



Analyse der auftretenden Kräfte im Oberbau basierend auf Messdaten am Beispiel der Geraden

MASTERARBEIT

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Infrastruktur

vorgelegt von:

Johanna Oberlinninger, B.Sc.

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. techn. Ferdinand Pospischil M.Sc.

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Michael Höfler

Institut für Eisenbahn-Infrastrukturdesign

Graz, Mai 2024

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Affidavit

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung meiner Masterarbeit und meines gesamten Studiums unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. techn. Ferdinand Pospischil, für die wertvollen Hinweise, die fachliche Expertise und kontinuierliche Unterstützung. Außerdem richtet sich mein Dank auch an Dipl. -Ing. Michael Höfler für die kompetente und zuverlässige Betreuung, sowie die stetige Motivation, die meine Arbeit maßgeblich vorangebracht hat.

Mein Dank geht auch an das gesamte Team des Instituts für Eisenbahn-Infrastrukturdesign für die Hilfsbereitschaft, die zahlreichen Feedbacks und die freundliche Arbeitsatmosphäre. Insbesondere danke ich meinem Kollegen Dipl.-Ing. Francesco Marangon für seine Bereitschaft, sein umfangreiches Fachwissen stets an mich weiterzugeben.

Ebenfalls ein herzlicher Dank geht an meine StudienkollegInnen, allen voran den Mitgliedern des Verkehrswesenzeichensaales und meiner Lerngruppe BA, deren Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung für mich während des Studiums unverzichtbar waren.

Nicht zuletzt möchte ich meiner gesamten Familie und meinem Freund danken, die stets an meiner Seite standen und mir den Rücken gestärkt haben.

Kurzfassung

Mit dem stetig wachsenden Schienenverkehr steigen die Anforderungen an die Infrastruktur. Ein umfassendes Verständnis der Kräfte und Bewegungen im Gleis ist daher entscheidend für die nachhaltige Entwicklung von Eisenbahnstrecken. Das Projekt *Track Understanding der voestalpine Railway Systems* soll durch umfangreiche Gleismessungen realistische Daten liefern, die zur Weiter- und Neuentwicklung von Simulationsmodellen und Gleiskomponenten genutzt werden können. Durch das Institut für Eisenbahn-Infrastrukturdesign der TU Graz wurden zahlreiche dieser Messungen an verschiedenen Standorten und unter unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messung an einem geraden Streckenabschnitt der Graz-Köflacher Bahn durchgeführt. Während der Messung wurden zwei verschiedene Zwischenlagen zwischen Schiene und Schwelle mit unterschiedlichen Steifigkeiten verwendet. Mit verschiedenen Sensoren, darunter Dehnmessstreifen und Lasersensoren, wurden Vertikal- und Lateralkräfte sowie die Einsenkungen und Verkipnungen von Schwellen und Schienen erfasst. Die gewonnenen Daten wurden statistisch analysiert und dienen als Basis für die Kalibrierung von Simulationsmodellen.

Die Analyse der Messdaten zeigt, dass der Einbau von steiferen Zwischenlagen das Verhalten des Oberbaus signifikant verändert. Die Schwellen und Schienen weisen nach dem Einbau der Sensorpads weniger Einsenkungen und Verkipnungen auf. Diese gleichmäßigere Verteilung der Kräfte trägt zu einer stabileren Gleislage bei und kann Materialermüdungen reduzieren. Die Messungen der Vertikal- und Lateralkräfte ergaben, dass diese Kräfte trotz unterschiedlicher Lasten durch verschiedene Fahrzeugtypen und Geschwindigkeiten ein ähnliches Verhalten bei jeder Überfahrt aufweisen. Bei allen auftretenden Kräften und Einsenkungen kann ein Unterschied zwischen der linken und rechten Seite des Gleises festgestellt werden. Die gewonnenen Daten bieten eine solide Grundlage für die Entwicklung von Gleiskomponenten des Oberbaus und die Optimierung der gesamten Schieneninfrastruktur.

Für zukünftige statistische Auswertungen sollte die Anzahl der Überfahrten der verschiedenen Schienenfahrzeuge bei unterschiedlich definierten Geschwindigkeiten erhöht werden. Dies würde eine detailliertere Analyse der Auswirkungen von Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp auf den Oberbau ermöglichen. Langfristig können die Erkenntnisse zur Prognose von Schäden und zur Optimierung der Bahninfrastruktur beitragen, was zu erhöhter Sicherheit und Effizienz im Schienenverkehr führt.

Abstract

As rail traffic continues to grow, the demands on the infrastructure are increasing. Therefore a comprehensive understanding of the forces and movements in the track is essential for a sustainable development of railway systems. The project *Track Understanding of voestalpine Railway Systems* aims to provide realistic data through a high number of track measurements, which can be used for the development of simulation models and track components. The Institute of Railway Infrastructure Design at University of Technology in Graz has carried out numerous of these measurements at different locations and under different conditions.

In context of this thesis, a measurement was performed on a straight section of the Graz-Köflacher Bahn. During the measurement, two different intermediate layers with different stiffnesses were used between the rail and sleeper. Various sensors, including strain gauges and laser sensors, were used to record the vertical and lateral forces as well as the displacement and tilting of sleepers and rails. The data obtained was statistically analyzed and serves as a basis for the calibration of simulation models.

The analysis of the measurement data shows that the installation of stiffer intermediate layers significantly changes the behavior of the superstructure. The sleepers and rails show less displacement and tilting after the sensor pads have been installed. This more even distribution of forces results in a more stable track position and can reduce material fatigue. The measurements of the vertical and lateral forces showed that these forces show similar behavior for each train crossing, despite different loads due to different vehicle types and speeds. A difference between the left and right side of the track can be determined for all occurring forces and displacements. The data obtained provides a solid basis for the development of track components of the superstructure and the optimization of the entire rail infrastructure.

For future statistical evaluations, the number of train crossings of different rail vehicles should be increased. This would enable a detailed analysis of the effects of speed and vehicle type on the superstructure. In long term, the findings can help to predict damage and optimize the rail infrastructure, leading to increased safety and efficiency in rail transport.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund	2
2.1 Querschnittsaufbau des Gleises.....	2
2.1.1 Oberbau im vorhandenen Messquerschnitt	4
2.2 Einwirkende Kräfte	6
2.2.1 Statische Kräfte.....	6
2.2.2 Dynamische Kräfte.....	9
2.3 Krafteinleitung.....	10
2.4 Rad-Schiene Kontakt.....	11
2.4.1 Spurführung	12
2.4.2 Kräfte zwischen Rad und Schiene	14
2.4.3 Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene	16
3 Messung im Gleis	19
3.1 Gewählte Messstelle	19
3.2 Messaufbau	20
3.2.1 Sensorpads.....	22
3.3 Verwendete Messtechnik	23
3.3.1 Funktionsweise Dehnungsmessstreifen (DMS)	23
3.3.2 Funktionsweise Lasersensoren.....	25
3.3.3 Funktionsweise induktive bzw. analoge Wegsensoren	26
3.4 Berechnung der Kräfte	27
3.4.1 Vertikalkraftmessung	27
3.4.2 Lateralkraftmessung	29
3.5 Vorhandene Schienenfahrzeuge	29
3.5.1 Diesellok DH 1700	30
3.5.2 Triebwagen GTW – VT 5063	30
3.6 Prüffahrten mit variabler Geschwindigkeit	31
3.7 Validierung der Vertikalkraft mit Fallgewicht	32

4	Analyse der Messdaten	36
4.1	Datenverarbeitung	36
4.2	Definitionen und Vorzeichenkonventionen	38
4.2.1	Vertikalkraft	38
4.2.2	Lateralkraft	39
4.2.3	Einsenkung und Verkipfung von Schiene und Schwelle	39
5	Ergebnisse	41
5.1	Prüffahrten	41
5.2	Überfahrten von lokbespannten Zügen	49
5.3	S-Bahn Überfahrten	56
5.3.1	Auswertungen vor Pads Einbau	56
5.3.2	Auswertungen nach Pads Einbau	63
5.3.3	Vergleich vor und nach Pads Einbau	70
6	Erkenntnisse und Ausblick	82
7	Zusammenfassung	84
	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	87
	Tabellenverzeichnis	90
	Formelverzeichnis	91
	Anhang	i
	Anhang A	ii
	Anhang B	ix

Abkürzungsverzeichnis

RID	Institut für Eisenbahn-Infrastrukturdesign
GKB	Graz-Köflacher Bahn und Busbetrieb GmbH
DMS	Dehnmessstreifen
MB	Messbereich
MBA	Messbereichsanfang
SFS	Schienenfuß seitlich
SFU	Schienenfuß unten

1 Einleitung

Die Analyse und das Verständnis der Interaktion zwischen Rad und Schiene ist entscheidend für die Entwicklung effizienter und langlebiger Eisenbahnsysteme. Aufgrund des stetig wachsenden Schienenverkehrs steigen die Anforderungen an die Infrastruktur. Um eine nachhaltige Entwicklung von Eisenbahnnetzen zu gewährleisten, muss ein detailliertes Verständnis der Kräfte und Verformungen, die im Gleis auftreten, vorhanden sein.

Dazu dient das bereits seit einiger Zeit laufende Projekt *Track Understanding der voestalpine Railway Systems*. Im Zuge des Projektes soll das Gleis ganzheitlich betrachtet werden und ein besseres Verständnis der Komponenten des Fahrweges der Eisenbahn generiert werden. Um reale Daten zu erhalten, werden zahlreiche Gleismessungen an verschiedenen Standorten und unter unterschiedlichen Bedingungen vom Institut für Eisenbahn-Infrastrukturdesign der TU Graz durchgeführt.

Die vorliegende Masterarbeit fokussiert sich auf eine dieser Messungen zur Erfassung und Analyse von Kräften sowie Verformungen im Oberbau in der Geraden auf einem Streckenabschnitt der Graz-Köflacher Bahn. Diese Daten bieten eine Grundlage für die Kalibrierung und Weiterentwicklung von Simulationsmodellen, die in der Lage sind, die Bewegungen und Verformungen des Gleisaufbaus präzise nachzubilden. Hieraus können wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung von neuen Materialien und innovativen Gleiskomponenten gezogen werden.

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird zunächst der theoretische Hintergrund erläutert, der für das Verständnis der Interaktionen im Gleis notwendig ist. Dabei wird der vorhandene Querschnitt des Gleises näher betrachtet, sowie die einwirkenden Kräfte und der Kontakt zwischen Rad und Schiene genauer erklärt. Anschließend werden die Methodik und die Durchführung der Messung samt aller Messtechniken detailliert beschrieben. Der Fokus dieser Messung lag darin, eine möglichst breite Abdeckung von allen Bewegungen der Schienen und den Schwellen darstellen zu können. Es wurden einerseits Schienendehnungen gemessen, um daraus in weiterer Folge Vertikal- und Lateralkräfte ermitteln zu können und andererseits Einsenkungen und Verkippen von Schwellen und Schienen an verschiedenen Stellen im System bestimmt.

Anschließend werden die gewonnenen Messdaten aufbereitet. Dadurch ergibt sich in Kapitel 5 eine umfassende statistische Analyse der aus der Messung gewonnenen Ergebnisse. Diese gemessenen und berechneten Werte dienen in Folge als Validierung und Anpassung von späteren Simulationen. Abschließend werden die Erkenntnisse in Bezug auf die Kräfte und Verformungen im Oberbau interpretiert.

Mit dieser umfassenden Analyse soll die vorliegende Masterarbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Eisenbahntechnologie leisten und weist auf die Notwendigkeit einer kontinuierlichen, datenbasierten Optimierung der Bahninfrastruktur hin.

2 Theoretischer Hintergrund

Bevor die gegenständliche Messung dieser Arbeit dargestellt wird und daraus Schlüsse gezogen werden können, müssen die theoretischen Hintergründe erläutert werden. Um die Beziehungen im Gleis, zum Beispiel zwischen Schiene und Schwelle, verstehen zu können, wird nachfolgend der Gleisaufbau dargestellt. Zusätzlich wird erläutert, welche Kräfte im System wirken, wie diese zu Stande kommen und abgeleitet werden können.

2.1 Querschnittsaufbau des Gleises

Grundsätzlich können Fahrwege von Schienenfahrzeugen in zwei unterschiedliche Kategorien unterteilt werden:

- Schotteroberbau
- Feste Fahrbahn

Bei einem Schotteroberbau werden die Schienen und Schwellen, die mit Befestigungsmittel verbunden sind, in einem Schotterbett verlegt. Um die Kräfte aus dem Betrieb und aus den Temperaturunterschieden sicher in den Untergrund leiten zu können, muss der Oberbau mit bestimmten Voraussetzungen hergestellt werden. [1]

Bei der festen Fahrbahn handelt es sich um die gleichen Schienen wie auch beim Schotteroberbau, aber in Verbindung mit Fahrbahnelementen. Dabei werden die Schienen an bestimmten Punkten auf einer Betonplatte oder einer bituminösen Tragschicht befestigt. [1] Da die vorliegende Messung dieser Arbeit in einem Gleis in der Schotterbauweise durchgeführt wurde, wird in weiterer Folge auf diese genauer eingegangen und die Bauweise der festen Fahrbahn nicht betrachtet.

Grundsätzlich wird das Schottergleis in Oberbau, Unterbau und Untergrund unterteilt. Die Trennung zwischen Oberbau und Unterbau (falls vorhanden, sonst Untergrund) wird in Österreich als Planum bezeichnet. [2]

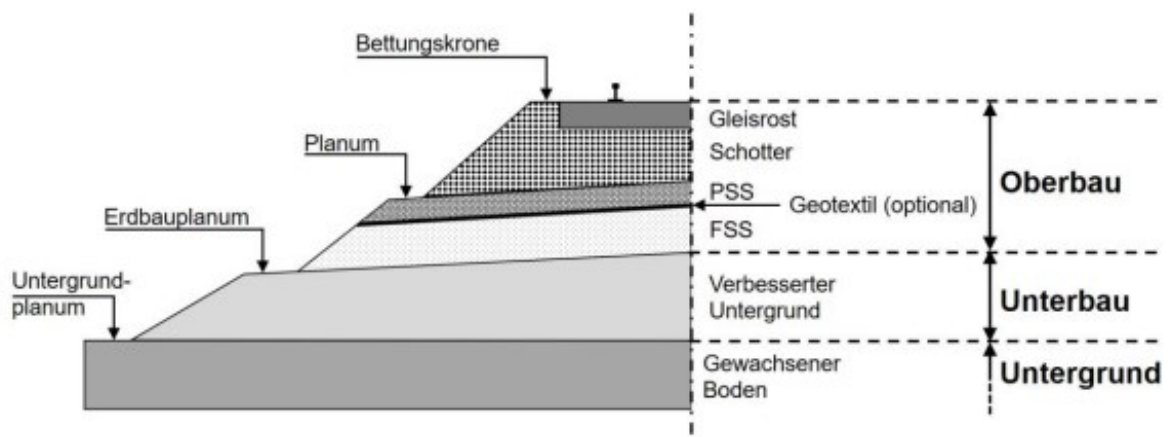


Abbildung 2-1: Systemquerschnitt des Gleisaufbaus [3]

Oberbau: Zum Oberbau gehört das Gleis mit Schienen, Weichen, Schienenbefestigungen und Schwellen, sowie das Schotterbett als Tragschicht selbst. Außerdem gehört die ggf. vorhandene Planumsschutzschicht, welche sich direkt unter dem Schotterbett befindet, auch zum Oberbau. Die Oberfläche davon stellt das Planum dar. Falls benötigt, wird direkt über dem Unterbau auch eine Frostschutzschicht eingebaut. Dazwischen kann ein Geotextil eingebracht werden. [4] Dieses dient zur Lastverteilung und zur Filterwirkung um einen durchnässten Untergrund zu vermeiden. Als minimale Schotterbettstärke werden 30 cm zwischen Planum und Unterseite der Schwelle definiert. Falls diese Stärke nicht eingehalten werden kann, weil sich der Schotter auf hartem Untergrund befindet, müssen Unterschottermatten verlegt werden. [5]

Bei der Schiene handelt es sich um die am stärksten beanspruchte Komponente des Eisenbahnoberbaus, da sie den direkten Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn darstellt. Ihre Hauptfunktionen umfassen die Aufnahme und Weiterleitung der von den Fahrzeugen ausgehenden Lasten, die Führung der Räder und die Bereitstellung einer ebenen Fahrfläche. [6]

Unter Schienenbefestigung werden Konstruktionsteile, die die Schiene mit der Schwelle verbinden sollen, verstanden. Hierbei muss unter anderem sichergestellt sein, dass die Spurhaltung der Schiene, das heißt die Haltung der ursprünglichen Lage, auch unter Belastung gegeben ist. Außerdem muss ein konstanter Druck zwischen Schwelle und Schienenfuß zu jeder Zeit erhalten sein. [7]

Die Schwellen sind aus Materialien wie Holz, Stahl oder Spannbeton gefertigt. Für eine effiziente Kraftübertragung in die Bettung sind eine umfangreiche Auflagefläche unter den Schienen an der Unterseite der Schwellen sowie ausgedehnte seitliche Kontaktflächen mit der Bettung notwendig. Der Abstand zwischen den Schwellen auf Eisenbahnstrecken liegt üblicherweise zwischen 60 und 70 cm. [6]

Der Schotter hat die Aufgabe, die Lasten, die von den Schienen und Schwellen ausgehen, gleichmäßig auf den Unterbau und den darunter liegenden Boden zu verteilen. Dies trägt dazu bei, die erforderliche Stabilität des Gleisbetts sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu gewährleisten. Außerdem schützt der Schotter den Untergrund, indem er die Kräfte verteilt und so eine Überbelastung verhindert. [2] Es handelt sich beim Schotter jedoch um die Schwachstelle im Oberbau. Dieser ist die einzige Oberbaukomponente, bei der im Gegensatz zu Schiene und Schwelle natürliche Eigenschaften vorliegen. Dadurch ergeben sich aufwendige Instandhaltungsmaßnahmen wie Stopfen, Reinigen oder Stabilisieren im Schotterbett. Um langfristige Verformungen zu vermeiden, muss das Schottermaterial eine gewisse Festigkeit aufweisen. Diese wird von Faktoren wie Härte, Zähigkeit, Rauheit der Körner, Korngrößenverteilung, Höhe der eingebrachten Schotterschicht usw. beeinflusst. Hartgesteine wie Granit, Basalt und Diabas erfüllen diese Anforderungen am besten. [5]

Unterbau: Der Unterbau stellt eine verbesserte und verdichtete Untergrundschicht dar, die den Oberbau trägt und zumeist aus einer oberen und unteren ungebundenen Tragschicht besteht. Die vom Oberbau einwirkenden Kräfte und Lasten müssen aufgenommen werden. Außerdem muss im Unterbau eine ausreichende Entwässerung vorhanden sein. Die Oberfläche dieser Schicht wird als Erdbauplanum bezeichnet [3]. Falls es die Eigenschaften des Untergrunds und der Aufbau des Oberbaus zulassen, kann auf den Unterbau verzichtet werden. [4]

Untergrund: Als Untergrund wird der gewachsene Boden samt Entwässerung unter dem Unterbau bezeichnet. Die Oberfläche wird als Untergrundplanum beschrieben. [3]

2.1.1 Oberbau im vorhandenen Messquerschnitt

In weiterer Folge werden die Komponenten des spezifischen Oberbaurückbaus des Gleises an der Messstelle von oben nach unten genauer beschrieben.

2.1.1.1 Schiene

Als Schienen werden Vignolschienen mit der Bezeichnung 60E1 verwendet. Diese sind unter anderem Standardschienenprofile für Neubauten auf Hauptstrecken im österreichischen Raum. In Europa werden Vignolschienen ab 46 kg/m laut EN 13674-1 nach dem Laufmetergewicht und der spezifischen Bezeichnung für das Schienenprofil bezeichnet. In Tabelle 2-1 sind die geometrischen Parameter dieses Schientyps dargestellt. [2] nach [8]

Tabelle 2-1: Geometrische Parameter des Standardprofils 60E1 [2] nach [8]

	Masse	Höhe	Kopfbreite	Fußbreite	Stegstärke
	[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
60E1	60,21	172	72	150	16,5

Die an der Messstelle vorhandenen Schienenprofile sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Dabei handelt es sich bei der orangen Linie um das gemessene Schienenprofil mit einer Einbauneigung von 1:40. Es ist zu erkennen, dass bei den Schienenprofilen bisher kaum Verschleiß aufgetreten ist. Dies ist auf den Einbau der Schienen im Jahr 2021 und auf die vergleichsweise geringen Lasten, die auf diesem Streckenabschnitt vorherrschen, zurückzuführen.

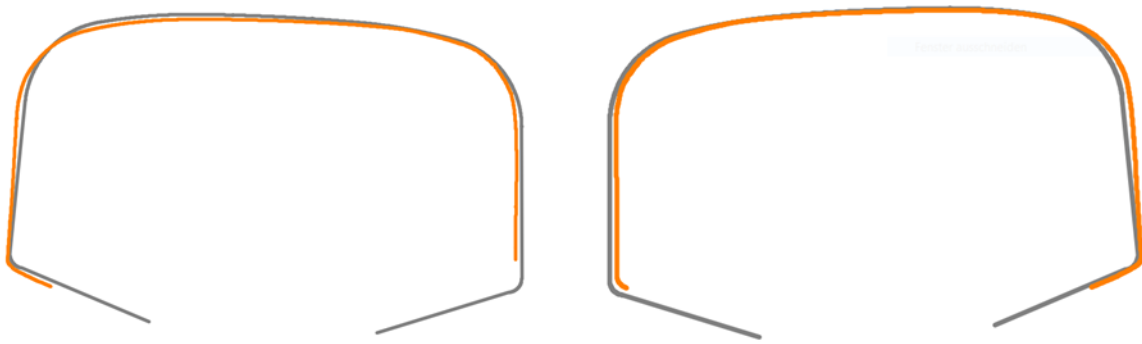


Abbildung 2-2: Gemessene Schienenprofile bei der Messstelle

Zusätzlich zu dem Profil sind auch die Werkstoffeigenschaften, genauer gesagt die Stahlsorte, der Schienen von Bedeutung. Die in Österreich gängigste verschleißfeste Güte wird als R260 bezeichnet. Die Einteilung der Güte erfolgt durch die Brinellhärte des Schienenkopfes. Für die Güte R260 ist eine Mindestzugfestigkeit von 880 N/mm^2 erforderlich. [7]

2.1.1.2 Schienenbefestigung

Die verwendete Schienenbefestigung wird als unmittelbare Befestigung bezeichnet, das heißt die Schiene ist direkt mit der Schwelle verbunden. Da es sich bei den Schwellen um Betonschwellen handelt, fungiert standardmäßig eine W-Befestigung als Befestigungsart. Die Schiene kann nur über eine elastische Zwischenlage getrennt, mithilfe von Schwellenschrauben und Spannklemmen SKL14, direkt auf der Schwelle befestigt werden. Durch seitliche Winkelführungsplatten kann zusätzlich die Lage der Schiene gesichert werden. [7]

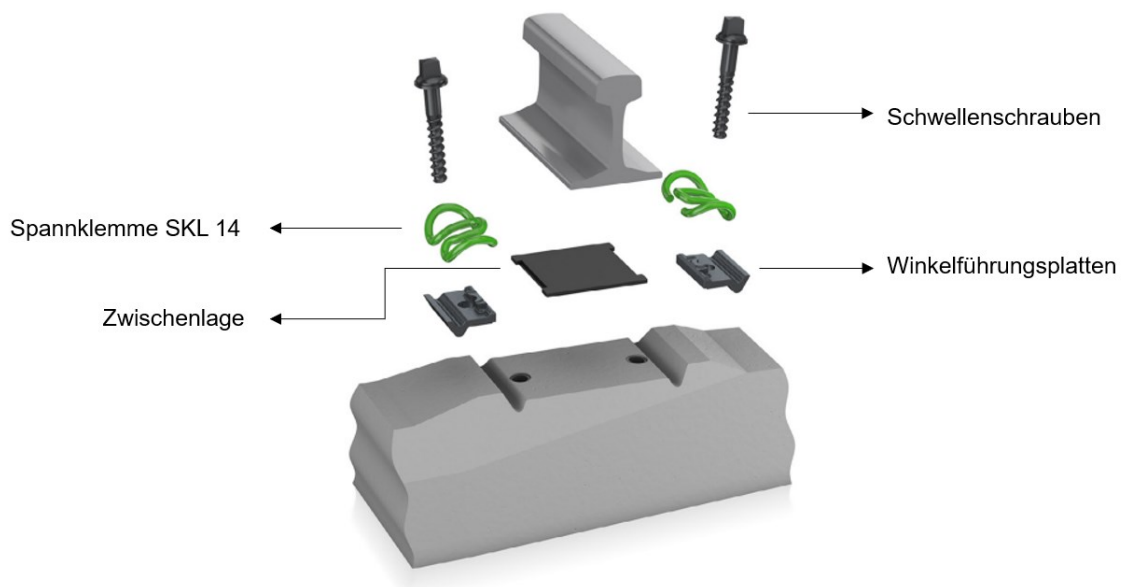


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Schienenbefestigung [9]

2.1.1.3 Schwelle

Bei der gegenständlichen Betonschwelle handelt es sich um eine Monoblockschwelle mit der Bezeichnung L2, welche in Österreich üblicherweise bei Hauptstrecken eingesetzt wird [2]. Die Schwelle weist eine hohe Gleislagestabilität auf und ist für die in Österreich gängigen Schienenprofile 49E1, 54E2 und 60E1, sowie die gängigen Schienenbefestigungen geeignet. Die Schwellen dürfen mit einer Achslast von bis zu 25t und bis zu einer Geschwindigkeit von 250km/h befahren werden. [10] Nachfolgend sind die wichtigsten Abmessungen der Schwelle in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Abmessung der Betonschwelle L2 [10]

	Schwellenlänge	Schwellenbreite	Schwellenhöhe unter der Schiene	Reines Schwellengewicht
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]
L2	2600	300	215	320

2.1.1.4 Schotter

Als Schotter in der Bettung wird der in Österreich typischerweise verwendete Gleisschotter 1 mit einer Kornverteilung von 31,5/63 verwendet. Die Kornverteilung gibt an, zwischen welchen zwei Siebgrößen der Großteil der Körner liegt. Die Schotterbettstärke ist laut ÖBB Regelwerk 01.05 mit 50 cm ausgeführt. Diese wird zwischen der Schwellenoberkante in Schienenachse und dem Planum gemessen. Außerdem ist die Schotterbettflanke standardmäßig in einem Böschungswinkel von 2:3 ausgeführt. Diese bezeichnet die Abflachung des Schotters am Rande der Bettung. [2]

2.2 Einwirkende Kräfte

Durch den Kontakt zwischen Rad und Schiene und zusätzliche Umwelteinflüsse, sowie Betriebsprozesse entstehen statische Kräfte im Gleis. Zusätzlich kann es durch Unebenheiten im Gleis, Unregelmäßigkeiten in den Rädern oder Eigenschwingungen des Fahrzeugs zu dynamischen Kräften kommen. [11] Ein Teil dieser Kräfte wird im Zuge der gegenständlichen Messung gemessen und später dargestellt.

2.2.1 Statische Kräfte

Es wirken grundsätzlich Kräfte in drei verschiedene Richtungen auf die Schiene.

- Vertikalkräfte (Q)
- Lateralkräfte/Querkräfte (Y)
- Schienenlängskräfte/Tangentialkräfte (X)

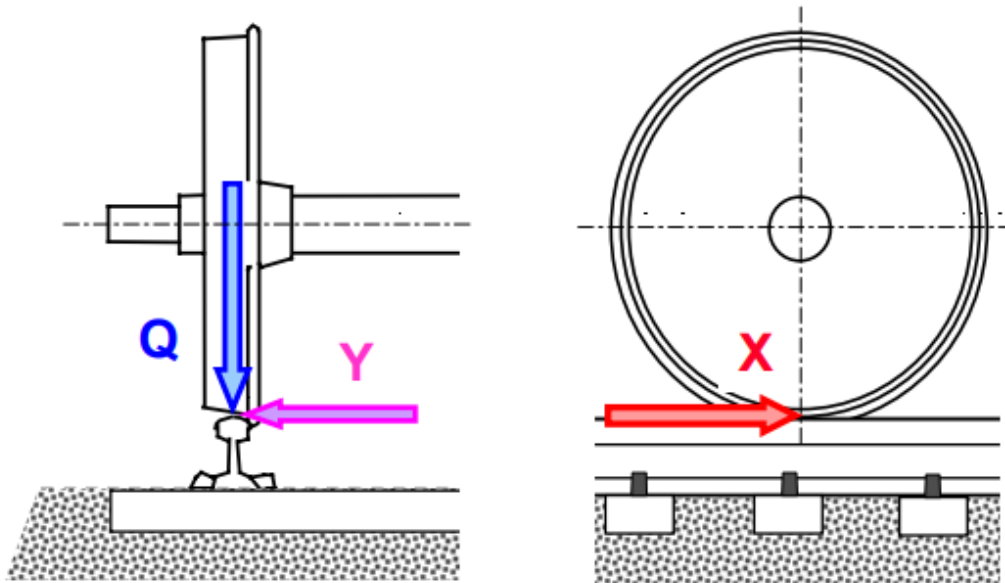


Abbildung 2-4: Statische Kräfte im Rad-Schiene System [12]

2.2.1.1 Vertikalkräfte

Die vertikalen Kräfte im Gleis werden hauptsächlich durch das Eigengewicht der Schienenfahrzeuge und der sich darauf befindenden Lasten erzeugt. Maximale Achslasten auf Mischverkehrsstrecken im deutschsprachigen Raum betragen ca. 22,5 t. Die Vertikalkraft kann in einen statischen und einen dynamischen Anteil unterschieden werden. Die statische Vertikalkraft tritt dauerhaft auf, auch wenn es zu keiner Bewegung der Schienenfahrzeuge kommt. [2] Durch die Vertikalkräfte können Normal-, Schub- und Zugeigenspannungen unterhalb der Schienenoberkante erzeugt werden. [11]

Der Fahrweg und das Fahrzeug stehen in einer wechselseitigen Interaktion, wobei der Fahrweg die Art der Belastung wesentlich beeinflusst. Unregelmäßigkeiten im Rad-Schiene-Kontakt, wie Schienenstöße oder andere Fehler, führen zu plötzlichen Anregungen des Fahrzeugs, wodurch die vertikale Belastung des gesamten Systems erheblich erhöht wird. Ähnliche Auswirkungen zeigen auch hohl liegende oder ungleichmäßig gestopfte Schwellen. [2]

2.2.1.2 Lateralkräfte/Querkräfte

Querkräfte sind seitliche Kräfte, die normal zur Fahrtrichtung/Gleisachse auf die Schienen wirken [13]. Die Kräfte haben verschiedene Ursachen, darunter Fahrzeugschwingungen, Windeinwirkung und die bereits erläuterte Spurführung. Insbesondere in Bögen erzeugt die Spurführung zusätzliche horizontale Kräfte, die signifikant größer sind als in geraden Abschnitten (siehe Abbildung 2-5). [2] Bei diesen zusätzlichen Kräften durch die Spurführung wird von Führungskräften gesprochen. Diese sind von verschiedenen Faktoren abhängig, wie der Geschwindigkeit, dem Bogenradius und der Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene. Sie werden aber auch von vielen verschiedenen fahrzeugtechnischen Parametern, wie zum Beispiel Achsstand, Achskraft, Drehgestell usw. beeinflusst. [13]

Diese Kräfte rufen eine hohe Belastung der Fahrzeugkomponenten hervor. Abhängig von Faktoren, wie der Überhöhung im Bogen und der Geschwindigkeit, wird das Fahrzeug entweder nach außen gegen die äußere Schiene oder gegen die innere Schiene gedrückt. [2]

Querkräfte verursachen eine Neigung des Fahrzeugs (Kippbewegung) sowie eine seitliche Verschiebung der Schiene in Richtung Schwellenkopf (Spreizkraft). Die Schienenbefestigung wirkt diesen Belastungen entgegen, da eine unkontrollierte Ausdehnung der Spurweite zu Entgleisungen führen könnte. Ähnlich wie Vertikalkräfte werden auch Querkräfte durch die Schwellen aufgenommen und über den Schotter weitergeleitet. [2]

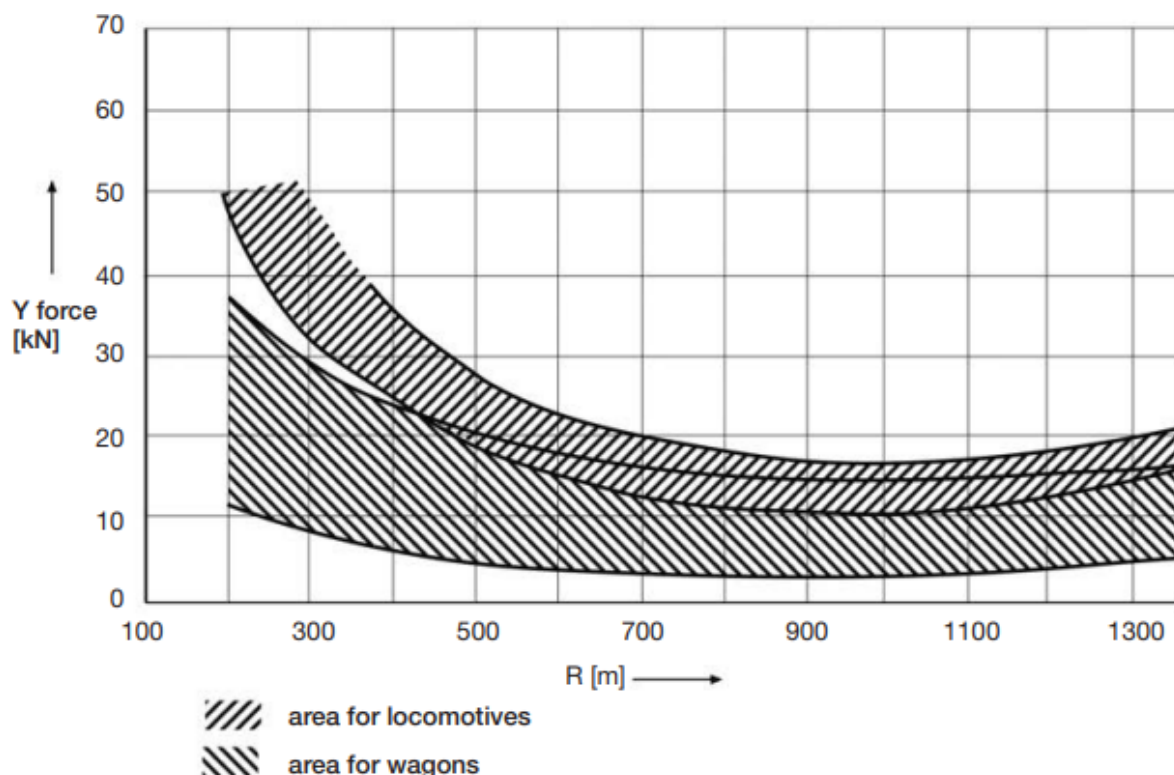


Abbildung 2-5: Horizontale Führungskräfte in Abhängigkeit des Bogenradius [13]

2.2.1.3 Schienenlängskräfte/Tangentialkräfte

Längskräfte in der Schiene können durch verschiedene Faktoren hervorgerufen werden, darunter die temperaturbedingte Längenänderung der Schiene, Brems- oder Beschleunigungsvorgänge, Schieneneigenspannungen sowie Spannungen infolge des Schrumpfens nach dem Schweißen. [11] Auf die ersten beiden Ursachen wird nachfolgend genauer eingegangen.

