu beobachten: Hier liegt die vertikale Pass-by-Gleisabklingrate von Güterzügen über jener von Personenzügen.

Auffallend sind die Ergebnisse in lateraler Schwingungsrichtung: Hier liegen die Pass-by-Gleisabklingraten der Personenzüge im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 500 Hz eindeutig über den Pass-by-Gleisabklingraten der Güterzüge. In höheren und niedrigeren Frequenzen sind wiederum keine größeren Unterschiede erkennbar. Diese Beobachtung trifft auf beide Gleise zu.

Eine mögliche Erklärung der Unterschiede ist hier zum Einen der Unterschied in der Achslast, welcher je nach Personenzug bzw. Lokomotive zwischen 5 t und 10 t betragen kann. Einen weiteren möglichen Einflussparameter auf die unterschiedlichen Pass-by-Gleisabklingraten zwischen Lokomotiven und Personenzügen stellen Radlaufflächendefekte dar. Die Möglichkeit der Beeinflussung durch „Raddefekte“ wird bereits in der DIN CEN/TR 16891 [3] in Betracht gezogen, eine messtechnische Untermauerung steht diesbezüglich noch aus.

Grundsätzlich ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse davon auszugehen, dass der Zugtyp keinen wesentlichen Einfluss auf die Pass-by-Gleisabklingrate hat. Dies gilt vor allem für die vertikale Pass-by-Gleisabklingrate und im Bereich mittlerer Frequenzen wo der Anteil der Schiene am Rollgeräusch als dominant angenommen wird. Eine Ausnahme bildet die laterale Pass-by-Gleisabklingrate im Bereich niedriger Frequenzen.

7.6 Streuung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit stützt sich sehr stark auf die Gegenüberstellung und Analyse von mittleren Pass-by-Gleisabklingraten, welche auf Basis vieler Zugvorbeifahrten gemäß Energie-Iterationsverfahren (EIV) berechnet werden. Diese mittleren Pass-by-Gleisabklingraten können sich – aufgrund der Variabilität des Verfahrens – stark von Einzelmessungen unterscheiden. Um den Zusammenhang zwischen Einzelmessungen und gemittelten Pass-by-Gleisabklingraten besser abschätzen zu können, wurden die Variationskoeffizienten (Quotient von Standardabweichung und arithmetischem Mittel) der gemittelten Pass-by-Gleisabklingraten für alle durchgeführten Parametervariationen berechnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Es kann gezeigt werden, dass der Variationskoeffizient starken Schwankungen unterliegt und in der vorliegenden Arbeit idR Werte zwischen 30 % und 80 % annimmt. Auch bei Reduktion potenzieller Einflussparameter durch Ausschluss von Schienentemperaturen und Betrachtung einzelner Personenzugtypen (siehe Kapitel 6.7) kann die Streuung der Ergebnisse nur geringfügig reduziert werden. Es konnte zudem kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Variationskoeffizienten und Gleisabklingrate bzw. Frequenz gefunden werden. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse der vertikalen Pass-by-Gleisabklingrate auf Gleis 1, welche sich durch äußerst geringe Variationskoeffizienten (< 30 %) in niedrigen Frequenzen auszeichnen und mit steigender Frequenz eine deutliche Zunahme der Streuung aufweisen.

7.7 Grenzen der vorliegenden Arbeit

Einige der Limitationen der vorliegenden Arbeit wurden bereits im Rahmen der Diskussion thematisiert. An dieser Stelle sind die wesentlichen Grenzen und Unsicherheiten in den Ergebnissen kurz zusammengefasst: Die beobachteten Zusammenhänge beziehen sich auf einen Streckenabschnitt mit weichen Zwischenlagen. Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der dargestellten Erkenntnisse nicht auf Strecken mit harter Gleisabklingrate übertragbar sind. Ein weiterer einschränkender Aspekt ist die hohe Ausfallrate innerhalb der zur Verfügung gestellten Messungen. Aufgrund unplausibler bzw. fehlerbehafteter Messungen musste ein großer Teil der Datengrundlage aussortiert werden (siehe Kapitel 6.1). Dies betrifft vor allem die Messungen der vertikalen Schienenbeschleunigung, wobei tendenziell Vorbeifahrten mit hohen Beschleunigungen das Plausibilitätskriterium nicht erfüllen. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass gewisse Verzerrungen durch das Weglassen derart großer Datenmengen entstehen, insbesondere wenn die aussortierten Züge erwähnte Gemeinsamkeiten aufweisen. Die hier gezeigten Ergebnisse basieren zwar dennoch auf einer großen Anzahl an vorbeifahrenden Zügen, diese repräsentieren jedoch nur einen Teil des Verkehrsaufkommens der betrachteten Strecke.

7.8 Offene Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit schneidet die Ermittlung der kombinierten Rauheit nach DIN CEN/TR 16891 [3] zwar an, eine vertiefte Untersuchung der Einflussfaktoren und Anwendungsmöglichkeiten wurde jedoch nicht durchgeführt. Vor allem die Anwendung als Grundlage für die Ermittlung von Standardwerten für die Prognoserechnung nach dem europäischen Berechnungsmodell ist aus Sicht des Autors ein vielversprechender Forschungsansatz. Auch die Implikationen der Erkenntnisse dieser Arbeit auf die Ermittlung von kombinierten Rauheiten sind nicht ohne weiterführende Untersuchungen abschätzbar. Aktuelle Forschung zum Thema der kombinierten Rauheitsermittlung mittels PBA ist überschaubar, hervorzuheben ist hier vor allem die Arbeit von Thompson et al. [44] als auch die Arbeit von Li et al. [25].

Auf Basis der Erkenntnisse in Kapitel 6.7 ist nicht auszuschließen, dass Radlauffläschendefekte einen potentiellen Einfluss auf die Ermittlung von Pass-by-Gleisabklingraten haben können. Auch die DIN CEN/TR 16891 [3] stützt diese These, da sie Radlauffläschendefekte als potentiellen Einflussfaktor nennt. Abgesehen davon liegen dem Autor dieser Arbeit keine Forschungsarbeiten vor, die diesen Aspekt thematisieren, demnach besteht hier ebenfalls ein gewisser Forschungsbedarf.

Weitere offene Frage betreffen die Wahl des Parameters L_2. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten darauf hin, dass die Wahl des Parameters einen großen Einfluss auf die Vergleichbarkeit von Pass-by-Gleisabklingraten nach EIV hat. Dies gilt insbesondere für kleine Zuglängen. Diesbezüglich stellt sich die Frage ob es sinnvoll wäre, Richtwerte und Grenzen für die Wahl von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

L_2 zu definieren. Auch der Zusammenhang zwischen der Streuung der Ergebnisse und der Wahl von L_2 wirft einige Fragen auf und bedarf vertiefter Untersuchungen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Literatur

[1] Austrian Standards International. *ONR 305011, Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb,* Wien, 15.11.2009.

[2] Briony Elizabeth Croft. *The Development of Rail-head Acoustic Roughness: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy.* University of Southhampton, Faculty of Engineering, Science and Mathematics, Institute of Sound and Vibration Research, 2009.

[3] Deutsches Institut für Normung. *DIN CEN/TR 16891, Bahnanwendungen- Akustik- Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen; Deutsche Fassung CEN/TR 16891:2016.* Berlin, März 2017.

[4] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 13146-9, Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 9: Bestimmung der Steifigkeiten; Deutsche Fassung EN 13146-9:2009+A1:2011.* Berlin, Dezember 2011.

[5] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 15461, Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen; Deutsche Fassung EN 15461:2008+A1:2010.* Berlin, Januar 2011.

[6] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 3095, Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013.* Berlin, Juli 2014.