Temperaturbedingte Längskräfte: Die Ausdehnung von Stahl unter Wärmeeinwirkung ist ein wichtiger Aspekt für Schienen als linienförmige Bauwerke. Im Laufe eines Jahres unterliegen Schienen extremen Temperaturschwankungen, insbesondere im Sommer, wenn direkte Sonneneinstrahlung die Schienentemperatur auf über 50°C erhöhen kann. Die Längenänderung der Schiene, wenn sie reibungsfrei gelagert ist, ergibt sich wie folgt: [2]

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Gleichung 2-1: Längenänderung [2]

mit:

α in [m/m]	...	Wärmeausdehnungskoeffizient von Schienenstahl 0,0000115
Δt	...	Temperaturdifferenz zur Verlegetemperatur
l in [m]	...	Schienenlänge
Δl in [m]	...	Längenänderung der Schiene

Wenn die Längenänderung der Schiene nicht ermöglicht wird, entstehen im Inneren Längskräfte. Dies kann im Winter vermehrt zu Schienenbrüchen und im Sommer zu Gleisverwerfungen oder Verdrückungen führen. [2]

Längskräfte durch Brems- oder Beschleunigungsvorgänge: Während der Beschleunigung mittels angetriebener Achsen entstehen aufgrund der Haftreibung Zugkräfte vor und Druckkräfte hinter der Achse. Die Intensität der Längsspannungskräfte wird durch die Radlast und den Haftreibungswert beeinflusst. Der Haftreibungswert wird als das Verhältnis der übertragenen Haftreibungskraft zur Normalkraft definiert. Als Haftreibungskraft wird jene Kraft bezeichnet, die das Bewegen zweier berührender Körper gegeneinander verhindert. Die statische Reibungskraft (Haftreibung) entspricht der erforderlichen Tangentialkraft, um eine Gleitbewegung der Körper zu initiieren. Das Bremsen ist der gegensätzliche Vorgang zur Beschleunigung. Es werden Druckspannungen vor der gebremsten Achse erzeugt und grundsätzlich alle Achsen in den Bremsvorgang miteinbezogen. [11]

2.2.2 Dynamische Kräfte

Dynamische Kräfte können aufgrund verschiedener Faktoren auftreten. Etwa durch Radlastverlagerungen. Diese können entstehen, wenn eine nicht entsprechende Überhöhung vorhanden ist. Außerdem können Schwingungsanregungen durch Schienen-Oberflächenfehler, wie Riffel oder Schlupfwellen entstehen. Auch Eigenschwingungen durch Fahrzeuge und das Gleis selbst können dynamische Kräfte verursachen. Die Eigenschwingungen der Fahrzeuge sind durch das Feder-Dämpfer-System der Laufwerke bestimmt. [13]

2.3 Krafteinleitung

Die zuvor beschriebenen Kräfte des Gleises müssen über den Bahnkörper in den Untergrund eingeleitet werden. Dabei erfolgt der Eingang aller Kräfte, außer der Lasten des Gleiskörperaufbaus selbst, über die Schiene. Die Aufnahme der horizontalen Kräfte erfolgt über die im Schotterbett liegenden Schwellen und die auftretenden Querverschiebewiderstände [5]. Darauf wird im Zuge dieser Arbeit nicht detaillierter eingegangen, stattdessen wird in weiterer Folge nur die Einleitung der Vertikalkräfte genauer betrachtet.

Die wirkenden Kräfte in der Berührfläche zwischen Rad und Schienenkopf (siehe 2.4.2) werden durch die Schienenbiegung auf mehrere Schwellen aufgeteilt. Die Ableitung der Kräfte erfolgt durch den Schienenfuß, die (elastische) Zwischenlage, die Schwelle und den Schotter, sowie ggf. Schutzschichten bis in den Unterbau/Untergrund. Dabei werden die Kräfte auf jeweils immer größere Flächen verteilt, damit die Flächenpressung im Untergrund nicht überstiegen wird. Es entstehen unter den Schwellen in der Schotterbettung sowie in Unterbau und Untergrund Spannungsspitzen, die durch die Wahl der richtigen Bauteile und Schichtdicken möglichst gering gehalten werden sollen. [14]

In Abbildung 2-6 ist das Prinzip der Druckverteilung der Radlastkraft Q über die einzelnen Systemkomponenten des Gleises dargestellt. Dabei ist auf der rechten Seite zu erkennen, dass sich der Druck durch die Vergrößerung der Querschnittsflächen bis zur Oberkante des Untergrundplanums um ca. den Faktor 4000 reduziert. Das heißt durch eine Radlast von 125 kN (12,5 t) wirkt am Kontaktpunkt (Annahme 3 cm² groß) zwischen Rad und Schiene eine Druckspannung von 42 kN/cm² (4,2 t/cm²). An der Kontaktfläche zwischen Schotterbettung und Unterbau/Untergrund wirkt hingegen nur mehr eine Druckspannung von 0,01 kN/cm² (1t/cm²). Dieser sogenannte Bettungsdruck darf bei Schnellfahrstrecken max. 30 N/cm² betragen [5].

Auf der linken Seite der Abbildung 2-6 ist zu erkennen, dass sich ausgehend vom Schwellendruck auf den Schotter, der Druck bereits nach der Hälfte der Schwellenbreite, gemessen von der Schwellenunterkante, halbiert hat. Im Untergrund kommen somit nur mehr 30% des Drucks, welcher durch die Schwelle auf die Bettung wirkt, an. Diese Theorie stimmt auch mit der rechten Abbildung überein. Hierbei liegt die Druckspannung zwischen Schwelle und Bettung bei 37 N/cm² und die bereits erwähnte Druckspannung zwischen Bettung und Untergrund bei ca. 10 N/cm².

2.4 Rad-Schiene Kontakt

Der Vollständigkeit halber sind alle in weiterer Folge verwendeten Begrifflichkeiten in Bezug auf den Berührungspunkt zwischen Radsatz und Schiene in der Abbildung 2-7 dargestellt.

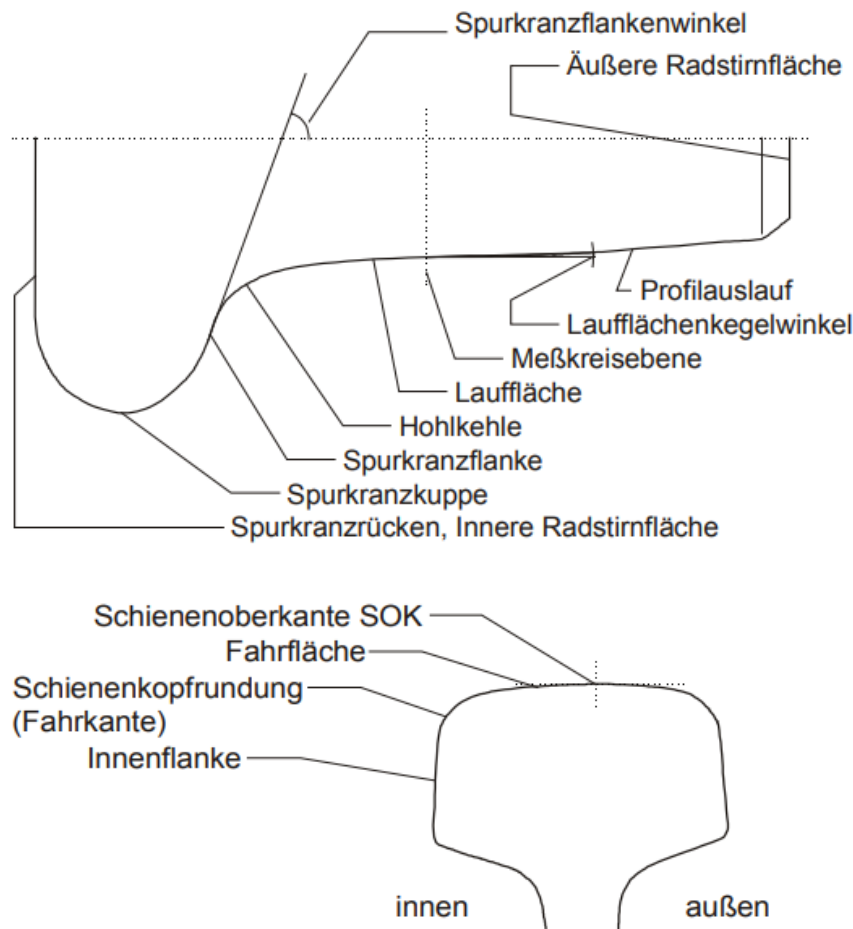


Abbildung 2-7: Elemente der Schiene und des Radsatzes [16]

2.4.1 Spurführung

Das Spurführungsprinzip bei Schienenfahrzeugen basiert auf der Verwendung von Spurkranzrädern mit einem konischen Fahrflächenprofil. Diese spezielle Formgebung der Räder ist entscheidend für die Stabilität und Sicherheit des Fahrzeugs während des Betriebs auf den Gleisen. Die Konizität der Räder sowie die Neigung der Schienenfahrflächen im Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene spielen eine essenzielle Rolle für das selbstzentrierende Verhalten des Fahrwerks auf geraden Gleisen. Zwischen den beiden Komponenten muss ein Formschluss vorhanden sein, um die Führung des Radsatzes in der Geraden sowie auch im Bogen gewährleisten zu können [17]. Besonders wichtig sind die Spurkränze der Räder für das Durchfahren von Gleisbögen mit kleinen Radien. Durch ihre Form bilden die Spurkränze einen festen Anschlag mit der Schiene, wodurch die Querbewegungen des Fahrwerks begrenzt werden können und somit die Fahrzeugstabilität aufrechterhalten wird. [4]

Die Spurkränze an den Rädern sind innenliegend zur Fahrzeuglängsachse hin positioniert. Das bedeutet, dass der Kontakt zwischen den Spurkranzflanken und der Schiene immer auf der zur Gleismitte gerichteten Innenseite der Schiene erfolgt, die somit die Fahrflanke bildet. [4]

2.4.1.1 Fahrt in der Geraden

Grundsätzlich werden heutzutage die Radlaufflächen der Schienenfahrzeuge kegelförmig ausgebildet und die Fahrflächen der Schienen leicht zur Gleismitte hingeneigt. Wenn ein Radsatz innerhalb des Spurspiels aus der Schienenmitte ausgelenkt wird, ändert sich aufgrund der konischen Form der Räder die wirksame Lauffläche. Wie in Abbildung 2-8 erkennbar ist, bewegt sich das Rad auf der Seite der Auslenkung auf einem größeren Durchmesser, während das gegenüberliegende Rad auf einem kleineren Durchmesser läuft. Diese Unterschiede im Durchmesser führen dazu, dass das ausgelenkte Rad einen größeren Weg zurücklegt als das andere Rad. Dieses Phänomen resultiert in einer Wendebewegung um die Hochachse des Radsatzes und erzeugt eine Winkeldrehung, die der ursprünglichen Auslenkung entgegenwirkt. Durch diesen Mechanismus entsteht ein selbstregulierender Effekt, der als "Wellenlauf" bekannt ist. Bei einer exakt kegelförmigen Schienen- und Radlauffläche wird von einem „Sinuslauf“ gesprochen. Dieser Effekt trägt maßgeblich zu einem stabilen und ruhigen Fahrzeuglauf bei. [18]

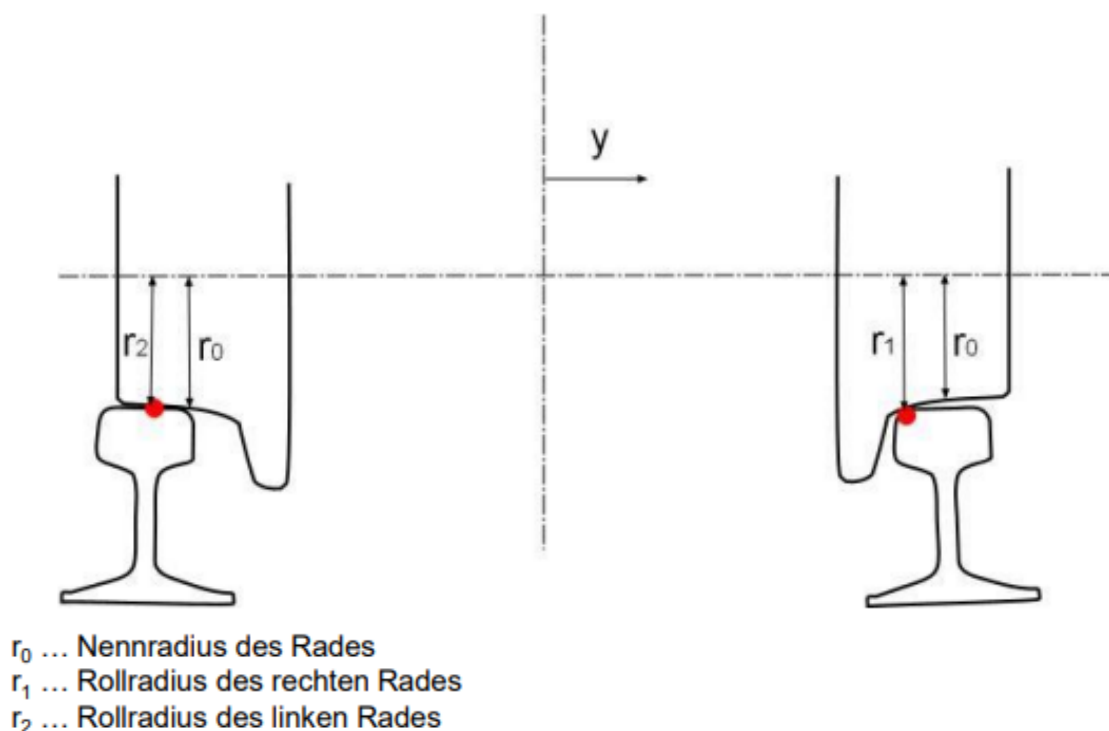


Abbildung 2-8: Bewegung des Radsatzes in der Geraden [19]

2.4.1.2 Fahrt im Bogen

Beim Durchfahren von Gleisbögen werden bei den äußeren Schienen die Spurkränze ohne Spurspiel gegen die Schienenfahrflanke getrieben. Während des Durchfahrens eines Gleisbogens entstehen durch das Anfahren des Spurkränzes zusätzliche Kraftkomponenten auf die führenden Räder. Diese werden durch Momente der Achslagerquerkräfte um die Fahrwerkslängsachse und durch Momente der Fliehkräfte verursacht, die oberhalb des Flankenkontakts von Spurkranz und Schiene angreifen. Diese Momente wirken nach außen gerichtet im Bogen und führen zu einem entsprechenden Reaktionsmoment der Radaufstandskräfte. Dadurch werden die bogenaußen fahrenden und führenden Räder zusätzlich mit einer Aufstandskraft belastet. Währenddessen werden die bogeninnen fahrenden Räder um die identische Aufstandskraft entlastet. Dies trägt zur Gesamtstabilität des Fahrzeugs bei und erhöht die Sicherheit gegen Entgleisen. [4]

2.4.2 Kräfte zwischen Rad und Schiene

Um ein Verständnis für die Kraftableitung zwischen dem Rad und der Schiene zu bekommen, werden in diesem Kapitel die Kräfte zwischen dem Radsatz und der Schiene genauer betrachtet. Es kann dabei grundsätzlich zwischen den Zwangskräften und den Reibkräften unterschieden werden.

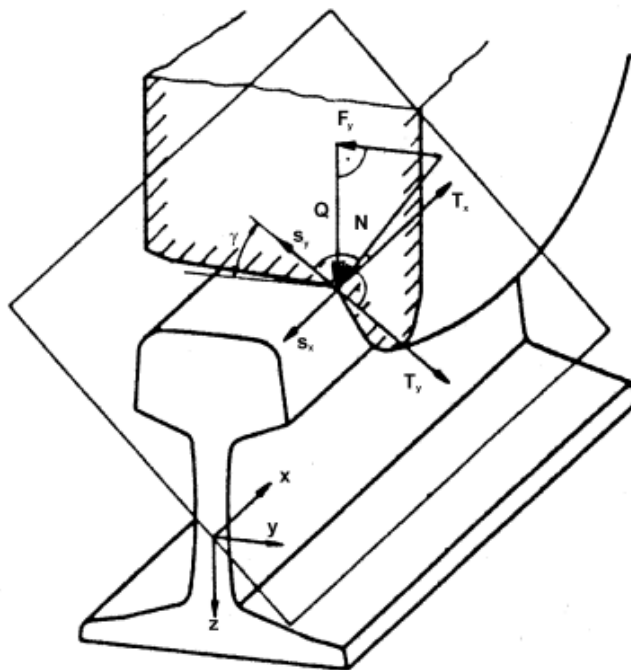


Abbildung 2-9: Zwangs- und Reibkräfte im Kontaktpunkt [16]

Die Zwangskräfte wirken in der Normalebene. Diese ist in Abbildung 2-9 schraffiert dargestellt und liegt senkrecht zur Berührfläche im Radmittelpunkt. Dabei wird in Radlastkraft (Q), in Normalkraft (N) und in Profilseitenkraft (F_y oder Y) unterschieden. Die Reibkräfte wirken hingegen in der Tangentialebene, welche direkt in der Berührfläche liegt. Dabei kann zwischen Längs- und Querreibkräften (T_x und T_y) unterschieden werden. Außerdem sind in der Abbildung 2-9 der Längs- und Querschlupf dargestellt (s_x und s_y). [16] In dieser Arbeit werden lediglich die Zwangskräfte genauer betrachtet. Die Reibkräfte werden nicht weiter betrachtet.

Zwangskräfte: Grundsätzlich wirkt am Rad die Radlastkraft Q , dadurch wirkt die Reaktionskraft N im Kontaktpunkt senkrecht zur Berührebene. Durch die Neigung des Radprofils entsteht aus der Reaktionskraft eine Querkomponente F_y , die in Richtung Gleismitte drückt. [16]

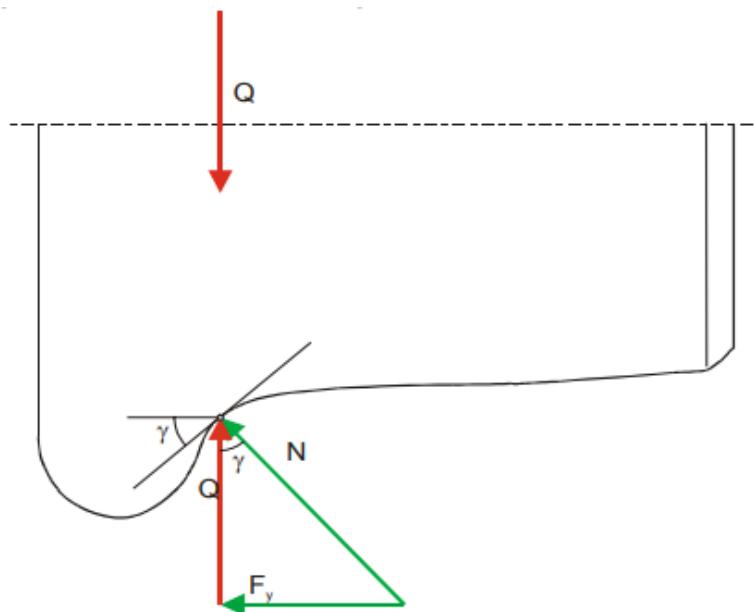


Abbildung 2-10: Zwangskräfte im Kontaktpunkt [16]

$$N = \frac{Q}{\cos \gamma}$$

Gleichung 2-2: Normalkraft [16]

$$F_y = Q \cdot \tan \gamma$$

Gleichung 2-3: Profilseitenkraft [16]

mit:

N	...	Normalkraft in der Berührfläche
F_y	...	Profilseitenkraft
Q	...	Radlastkraft
γ	...	Tangentenneigung des Radprofils

Die Normalkraft, sowie die Profilseitenkraft hängen, wie in der Abbildung 2-10 ersichtlich, von der Profilneigung im veränderlichen Berührpunkt ab. Es handelt sich hierbei um keinen linearen Zusammenhang. Im Bereich des Spurkranzes kommt es zu einem Anstieg der Kräfte [16].

2.4.3 Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene

Welche Punkte des Radprofils sich mit welchen Punkten der Schiene aufgrund der Spurführung berühren und welche Kräfte dadurch entstehen, ist abhängig von der geometrischen Form der Profile. Da durch den Betrieb besonders bei Spurkranz und Lauffläche ein hoher Verschleiß entsteht, ändert sich die Laufeigenschaft und Berührgeometrie im Laufe der Zeit. Das Kräftespiel unterliegt somit einer großen Varianz. [17]

Die Materialien von Rad und Schiene verhalten sich elastisch, deswegen verformen sich diese aufgrund der Größe der Normalkraft. Es ergibt sich eine Berührfläche mit Kontaktspannungen. [16] Für die Berechnung dieser Berührfläche und der dazugehörigen Normalspannungen gibt es verschiedene Methoden. Die einfachste Methode ist die Theorie nach Hertz. Um detailliertere Berechnungen der Kontaktfläche für Simulationen durchführen zu können, müssen Finite-Elemente-Lösungen verwendet werden. [20]

2.4.3.1 Theorie nach Hertz

Nach dieser Theorie stellt die Berührfläche zwischen Rad und Schiene die Form einer Ellipse dar. Im Rollzustand ist die gesamte Kontaktfläche die Haftfläche, was bedeutet, dass alle Elemente dieser Fläche ohne relative Bewegungen zueinander in direktem Kontakt stehen. Bei der Kraftübertragung, wie beispielsweise beim Antrieb, beginnt jedoch der hintere Teil dieser Kontaktfläche zu gleiten, wodurch eine Aufteilung der Hertz'schen Fläche in zwei Bereiche entsteht: ein Haftgebiet und ein Gleitgebiet. Diese beiden Gebiete sind durch unterschiedliche Oberflächen-Schubspannungen gekennzeichnet. Im vorderen Teil des Berührgebietes entstehen im Rad Druckspannungen und auf der Schiene Zugspannungen, während im hinteren Gleitgebiet diese Verhältnisse umgekehrt sind – es kommt zu Stauchung der Schiene und Dehnung des Rades. Diese Veränderungen führen zu unterschiedlichen Umfangs- und Fahrgeschwindigkeiten zwischen Rad und Schiene, was als Schlupf bezeichnet wird. Für eine effektive Kraftübertragung ist ein gewisses Maß an Schlupf notwendig. Mit steigender Kraftübertragung vergrößert sich das Gleitgebiet zulasten des Haftgebietes. [7]

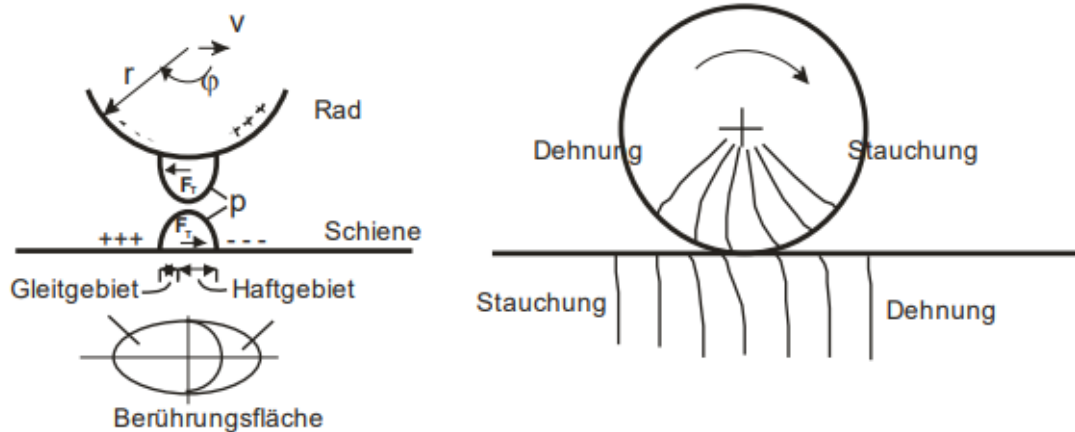


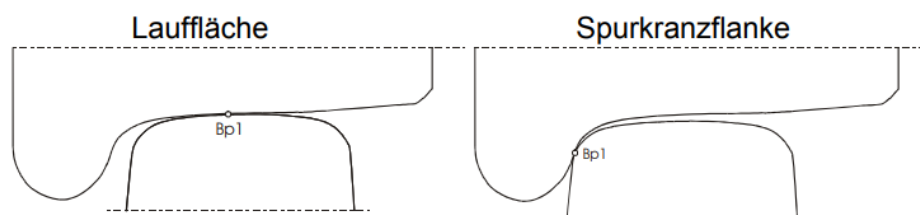
Abbildung 2-11: Hertz'sche Fläche [7]

Die maximale Antriebskraft wird erreicht, wenn die gesamte Kontaktfläche aus Gleitbereichen besteht und die Haftzone auf einen Punkt reduziert wird. Eine weitere Erhöhung der Kraftübertragung führt nicht zur Verbesserung des Antriebs, sondern bewirkt eine Beschleunigung des Rades mit einem vorherrschenden Gleitzustand, wodurch der Kraftschluss abnimmt (Makroschlupf). [7]

2.4.3.2 Berührungspunkte

Grundsätzlich kann beim Rad-Schiene Kontakt zwischen einer Einpunktberührung und einer Zweipunktberührung unterschieden werden (siehe Abbildung 2-12). Darüber hinaus gibt es auch die Definition der konformen Berührung. Diese ist laut dem *National Research Council of Canada* gegeben, wenn sich im unbelasteten Zustand zwischen Schiene und Spurkranz des Rades kein Spalt größer 0,1 mm bildet. Durch eine Belastung wird der Spalt aufgehoben. [21]

Einpunktberührung



Zweipunktberührung

Spurkranzflanke/Lauffläche

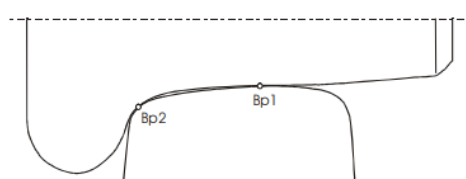


Abbildung 2-12: Berührungspunkte [16]

Einpunktberührung:

In diesem Fall greifen die Radaufstandskraft Q_A und die Führungskraft Y im Berührungspunkt B an. Zusätzlich dazu wirken die Normalkraft N und die Reibungskraft μN als Reaktionskräfte. [7]

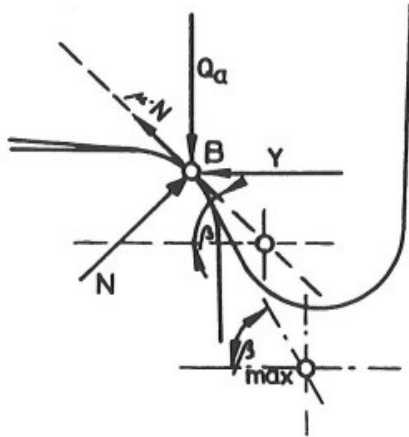


Abbildung 2-13: Einpunktberührung zwischen Rad und Schiene [7]

Zweipunktberührung:

Hier kommt es zu einer Berührung zwischen Radsatz und Schiene im Radaufstandspunkt A und im Spurkranzdruckpunkt B. Da die führende Radachse in einem Winkel zur Schiene läuft, liegen die Punkte A und B nicht in derselben Ebene, sondern B etwas weiter vorne. [7] Durch das Gleiten in Querrichtung kommt es durch Spurkranzquerkräfte und Schlupf zum Spurkranzverschleiß. [21]

Die Radaufstandskraft Q wird in Form von Radaufstandskraftanteilen Q_A (Hier wird die Annahme getroffen, dass diese Kraft senkrecht wirkt [16].) und Q_B übertragen. Außerdem wirken die Reibungskräfte μQ_A und μN , wobei μQ_A waagrecht in A in Richtung der Bogenaußenseite und N schräg nach oben gerichtet in B wirkt. Zusätzlich wirkt in B der Radkraftanteil Q_B und in der horizontalen Ebene die Führungskraft Y . [7]

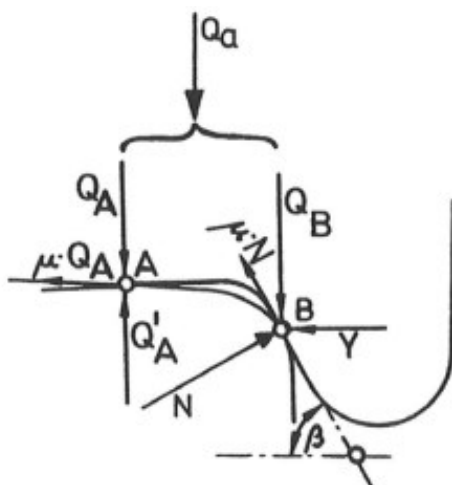


Abbildung 2-14: Zweipunktberührung zwischen Rad und Schiene [7]

3 Messung im Gleis

Um das Verhalten des gesamten Gleissystems und die Interaktion der einzelnen Kräfte in einem geraden Abschnitt über einen gewissen Zeitraum beobachten und in späterer Folge analysieren zu können, muss eine Messung an einem geeigneten und den Randbedingungen entsprechenden Messabschnitt durchgeführt werden. In weiterer Folge werden die Eckdaten und der Ablauf der Messung, sowie die dazugehörige Messtechnik genauer erläutert.