[7] M. G. Dittrich, F. Létourneaux und H. Dupuis. „Background for a New Standard on Pass-By Measurement of Combined Roughness, Track Decay Rate and Vibroacoustic Transfer Functions“. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems.* Hrsg. von J. C. O. Nielsen, D. Anderson, P.-E. Gautier, M. Iida, J. T. Nelson, D. Thompson, T. Tielkes, D. A. Towers und P. de Vos. Bd. 126. Springer eBook Collection Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, S. 197–204. ISBN: 9783662448328. DOI: 10.1007/978-3-662-44832-8_26.

[8] M. Dittrich, F. Letourneaux, C. Jones, H. Brammer, C. Gerbig, G. Dinhobl, E. Verheijen, A. Kuijpers, F. Aubin und C. Czolbe. „A New Standard for the Measurement of Source Terms for Railway Noise Prediction Models“. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings.* Hrsg. von Institute of Noise Control Engineering. USA, 2019.

[9] M. Dumitriu und I. C. Cruceanu. „On the Rolling Noise Reduction by Using the Rail Damper“. In: *Journal of Engineering Science and Technology Review* 10.6 (2017), S. 87–95. ISSN: 17919320. DOI: 10.25103/jestr.106.12.

[10] Europäische Kommission. *Delegierte Richtlinie (EU) 2021/1226 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG der Kommission zur Änderung des Anhangs II der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich gemeinsamer Methoden zur Lärmbewertung zwecks Anpassung an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt: Amtsblatt L 269 der Europäischen Union vom 28. Juli 2021.* 28.07.2021.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[11] Europäische Kommission. *Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU Text von Bedeutung für den EWR: Amtsblatt L 356/421 der Europäischen Union vom 12. Dezember 2014*. 12.12.2014.

[12] Europäisches Parlament und Rat. *Richtlinie (EU) 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm: Amtsblatt L 189 der Europäischen Union vom 18. Juli 2002*. 25.06.2002.

[13] Europäisches Parlament und Rat. *Richtlinie (EU) 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (Text von Bedeutung für den EWR): Amtsblatt L 168 der Europäischen Union vom 1. Juli 2015*. 1.07.2015.

[14] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr. *RVE 04.01.02: Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen*. Wien, 1.02.2022.

[15] A. G. Galaitsis und E. K. Bender. „Wheel/rail noise—Part V : Measurement of wheel and rail roughness“. In: *Journal of Sound and Vibration* 46.3 (1976), S. 437–451. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/0022-460X(76)90865-8.

[16] A. Hardy und R. Jones. *Rail and wheel roughness - implications for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise procedure: A report produced for Defra*.

[17] M. Janssens, M. G. Dittrich, F. G. de Beer und C. Jones. „Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay“. In: *Journal of Sound and Vibration* 293.3-5 (2006), S. 1007–1028. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.070.

[18] C. Jones, D. Thompson und R. J. Diehl. „The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation“. In: *Journal of Sound and Vibration* 293 (2006), S. 485–494. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.060.

[19] M. T. Kalivoda. „Track decay rate of different railway noise test sites“. In: *Proceedings / Forum Acusticum Budapest, 29 Aug - 2 Sep, 2005*. Budapest, 2005.

[20] S. Kephalopoulos, M. Paviotti und F. Anfosso-Lédée. *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU): To be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC*. Bd. 25379. EUR (Luxembourg. Online). Luxembourg: OPEU, 2012. ISBN: 978-92-79-25281-5.

[21] C. Kirisits. „Stand der Grundlagen und Modelle für die Beurteilung von Bahnlärm“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* 6 (2015), S. 89–93.

[22] C. Kirisits und T. Maly. „Die Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen (RVE 04.01.02) im Rahmen der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie und nationale Anforderungen für Prognose und Beurteilung“. In: *FSV-Verkehrstag 2023 - Tagungsband*. Hrsg. von Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr. Wien, 2023, S. 38–42.

[23] C. Kirisits und T. Maly. *Ermittlung von Eingangsparametern anhand des korrigierten Annex II der EU-Umgebungs- lärmrichtlinie zur Ermittlung von Schallleistungspegeln für Schienenverkehrslärm im österreichischen Schienennetz: Kurzzusammenfassung*. Wien.

[24] K. Knothe. *Gleisdynamik*. Bauingenieur-Praxis. Berlin: Ernst & Sohn, 2001. ISBN: 978-3-433-03366-1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[25] Q. Li, D. J. Thompson und M. G. R. Toward. „Estimation of track parameters and wheel–rail combined roughness from rail vibration“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 232.4 (2018), S. 1149–1167. ISSN: 0954-4097. DOI: 10.1177/0954409717710126.

[26] W. Li, J. Jiang, R. Dwight und C. Schulten. „An investigation of a method for track decay rate measurement using train pass-bys“. In: *Proceedings of Acoustics 2011 - Breaking New Ground*. Hrsg. von Australian Acoustical Society. 2011.

[27] B. Lichtberger. *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. 1. Aufl. Hamburg: Tetzlaff, 2003. ISBN: 3-87814-803-8.

[28] T. Maly und C. Kirisits. „Berücksichtigung hochliegender Schallquellen in der Europäischen Immissionsprognose“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* 3 (2024), S. 70–75.

[29] T. Maly und C. Kirisits. „Modellierung der Rauheiten in CNOSSOS-EU - Theorie und Praxis“. In: *Bahnakustik - Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb - Fachtagung 2018*. Hrsg. von Müller-BBM Rail Technologies GmbH. Planegg, 2018.

[30] A. P. de Man. „Pin-pin resonance as a reference in determining ballasted railway track vibration behaviour“. In: *HERON* Vol. 45.No.1 (2000), S. 35–51. ISSN: 0046-7316.

[31] V. Matthews. *Bahnbau*. 8., überarb. und aktualisierte Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1291-9.

[32] R. Menius und V. Matthews. *Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen*. 10. Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-27732-1.

[33] M. Möser. *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-47703-8. DOI: 10.1007/978-3-662-47704-5.

[34] G. Müller und M. Möser, Hrsg. *Luftschall aus dem Schienenverkehr*. [1. Auflage]. Fachwissen Technische Akustik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-55462-3.

[35] J. Oertli. *Erprobung von Schienendämpfern: Schlussbericht, April 2016: Version 6*. Hrsg. von SBB AG. 5.04.2016. URL: https://laermforschung-eisenbahn.ch/site/wp-content/uploads/2022/02/2016_Bericht-Erprobung-von-Schienendaempfern_SBB-AG.pdf (Zugriff am 15. 11. 2024).

[36] *Position paper on the European strategies and priorities for railway noise abatement*. Environment themes. Urban. Luxembourg: EUR-OP, 2003. ISBN: 92-894-6055-5.

[37] Prose AG. *Akustisch optimierte Zwischenlage: Schlussbericht*. Hrsg. von Prose AG. 2020. URL: https://laermforschung-eisenbahn.ch/site/wp-content/uploads/2022/02/2020_Bericht-Entwicklung-Zwischenlage_Prose-AG.pdf (Zugriff am 15. 11. 2024).

[38] Prose AG. *Lärmauswirkung von Unterschottermatten: Lärm- und Schwingungsmessungen an USM-Teststrecke in Raron West*. 2015. URL: https://laermforschung-eisenbahn.ch/site/wp-content/uploads/2022/02/2015_Bericht-Laermauswirkungen-von-Unterschottermatten_Prose-AG.pdf (Zugriff am 15. 11. 2024).

[39] Prose AG, Hrsg. *Schienenstegabschirmung: Vorbeifahrtsmessungen: Abschlussbericht*. 2016. URL: https://laermforschung-eisenbahn.ch/site/wp-content/uploads/2022/02/2016_Bericht-Schienenstegabschirmung_Prose-AG.pdf (Zugriff am 15. 11. 2024).