3.1 Gewählte Messstelle

Die Messung wurde auf einem geraden Gleis auf einem Streckenabschnitt der Graz-Köflacher Bahn zwischen den Bahnhöfen Lieboch und Lannach durchgeführt. Dieser Abschnitt weist eine gute Zugänglichkeit auf und ermöglichte ein einfaches Aufbauen der Messgeräte. Dadurch, dass es auf dieser Strecke tagsüber lediglich zu Befahrungen durch die S-Bahnen und einige wenige lokbespannte Personenzüge der Graz-Köflacher Bahn kommt, konnte der Aufbau durch lange Arbeitsintervalle relativ rasch durchgeführt werden.

Die gewählte Gerade weist eine Spurweite von 1435 mm (Regelspurweite) auf. Es sind Schienenprofile des Typs 60E1 verlegt. Zusätzlich befinden sich dort Betonschwellen des Typs L2 und Schienenbefestigungen des Typs SKL14. Eine detaillierte Erklärung der einzelnen Oberbaukomponenten des Gleises befindet sich in Kapitel 2.1.1.

Die Messstelle wurde am 31.10.2023 aufgebaut - im Zeitraum vom 02.11.2023 bis 13.11.2023 wurden zahlreiche Messungen aufgezeichnet und Daten erhoben.



Abbildung 3-1: Gewählter Messabschnitt mit Blickrichtung Lieboch

3.2 Messaufbau

Die Messstelle wurde mit zahlreichen Sensoren und Messequipment ausgestattet, um eine Vielzahl an Bewegungen in Schiene und Schwelle erfassen zu können, die in weiterer Folge für Simulationen zur Produktweiterentwicklung dienen können.

Die schematischen Abbildung 3-2 und Abbildung 3-4 zeigen an welchen Stellen Sensoren für die Messung aufgebaut wurden. Grundsätzlich wurden Laser- und induktive Wegsensoren verwendet. In Kapitel 3.3 wird die Funktionsweise dieser Sensoren genauer erläutert. Es ist wichtig zu erwähnen, dass sich Messstellen immer über mehrere Schwellen erstrecken sollen, um punktuelle Fehler oder Abweichungen erkennen zu können. Daher erfolgte die gegenständliche Messung über sechs Schwellen.

In weiterer Folge bezieht sich *Rechts* immer auf die Blickrichtung in aufsteigender Schwellennummer in Richtung Lieboch.

In Abbildung 3-2 ist die vertikale Einsenkung der beiden Schienen bezogen auf die Schwelle, welche mithilfe von Lasersensoren gemessen wurde, mit grünen Pfeilen dargestellt. Mithilfe von Laser- und induktiven Wegsensoren wurde die Einsenkung der Schwellen (gelbe Pfeile) in Schwellenmitte und an den Schwellen außen bestimmt. Außerdem konnte durch das Anbringen von Lasersensoren am Schienenkopf die Auslenkung in horizontale Richtung (rote horizontale Pfeile) gemessen werden.

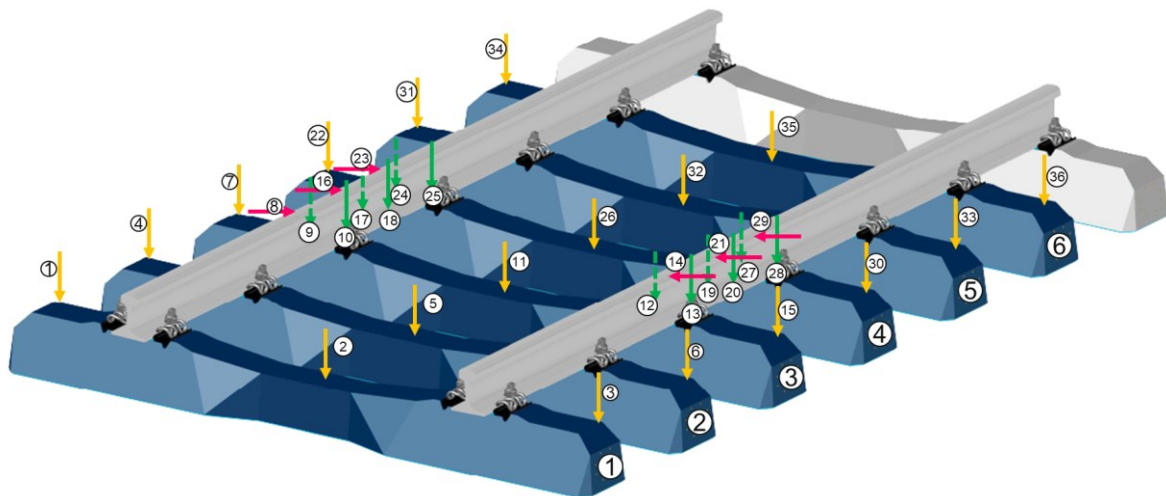


Abbildung 3-2: Schematischer Messaufbau – Schwellenübersicht

Abbildung 3-3 zeigt die gewählte Messstelle nach dem Aufbau der gesamten Sensoren. Es ist dabei zu erkennen, dass die Wegsensoren mithilfe eines Aluminiumprofils und einer eigens vom RID entwickelten Adapterplatte (orange Bauteile in Abbildung 3-3) an den Schwellenaußenseiten fixiert worden sind. Mit einem zweiten Profil konnten auch die Lasersensoren in der Schwellenmitte befestigt werden. Hierbei hilft eine eigens entwickelte Befestigungskonstruktion vom RID (rote Bauteile in Abbildung 3-3). Die Sensoren an den Schienen wurden identisch zu denen in der Schwellenmitte angebracht.

Zusätzlich ist in Abbildung 3-3 die graue Verkabelung der gesamten Sensoren zu den Messverstärkern in den Boxen auf der linken Seite zu erkennen. Die orangenen Kabel auf der rechten Seite führen zur Stromversorgung. Hier wurde ein Stromaggregat verwendet, da in der Nähe keine Stromversorgung vorhanden war. Da es den Rahmen dieser Masterarbeit übersteigen würde, wird auf die Verkabelung in weiterer Folge nicht genauer eingegangen.



Abbildung 3-3: Messaufbau mit Blickrichtung Lieboch

Neben den Wegsensoren wurden auch Dehnungsmessstreifen (DMS) angebracht. Die Pfeile in Abbildung 3-4 stellen jene DMS dar, welche die (Scher-) Dehnungen an der rechten und linken Schiene messen können. Damit können in weiterer Folge die Vertikal- und Lateralkraft im Bereich des Schwellenfachs und im Bereich der Schwellen bestimmt werden.

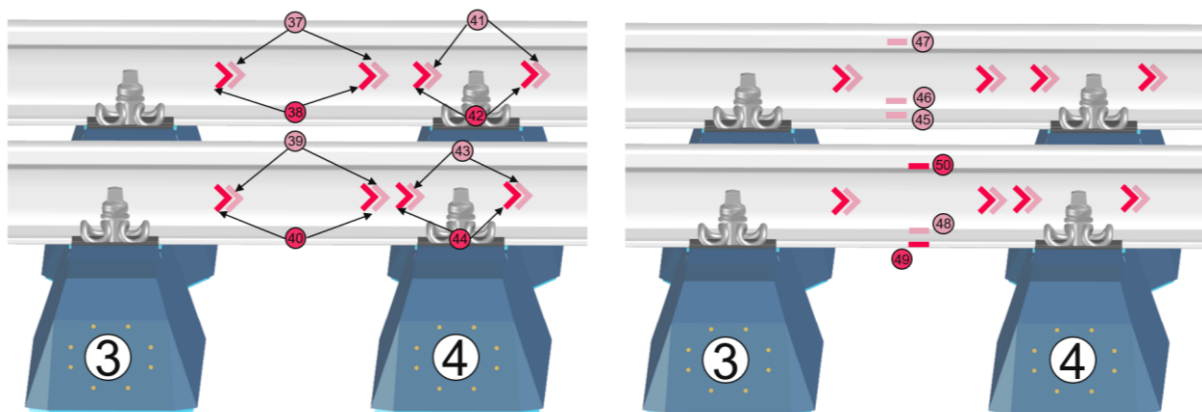


Abbildung 3-4: Schematischer Messaufbau der (Scher-) DMS bei Schwelle 3 und 4

Um die Vertikal – und Horizontalkräfte rechnerisch bestimmen zu können, müssen die (Scher-) DMS an geeigneten Stellen an der Schieneninnen- und Schienenaußenseite am Messquerschnitt angebracht werden. Mit den DMS, welche im Schienensteg befestigt sind, können die Vertikalkräfte ermittelt werden. Mit den gemessenen Scherdehnungen am äußeren Schienenkopf und Schienenfuß (Anbringung der DMS am Schienenfuß seitlich und auf der Schienenfußunterseite) können die Lateralkräfte berechnet werden. Die Funktionsweise eines Dehnungsmessstreifens ist in Kapitel 3.3.1 erläutert. Eine genauere Beschreibung der Berechnung für die Vertikal- und Lateralkraft ist in Kapitel 3.3.3 zu finden.



Abbildung 3-5: Messaufbau der (Scher-) DMS

In Abbildung 3-5 sind die bereits an der Schiene angebrachten DMS zu erkennen. Diese befinden sich an der Schieneninnen- und -außenseite und sind mit einer Aluschutzschicht vor Umwelteinflüssen geschützt.

3.2.1 Sensorpads

Es ist zu erwähnen, dass im Laufe der Messung Änderungen am Gleisaufbau vorgenommen wurden. Am 06.11.2023, ein paar Tage nach Beginn der Messaufzeichnungen, wurden auf der linken Seite bei Schwelle 2, 3 und 4 zwischen Schiene und Schwelle sogenannte Sensorpads eingebaut. Dabei handelt es sich um elastische Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 100 N/mm^2 der Firma *sensorline*. Damit können die Einwirkungen der Vertikalkraft auf den Oberbau direkt gemessen werden. Das bedeutet, mithilfe der Pads kann ebenso eine Kräftemessung durchgeführt werden.

3.3 Verwendete Messtechnik

Wie bereits zuvor beschrieben, benötigt eine Messstelle eine Vielzahl an Sensoren um aussagekräftige Werte liefern zu können. Daher wurden bei dieser Messstelle insgesamt 16 DMS, 24 Lasersensoren und 12 induktive Wegsensoren eingebaut. In weiterer Folge wird erklärt, wie die verschiedenen Arten funktionieren und auf welchem Messprinzip diese aufgebaut sind.

3.3.1 Funktionsweise Dehnungsmessstreifen (DMS)

Um die Spannungen und in weiterer Folge die Vertikal- und Lateralkräfte in den Schienen ermitteln zu können, werden Dehnungsmessstreifen verwendet. DMS sind Sensoren, die zur Erfassung von relativen Längenänderungen dienen.

Die Funktionsweise der Dehnungsmessstreifen lässt sich wie folgt erklären: Die Dehnungsänderungen werden einem an der Oberfläche aufgebrachten elektrischen Leiter aufgezwungen und dadurch entsprechend dessen Widerstand verändert. Die gemessene Widerstandsänderung ist die Grundlage für die Bestimmung der Dehnungsänderung. [22]

Wenn eine Kraft auf ein ruhendes Objekt einwirkt, entstehen mechanische Spannungen und Dehnungen. Die Spannung ist der Widerstand des Objekts gegenüber der Kraft und die Dehnung ist die daraus resultierende Verformung. Bei einer Verlängerung des Objektes handelt es sich um eine positive Dehnung, umgekehrt wird bei einer negativen Dehnung von einer Stauchung gesprochen. [23] Es ist zu erwähnen, dass Dehnungsmessungen stets den Unterschied zwischen einem ursprünglichen Zustand und einem späteren veränderten Zustand erfassen. Der ursprüngliche Zustand kann entweder unbelastet sein oder bereits durch Vorbelastungen, wie zum Beispiel dem Eigengewicht eines Objekts, beeinflusst sein. Durch die Dehnungen des Bauteils werden dehnungsabhängige Änderungen des elektrischen Widerstandes des DMS erzeugt. Dabei wird durch eine Stauchung der elektrische Widerstand verringert und bei einer Verlängerung der elektrische Widerstand vergrößert. [24] Die dazugehörige Berechnung ist in Gleichung 3-1 dargestellt.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k * \varepsilon$$

Gleichung 3-1: Dehnung des DMS
[24]

mit:

ΔR	...	Widerstandsänderung im DMS aufgrund der Dehnung
R_0	...	Grundwiderstand des DMS
k	...	k -Faktor des DMS (Empfindlichkeit)
ε	...	zu messende Dehnung, dimensionsloser Wert, relative Längenänderung gegenüber seiner Ausgangslänge



Abbildung 3-6: Schematische Darstellung DMS [23]

Der Aufbau der DMS ist Abbildung 3-6 schematisch dargestellt. Die DMS bestehen aus einem Widerstandsdraht (schwarze Schicht) der auf einem dünnen Kunststoffträger (untere gelbe Schicht) aufgebracht ist und mit elektrischen Anschlüssen versehen ist. Der Widerstandsdraht ist entweder ein Halbleiter oder ein metallischer Draht aus Konstantan oder einer Chrom-Nickel-Legierung. Zumeist ist der Widerstandsdraht an der Oberfläche mit einer zweiten Kunststoffolie (obere gelbe Schicht) vor mechanischen Einwirkungen geschützt. Um die Längenänderung vom Bauteil übernehmen zu können, muss der DMS mithilfe von zum Beispiel Epoxidharz mit dem belasteten Körper schlüssig und fest verbunden werden. [23] In der nachstehenden Abbildung 3-7 sind die Schritte zum Anbringen eines DMS dargestellt.



Abbildung 3-7: Schrittweises Anbringen eines DMS [23]

Die geometrische Anordnung der DMS ist abhängig von der Art der Widerstandsmessung. Bei dieser Messung erfolgte die Anordnung der DMS in einer Vollbrücke der Wheatstone'schen Brückenschaltung. Diese Schaltung wird bei der Messung von Widerständen bevorzugt verwendet und kann entweder den Absolutwert eines Widerstandes oder die relative Widerstandsänderung bestimmen. Bei Messungen mit Dehnmessstreifen wird zweiteres verwendet. [23]

3.3.2 Funktionsweise Lasersensoren

Bei den verwendeten Lasersensoren (siehe Abbildung 3-8) für die Einsenkungsmessungen handelt es sich um ein Gerät der Firma *MICRO-EPSILON*. Der Sensortyp trägt die Bezeichnung *optoNCDT 1420*.



Abbildung 3-8: Lasersensor

Dieser Sensor basiert auf dem Konzept der optischen Triangulation, einem Verfahren zur präzisen Abstandsmessung. Hierbei wird ein spezieller Lichtpunkt gezielt auf die Oberfläche des zu vermessenden Objekts projiziert, in diesem Fall auf die Schienenoberfläche. Die reflektierten Lichtstrahlen werden anschließend von einer Empfängeroptik aufgefangen, die in einem definierten Winkel zur optischen Achse des Laserstrahls positioniert ist. Die Lichtreflexe werden dann auf einem ortsauflösenden Element abgebildet, wobei der Abstand des Objekts den Ort der Reflexion beeinflusst. Durch die Auswertung des Signals des ortsauflösenden Elements berechnet ein integrierter Signalprozessor im Sensor den Abstand zwischen dem Sensor und dem gemessenen Objekt. Diese Distanz wird im Anschluss linearisiert und über eine Schnittstelle ausgegeben. [25] Somit können die Bewegungen der Schiene durch die unterschiedlichen Abstände zu den Lasersensoren bestimmt werden.

In Abbildung 3-9 ist ersichtlich, dass der Messbereich in einem gewissen Abstand vom Sensor definiert ist. Dieser Wert, bezeichnet als Messbereichsanfang, reicht je nach Modell von 20 mm bis 100 mm. Daher muss beim Aufbau der Lasersensoren darauf geachtet werden, dass das zu messende Objekt sich mindestens um diesen Abstand vom Sensor entfernt befindet. Der Messbereich selbst reicht von 10 mm bis 500 mm. Das bedeutet, dass das zu messende Objekt darf maximal die Summe der Abstände von MBA und MB entfernt sein. [25]

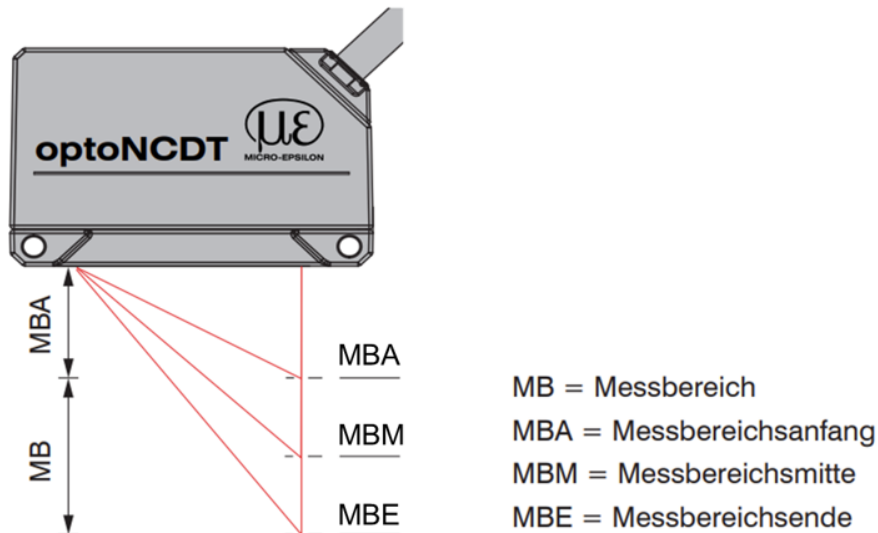


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung Lasersensor [25]

3.3.3 Funktionsweise induktive bzw. analoge Wegsensoren

Die verwendeten analogen Wegsensoren funktionieren nach der Methode der induktiven Wegmessung mittels Taster. Hier sind je nach Einsatzbereich unterschiedliche Längen erhältlich, wie in Abbildung 3-10 ersichtlich. [23]



Abbildung 3-10: Induktiver Wegsensor [23]

Das Messprinzip von Wegaufnehmern beruht darauf, dass sich die Impedanz einer Messspule oder eines Spulensystems ändert, wenn sich ein magnetisierbarer Kern innerhalb der Spulen bewegt. Bei den verwendeten Wegsensoren handelt es sich um LVIT-Wegaufnehmer, auch bekannt als Wegaufnehmer nach dem Differentialdrossel-Prinzip. Diese setzen sich entweder aus einer durchgehenden Spule mit einem Mittenabgriff oder aus zwei nebeneinander positionierten identischen Spulen zusammen, die in Reihe miteinander verschaltet sind. [26]

Ein ferromagnetischer Kern im Inneren des Spulensystems verursacht eine Veränderung der Impedanzen beider Spulenhälften, wenn er verschoben wird. In der Mittelstellung entsteht durch die symmetrische Anordnung ein Spannungsteiler mit gleichen Anteilen, was zu einem Ausgangssignal von Null führt. Sobald der Kern aus der Mittelstellung bewegt wird, verändern sich die Impedanzen der beiden Spulen gegenläufig. Diese Änderung wird von einer angeschlossenen Elektronik ausgewertet und als Signal ausgegeben, das proportional zur Verschiebung ist. [26]

LVIT-Wegaufnehmer, die auf dem Prinzip der Differentialdrossel basieren, zeichnen sich durch ihren kostengünstigen Aufbau, hohe Genauigkeitsklassen und sehr niedrigen Temperaturdrift aus. Sie weisen keine Phasenverschiebung auf und können schnell und problemlos mit einem 3-Leiter-Anschluss angeschlossen und kalibriert werden. [26]

3.4 Berechnung der Kräfte

Mit den zuvor beschriebenen DMS können Vertikalkraft und Lateralkraft im System ermittelt werden. Dazu wird in weiterer Folge erläutert wie die Berechnungen funktionieren.

3.4.1 Vertikalkraftmessung

Die Erfassung der Vertikalkraft erfolgt unter Anwendung der Differenzial-Scherspannungsmethode. Diese Methode bietet den Vorteil, dass sie sowohl für statische als auch für dynamische Vertikallasten geeignet ist [27]. Forschungen von Rabbi et al. [28] haben gezeigt, dass die Lateralkraft einen gewissen Einfluss auf die Messung der Vertikalkraft ausübt, dieser Einfluss jedoch vernachlässigbar bleibt, solange die Lateralkraft nicht zu groß ist. Um den Einfluss der Messergebnisse durch seitliche Kräfte zu minimieren, werden die Scherspannungen an beiden Seiten der Schiene erfasst und deren Mittelwert gebildet. Dazu werden acht Dehnungsmessungen durchgeführt. Das heißt es werden auf jeder Seite zwei Elemente, die wiederum aus zwei Dehnungsmessstreifen bestehen, angebracht. Dabei spielt die Konfiguration der Messstreifen in der Wheatstone-Brückenschaltung eine entscheidende Rolle. Durch die Ausrichtung der Dehnungsmessstreifen in einem Winkel von 45 Grad zur Schienenlängsachse entsprechen die gemessenen Dehnungen infolge der Belastung den Hauptdehnungen in der Ebene des Stegs. Dadurch ist die Größe der Vertikalkraft proportional zur Änderung der maximalen Scherdehnung zwischen den Punkten A und B (Punkte, an denen DMS angebracht sind).

Diese Beziehung ist grafisch in Abbildung 3-11 dargestellt und formal durch folgende Gleichungen ausgedrückt:

$$\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Gleichung 3-2: Maximale Scherspannung [28]

$$V = \frac{\gamma * E * I * t}{2 * Q * (1 + \nu)}$$

Gleichung 3-3: Vertikale Scherkraft [28]

$$P = V_A - V_B = \frac{E * I * t}{2 * Q * (1 + \nu)} * (\gamma_A - \gamma_B)$$

$$= \frac{E * I * t}{2 * Q * (1 + \nu)} * [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_A + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_B]$$

Gleichung 3-4: Vertikalkraft [28]

mit:

V	...	Vertikale Scherkraft
γ	...	Maximale Scherdehnung
E	...	Elastizitätsmodul
I	...	Trägheitsmoment
t	...	Stegdicke
Q	...	Statisches Flächenmoment
ν	...	Poissonzahl
ε	...	Hauptdehnung

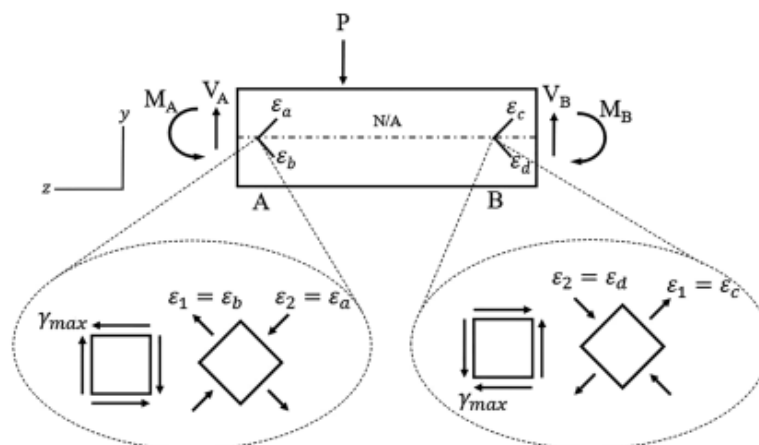


Abbildung 3-11: Ausrichtung der DMS und Dehnungszustand im Schienensteg

In weiterer Folge werden Vereinfachungen getroffen und die Vertikalkraft als das Produkt einer Konstanten C und der Differenz der gemessenen Scherspannungen ($\gamma_A - \gamma_B$) definiert. Bei dieser Differenz handelt es sich um die direkt durch die verwendeten Dehnungsmessstreifen erfasste Spannung. Die Konstante C wird auf Basis des vorhandenen Schienenprofils und der gegebenen Materialeigenschaften ermittelt.

$$P = C * (\gamma_A - \gamma_B)$$

Gleichung 3-5: Vereinfachung der Vertikalkraft

3.4.2 Lateralkraftmessung

Die Berechnung der Lateralkraft erfolgt durch die Normalspannungen, die während der Biegung entstehen. Diese Spannungen werden durch die in Abbildung 3-4 – rechts dargestellten Linear-DMS gemessen. Abbildung 3-12 veranschaulicht die Zusammensetzung der einzelnen Normalspannungen. Diese Spannungen zeigen die Überlagerung der Vertikalkraft (Q), der Lateralkraft (Y) und des durch den Abstand zwischen den Kraftangriffspunkten und dem Schubmittelpunkt der Schiene wirkenden Torsionsmoments. Die Auslenkung des Berührungspunktes ist in Abbildung 3-12 mit e bezeichnet und ist positiv definiert, wenn sie in Richtung Gleismitte erfolgt. Im Gegensatz dazu wird die Lateralkraft Y als positiv betrachtet, wenn sie nach außen wirkt. Da die Herleitung auf der Berechnung nach Zimmermann basiert, stammen auch die dafür getroffenen Vereinfachungen davon. Diese methodischen Ansätze sind von den Arbeiten von Fastenrath [29] und Esveld [30] abgeleitet.

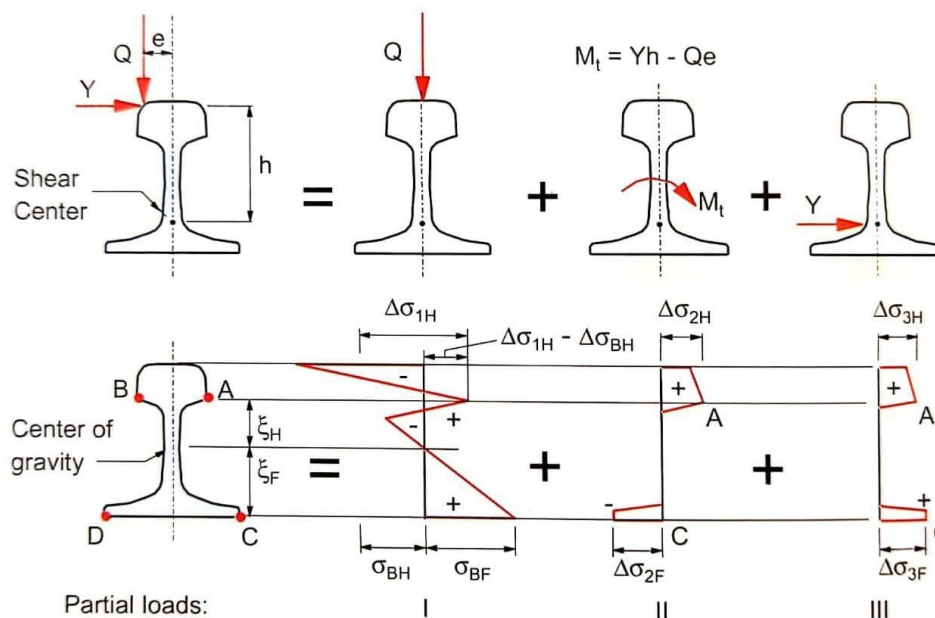


Abbildung 3-12: Theoretische Spannungsverteilung für die Überlagerung einer Vertikal- und Lateralkraft [30]

3.5 Vorhandene Schienenfahrzeuge

Die gewählte Messstelle wurde von verschiedenen Fahrzeugtypen befahren. Hauptsächlich waren dies S-Bahnen des Typs Stadler GTW 2/8. [31] Im Zuge der Messung wurden auch zusätzliche Prüffahrten mit einer Diesellok DH 1700.1 durchgeführt. [32] Außerdem fand eine geringe Anzahl an Überfahrten von Güterzügen und lokbespannten Personenzügen im Zeitraum der Messung statt. Bei der Lokomotive handelte es sich dabei um die gleiche oder eine bauähnliche Lok (DH 1700.2) wie bei den Prüffahrten.

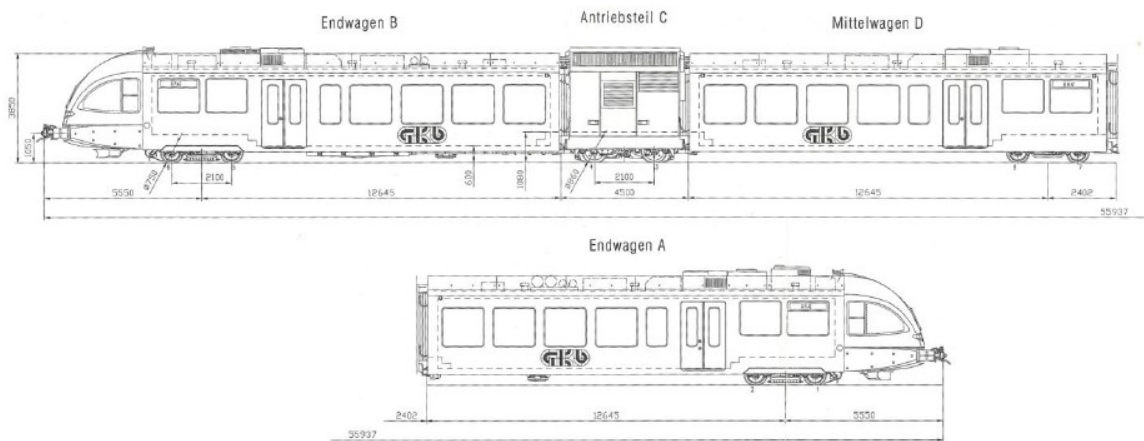


Abbildung 3-14: Technische Daten von Triebwagen GTW - VT 5063 [31]

In weiterer Folge wird die S-Bahn bezogen auf Abbildung 3-14 immer von links nach rechts betrachtet. Das bedeutet, die Achsen des Antriebssteils stellen die zweite und dritte Achse dar.

3.6 Prüffahrten mit variabler Geschwindigkeit

An der gegenständlichen Messstelle war es möglich während der laufenden Messung gesonderte Überfahrten durchzuführen. Dadurch konnte geprüft werden, ob unterschiedliche Geschwindigkeiten der Fahrzeuge einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Durch die vordefinierten Geschwindigkeiten können in der Auswertung Schlüsse über einen Zusammenhang zwischen erhöhter Geschwindigkeit und Veränderung der Vertikalkraft, Lateralkraft oder Einsenkung gezogen werden. Es wurden durch die GKB je vier Überfahrten zu zwei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt und von einem Messteam des RID betreut. Um den laufenden Betrieb nicht zu unterbrechen, fanden die Überfahrten am 03.11.2023 und am 06.11.2023 nachts statt. Diese Prüffahrten wurden mit der in Kapitel 3.5.1 beschriebenen Diesellok DH 1700 durchgeführt.

Bei jeder Prüfung wurden vier Überfahrten gemessen. Bei der ersten Überfahrt, welche auf Abbildung 3-15 zu sehen ist, handelte es sich um eine statische Messung. Das bedeutet, dass die Lok mit der Bemessungsachse sowohl im Schwellenfach 3-4 und über der Schwelle 3 zum Stillstand gekommen ist. Die Bezugsachse ist in Abbildung 3-13 mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Durch die stehende Lok können die statisch auf das Gleis wirkenden Kräfte ermittelt werden. Die nächsten drei Überfahrten wurden jeweils mit den Geschwindigkeiten 40 km/h, 70 km/h und 100 km/h durchgeführt. Durch die Messung von drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten kann im Falle eines Zusammenhangs zwischen der Geschwindigkeitserhöhung und einer Veränderung der Kräfte geprüft werden, ob sich dieser Zusammenhang linear verhält.



Abbildung 3-15: Statische Messung

Bei jeder Überfahrt wird die definierte Bemessungsachse maßgebend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass verschiedene Radsätze ein unterschiedliches Verhalten aufweisen können. Daher ist es sinnvoll immer die gleichen Radsätze der gleichen Achse miteinander zu vergleichen, damit möglichst ähnliche Bedingungen für alle Überfahrten gegeben sind.

Die Auswertungen der Prüffahrten befinden sich in Kapitel 5.1.

3.7 Validierung der Vertikalkraft mit Fallgewicht

Um überprüfen zu können, ob es sich bei den gewählten Messmethoden um zuverlässige Verfahren handelt, muss eine Validierung durchgeführt werden. Dabei sollen die erforderliche Messgenauigkeit und die Wiederholbarkeit der gemessenen Rohdaten sichergestellt werden. In diesem Fall wird die Messmethode der Scher-DMS zur Berechnung der Vertikalkraft überprüft (Bemessung siehe Kapitel 3.4.1). Dies erfolgt mit der Hilfe eines Fallgewichts und einem darauf fixierten Beschleunigungssensor, wie in Abbildung 3-16 zu sehen ist. Dieses Bild ist nicht im Zuge der gegenständlichen Messung entstanden, weshalb das Fallgewicht an einem Weichenherz aufgebracht ist und nicht am geraden Gleis. Der Aufbau der Validierung verändert sich dadurch nicht.

Das verwendete Fallgewicht hat eine Masse von 20,15 kg und wird aus unterschiedlichen Höhen mehrmals auf die Schiene fallen gelassen. Zusätzlich wird auch die Kontaktfläche zwischen Fallgewicht und Schiene mehrmals verändert. Die Beschleunigung kann mithilfe eines Beschleunigungssensors, der an der Oberfläche des Fallgewichts angebracht ist, gemessen werden. Dadurch kann festgestellt werden, welche Kraft bei der Berührung durch das Fallgewicht auf das Gleis wirkt. Währenddessen wird auch mithilfe der Scher-DMS die Scherspannung gemessen und in weiterer Folge die Vertikalkraft berechnet. Diese beiden Methoden sollen die gleichen Werte für die einwirkende vertikale Kraft liefern. Die Validierung findet im Schwellenfach 3-4 auf der rechten Schiene statt. Insgesamt wurden 26 Schläge mithilfe des Fallgewichtes auf der Schiene durchgeführt.



Abbildung 3-16: Beispielaufbau eines Fallgewichts mit Beschleunigungssensor

Nach der Messung werden die gewonnenen Werte aus Dehnmessstreifen und Beschleunigungssensor mit einer eigens entwickelten Auswertesoftware des RID verarbeitet. Genauere Informationen zu der Auswertung der Messdaten befinden sich in Kapitel 4.1.

Die Abbildung 3-17 zeigt für einen dieser Schläge den unterschiedlichen Vertikalkraftverlauf von Beschleunigungssensor und Dehnmessstreifen. Dabei stellt jeweils der erste Hochpunkt das Auftreffen des Fallgewichts auf die Schiene dar. Die immer weiter abklingenden Hochpunkte zeigen das Nachschwingen des Fallgewichts. Diese sind für die Validierung der Messung nicht von Bedeutung. In Abbildung 3-18 ist zu erkennen, dass sich zwischen Beschleunigungssensor und DMS-Messung eine Differenz ergibt. Dieser Unterschied kann für alle 26 Schläge ermittelt werden und in weiterer Folge die Abweichung der DMS Messmethode zu der Messung mit dem Beschleunigungssensor festgestellt werden.

Tabelle 3-1 listet die Hochpunkte aller Schläge von beiden Messmethoden auf. Damit können die absolute Differenz und die Abweichung in Prozent der beiden Messungen ermittelt werden. Im Durchschnitt über alle Schläge ergibt sich eine Abweichung der DMS Messmethode zu der Messung mit dem Beschleunigungssensor von 5,11 %. Dieser Wert bestätigt die Validität der gewählten DMS Messmethode.

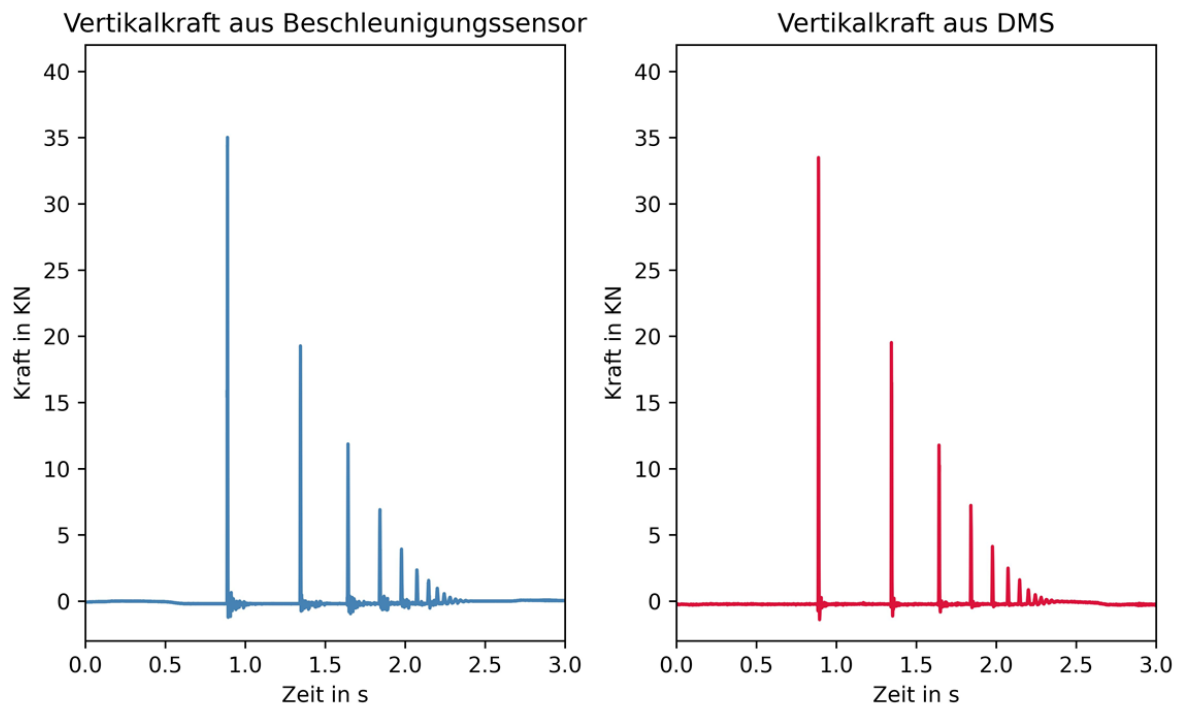


Abbildung 3-17: Vertikalkraft von Beschleunigungssensor und DMS

Es ist zu erwähnen, dass die Stelle der Messung im Schwellenfach einen Einfluss auf die berechnete Abweichung hat. Diese Validierung konnte aufgrund der vorhandenen Sensoren nicht genau in der Mitte des Schwellenfaches durchgeführt werden. Zu geringe Abstände zwischen der Krafteinwirkung und den DMS können gewisse Ungenauigkeiten der Ergebnisse hervorrufen.

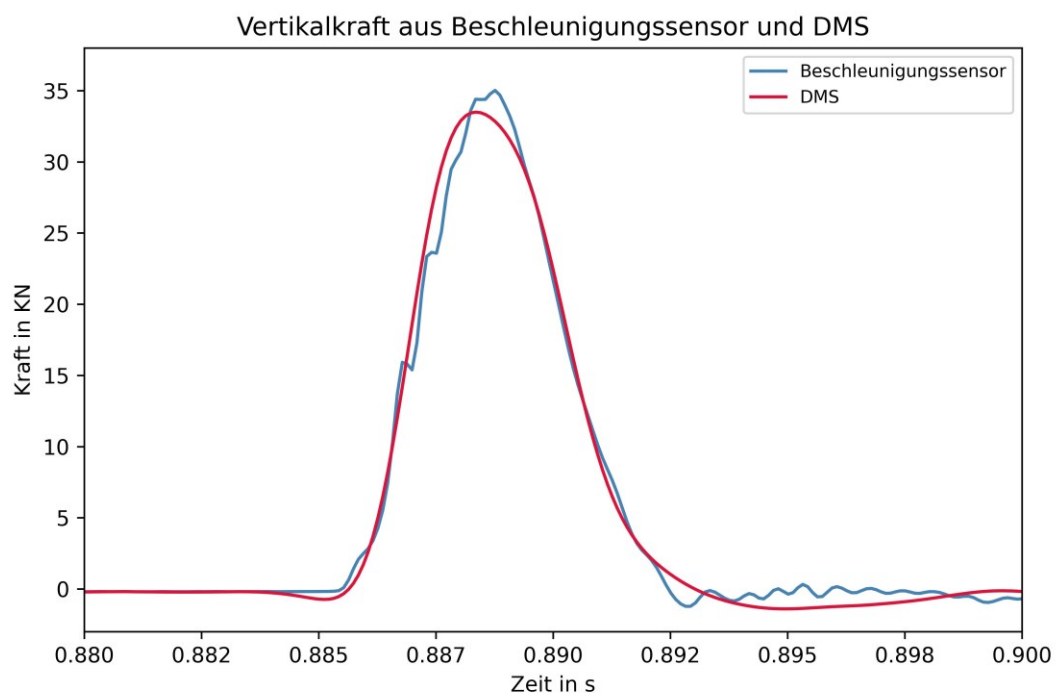


Abbildung 3-18: Hochpunkt der Vertikalkraft von Beschleunigungssensor und DMS

Tabelle 3-1: Berechnung der Abweichung der Messmethoden

Anzahl	Vertikalkraft von DMS in [kN]	Vertikalkraft von Beschleunigungssensor in [kN]	Absolute Differenz	Abweichung in [%]
1	7,6873	7,4666	0,2207	2,96%
2	8,1471	8,0150	0,1320	1,65%
3	12,4631	12,4630	0,0001	0,00%
4	22,6385	23,8831	1,2446	5,21%
5	23,5721	25,3996	1,8275	7,19%
6	24,4450	26,9617	2,5168	9,33%
7	41,4266	50,1079	8,6813	17,33%
8	44,9713	54,4905	9,5192	17,47%
9	45,1141	54,0237	8,9096	16,49%
10	5,6347	5,5104	0,1243	2,26%
11	9,0717	8,5649	0,5068	5,92%
12	10,2109	9,9175	0,2934	2,96%
13	10,2259	10,0312	0,1947	1,94%
14	17,5500	17,4188	0,1312	0,75%
15	17,8650	17,5932	0,2719	1,55%
16	17,6142	17,2530	0,3613	2,09%
17	4,9239	5,4311	0,5072	9,34%
18	16,8401	16,9800	0,1400	0,82%
19	17,2793	17,3488	0,0695	0,40%
20	17,1482	17,3230	0,1748	1,01%
21	25,7066	26,5091	0,8025	3,03%
22	26,8681	28,2631	1,3950	4,94%
23	26,5484	28,1660	1,6176	5,74%
24	33,4932	35,0185	1,5253	4,36%
25	35,7133	37,3244	1,6111	4,32%
26	35,7411	37,1509	1,4098	3,79%
Mittelwert der Abweichung				5,11%

4 Analyse der Messdaten

Für die Analyse der aufgenommenen Rohdaten, wurde eine eigens entwickelte Auswertesoftware verwendet. Mit dieser werden die Daten gefiltert und benötigte Werte, wie zum Beispiel Lateralkraft und Vertikalkraft, berechnet und die Spitzenwerte, die einem Radsatz bzw. Drehgestell entsprechen, entnommen. Mit diesen bereinigten und ausgewerteten Daten wurden Darstellungen und Diagramme zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse erzeugt. Die genaue Vorgehensweise wird nachstehend erläutert.

4.1 Datenverarbeitung

Während der Messung am Gleis wurde eine Vielzahl an Rohdaten erzeugt. Die Aufnahme dieser Daten erfolgte mit der Datenerfassungssoftware *catman* im BIN-Dateiformat. Es wurden bei dieser Messung insgesamt 295 Datensätze generiert. Im ersten Schritt der Datenverarbeitung werden die Daten je nach Art der Überfahrt manuell sortiert. Dabei handelt es sich bei dem Großteil der Datensätze, das heißt ca. 230 Stück, um je eine eigene Überfahrt der S-Bahn im Regelbetrieb über die Messstelle. Die restlichen Datensätze stammen von den Validierungen und Prüffahrten, sowie einigen Personen- und Güterzugüberfahrten. Zudem können einige Datensätze keiner bestimmten Überfahrt bzw. keinem bestimmten Fahrzeugtyp zugeordnet werden.

Im nächsten Schritt werden die Datensätze in die Auswertesoftware des RID integriert. Die Anwendung erfolgt in *PyCharm* selbst. Mithilfe des Programms können für diese Messung die Geschwindigkeit, die Schienendehnung, Vertikalkraft, Lateralkraft, der Einleitungspunkt der Vertikalkraft, die Schwellen- bzw. Schieneneinsenkung, die Schwellen- bzw. Schienenverkipfung und die Schienenkopfauslenkung an den verschiedenen Positionen bestimmt werden. Dafür müssen die Sensoren den richtigen Indizes zugeordnet werden, da mit den unterschiedlichen Sensoren auch unterschiedliche Größen berechnet werden. Bevor die Berechnung startet, ist zu bestimmen, mit welcher Frequenz die Daten gefiltert werden. Die Bestimmung der Maximalwerte jeder Achse erfolgt über das Prinzip der Prominenz. Dafür muss ein Wert festgelegt werden, ab welchem Bereich bei jedem Datensatz nach Hochpunkten gesucht wird. Es wird ein iterativer Prozess durchgeführt, welcher mehrere Berechnungsdurchgänge und Erfahrung aus anderen Auswertungen benötigt, um die richtigen Werte zu finden. Es gibt zusätzlich weitere Einstellungsmöglichkeiten, auf die jedoch nicht detaillierter eingegangen wird, da diese grundsätzlich für jede Messauswertung ident sind.

Im Zuge der Berechnung stellte sich heraus, dass einige Datensätze nicht mit der Auswertesoftware und den anderen Daten kompatibel sind. Diese mussten daher für eine fehlerfreie Auswertung entfernt werden. Nach der Durchführung der Berechnung ergeben sich eine Vielzahl an Datenlisten, die Informationen über die zuvor aufgelisteten Berechnungsgrößen liefern. Darunter sind zum Beispiel alle Maximalwerte der einzelnen Achsen, sowie die generellen Minimal- und Maximalwerte jeder Überfahrt enthalten. Außerdem liefert die Auswertesoftware für jede einzelne Überfahrt eine Grafik aller

Berechnungsgrößen. Das bedeutet, nach der Auswertung liegen von jedem Datensatz ca. 20 Diagramme vor. Eine Auswahl davon ist in Abbildung 4-1 zu sehen. Zusätzlich konnte in Folge der Auswertung festgestellt werden, dass sich die Messwerte einiger Sensoren als fehlerhaft erwiesen haben, welche dadurch nicht für weitere Berechnungen herangezogen werden können.

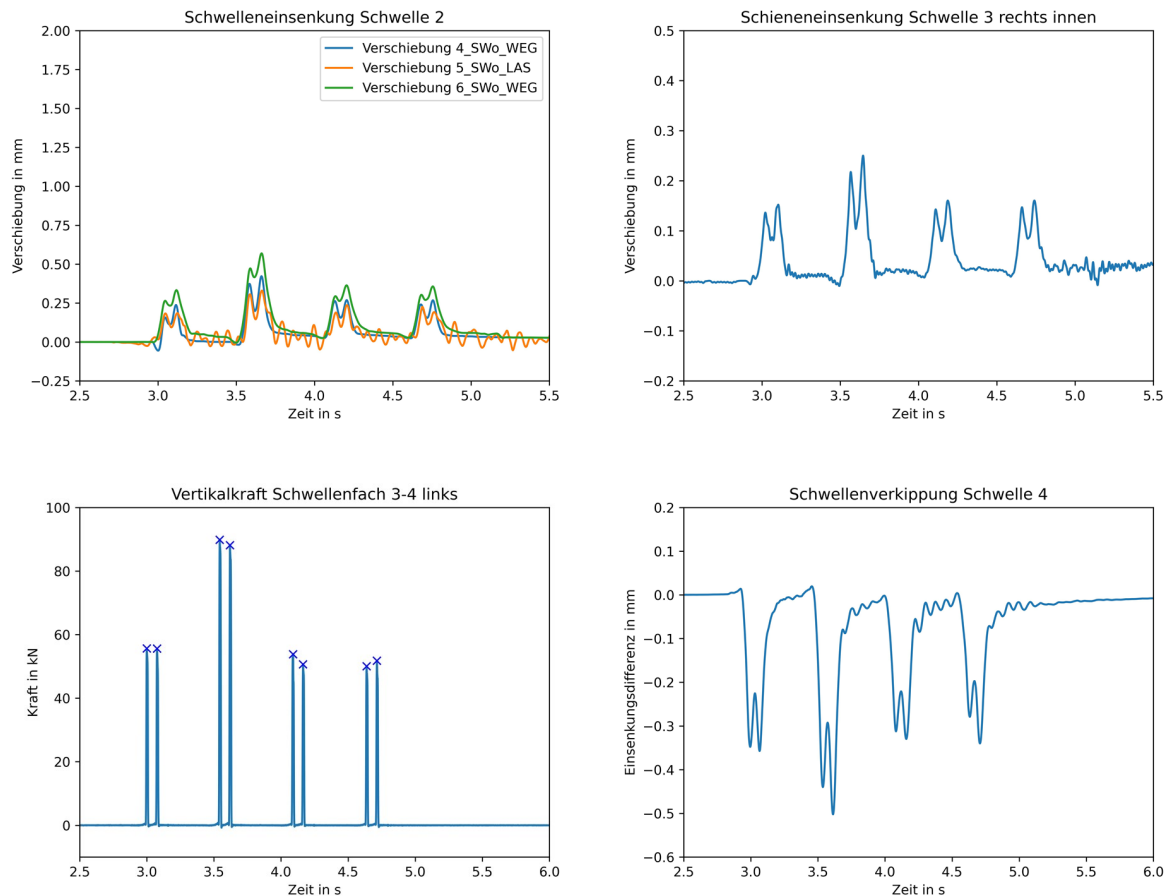


Abbildung 4-1: Beispiel an Auswertungen der Überfahrt am 04.11.2023 um 14:41:37

Damit im nächsten Schritt die Überfahrten miteinander verglichen und generelle statistische Aussagen über die Messung getroffen werden können, müssen die unterschiedlichen Werte der einzelnen Überfahrten zusammengefasst und in verschiedenen Grafiken dargestellt werden. Dies erfolgt wiederum in *PyCharm* über einen Programmcode mithilfe der zuvor generierten Datenlisten. Hierbei ist es wichtig, dass die richtige Zuordnung der Achsen der S-Bahn-Überfahrten erfolgt, damit diese immer von der gleichen Richtung betrachtet werden können. Da in Folge dieser Auswertung festgestellt wurde, dass der Einbau der Sensorpads (siehe Kapitel 3.2.1) einen deutlichen Unterschied auf die Ergebnisse der S-Bahn Überfahrten hat, werden diese in weiterer Folge in zwei Phasen dargestellt: Es wird die Auswertung vor und nach dem Einbau der Sensorpads betrachtet. Für jede dieser Phasen wurde eine Vielzahl an Diagrammen erstellt, wie zum Beispiel ein Vergleich der Einsenkungen der unterschiedlichen Schwellen. Diese sind alle in Kapitel 5 dargestellt.

4.2 Definitionen und Vorzeichenkonventionen

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse in Kapitel 5 muss erläutert werden, wie die gemessenen Werte während der Datenauswertung definiert wurden und welchen Vorzeichenkonventionen sie unterliegen.

4.2.1 Vertikalkraft

Bei der Definition der Vertikalkraft muss zwischen zwei Arten der Vertikalkraft unterschieden werden: Die Vertikalkraft gemessen im Schwellenfach und die abgeleitete Vertikalkraft über der Schwelle. Beide Arten werden in allen Ergebnissen in Kilonewton angegeben. Bei der Vertikalkraft, welche im Schwellenfach gemessen wird, wirkt vereinfacht dargestellt nur die Vertikalkraft des Fahrzeuges (siehe Abbildung 4-2). Diese ist nach unten hin positiv definiert und wird auch in späteren Abbildungen so dargestellt.

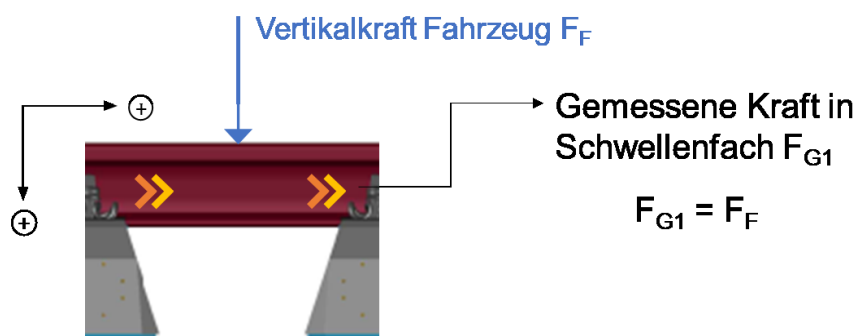


Abbildung 4-2: Vertikalkraft in Schwellenfach

Bei einem vereinfacht dargestellten Freischnitt der Vertikalkräfte im Schwellenbereich kommt zu der Vertikalkraft des Fahrzeuges noch eine Kraft, welche durch die Schiene in die Schwelle abgeleitet wird, hinzu. Bei der gemessenen Kraft handelt es sich in an dieser Position um die Differenz zwischen der Vertikalkraft aus dem Fahrzeug und der abgeleiteten Kraft der Schwelle. Alle Vertikalkräfte, die im System wirken, werden zum leichteren Verständnis in weiterer Folge positiv dargestellt.

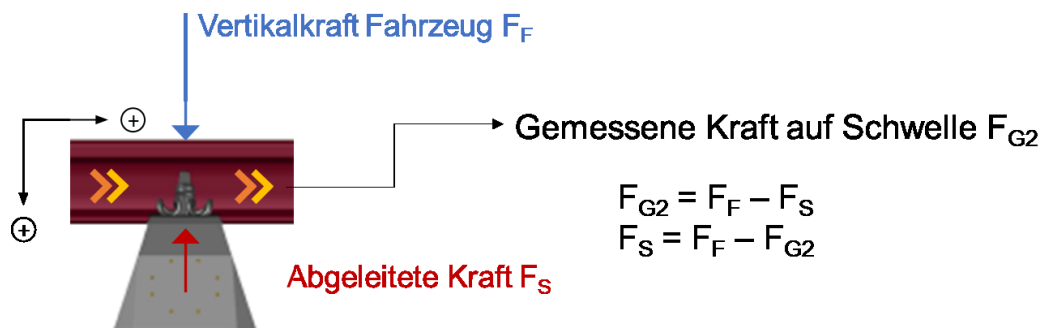


Abbildung 4-3: Vertikalkraft im Bereich der Schwelle

Aufgrund des veränderlichen Rad-Schiene Kontakts wird die Vertikalkraft des Fahrzeugs nicht immer am selben Punkt in die Schiene eingeleitet. Der Abstand des Einleitungspunktes der Vertikalkraft wird daher von der jeweiligen Schienenmitte aus berechnet und in Millimeter angegeben. Hierbei wird eine Auslenkung in Gleismitte positiv dargestellt (siehe Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Vorzeichenkonvention des Einleitungspunktes der Vertikalkraft

4.2.2 Lateralkraft

Neben der Vertikalkraft wird auch die einwirkende Lateralkraft genauer betrachtet. Diese wird mithilfe der Schienendehnung berechnet. Bei dieser Berechnung wird für die Lateralkraft eine Vorzeichenkonvention, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, festgelegt. Das bedeutet, wenn die Lateralkraft in Richtung Gleismitte wirkt, sind die Werte negativ. Als Einheit wird Kilonewton verwendet.



Abbildung 4-5: Vorzeichenkonvention der Lateralkraft

4.2.3 Einsenkung und Verkipfung von Schiene und Schwelle

Neben den Kräften können auch die Bewegungen von Schwelle und Schiene bestimmt werden. Mit dem Großteil der benutzten Sensoren kann die Einsenkung der Schienen bzw. der Schwellen in Millimeter ermittelt werden. Hierbei ist die positive Richtung mit einer Einsenkung nach unten definiert (siehe Abbildung 4-6). Außerdem ist zu erwähnen, dass die Einsenkung der Schiene relativ zur Einsenkung der Schwelle gemessen wird. Das bedeutet, als Referenzebene der Schieneneinsenkung dient die Schwelle. Die Einsenkung der Schwelle ist bezogen auf die Schotterbettung.

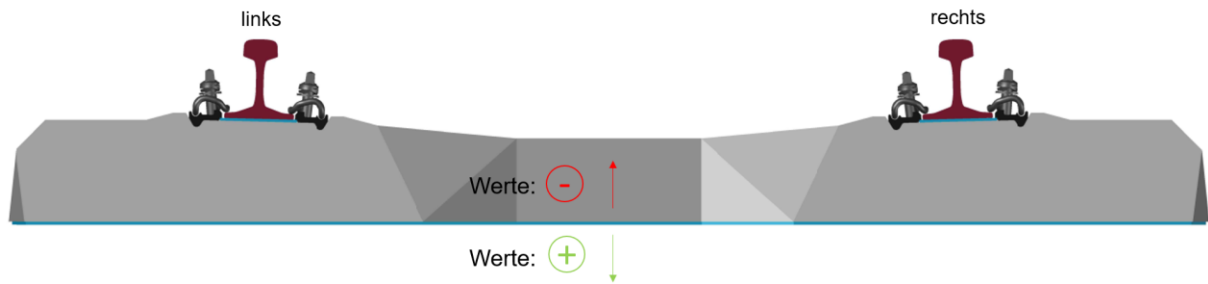


Abbildung 4-6: Vorzeichenkonvention von Schwellen- und Schieneneinsenkung

Um die Verkipfung der Schwelle zu ermitteln, werden zuerst die Einsenkungen der Schwellen subtrahiert. Dafür wird die Differenz zwischen dem Wert der rechten und linken Schiene ermittelt. Diese wird durch den Sensorabstand dividiert und mit der vorhandenen Spurweite multipliziert, um auf die Verkipfung in Millimeter (bezogen auf die Spurweite) zu kommen. Das bedeutet, wenn sich der Wert der Verkipfung im positiven Bereich befindet, ist eine Verkipfung der Schwelle nach rechts vorhanden.

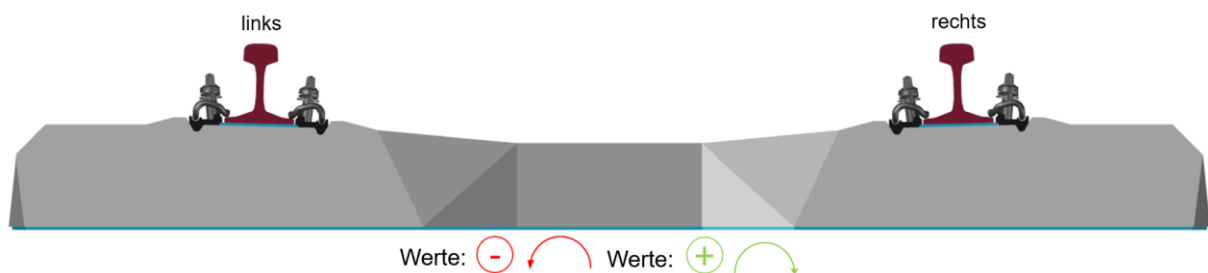


Abbildung 4-7: Vorzeichenkonvention von Schwellenverkipfung

Die Verkipfung der Schiene verhält sich grundsätzlich analog. Es wird zuerst die Differenz der Schieneneinsenkung der Außenseite und der Innenseite gebildet. Danach kann mithilfe der Winkelfunktion, des Sensorabstands und der ermittelten Differenz die Verkipfung in Grad berechnet werden. Bei positiven Werten ergibt sich eine Verkipfung nach außen, wie in Abbildung 4-8 dargestellt ist.



Abbildung 4-8: Vorzeichenkonvention von Schienenverkipfung

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messstelle werden in den folgenden Abschnitten dargestellt. Vorab ist zu erwähnen, dass aufgrund schlechter Wetterverhältnisse und starkem Regen beim Aufbau der Messstelle einige Sensoren nicht wie erwartet funktionierten und dies zu Ausfällen von einzelnen Sensoren führte. Daher sind nicht alle Sensoren und Mess-techniken, welche in Kapitel 3.2 dargestellt und beschrieben sind, in die Auswertung miteinbezogen. Die Auswertung beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Bereich von Schwelle 2 bis 4 und dem Großteil der darin liegenden Messsensoren.

In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst die Auswertungen zu den Prüffahrten und die Auswertungen der lokbespannten Züge dargestellt. Danach folgen die Abbildungen der S-Bahn Überfahrten. Darauf wurde das Hauptaugenmerk dieser Arbeit gelegt, da aufgrund der hohen Anzahl der Überfahrten, die größte Aussagekraft besteht. Dabei werden die Ergebnisse in eine Auswertung vor und nach dem Sensorpad Einbau am 06.11.2023 auf der linken Seite der Messstelle unterschieden. Am Ende folgt eine Gegenüberstellung der gesamten S-Bahn Überfahrten.

Es handelt sich bei diesen Auswertungen hauptsächlich um statistische Vergleiche mit den Überfahrten und welche Erkenntnisse aus den gesamten Datensätzen gezogen werden können. Die Darstellung der Auswertungen von einzelnen Überfahrten und Sensoren ist dem Anhang zu entnehmen. Es werden nicht alle Überfahrten beigelegt, sondern lediglich von den lokbespannten Zügen und den S-Bahnen je eine Referenzfahrt gewählt.

5.1 Prüffahrten

Die folgende Auswertung bezieht sich auf die Prüffahrten vom 03.11.2023. Hier wurden mit der in Kapitel 3.5.1 beschriebenen Diesellok gleichmäßige Überfahrten mit je 40 km/h, 70 km/h und 100 km/h an der Messstelle durchgeführt. Maßgebend für die Auswertung ist dabei immer die zuvor definierte Bemessungsachse, welche in Kapitel 3.6 erläutert ist. Dort befindet sich außerdem eine detaillierte Beschreibung zum Ablauf der Prüffahrten. Grundsätzlich sollen mit diesen Fahrten Schlüsse über den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Kräfte gezogen werden.