[40] P. J. Remington. „Wheel/rail rolling noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?“ In: *Journal of Sound and Vibration* 120.2 (1988), S. 203–226. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/0022-460X(88)90430-0.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[41] I. Richter, J. Thomsen, K. Stampka und E. Sarradj. „Zeitbereichsmodelle für das Rad-Schiene-Rolgeräusch - Teil 1: Schienenmodelle“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2019*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Berlin, 2019, S. 676–679.

[42] D. Thompson. *Railway Noise and Vibration*. Elsevier, 2009. ISBN: 9780080451473. DOI: 10.1016/B978-0-08-045147-3.X0023-0.

[43] D. Thompson. „Railway noise and vibration: The use of appropriate models to solve practical problems“. In: *21st International Congress on Sound and Vibration 2014 (ICSV 21)*. Hrsg. von International Institute of Acoustics and Vibration. Red Hook, New York und Auburn (Alabama): International Institute of Acoustics & Vibration, 2014, S. 17–32. ISBN: 9781634392389.

[44] D. Thompson, G. Squicciarini, J. Zhang, I. Lopez Arteaga, E. Zea, M. Dittrich, E. Jansen, K. Arcas, E. Cierco, F. X. Magrans, A. Malkoun, E. Iturritxa, A. Guiral, M. Stangl, G. Schleinzer, B. Martin Lopez, C. Chaufour und J. Wändell. „Assessment of measurement-based methods for separating wheel and track contributions to railway rolling noise“. In: *Applied Acoustics* 140 (2018), S. 48–62. ISSN: 0003682X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.05.012.

[45] M. Toward und D. Thompson. *Laboratory methods for testing the performance of acoustic rail dampers: Acoustics, April 2012*. Nantes, France, 2012.

[46] B. van Damme. *Preliminary experimental study of the influence of loose rail clamps on track dynamics*. 2022. URL: https://laermforschung-eisenbahn.ch/site/wp-content/uploads/2022/09/2022_Bericht_Schienenbefestigung_Empa.pdf (Zugriff am 15. 11. 2024).

[47] H. Venghaus. „Der Einfluss der Gleisparameter Schienenrauheit und TDR auf die Emissionen von Schall und Erschütterun“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2017*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Berlin, 2017, S. 84–87.

[48] H. Venghaus. „Messung der Track Decay Rate und die erreichbare Genauigkeit“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2015*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Berlin, 2015.

[49] ZT Kirisits. *Monitoring Schallemissionen Eisenbahnverkehr Wörthersee: Bericht 2022*. Hrsg. von Land Kärnten und ÖBB Infra. Klagenfurt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