Es ist außerdem zu erwähnen, dass es sich bei den nachstehenden Darstellungen jeweils um nur eine Überfahrt bei jeder Geschwindigkeit handelt. Daher können aus geringen sichtbaren Tendenzen keine validierten Schlüsse gezogen werden. Es würde sich bei einer größeren Menge an Überfahrten eine Streuung einstellen, wodurch diese geringen Tendenzen nicht mehr vorhanden wären. Zusätzlich wurden die Überfahrten aus beiden Richtungen durchgeführt. Dadurch können geringe Abweichungen entstehen, da die Bemessungsachse nicht immer die erste Achse ist, sondern bei einer Überfahrt auch die nachlaufende Achse.

Generell gilt für das folgende Unterkapitel, dass alle Erklärungen bzgl. Vorzeichenkonvention, Richtungen oder Bezugsachsen der Kräfte, sowie Einsenkungen und Verkip-pungen in Kapitel 4.2 zu finden sind.

In Abbildung 5-1 ist die Vertikalkraft, welche durch das Fahrzeug auf das System Schiene wirkt, für die drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf der linken Seite des Gleises dargestellt. Jeder Hochpunkt stellt die maximale Belastung durch eine Radsatzachse an der Messstelle dar. Das bedeutet, dass in dieser Abbildung nicht nur die Bemessungsachse dargestellt ist, sondern alle vier Achsen der Lok.

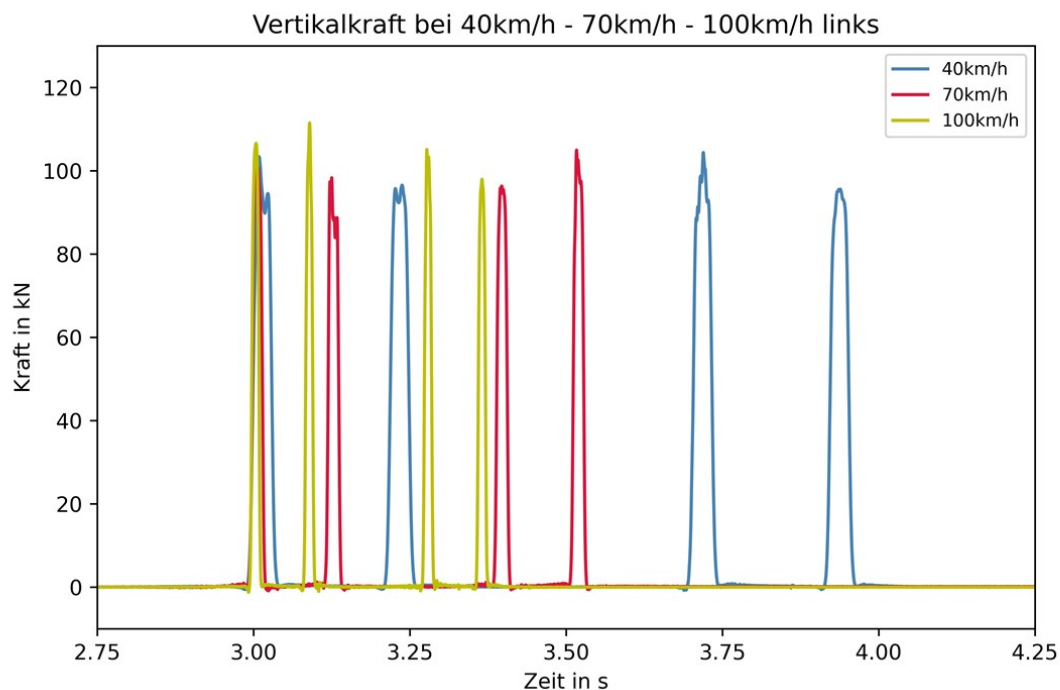


Abbildung 5-1: Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 links

In der Tabelle 5-1 sind die Maxima aus der obigen Abbildung in Zahlenwerten dargestellt, um diese besser vergleichen zu können.

Tabelle 5-1: Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 links

Geschwindigkeit	Achse 1	Achse 2	Achse 3	Achse 4
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
40 km/h	103,38	96,53	104,37	95,55
70 km/h	100,76	98,31	96,33	104,95
100 km/h	106,56	111,48	105,10	97,95

In nachfolgender Abbildung 5-2 handelt es sich um die Vertikalkraft auf der rechten Gleisseite, die erneut die drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten darstellt, wie im Absatz zuvor beschrieben. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass durch die drei verschiedenen Geschwindigkeiten die Dauer der Loküberfahrt über die Messstelle unterschiedlich ist.

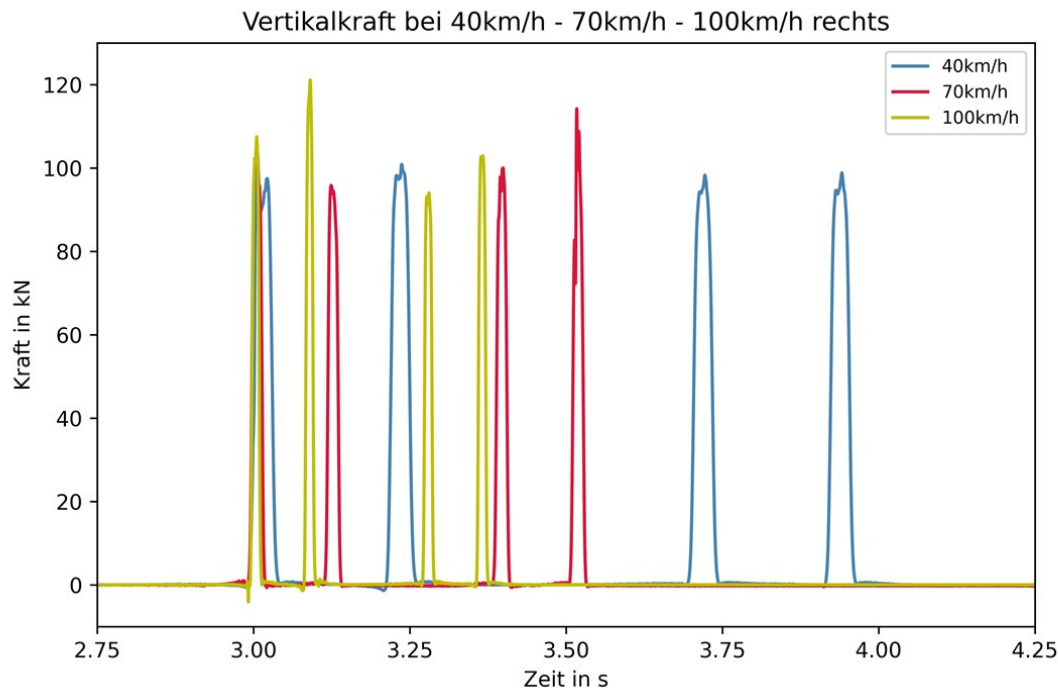


Abbildung 5-2: Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 rechts

In der nachfolgenden Tabelle 5-2 sind zur besseren Vergleichbarkeit die Maximalwerte aus der obigen Abbildung in Zahlenwerten dargestellt.

Tabelle 5-2: Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 rechts

Geschwindigkeit	Achse 1	Achse 2	Achse 3	Achse 4
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
40 km/h	103,49	100,86	98,28	98,83
70 km/h	102,43	95,83	100,00	114,21
100 km/h	107,50	121,12	94,02	102,95

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die höchste Vertikalkraft nicht immer bei der höchsten Geschwindigkeit auftritt. Daher lässt sich kein Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitserhöhungen und einer Erhöhung der Vertikalkraft erkennen. Das bedeutet die einwirkende Vertikalkraft des Fahrzeuges auf das System Schiene ist hier nicht abhängig von der Geschwindigkeit.

Um die Maximalwerte der einwirkenden Vertikalkraft durch die Bemessungsachse im Schwellenfach 3-4 und die dazu abgeleitete Vertikalkraft über der Schwelle 4 genauer betrachten und vergleichen zu können, stellt Abbildung 5-3 dies gegenüber.

Auch in dieser Gegenüberstellung der Kräfte und Geschwindigkeiten ist keine Abhängigkeit der Vertikalkraft durch die Geschwindigkeit erkennbar.

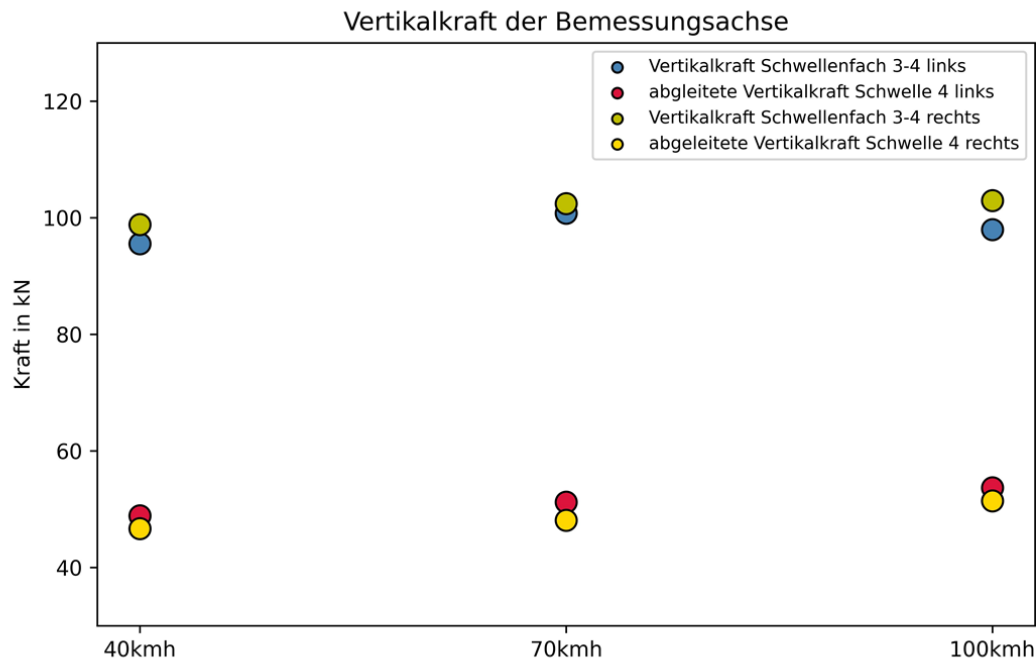


Abbildung 5-3: Maximale Vertikalkraft in 1.Achse bei Prüffahrten

In Tabelle 5-3 sind die Werte aus der obigen Abbildung in Form von Zahlenwerten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Maximalwert einer jeden Überfahrt nicht an allen gemessenen Positionen bei der höchsten Geschwindigkeit auftritt.

Tabelle 5-3: Maximale Vertikalkraft in 1.Achse bei Prüffahrten

Geschwindigkeit	Schwellenfach 3-4 links	abg. Kraft Schw. 4 links	Schwellenfach 3-4 rechts	abg. Kraft Schw. 4 rechts
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
40 km/h	95,55	48,87	98,83	46,68
70 km/h	100,76	51,22	102,43	48,10
100 km/h	97,95	53,70	102,95	51,42

Im nächsten Schritt wird in Abbildung 5-4 die maximale Schwelleneinsenkung der Prüffahrten auf der linken Seite betrachtet. Dazu werden die Höchstwerte, die durch die Bemessungsachse in Schwelle 2, 3 und 4 verursacht wurden, herangezogen.

Bei der Schwelleneinsenkung ist, wie zuvor bei der Vertikalkraft, kein direkter Zusammenhang mit der Geschwindigkeit ersichtlich. Dafür kann ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Schwellen festgestellt werden. So liegen die Werte von Schwelle 2 und 3 sehr nahe beisammen. Schwelle 4 weist im Vergleich dazu eine sehr große Einsenkung auf. Dazu folgt in den nächsten Kapiteln eine genauere Betrachtung.

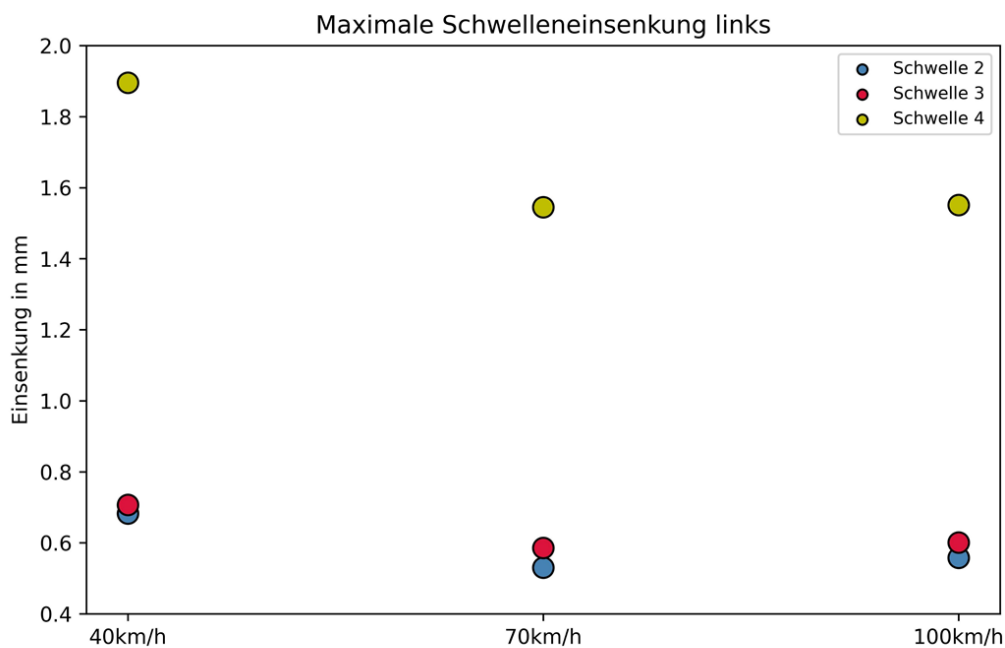


Abbildung 5-4: Maximale Schwelleneinsenkung links bei Prüffahrten

In Tabelle 5-4 sind die Werte aus der obigen Abbildung in Form von Zahlenwerten dargestellt.

Tabelle 5-4: Maximale Schwelleneinsenkung bei Prüffahrten

Geschwindigkeit	Schwelle 2	Schwelle 3	Schwelle 4
	[mm]	[mm]	[mm]
40 km/h	0,6827	0,7067	1,8952
70 km/h	0,5299	0,5856	1,5450
100 km/h	0,5579	0,6008	1,5511

Auf die Darstellung der Schwelleneinsenkung der rechten Seite wurde verzichtet, da aufgrund eines Sensorausfalles bei Schwelle 3 keine Daten vorliegen.

In Abbildung 5-5 ist die maximale Schwellenverkipfung dargestellt. Aufgrund des bereits erwähnten Sensorausfalls kann die Verkipfung für Schwelle 3 nicht ermittelt werden und es werden lediglich die Schwellen 2 und 4 betrachtet. Hierbei wird der jeweils höchste absolute Wert der Bemessungsachse bei jeder Geschwindigkeit dargestellt.

Die folgende Abbildung zeigt, dass die Verkipfung in Schwelle 2 in eine andere Richtung geht, als die von Schwelle 4. Hierauf wird in den nächsten Kapiteln genauer eingegangen. Diese Darstellung dient hauptsächlich der Verdeutlichung, dass die Geschwindigkeit keinen Einfluss auf die Verkipfung der Schwelle hat.

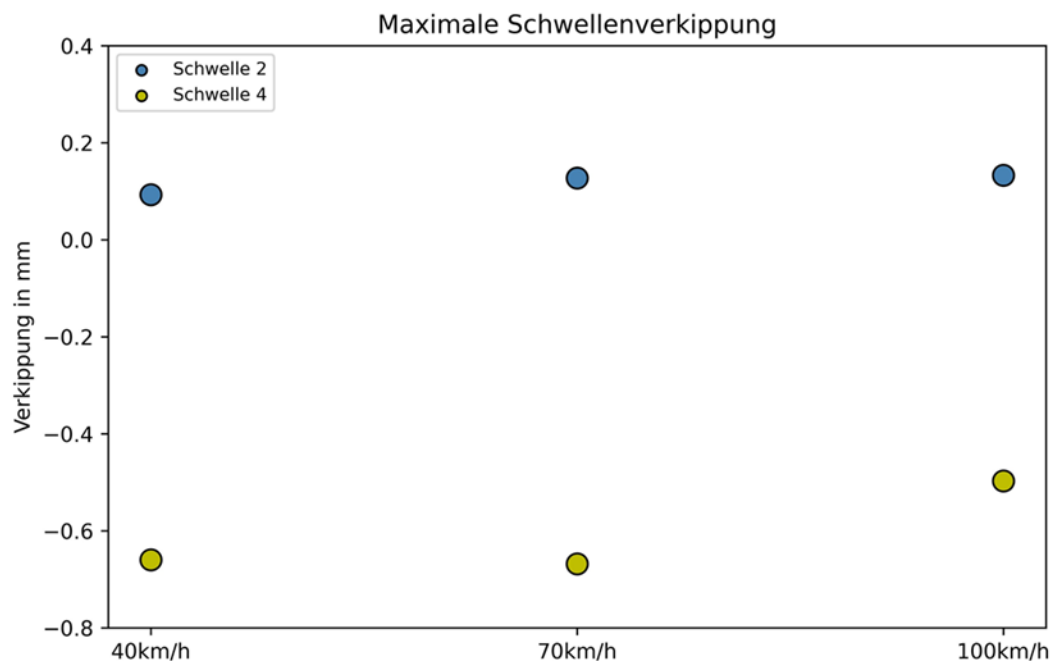


Abbildung 5-5: Maximale Schwellenverkipfung bei Prüffahrten

In Tabelle 5-5 sind in Werte aus Abbildung 5-5 nochmals dargestellt.

Tabelle 5-5: Maximale Schwellenverkipfung bei Prüffahrten

Geschwindigkeit	Schwelle 2	Schwelle 3
	[mm]	[mm]
40 km/h	0,0931	-0,6596
70 km/h	0,1273	-0,6678
100 km/h	0,1327	-0,4972

Nach der Auswertung der Schwellen erfolgt die genauere Betrachtung der Schienen. Abbildung 5-6 stellt die höchste gemessene Einsenkung in der Bemessungsachse der Prüffahrten an verschiedenen Stellen der Schiene dar. Zu erwähnen ist, dass sich die Werte von Schwelle 3 und dem Schwellenfach 3-4 auf die Innenseite der Schiene beziehen und die Werte der Schwelle 4 auf die außenliegende Seite der Schiene. Die Darstellung dient nicht dem Vergleich der Einsenkung an unterschiedlichen Positionen zueinander, sondern soll die Veränderung mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten darstellen.

Zu erwähnen ist außerdem, dass die Skalierung der Y-Achse keinen halben Millimeter abbildet. Daher zeigen die Werte der Schieneneinsenkung keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Vertikalkrafterhöhung und einer größeren Einsenkung.

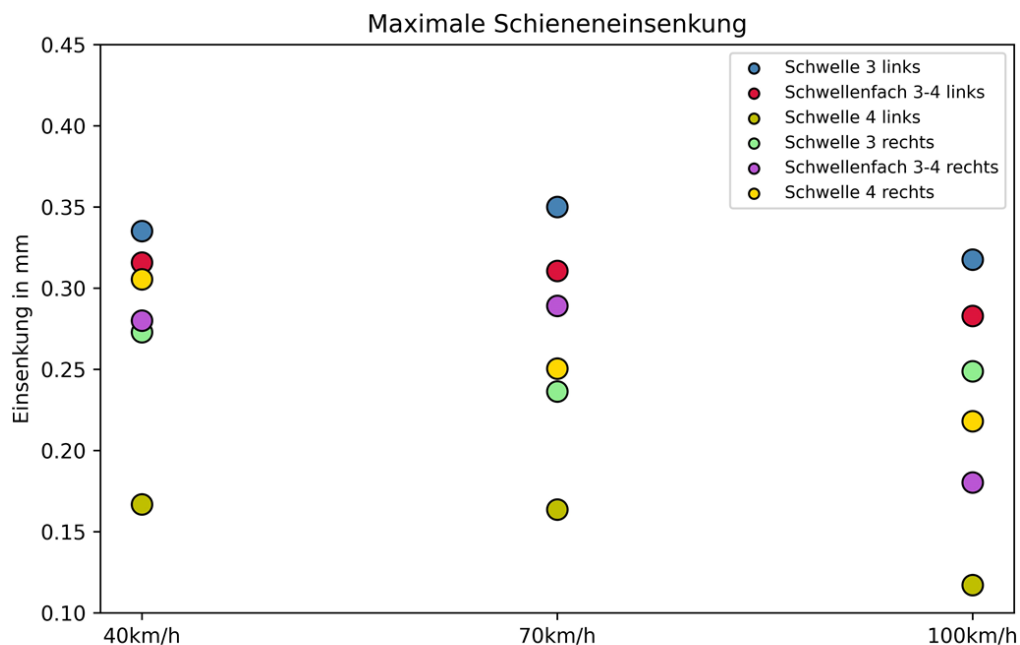


Abbildung 5-6: Maximale Schieneneinsenkung bei Prüffahrten

In Tabelle 5-6 sind die Werte aus der obigen Abbildung nochmals in Zahlenwerten ausgedrückt, dargestellt.

Tabelle 5-6: Maximale Schieneneinsenkung bei Prüffahrten

Geschwindigkeit	Schwelle 3 links	Schwellenfach 3-4 links	Schwelle 4 links	Schwelle 3 rechts	Schwellenfach 3-4 rechts	Schwelle 4 rechts
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
40 km/h	0,3352	0,3158	0,1669	0,2729	0,2800	0,3055
70 km/h	0,3501	0,3106	0,1636	0,2364	0,2891	0,2505
100 km/h	0,3176	0,2828	0,1171	0,2488	0,1803	0,2180

Auch die Schienenverkippung wird betrachtet. Hier ist zu erwähnen, dass es aufgrund von fehlerhaften Sensoren nur möglich war, die Verkippung der Schienen auf der rechten Seite der Messstelle zu untersuchen.

In Abbildung 5-7 ist die Verkippung der Schienen an der Stelle über dem Schwellenfach 3-4 und über der Schwelle 4 auf der rechten Seite dargestellt. Die Werte sind hier, im Gegensatz zu allen bisherigen Werten der Einsenkung und Verkippung in Grad angegeben. Auch wenn in der Abbildung Unterschiede zwischen den Geschwindigkeiten zu erkennen sind, sind diese nur sehr marginal in Anbetracht der Darstellung in Grad und der Berücksichtigung, dass es sich um nur jeweils eine Überfahrt pro Geschwindigkeit handelt. Das heißt, die Werte verändern sich nicht signifikant mit der Zunahme der Geschwindigkeit.

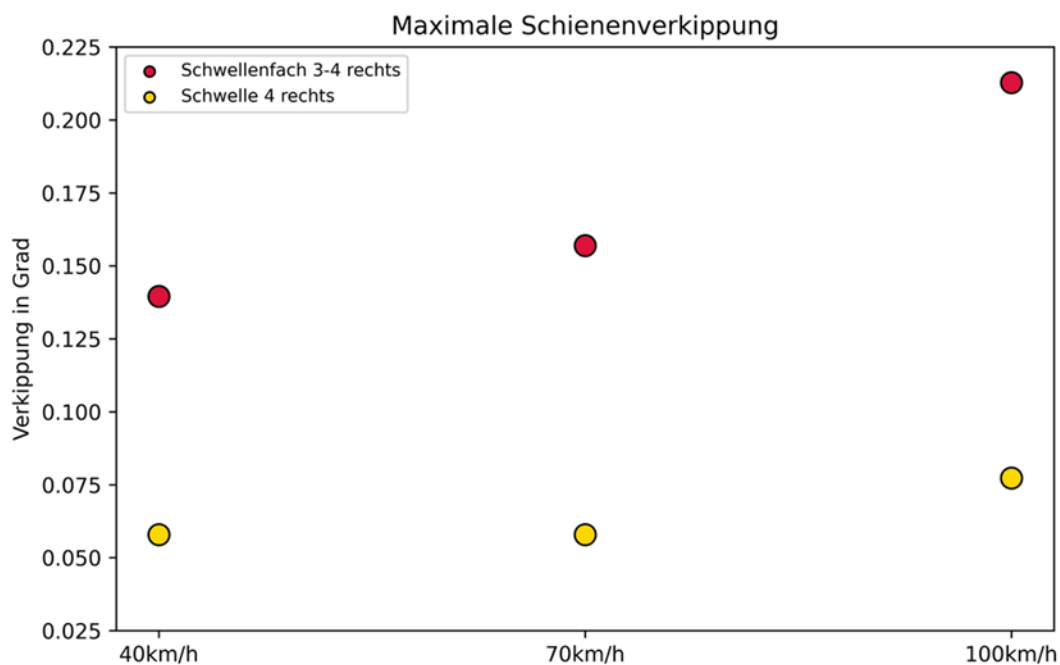


Abbildung 5-7: Maximale Schienenverkippung bei Prüffahrten

In Tabelle 5-7 sind die Werte aus der obigen Abbildung erneut in Zahlenwerten ausgedrückt, dargestellt.

Tabelle 5-7: Maximale Schienenverkippung bei Prüffahrten

Geschwindigkeit	Schwellenfach 3-4 rechts	Schwelle 4 rechts
	[Grad]	[Grad]
40 km/h	0,1396	0,0579
70 km/h	0,1569	0,0579
100 km/h	0,2128	0,0773

5.2 Überfahrten von lokbespannten Zügen

Den nachstehenden Darstellungen liegt die Auswertung der Überfahrten von lokbespannten Zügen zu Grunde. Aufgrund der hohen Dominanz der S-Bahn im gewählten Streckenabschnitt ist die Anzahl der Überfahrten von anderen Fahrzeugtypen sehr begrenzt. Deshalb konnten während der gesamten Messung nur 21 Datensätze eindeutig lokbespannten Zugüberfahrten zugewiesen werden. Davon sind 7 Überfahrten von Güterzügen und 14 Überfahrten von Personenzügen. Bei den Güterzügen ist davon auszugehen, dass die Lok die Wagone zieht, bei den Personenzügen kann die Lok die Personenwagen entweder ziehen oder schieben. Da bei der Auswertung dieser Überfahrten nur die vier Achsen der Lok genauer betrachtet werden, erfolgt keine Unterscheidung von Güter- und Personenzügen.

Generell gilt für den gesamten folgenden Abschnitt, dass alle Erklärungen bzgl. Vorzeichenkonvention, Richtungen, Bezugsachsen der Kräfte sowie Einsenkungen, in Kapitel 4.2 zu finden sind.

Es ist anzumerken, dass aufgrund der geringen Anzahl der Überfahrten die Aussagekraft der folgenden Ergebnisse im Gegensatz zu denen der S-Bahn Überfahrten geringer ist. Deshalb sind die Überfahrten der lokbespannten Züge nicht so detailliert ausgearbeitet, wie die der S-Bahnen. Da die Auswertung aber eine starke Korrelation mit der nachfolgenden Auswertung der S-Bahnen aufweist, wird auf Auffälligkeiten, welche in diesem Kapitel zu erkennen sind, im Zuge der S-Bahn Auswertung genauer eingegangen.

Als erstes wird die Vertikalkraftverteilung der Achsen von allen Überfahrten genauer betrachtet. Dazu wird in Abbildung 5-8 die Streuung der Vertikalkraft in den vier Achsen der Loks im Schwellenfach 3-4 mithilfe von Boxplots dargestellt. Dabei werden die linke und die rechte Schiene in einer Grafik nebeneinander abgebildet, damit direkt ein Vergleich zwischen den beiden Seiten erfolgen kann. Zusätzlich ist eine schematische Darstellung der gegenständlichen Lok mit entsprechender Zuordnung der Achsen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die einwirkende Vertikalkraft auf der linken Seite in allen Achsen um ca. 10 kN größer ist, als auf der rechten Seite. Das belegt auch der angeführte Mittelwert aller Achsen in Tabelle 5-8. Die Streuung bewegt sich aufgrund der unterschiedlichen Zugarten im Mittel in einem Bereich von ca. 35 kN und hat eine Standardabweichung von ca. 9,9 kN. Dieser Wert stellt ca. 11 % der Mittelwerte dar.

Tabelle 5-8: Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwellenfach 3-4

Achse	1		2		3		4	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	90,18	82,08	93,17	83,63	93,51	82,39	90,57	83,42
Median	89,94	80,08	93,09	81,18	88,76	77,10	89,20	83,22
Kleinster Wert	74,71	69,25	78,85	68,91	84,10	70,18	74,54	69,25
Größter Wert	109,49	101,43	109,09	99,08	111,36	101,30	110,32	102,01
Standardabw.	10,50	10,41	8,26	9,87	8,26	10,62	10,86	10,34

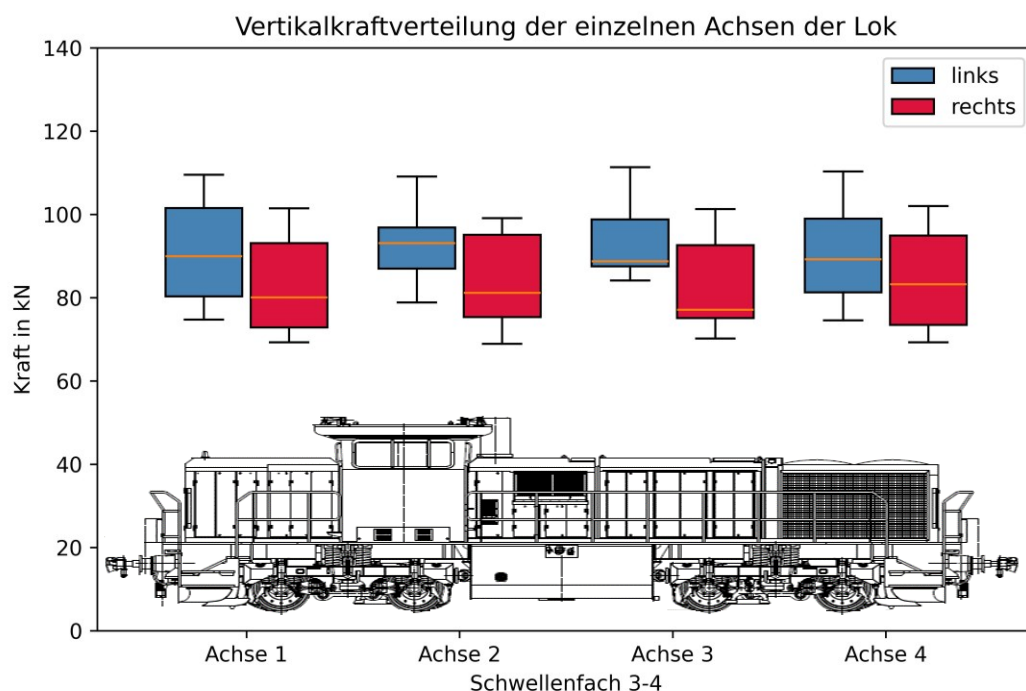


Abbildung 5-8: Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwellenfach 3-4

In Abbildung 5-9 ist die abgeleitete Vertikalkraft der vier Lokomotivachsen bei Schwelle 4 dargestellt. Es ist sowohl die Verteilung der linken als auch die der rechten Schiene abgebildet, wobei deutliche Unterschiede zu erkennen sind.

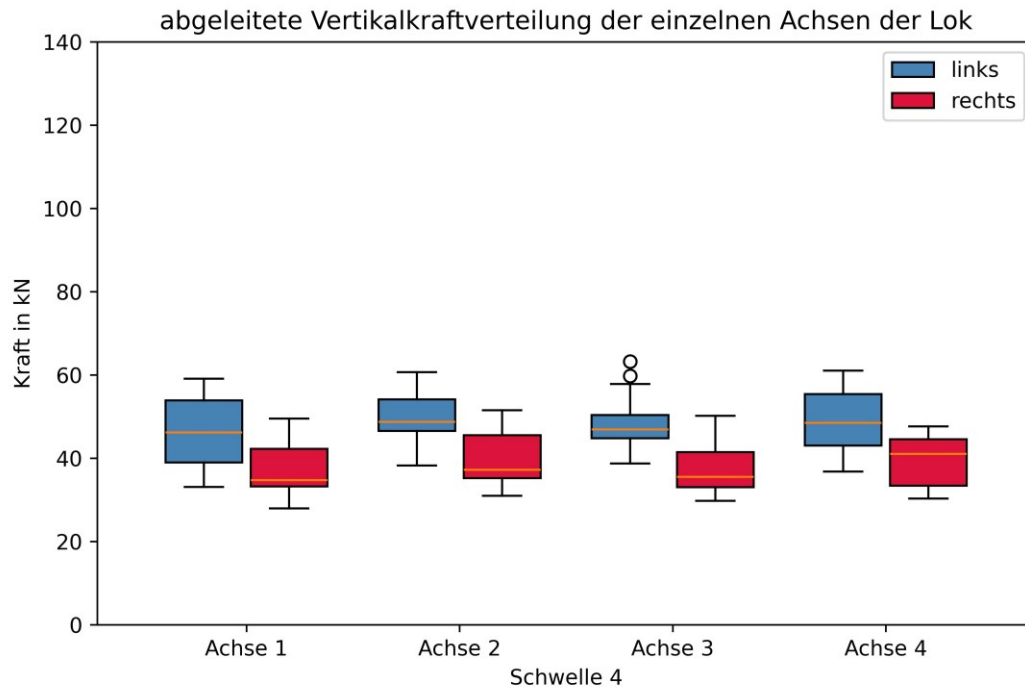


Abbildung 5-9: abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwelle 4

Zur besseren Vergleichbarkeit sind zusätzlich in Tabelle 5-9 statistische Werte angeführt. Die Mittelwerte der linken Seite liegen im Durchschnitt bei ca. 48 kN und die Standardabweichung bei 6,4 kN. Die rechte Seite zeigt einen um ca. 10 kN geringeren Mittelwert und eine Standardabweichung von 6,0 kN. Das Verhalten der Achsen zueinander unterscheidet sich kaum. Das bedeutet, keine der vier Achsen hat ein ausgeprägtes Merkmal oder ein spezielles Verhalten gegenüber den anderen.

Tabelle 5-9: abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwelle 4

Achse	1		2		3		4	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	45,94	36,91	49,47	39,76	48,55	37,62	48,85	39,54
Median	46,20	34,72	48,76	37,24	46,93	35,50	48,50	41,03
Kleinsten Wert	33,08	27,95	38,24	30,97	38,71	29,77	36,77	30,33
Größter Wert	59,07	49,51	60,68	51,52	63,23	50,17	61,01	47,65
Standardabw.	7,63	6,01	6,47	6,14	6,27	6,38	7,20	5,85

Zur detaillierten Betrachtung der Vertikalkraft gehört auch der Krafteinleitungspunkt. Dazu wird der Abstand des veränderlichen Einleitungspunkts der Vertikalkraft zur Schienenmitte in Abbildung 5-10 für die vier Achsen der Loks dargestellt. Die linke und rechte Schiene sind nebeneinander abgebildet und zeigen keine eindeutigen Unterschiede. Beide Seiten haben hohe Streuungen und zahlreiche Ausreißer, da bedacht werden muss, dass nur 21 Datensätze in der Auswertung verwendet wurden. Da alle Abstände im positiven Bereich liegen, greift die Vertikalkraft bei beiden Seiten in Richtung Gleismitte an. Der Median liegt bei allen Achsen bei ca. 8 mm. Weitere statistische Betrachtungen sind in Tabelle 5-10 angegeben.

Tabelle 5-10: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4

Achse	1		2		3		4	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Mittelwert	8,56	7,56	7,27	7,74	8,68	7,51	7,39	6,84
Median	8,04	8,57	7,36	8,31	8,17	7,90	7,38	6,84
Kleinster Wert	4,36	-0,40	5,22	0,83	5,99	-0,78	4,73	-1,37
Größter Wert	13,71	10,44	9,13	11,14	15,04	10,79	10,80	11,95
Standardabw.	2,55	2,62	0,94	2,51	2,28	2,43	1,33	2,86

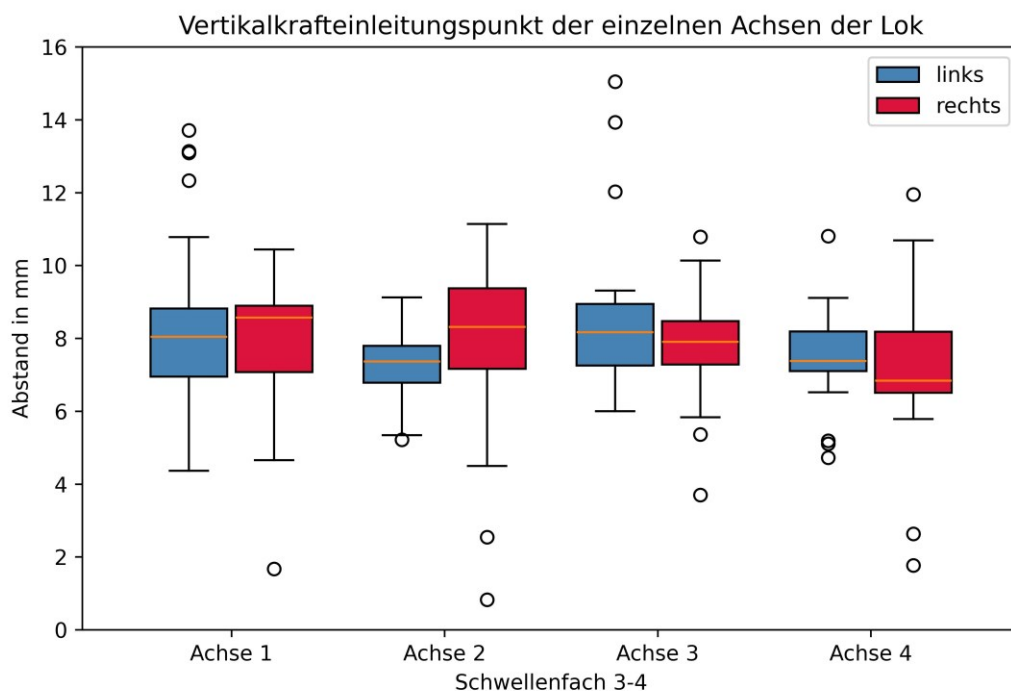


Abbildung 5-10: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4

Als nächster Punkt wird die Lateralkraft genauer analysiert. Die Verteilung der Kraft auf beiden Seiten des Gleises ist in Abbildung 5-11 gezeigt. Es handelt sich dabei um die einwirkende horizontale Kraft im Schwellenfach 3-4 durch die vier Achsen der Lok. Die Lateralkraft liegt bei allen Achsen und Seiten im negativen Bereich. Die einwirkende Kraft auf die rechte Schiene weist eine höhere Streuung auf als die linke Seite. Dafür sind die Maximalwerte und die Mediane der linken Seite höher. In der Tabelle 5-11 werden alle statistischen Werte zur besseren Vergleichbarkeit angeführt. Der Median der linken Seite liegt in einem Bereich von 12,6 kN bis 15,1 kN und der Median der rechten Seite ist bei allen vier Achsen kleiner als 12,1 kN.

Tabelle 5-11: Absolutwerte der Lateralkraft in einzelnen Achsen der Lok – Schwellenfach 3-4

Achse	1		2		3		4	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	14,71	11,35	14,05	11,51	14,48	11,08	13,65	11,27
Median	15,11	11,67	13,50	12,06	14,44	11,21	12,62	10,49
Kleinster Wert	11,35	6,18	11,02	7,25	10,69	4,39	10,18	6,44
Größter Wert	18,23	14,65	17,35	15,93	18,45	15,17	18,33	16,39
Standardabw.	1,91	2,39	1,82	2,46	2,34	2,69	2,47	2,67

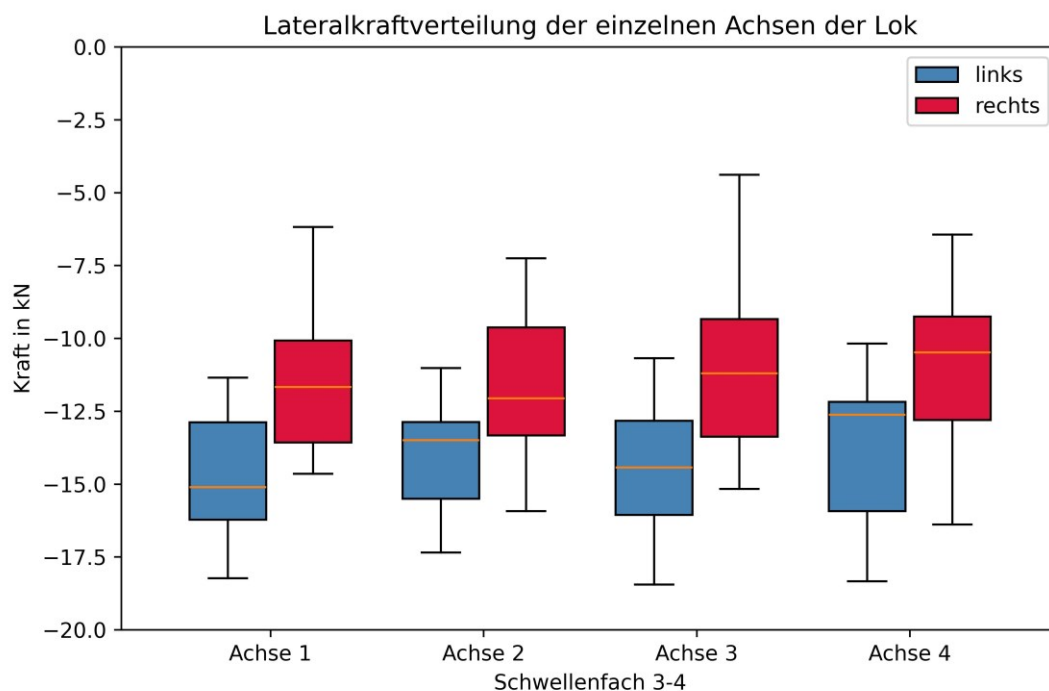


Abbildung 5-11: Lateralkraft in einzelnen Achsen der Lok – Schwellenfach 3-4

Die Auswertung der maximalen Schwelleneinsenkung bei Schwelle 2, 3 und 4 ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass bei Schwelle 3, wie bereits bei den Prüffahrten, aufgrund des defekten Sensors nur die linke Seite ausgewertet wurde. Die dargestellten Boxplots werden mit den Maximalwerten der Schwelleneinsenkung an der jeweiligen Position, unabhängig davon durch welche Achse der Lok das Maxima verursacht wurde, gefüllt. Dabei ist zu erkennen, dass das Verhalten und die Streuung von Schwelle 2, 3 auf beiden Seiten und bei Schwelle 4 rechts relativ identisch sind. Aus Tabelle 5-12 ist zu entnehmen, dass der Median dieser Einsenkungen im Durchschnitt bei ca. 0,6 mm liegt. Die Einsenkung der Schwelle 4 auf der linken Seite ist größer, der Median liegt hier bei 1,14 mm. Die Standardabweichung der Streuung ist mehr als dreimal so groß wie bei den restlichen gemessenen Stellen. Die gesamten Daten sind positive Werte, das bedeutet, es ist bei allen Schwellen eine Einsenkung nach unten vorhanden.

Tabelle 5-12: Maximale Schwelleneinsenkung bei Lok

Schwelleneinsenkung	Schwelle 2	Schwelle 3	Schwelle 4	Schwelle 2	Schwelle 4
	links			rechts	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Mittelwert	0,70	0,47	1,22	0,56	0,62
Median	0,72	0,44	1,14	0,58	0,61
Kleinster Wert	0,53	0,33	0,78	0,43	0,48
Größter Wert	0,86	0,67	1,82	0,73	0,76
Standardabweichung	0,0985	0,0974	0,2883	0,0818	0,0841

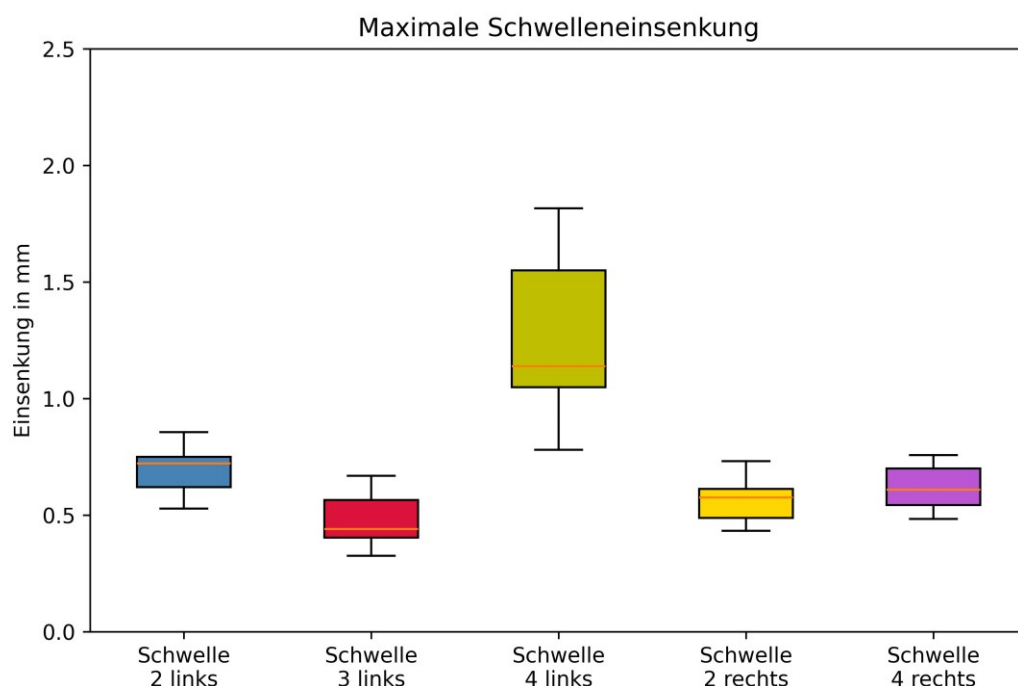


Abbildung 5-12: Maximale Schwelleneinsenkung bei Lok

In Abbildung 5-13 ist die maximale Schieneneinsenkung an unterschiedlichen Positionen im Gleis dargestellt. Dabei wird für jeden Boxplot, wie bei der Schwelleneinsenkung, der maximal gemessene Wert der Einsenkung verwendet, unabhängig davon von welcher Achse der Lok dieser erzeugt wurde. Aus der Abbildung lässt sich eindeutig erkennen, dass die Streuung der Einsenkungen und die Werte auf der linken Seite größer sind als bei der rechten Schiene. Aus Tabelle 5-13 geht hervor, dass die Werte links eine Streuung von 0,19 mm bis 0,31 mm und rechts von 0,11 mm bis 0,19 mm haben. Die Mediane der linken Seite liegen bei rund 0,4 mm, ausgenommen bei Schwelle 4 links, dort liegt der Median bei ca. 0,23 mm, auf gleicher Höhe wie die Werte auf der rechten Seite. Das bedeutet, die Einsenkungen der linken und rechten Seite weisen unterschiedliche Verhalten auf, wobei Schwelle 4 eine Ausnahme darstellt.

Tabelle 5-13: Maximale Schieneneinsenkung bei Lok

Schieneneinsenkung	Schwelle 3	Schwellenf. 3-4	Schwelle 4	Schwelle 3	Schwellenf. 3-4	Schwelle 4
	links			rechts		
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Mittelwert	0,39	0,38	0,24	0,23	0,21	0,26
Median	0,38	0,40	0,23	0,23	0,23	0,25
Kleinster Wert	0,29	0,28	0,13	0,18	0,13	0,18
Größter Wert	0,52	0,47	0,44	0,29	0,30	0,37
Standardabw.	0,0555	0,0579	0,0736	0,0305	0,0489	0,0559

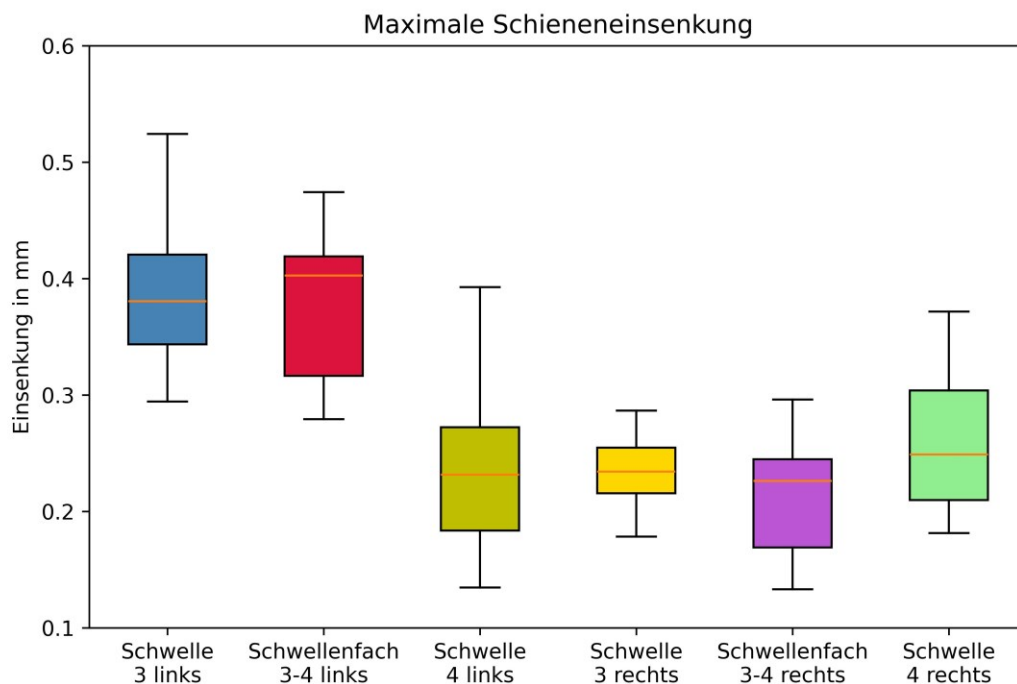


Abbildung 5-13: Maximale Schieneneinsenkung bei Lok

5.3 S-Bahn Überfahrten

Dieses Kapitel befasst sich mit der Auswertung der S-Bahn Überfahrten, welche den Großteil der Überfahrten auf diesem Streckenabschnitt ausmachen. Genaue Fahrzeugdetails befinden sich in Kapitel 3.5. Die Betrachtung dieser Überfahrten erfolgt in zwei Phasen: Eine getrennte Auswertung vor und nach dem Sensorpad Einbau.

Die Sensorpads wurden am 06. November 2023 auf der linken Seite zwischen Schiene und Schwelle eingebaut. Da die Pads eine höhere Steifigkeit aufweisen sollen als die Zwischenlage zuvor, führt dies zu einigen Veränderungen und macht eine getrennte Betrachtung der Lastabtragung sinnvoll. Weitere Informationen zu den Sensorpads befinden sich in Kapitel 3.2.1.

Generell gilt für den gesamten folgenden Abschnitt, dass alle Erklärungen bzgl. Vorzeichenkonvention, Richtungen oder Bezugsachsen der Kräfte, Einsenkungen und Verkipnungen in Kapitel 4.2 zu finden sind.

In den nächsten beiden Unterpunkten werden die allgemeinen Auswertungen von vor und nach dem Pads Einbau erläutert und in Kapitel 5.3.3 wird ein Vergleich zwischen beiden Auswertungsphasen gezeigt.

5.3.1 Auswertungen vor Pads Einbau

Als erster Punkt bei der Auswertung der S-Bahn Überfahrten wird die Vertikalkraft mithilfe eines Boxplots genauer betrachtet. Dazu ist in Abbildung 5-14 die gemessene Vertikalkraft im Schwellenfach 3-4 auf der linken Seite dargestellt. Abbildung 5-15 zeigt die rechte Seite der Messstelle. In den Grafiken ist die Streuung der Vertikalkraft aller Überfahrten der einzelnen Achsen ersichtlich. Bei der Zuordnung der Achsen wurde die S-Bahn immer von der gleichen Seite betrachtet, unabhängig davon in welche Richtung diese gefahren ist. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5-14 zusätzlich zur Vertikalkraft eine schematische Darstellung der S-Bahn mit der entsprechenden Zuordnung der Achsen gezeigt. Das bedeutet, die erhöhte Vertikalkraft bei Achse 3 und 4 ist auf das höhere Gewicht des Zuges zurückzuführen, da sich der Antriebsteil an dieser Stelle befindet. Die Mittelwerte sowie die Mediane und der jeweils kleinste und größte Wert der Vertikalkräfte bei den einzelnen Achsen auf der linken Seite sind in Tabelle 5-14 dargestellt. Es sind dabei keine deutlichen Unterschiede zwischen den Achsen zu erkennen. Auch die Streuung aller Achsen mit einer Standardabweichung zwischen 1,75 kN und 2,55 kN ist gering und zeigt keine Auffälligkeiten. Auf eine tabellarische Darstellung der Vertikalkraft von der rechten Seite wurde aufgrund der Ähnlichkeit verzichtet.

Tabelle 5-14: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - vor Pads Einbau

Achse	1	2	3	4	5	6	7	8
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	51,87	51,55	87,28	85,66	50,83	49,86	51,75	50,64
Median	51,52	50,96	86,5	85,24	50,93	49,68	51,49	51,04
Kleinsten Wert	48,33	47,58	81,26	81,98	45,74	45,99	45,16	45,44
Größter Wert	56,39	59,79	93,32	91,94	54,21	54,47	55,95	54,83
Standardabw.	1,9106	2,5512	2,8191	2,0766	1,7487	2,0906	1,9118	1,8690

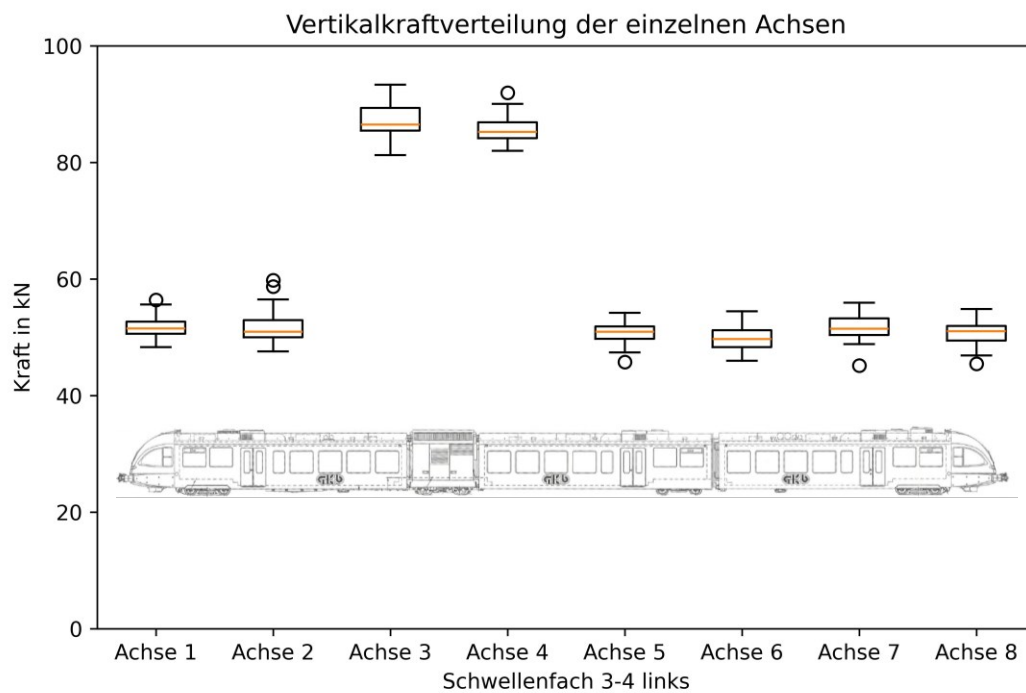


Abbildung 5-14: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - vor Pads Einbau

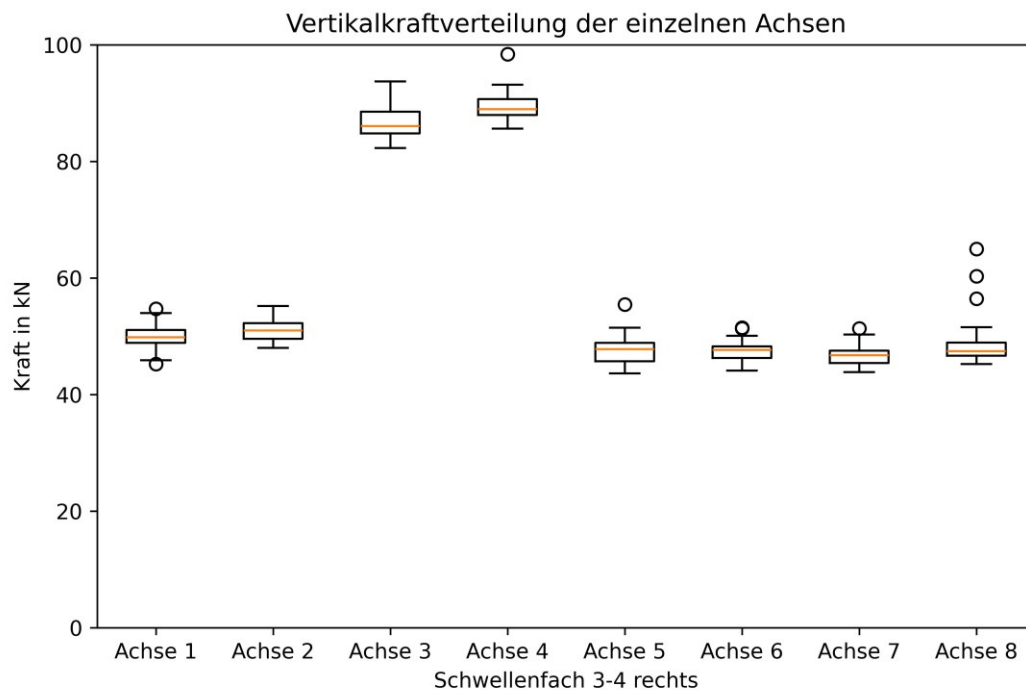


Abbildung 5-15: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 rechts - vor Pads Einbau

Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, variiert der Einleitungspunkt der Kräfte. In Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 sind die Einleitungspunkte der linken und rechten Schiene direkt gegenübergestellt. Es handelt sich bei den Werten in den Abbildungen um den Abstand e , der gemessen von der Schienenkopfmittle in Millimeter angegeben wird. Die Streuung dieser Abstände ist in Anbetracht der Schienenkopfbreite von 72 mm relativ groß und reicht bis zu ca. 12 mm in Richtung Gleisinnenseite und bis zu ca. 8 mm in Richtung Gleisaußenseite. Das bedeutet, der Abstand des Einleitungspunktes der Vertikalkraft bewegt sich in einem Bereich von ca. 20 mm.

Bei Abbildung 5-16 werden alle Achsen und alle Abstände der Einleitungspunkte in einem Boxplot zusammengeführt. Hierbei lässt sich erkennen, dass der Median der Werte ungefähr auf gleicher Höhe bei ca. 2 mm in Richtung Gleismittle liegt. Die Boxplots unterscheiden sich nur durch die höhere Streuung auf der rechten Seite.

In Abbildung 5-17 werden nur die Abstände des Einleitungspunktes der ersten Achse dargestellt. Im Vergleich zur vorherigen Abbildung lässt sich eine geringere Streuung erkennen. Zusätzlich sind die Werte rechts höher als links. Folglich lässt sich auf der rechten Seite ein höherer Median als in der vorherigen Abbildung feststellen. Dieser befindet sich auf der Höhe von ca. 4 mm in Richtung Gleismittle. Das bedeutet, dass bei 50 % aller Überfahrten in der ersten Achse die Krafteinleitung in einem größeren Abstand als 4 mm zur Schienenkopfmittle auftritt.

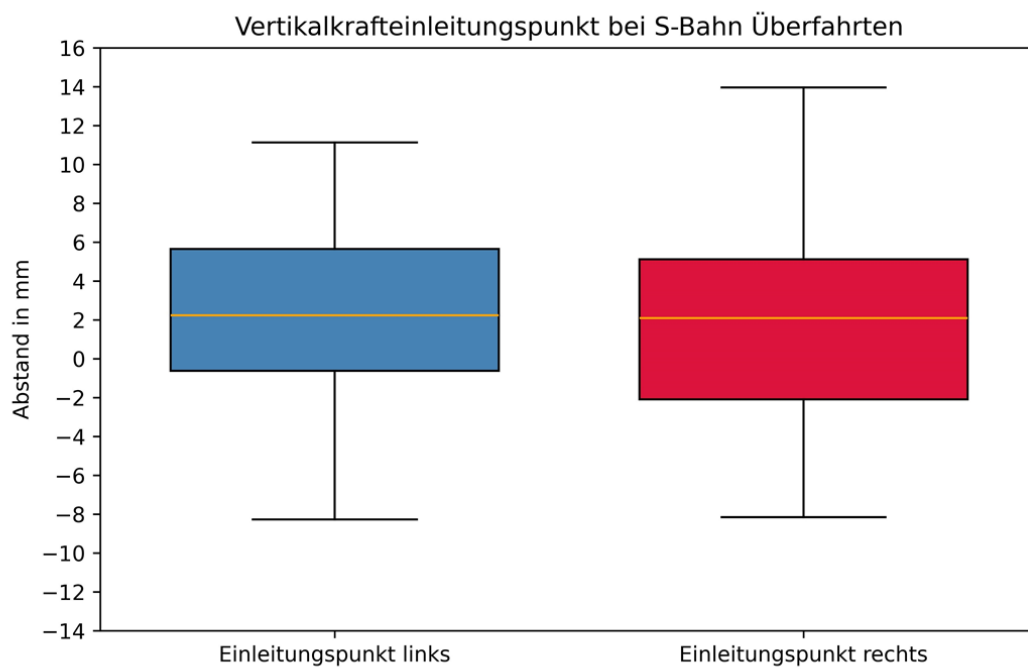


Abbildung 5-16: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für alle Achsen – vor Pads Einbau

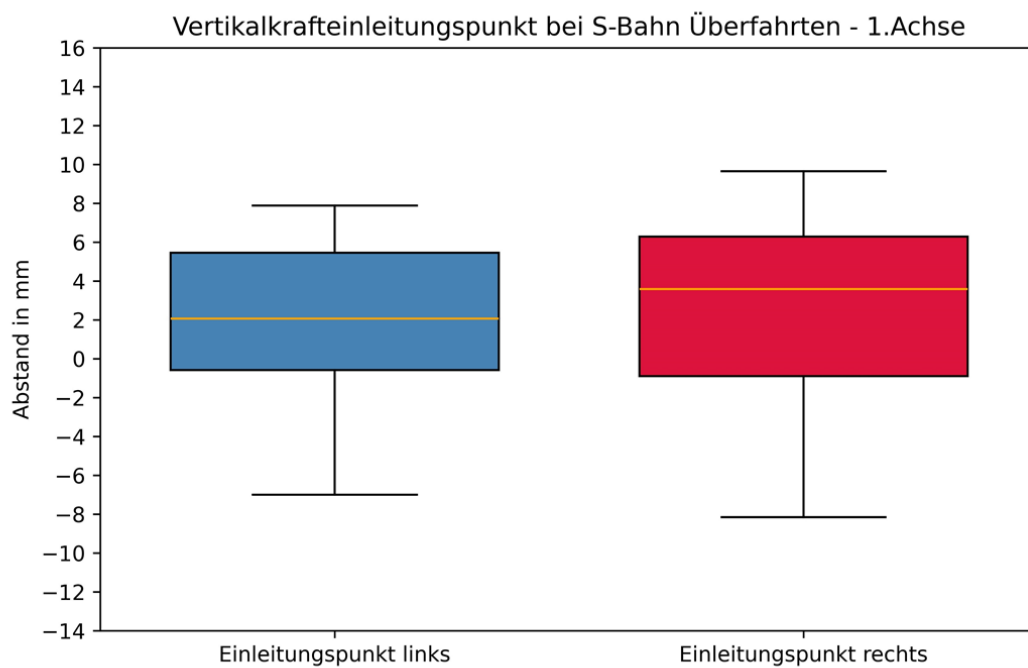


Abbildung 5-17: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau

Nach der Vertikalkraft und dem dazugehörigen Einleitungspunkt wird auch die Lateralkraft genauer betrachtet. Die Werte der nächsten Darstellungen geben die Streuung der Lateralkraft in Kilonewton an. Alle Werte bewegen sich im negativen Bereich, somit wirkt die Kraft auf der linken und rechten Schiene in Richtung Gleismitte und durch die Schienenneigung zusätzlich nach unten. Die folgende Abbildung 5-18 zeigt die Gegenüberstellung der Lateralkraft von der linken und rechten Seite über alle Achsen. Es kann auf der rechten Seite eine erhöhte Streuung im Gegensatz zur linken Seite erkannt werden. Die gesamten Achsen haben links eine Streuung von ca. 5 kN bis 13 kN und auf der rechten Seite von ca. 2 kN bis 12 kN. Zusätzlich zeigt die Darstellung, dass die Lateralkraft auf der linken Seite bei den meisten Überfahrten einen größeren Absolutwert hat.