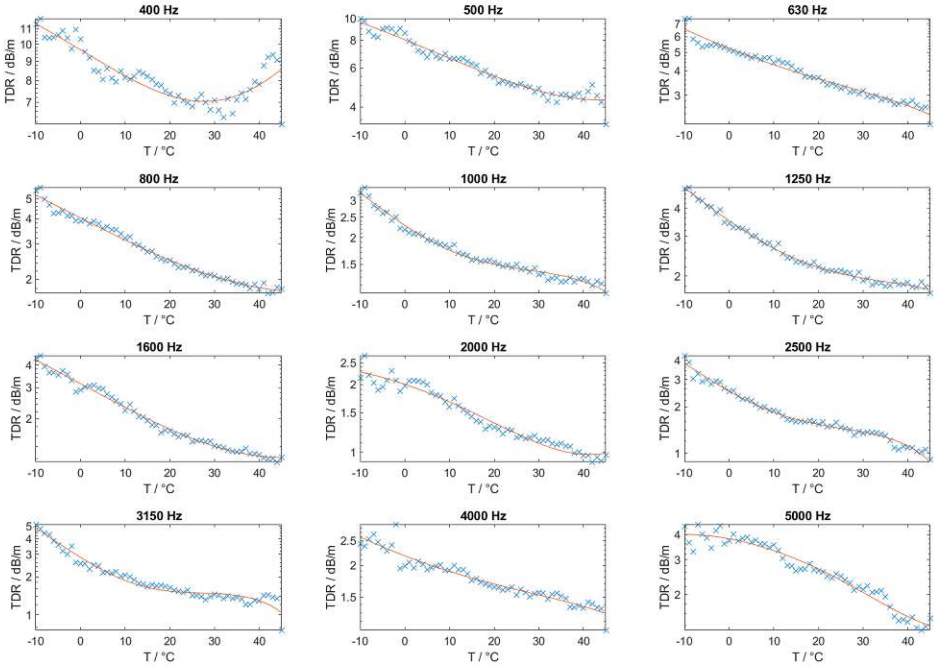
Anhang A

Ergänzungen

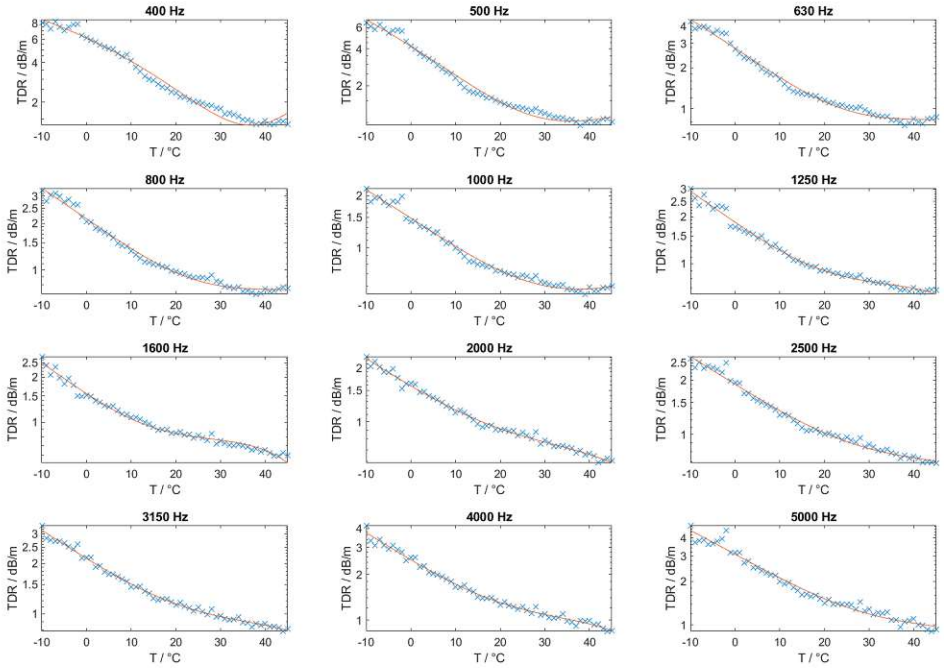
Auf den nachfolgenden Seiten sind jene Teile der Auswertung angeführt, welche aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in den Fließtext aufgenommen wurden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