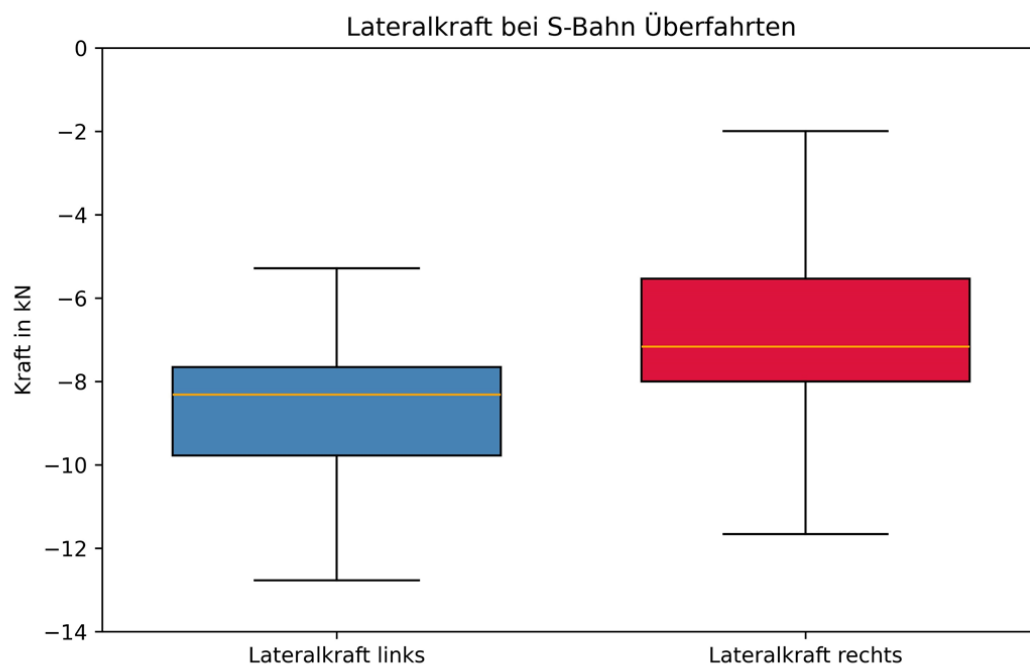


Abbildung 5-18: Lateralkraft bei S-Bahn Überfahrten – Schwellenfach 3-4 - vor Pads Einbau

Nach der Betrachtung aller Achsen werden in Abbildung 5-19 mithilfe eines Scatterplots die Ergebnisse der ersten Achse genauer analysiert. Jeder Punkt stellt die Lateralkraft bei einer Überfahrt in der ersten Achse dar. Zusätzlich befinden sich statistische Auswertungsgrößen in Tabelle 5-15. Wie bei der Betrachtung aller Achsen ist die Streuung der ersten Achse auf der rechten Seite höher als auf der linken Seite. Der Mittelwert hingegen ist auf der rechten Seite mit 6,44 kN geringer als auf der linken Seite mit 8,44 kN. Das bedeutet, die einwirkende Lateralkraft ist im Durchschnitt auf die rechte Schiene geringer, es zeigt sich jedoch eine höhere Varianz der Werte.

Tabelle 5-15: Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau

Lateralkraft in absolut Werten	links	rechts
	[kN]	[kN]
Mittelwert	8,11	6,44
Kleinsten Wert	5,75	2,83
Größter Wert	9,79	8,95
Spannweite der Streuung	4,03	6,13
Standardabweichung	0,7324	1,7697

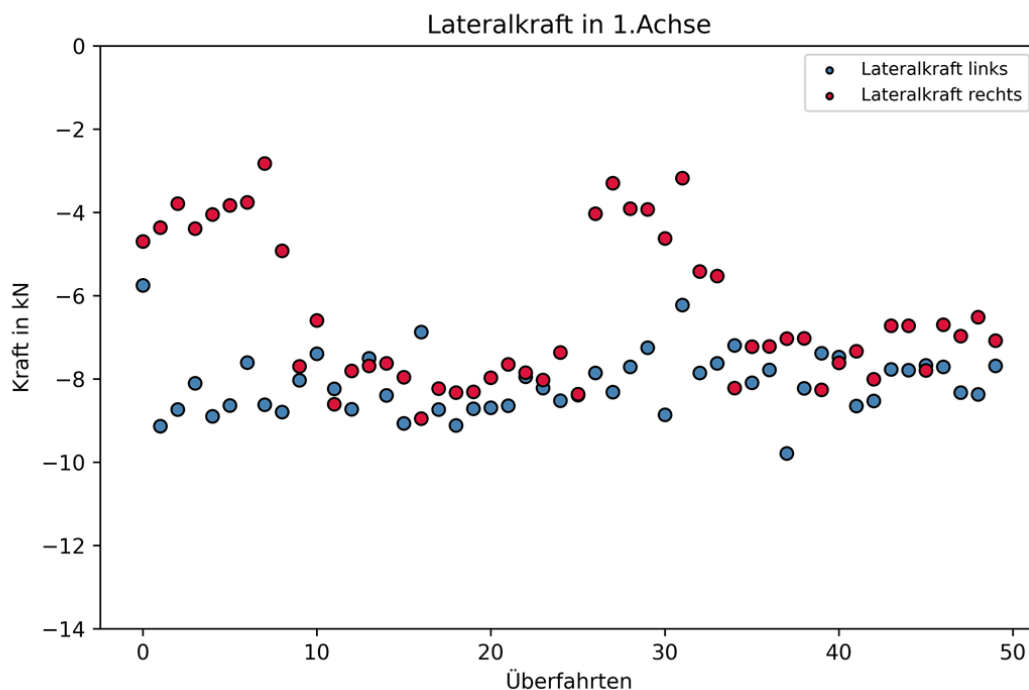


Abbildung 5-19: Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau

In der Abbildung 5-20 und der Abbildung 5-21 sind die Schienenspannungen am Schienenfuß unten und am Schienenfuß seitlich im Bereich des Schwellenfaches 3-4 für die erste Achse dargestellt. Die Spannung wird wie zuvor die Lateralkraft mithilfe der aus den Linear-DMS gemessenen Dehnung ermittelt. In den beiden Abbildungen stellt jeder Punkt die Spannung bei einer Überfahrt in der ersten Achse in Newton pro Quadratmillimeter dar. Wie normalerweise üblich, tritt im Schienenfuß unten eine höhere Spannung als im Schienenfuß seitlich auf. Um die Werte besser vergleichen zu können, werden in Tabelle 5-16 statistische Werte, wie der Mittelwert und die Standardabweichung angeführt. Die durchschnittlichen Ergebnisse von der linken und rechten Seite unterscheiden sich im SFU nur um ca. $0,6 \text{ N/mm}^2$. Bei der seitlichen Spannung im Schienenfuß ist zu erkennen, dass die Mittelwerte auf der rechten Seite um ca. $2,8 \text{ N/mm}^2$ höher sind als links. Die Standardabweichungen von SFU und SFS verhalten sich relativ ident und bewegen sich in einem Bereich von $1,5 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 5-16: Mittelwerte der Schienenspannung SFU und SFS in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau

Schienenspannung		links	rechts
		[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mittelwert	SFU	24,8717	25,4687
	SFS	16,1421	18,9665
Kleinsten Wert	SFU	20,6179	21,5552
	SFS	12,8947	14,5646
Größter Wert	SFU	28,4021	29,5219
	SFS	20,3344	22,8869
Spannweite der Streuung	SFU	7,7842	7,9667
	SFS	7,4397	8,3222
Standardabweichung	SFU	1,7253	1,4142
	SFS	1,3581	1,6326

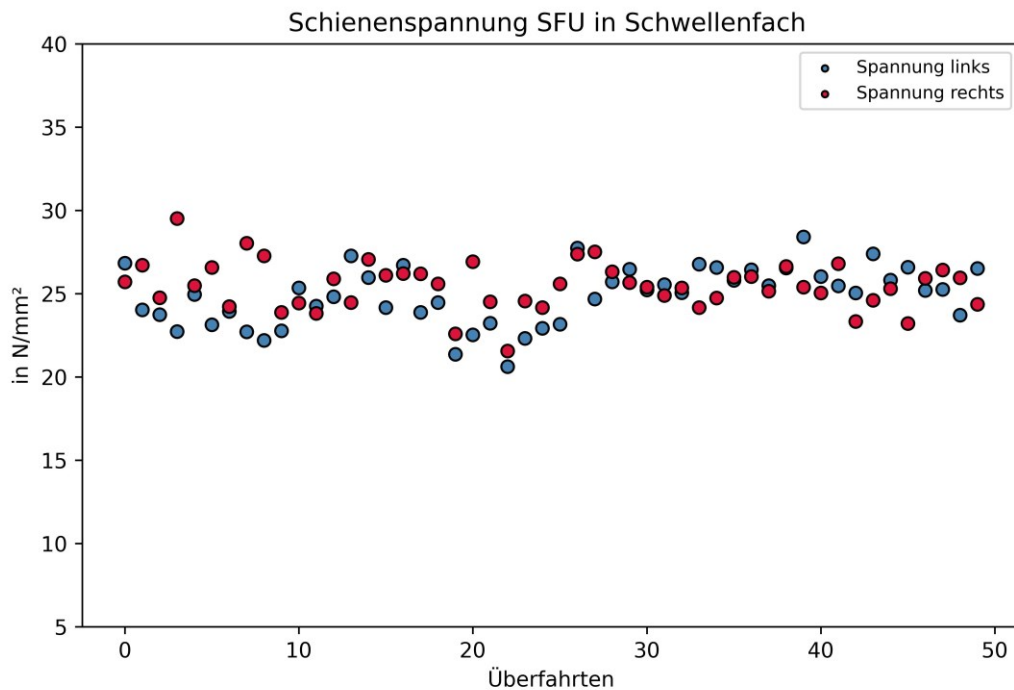


Abbildung 5-20: Schienenspannung Schienenfuß Unten in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau

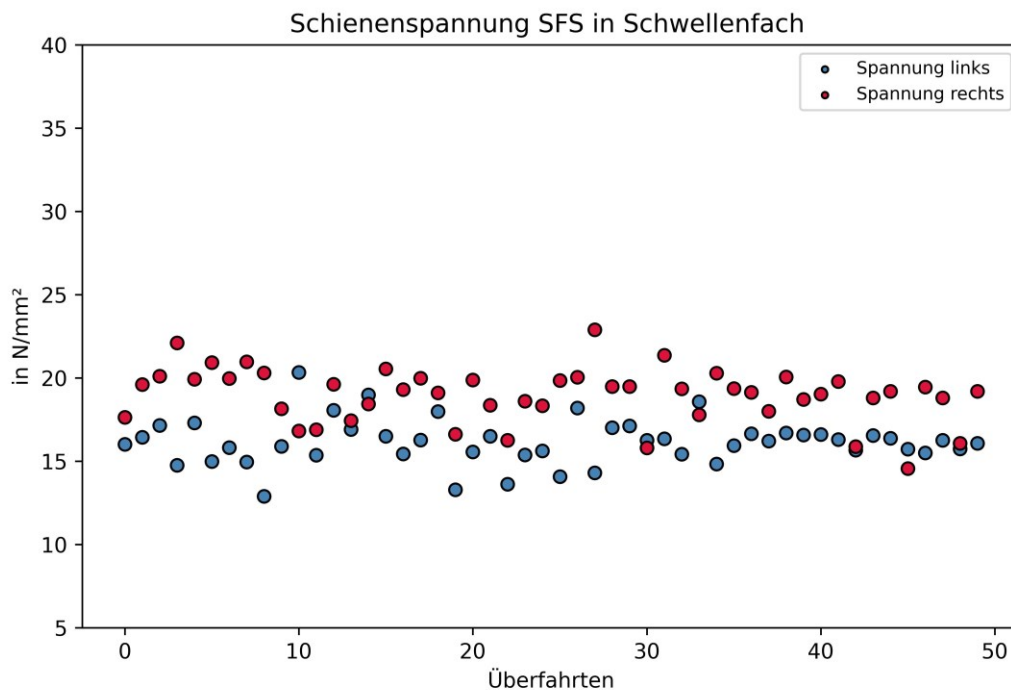


Abbildung 5-21: Schienenspannung Schienenfuß Seite in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau

Weitere Auswertung zu den Überfahrten vor dem Sensorpads Einbau befinden sich in Kapitel 5.3.3 im Vergleich mit den Auswertungen nach dem Sensorpads Einbau.

5.3.2 Auswertungen nach Pads Einbau

In diesem Kapitel erfolgt die statistische Darstellung der Überfahrten nach dem Pads Einbau. Generell sind die gleichen Grafiken wie in dem Kapitel 5.3.1 zu finden und auch der Aufbau und das System dahinter sind ident. Daher werden hier nicht erneut alle Darstellungen im Detail erläutert. Es wird lediglich auf die Werte, Streuungen und Auffälligkeiten hingewiesen.

Die Auswertung startet mit der Betrachtung der Vertikalkraftverteilung in den einzelnen Achsen im Schwellenfach 3-4 auf beiden Seiten. Die Ausprägung in Achse 3 und 4, verursacht durch das Antriebsteil des Zuges, ist in beiden Darstellungen eindeutig erkennbar. In Abbildung 5-22 ist außerdem ersichtlich, dass sich nur eine geringe Streuung auf der linken Seite ergibt. Die Streuung der rechten Seite (siehe Abbildung 5-23) verhält sich grundsätzlich ähnlich, es sind zusätzlich in jeder Achse einige Ausreißer nach oben hin erkennbar. In der Tabelle 5-17 sind die Werte aus der Abbildung der Vertikalkraftverteilung auf der linken Seite dargestellt. Die Standardabweichung mit Werten zwischen 1,95 kN und 2,68 kN bestätigt das gleichmäßige Verhalten aller Achsen. Das bedeutet, die Datensätze sind im Durchschnitt zwischen 1,95 kN und 2,68 kN vom Mittelwert entfernt.

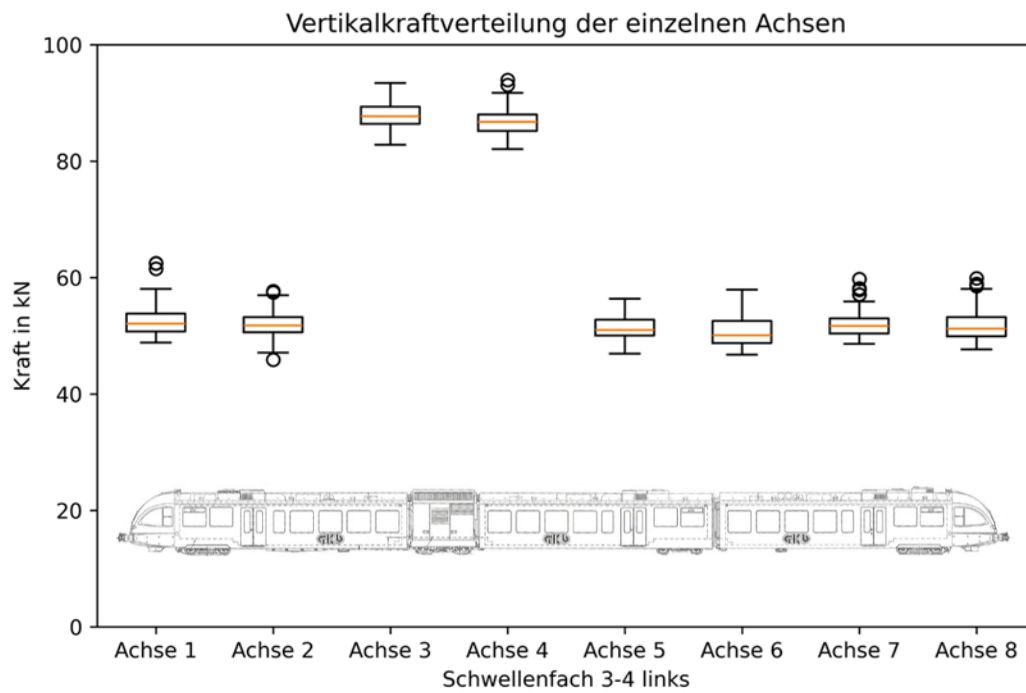


Abbildung 5-22: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - nach Pads Einbau

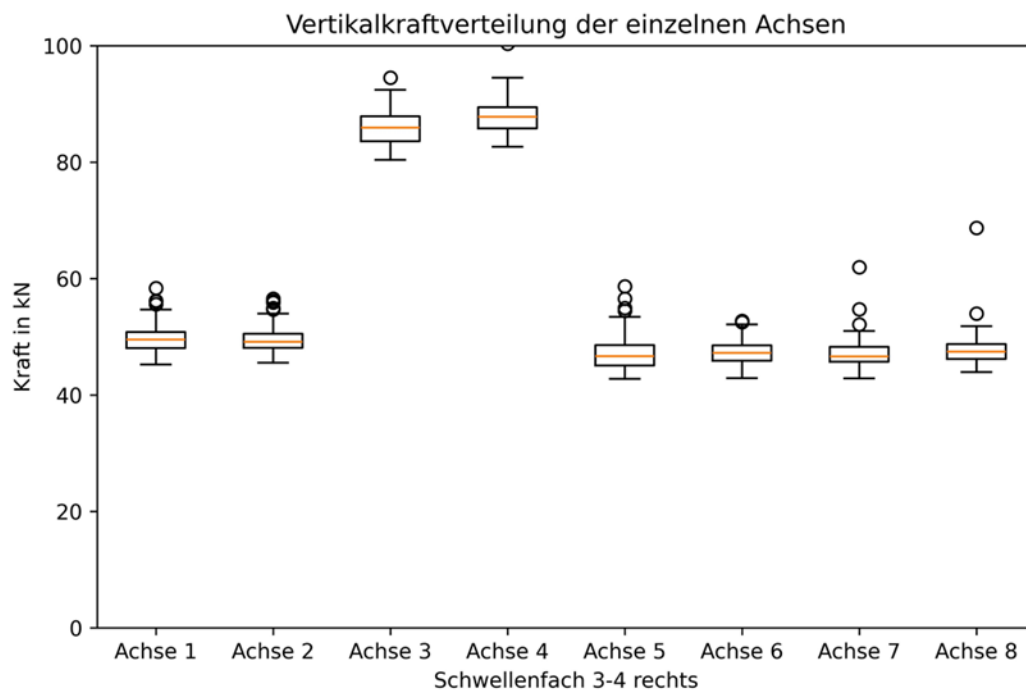


Abbildung 5-23: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 rechts - nach Pads Einbau

Tabelle 5-17: Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - nach Pads Einbau

Achse	1	2	3	4	5	6	7	8
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	52,63	51,93	87,78	86,83	51,35	50,72	51,94	51,83
Median	52,09	51,8	87,72	86,77	50,99	50,11	51,67	51,23
Kleinster Wert	48,82	45,9	82,82	82,06	46,94	46,76	48,61	47,67
Größter Wert	62,49	57,64	93,4	93,94	56,36	57,93	59,74	59,89
Standardabw.	2,5992	2,1204	2,2055	2,0749	1,9561	2,5357	2,129	2,6823

Die verschiedenen Einleitungspunkte der Vertikalkraft auf der linken und rechten Seite sind in den nachfolgenden Abbildungen in jeweils zwei Boxplots dargestellt. Es handelt sich bei den Werten in den Abbildungen um den Abstand e , der gemessen von der Schienenkopfmittle in Millimeter angegeben wird. Für beide Darstellungen ist zu erwähnen, dass sich die Werte der Einleitungspunkte nur im positiven Bereich bewegen. Das bedeutet, der Einleitungspunkt liegt auf beiden Seiten in Richtung Gleismitte.

In Abbildung 5-24 sind die Werte für alle Überfahrten und alle Achsen zusammengefasst dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass sich die Streuung auf der rechten und linken Seite sehr identisch verhält und die gleichen Minima und Maxima vorhanden sind.

Bei Abbildung 5-25 wird nur der Einleitungspunkt der ersten Achse in allen Überfahrten genauer betrachtet. Hier ist zu erkennen, dass der Median auf der rechten Seite um ca. 2 mm höher liegt als auf der linken Seite. Das bedeutet, die Werte aller Überfahrten sind auf der rechten Seite höher. Im Gegensatz dazu verhält sich die Länge des Boxplots und somit auch die Streuung links und rechts ähnlich.

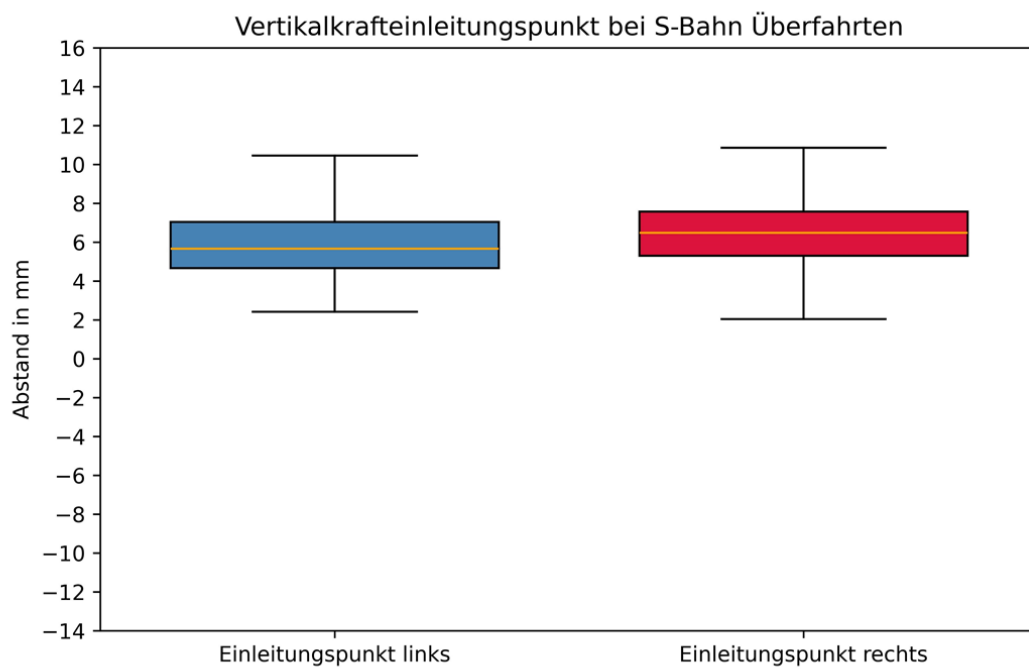


Abbildung 5-24: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für alle Achsen – nach Pads Einbau

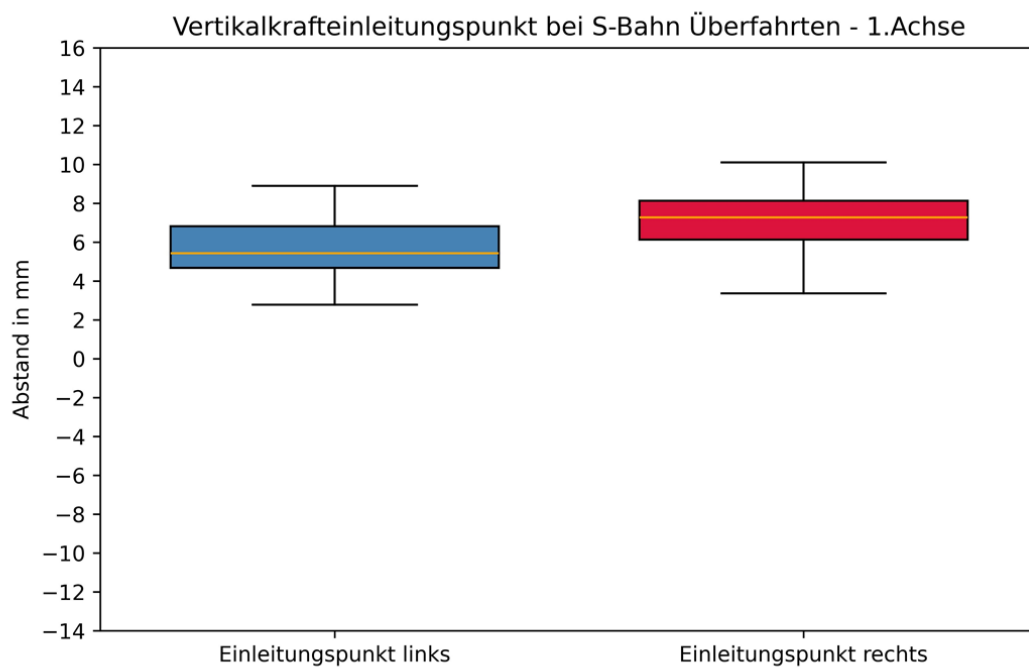


Abbildung 5-25: Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau

Im nächsten Schritt wird die Lateralkraft näher betrachtet. Die Abbildung 5-26 zeigt die Lateralkraft der linken und rechten Seite über alle Achsen. Die gesamten Werte bewegen sich im negativen Bereich, daher wirkt die Lateralkraft auf der linken und rechten Schiene Richtung Gleismitte und durch die Schienenneigung zusätzlich nach unten. Bei beiden Seiten liegt der Median bei knapp unter 8 mm und die Streuung beträgt ungefähr 9 mm. Anzumerken ist, dass die Verteilung der Quantile äußerst unterschiedlich ausgeprägt ist. Auf der linken Seite befinden sich 50 % zwischen den Werten 6 mm bis 8 mm und bei der rechten Seite liegen 50 % zwischen 4 mm bis 8 mm.

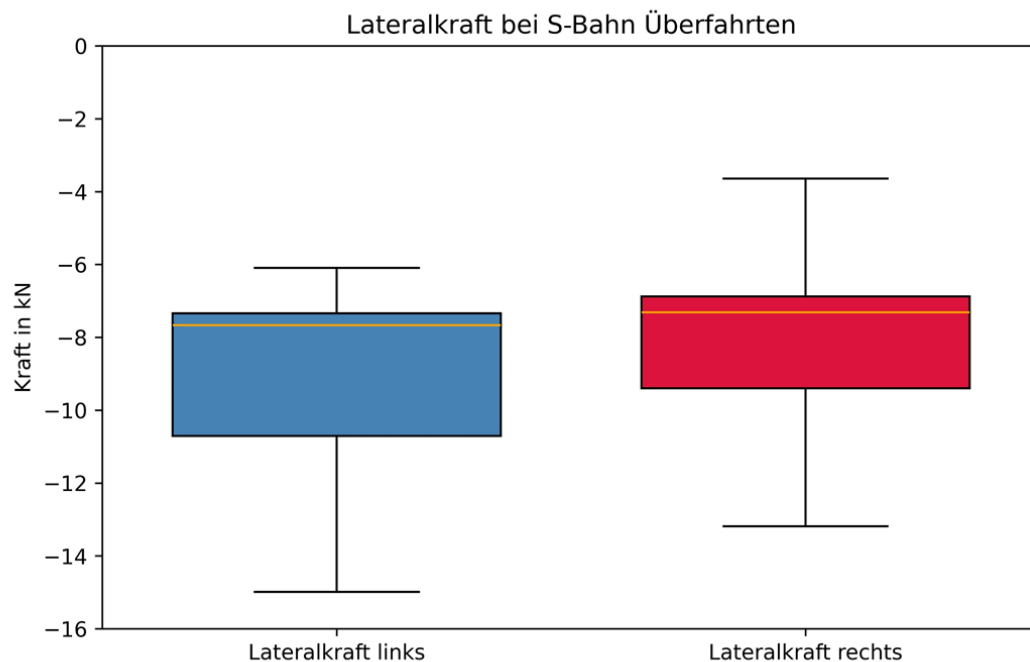


Abbildung 5-26: Lateralkraft bei S-Bahn Überfahrten – Schwellenfach 3-4 - nach Pads Einbau

Zusätzlich werden mithilfe eines Scatterplots (siehe Abbildung 5-27) und den statistische Auswertungsgrößen in Tabelle 5-18 die Ergebnisse der ersten Achse genauer analysiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Streuung und somit auch die Standardabweichung auf der rechten Seite höher ist als auf der linken Seite. Der Mittelwert hingegen ist auf der rechten Seite mit 7,17 kN geringer als auf der linken Seite mit 7,75 kN. Das bedeutet, die einwirkende Lateralkraft auf die rechte Schiene ist im Durchschnitt geringer, zeigt jedoch eine höhere Varianz der Werte.

Tabelle 5-18: Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

Lateralkraft in absolut Werten	links	rechts
	[kN]	[kN]
Mittelwert	7,75	7,17
Kleinsten Wert	6,42	1,08
Größter Wert	13,00	12,79
Spannweite der Streuung	6,58	11,72
Standardabweichung	0,6515	1,0520

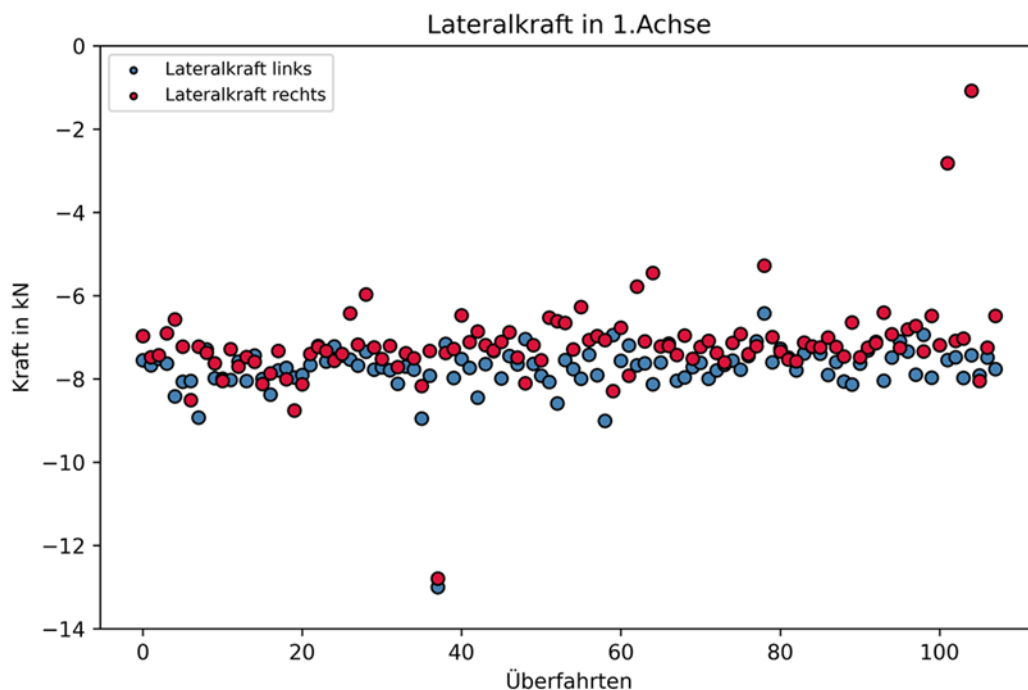


Abbildung 5-27: Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

Als letzter Punkt wird die Schienenspannung genauer betrachtet. Hierfür stellen die Punkte der Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 jeweils die Spannungen im Schienenfuß unten und am Schienenfuß seitlich bei jeder Überfahrt in der ersten Achse dar. Bei beiden Darstellungen ist die starke Unterscheidung zwischen linker und rechter Seite des Gleises auffällig. Laut Tabelle 5-19 ist am SFU eine Erhöhung von ca. 4,4 N/mm² und am SFS von ca. 5,5 N/mm² von der rechten gegenüber der linken Seite vorhanden. Die Streuung ist auf beiden Seiten sehr gering (Standardabweichung überall bei ca. 1,80 kN) und es kommt zu wenig Ausreißern.