A.1 Einflussfaktor Schienentemperatur



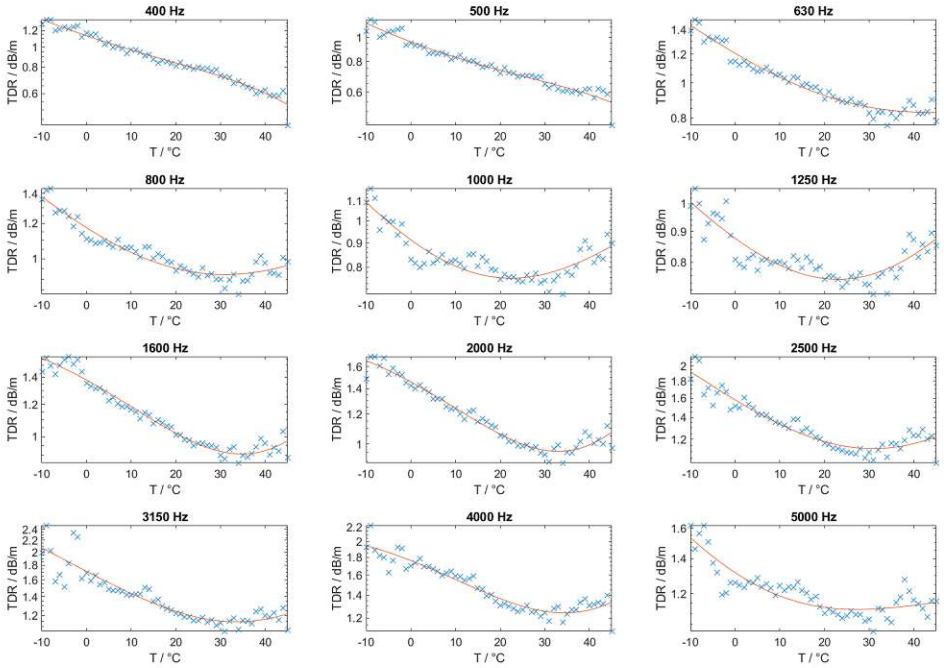
(a) Gleis 1



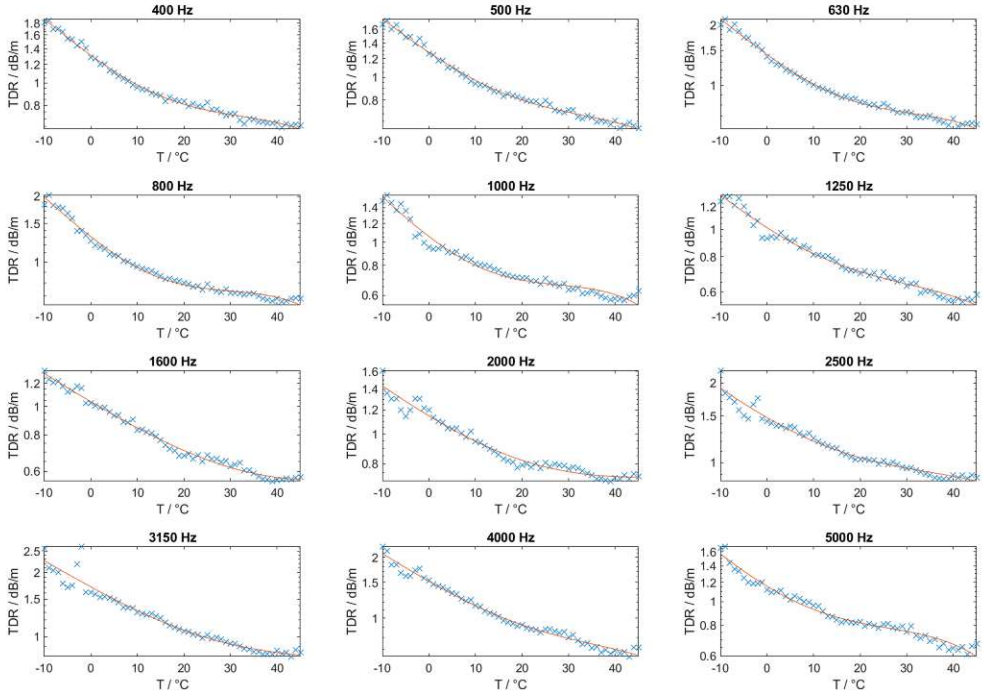
(b) Gleis 2

Abb. A.1: Kurvenanpassung mittels Polynomfunktion 3. Grades, vertikale Gleisabklingrate

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



(a) Gleis 1



(b) Gleis 2

Abb. A.2: Kurvenanpassung mittels Polynomfunktion 3. Grades, laterale Gleisabklingrate

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.