Die deutliche grafische Trennung in den Abbildungen kommt aufgrund der geringen Varianz der Werte und der großen Unterschiede zwischen rechter und linker Schiene zustande.

Tabelle 5-19: Mittelwerte der Schienenspannung SFU und SFS in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau

Schienenspannung		links	rechts
		[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mittelwert	SFU	17,4501	21,8764
	SFS	11,3467	16,8456
Kleinsten Wert	SFU	15,5776	19,2378
	SFS	8,6381	12,5228
Größter Wert	SFU	34,3532	37,5554
	SFS	25,8298	30,5162
Spannweite der Streuung	SFU	1,7871	1,8469
	SFS	1,8204	1,8796

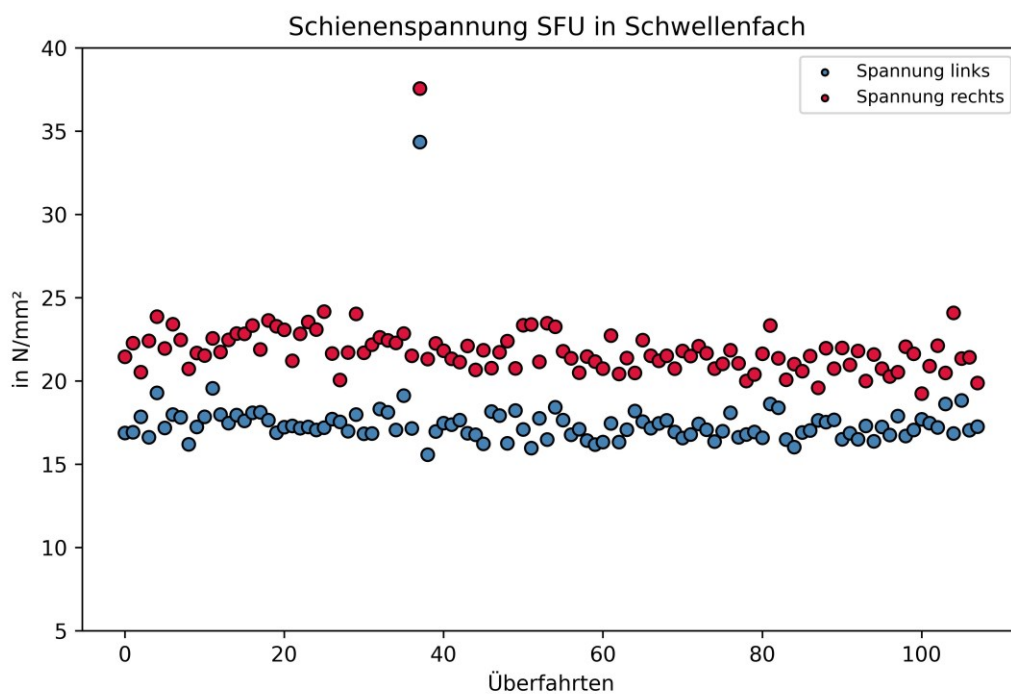


Abbildung 5-28: Schienenspannung Schienenfuß Unten in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau

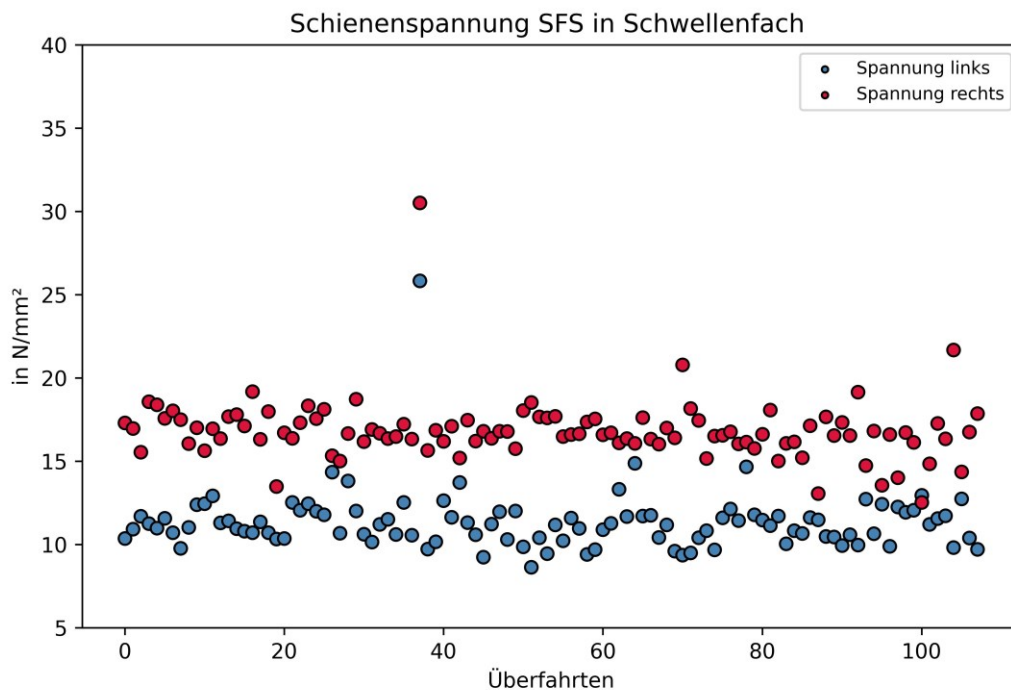


Abbildung 5-29: Schienenspannung Schienenfuß Seite in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau

Weitere Auswertungen zu den Überfahrten nach dem Pads Einbau befinden sich im nächsten Unterkapitel im Vergleich mit den Überfahrten vor dem Sensorpads Einbau.

5.3.3 Vergleich vor und nach Pads Einbau

In den vorherigen beiden Unterkapiteln wurden allgemeine Auswertungen vor und nach dem Sensorpads Einbau jeweils getrennt voneinander betrachtet, um Unterschiede zwischen der rechten und linken Seite im Gleis zu erkennen. Dieser Abschnitt zeigt hingegen den Vergleich von ausgewählten Abbildungen beider Phasen. Dabei soll festgestellt werden, in welchen Bereichen Unterschiede zu erkennen sind und welche Parameter durch das Sensorpads beeinflusst werden.

Zum besseren Verständnis sind die Darstellungen vor dem Pads Einbau und nach dem Pads Einbau direkt nacheinander abgebildet. Das bedeutet, es befinden sich in diesem Unterkapitel immer zwei schematisch gleich aufgebaute und zusammengehörige Abbildungen untereinander.

Zuerst wird die Vertikalkraft in der linken Schiene miteinander verglichen und genauer betrachtet. In Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31 handelt es sich um die von der Schiene in die Schwelle abgeleitete Vertikalkraft in jeder Achse. Eine genaue Definition dazu befindet sich in Kapitel 4.2.1. Die Grafiken zeigen die Streuung der Vertikalkraft aller Überfahrten. Bei der Zuordnung der Achsen wird die S-Bahn immer von der gleichen Seite betrachtet, unabhängig davon in welche Richtung sie gefahren ist. Deswegen ist zum besseren Verständnis eine schematische Darstellung einer S-Bahn mit der entsprechenden Zuordnung der Achsen in Abbildung 5-30 gezeigt. Es sind vor und

nach dem Pads Einbau kaum Veränderungen bemerkbar. Die Einwirkung der Vertikalkraft vom Gewicht des Fahrzeuges unterliegt nur leichten betrieblichen Schwankungen, unabhängig von Änderungen im Systemaufbau. Dies belegt auch die Tabelle 5-20, in der die Mittelwerte und Streuungen vor und nach dem Pads Aufbau dargelegt sind.

Tabelle 5-20: Vergleich von der abgeleiteten Vertikalkraft - Schwelle 4 links

Achse		1	2	3	4	5	6	7	8
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Mittelwert	VOR	25,23	25,3	45,23	44,33	24,73	24,04	25,35	24,5
	NACH	28,36	27,74	48,15	47,4	27,68	27,29	28,09	27,85
Median	VOR	24,83	24,49	45,2	44,25	24,67	23,73	25,17	24,53
	NACH	28,33	27,62	48,03	47,23	27,73	27,04	27,97	27,43
Kleinster Wert	VOR	22,32	22,08	41,53	40,97	21,5	21,39	20,97	20,45
	NACH	23,32	23,69	43,42	43,92	22,72	23,57	24,71	23,86
Größter Wert	VOR	29,96	33,66	49,93	50,32	28,08	28,69	29,69	29,22
	NACH	36,99	31,34	53,12	53,7	32,02	32,76	36,23	34,3
Spannweite	VOR	7,64	11,58	8,40	9,35	6,58	7,30	8,72	8,77
	NACH	13,67	7,65	9,70	9,78	9,30	9,19	11,52	10,44
Standardabw.	VOR	1,6014	2,305	1,9575	1,9527	1,5041	1,5177	1,6415	1,6568
	NACH	2,2160	1,4845	1,9896	1,7225	1,7621	1,8788	2,2163	2,216

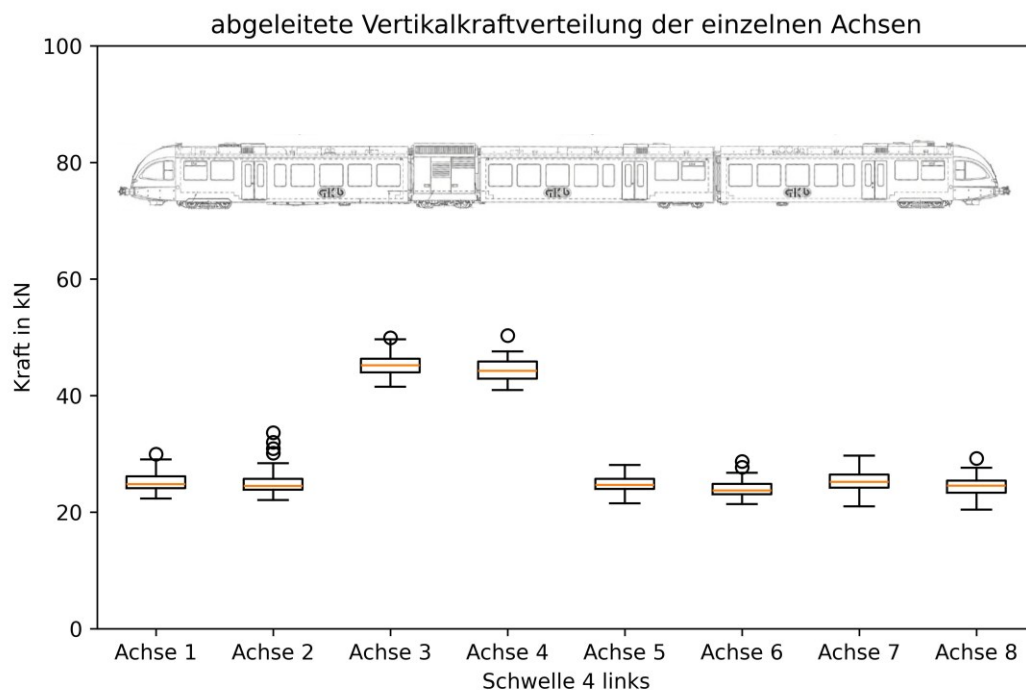


Abbildung 5-30: abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen - Schwelle 4 links - vor Pads Einbau

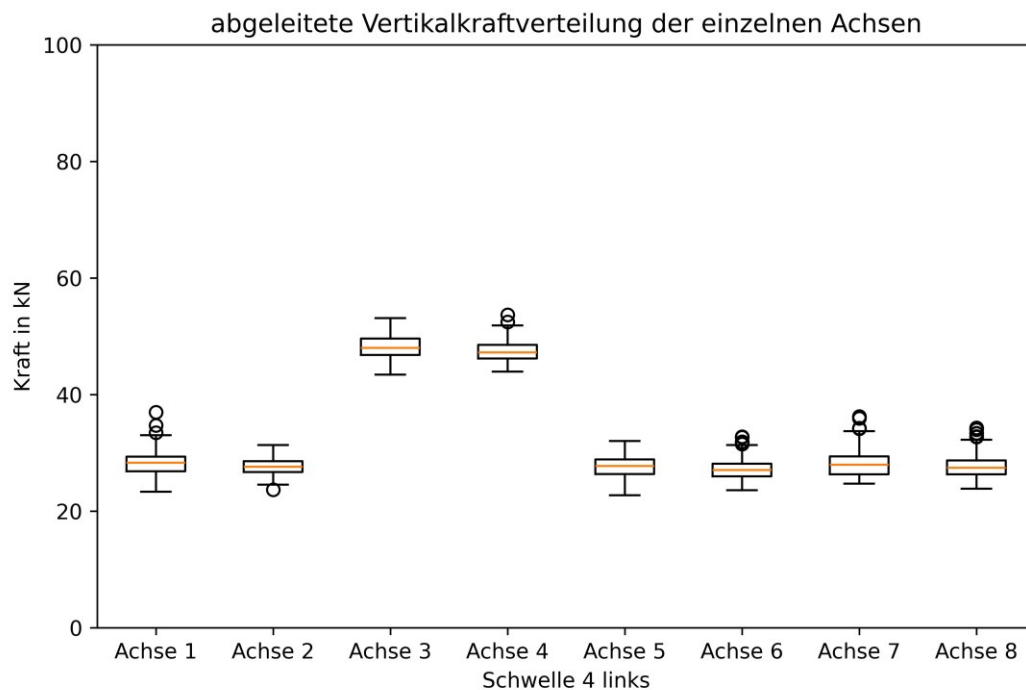


Abbildung 5-31: abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen - Schwelle 4 links - nach Pads Einbau

Auch die Lateralkraft wird in beiden Auswertungsphasen untersucht und nachfolgend in Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33 verglichen. Mithilfe eines Scatterplots wird die Lateralkraft jeder Überfahrt, die im Durchschnitt von einer Achse des Fahrzeuges auf die linke und rechte Seite wirkt, dargestellt. Zusätzlich sind in Tabelle 5-21 die Werte der beiden Abbildungen zur besseren Vergleichbarkeit statistisch zusammengefasst. Die größte Auffälligkeit stellt in diesem Fall die signifikant unterschiedlich große Streuung zwischen vor und nach dem Pads Einbau dar. Es ist zu beachten, dass die Werte der Spannweiten in der Tabelle aufgrund von extremen Ausreißern nach dem Pads Einbau beeinflusst werden. Der Großteil der Datenpunkte vor dem Pads Einbau liegt zwischen 6 kN und 10 kN. Nach dem Pads Einbau befindet sich der Großteil der Werte zwischen 7 kN und 8 kN, obwohl eine höhere Anzahl an Überfahrten vorhanden ist. Dieser Unterschied der Streuung ist an den Werten der rechten Schiene besonders deutlich zu erkennen. Die Standardabweichung hat sich nach dem Pads Einbau um mehr als 0,9 kN reduziert.

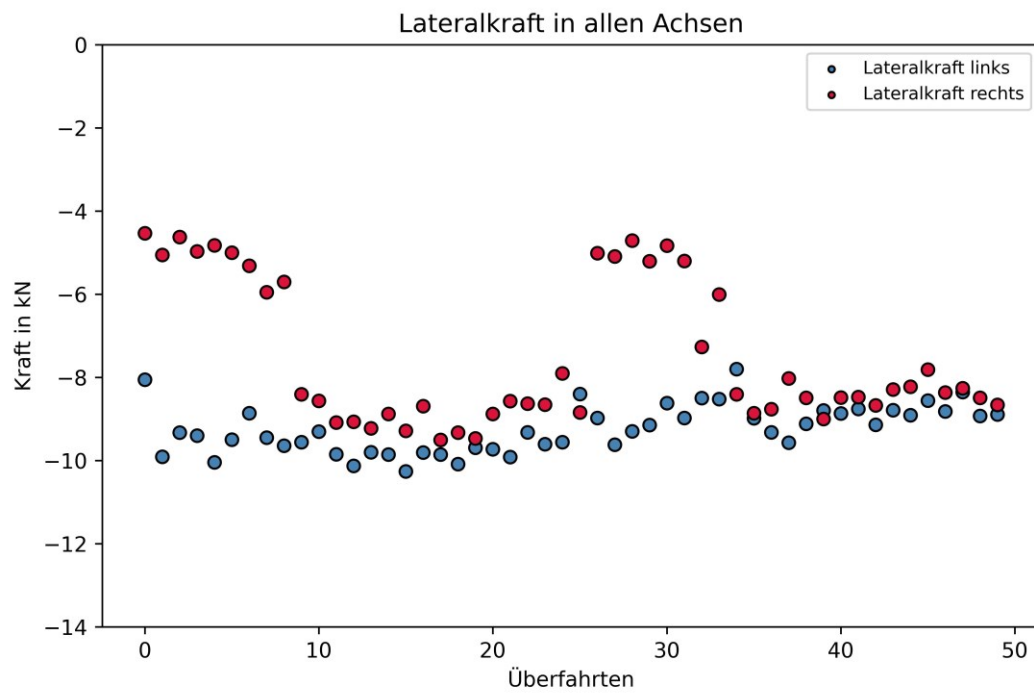


Abbildung 5-32: Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau

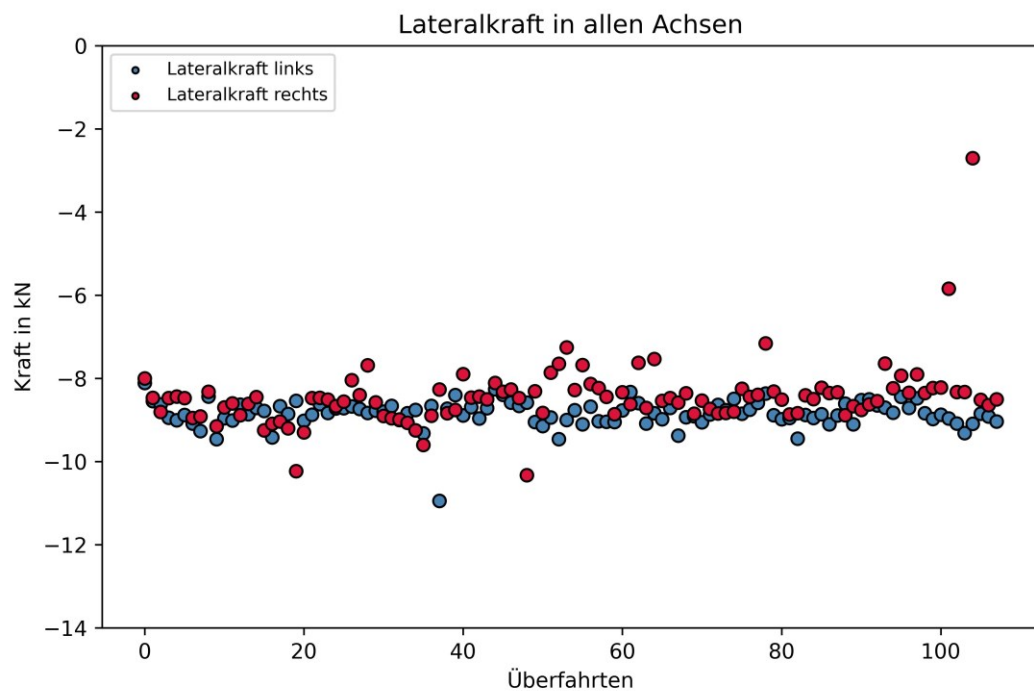


Abbildung 5-33: Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

Tabelle 5-21: Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

Lateralkraft in absolut Werten		links	rechts
		[kN]	[kN]
Mittelwert	VOR	9,24	7,51
	NACH	8,85	8,44
Kleinsten Wert	VOR	7,80	4,53
	NACH	8,11	2,71
Größter Wert	VOR	10,26	9,50
	NACH	10,94	10,32
Spannweite der Streuung	VOR	2,46	4,97
	NACH	2,84	7,62
Standardabweichung	VOR	0,5617	1,6982
	NACH	0,3273	0,7784

Im nächsten Schritt wird die Schienenspannung SFU in beiden Auswertungsphasen untersucht und nachfolgend in Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35 verglichen. Mithilfe eines Scatterplots wird die von einer Achse ausgehende durchschnittliche Spannung bei jeder Überfahrt des Fahrzeuges auf der linken und rechten Seite dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Tabelle 5-22 die Werte der beiden Abbildungen statistisch zusammengefasst. Nach dem Pads Einbau lässt sich aufgrund der geringen Varianz (Standardabweichung liegt bei ca. 0,8 N/mm² bis 1,0 N/mm²) der Werte und der großen Unterschiede zwischen rechter und linker Schiene (Mittelwert weist einen Unterschied von 5 N/mm² auf) eine deutliche grafische Trennung erkennen. Bei den Werten vor dem Pads Einbau liegt der Mittelwert nur 1 N/mm² voneinander entfernt und die Streuung unterscheidet sich zwischen linker und rechter Seite merklich.

Tabelle 5-22: Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

Schienenspannung SFU		links	rechts
		[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mittelwert	VOR	28,5955	29,6457
	NACH	20,2208	25,1849
Kleinsten Wert	VOR	25,9443	27,8363
	NACH	18,5422	23,5677
Größter Wert	VOR	32,0191	31,7804
	NACH	24,8286	28,8440
Spannweite der Streuung	VOR	6,0749	3,9441
	NACH	6,2864	5,2762
Standardabweichung	VOR	1,5451	0,7505
	NACH	0,8242	0,9948

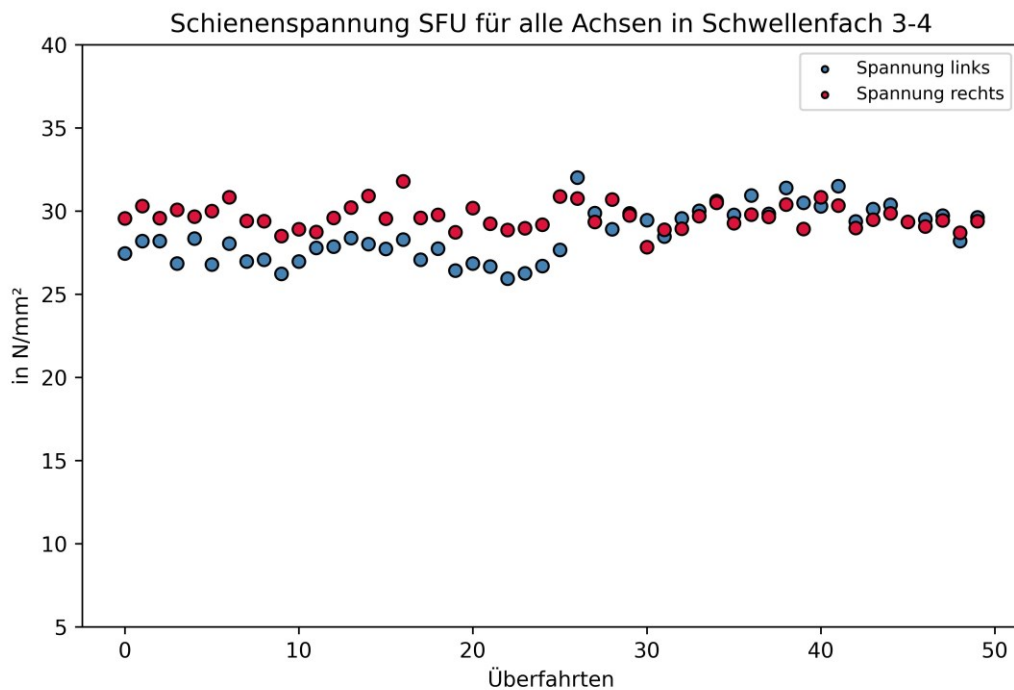


Abbildung 5-34: Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau

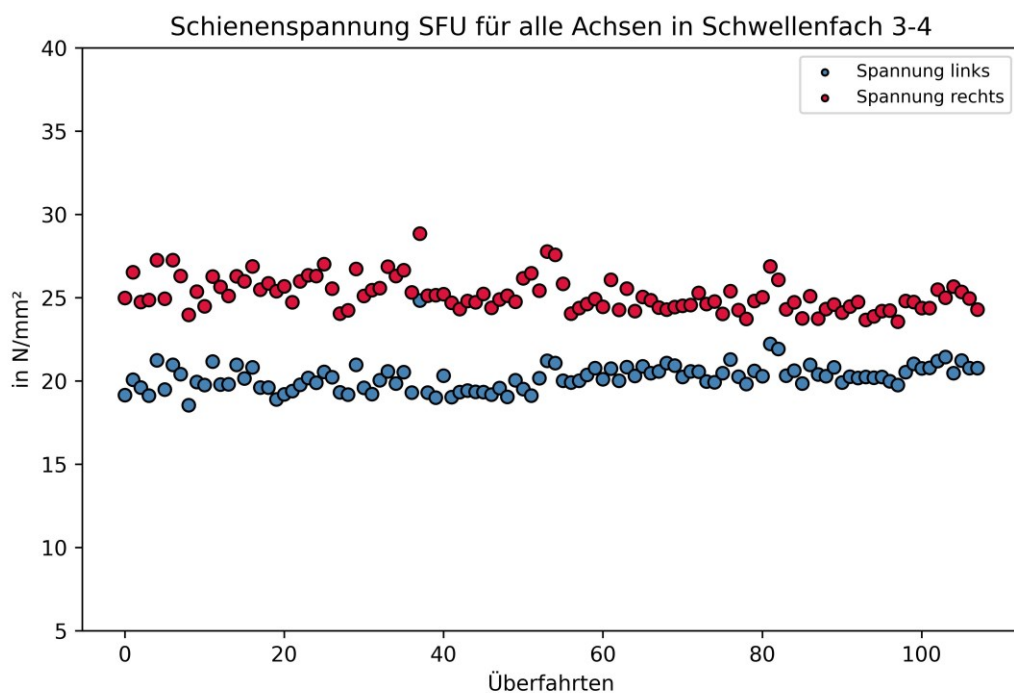


Abbildung 5-35: Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau

In der nachfolgenden Abbildung 5-36 und der Abbildung 5-37 sind Schwelleneinsenkungen an verschiedenen Positionen der unterschiedlichen Schwellen in Millimeter dargestellt. Dabei stellt ein Boxplot immer die Streuung der Maxima einer jeden einzelnen Überfahrt dar. Die Mittelwerte, Mediane, kleinsten und größten Werte, sowie die Standardabweichungen aus den beiden nachstehenden Abbildungen sind zum besseren Vergleich in Tabelle 5-23 dargelegt. Es ist zu beachten, dass die kleinsten und größten Werte in der Tabelle aufgrund von extremen Ausreißern beeinflusst werden und diese deshalb in den Boxplots nicht miteingezogen werden.

Betrachtet werden grundsätzlich die Einsenkungen von Schwelle 2 bis 4 auf der rechten und linken Seite. Aufgrund eines defekten Sensors konnten keine Werte für die Schwelle 3 rechts generiert werden. Da sich alle Ergebnisse im positiven Bereich befinden, gibt es an allen untersuchten Stellen eine Einsenkung nach unten. Genaue Erläuterungen, worauf die Einsenkung Bezug nimmt, befinden sich in Kapitel 4.2.3.

Bei Abbildung 5-36 ist zu erwähnen, dass sich das Verhalten der Schwelle 4 auf der linken Seite stark zu dem der restlichen Messpunkte unterscheidet. Der Wert ist ungefähr 1 mm höher. Absolut betrachtet entspricht dies einem geringen Wert, relativ im Vergleich zu den anderen Werten und zu den Streuungen der einzelnen Boxplots betrachtet, ist dieser Unterschied nicht zu vernachlässigen. Auch die Streuung mit über 0,4 mm und die Standardabweichung mit 0,1 mm sind bei der Schwelle 4 links größer als in den restlichen Messpunkten.

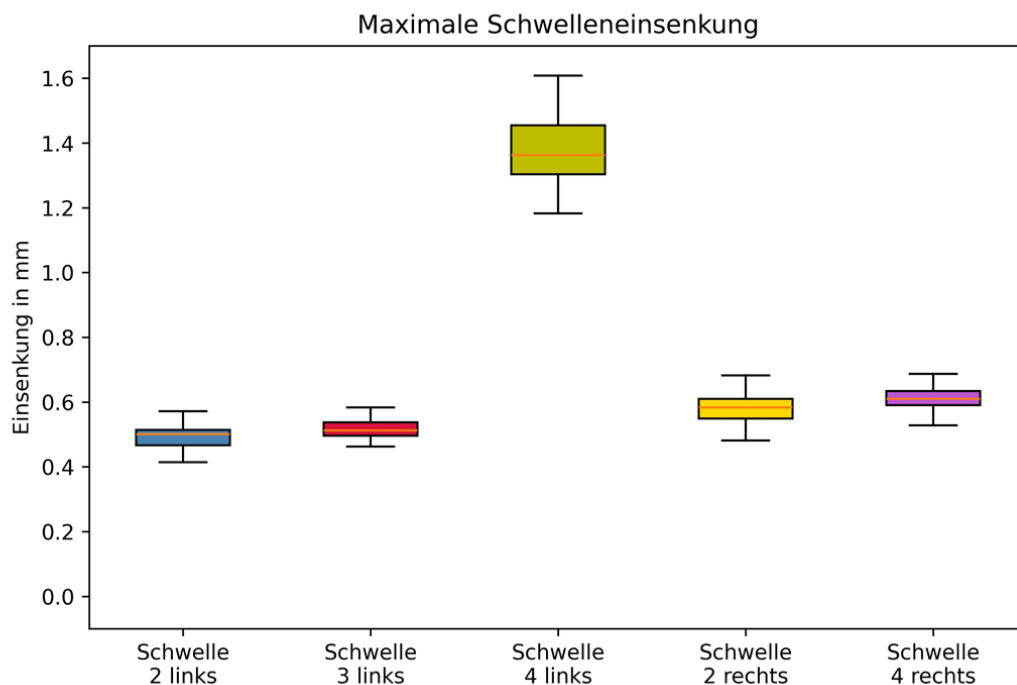


Abbildung 5-36: Maximale Schwelleneinsenkung - vor Pads Einbau

In Abbildung 5-37 zeigt sich erneut, dass die Werte von Schwelle 4 links höher als die restlichen Einsenkungen sind, wenn auch die Differenz geringer ist. Die Streuung nach dem Pads Einbau ist an allen gemessenen Punkten relativ ähnlich. Im Schnitt liegt die Streuung bei ungefähr 0,2 mm. Generell sind die Abweichungen vor und nach dem Pads Einbau auf der rechten Seite gering. Auch die linke Seite zeigt, außer Schwelle 4, keine signifikanten Unterschiede durch den Pads Einbau.

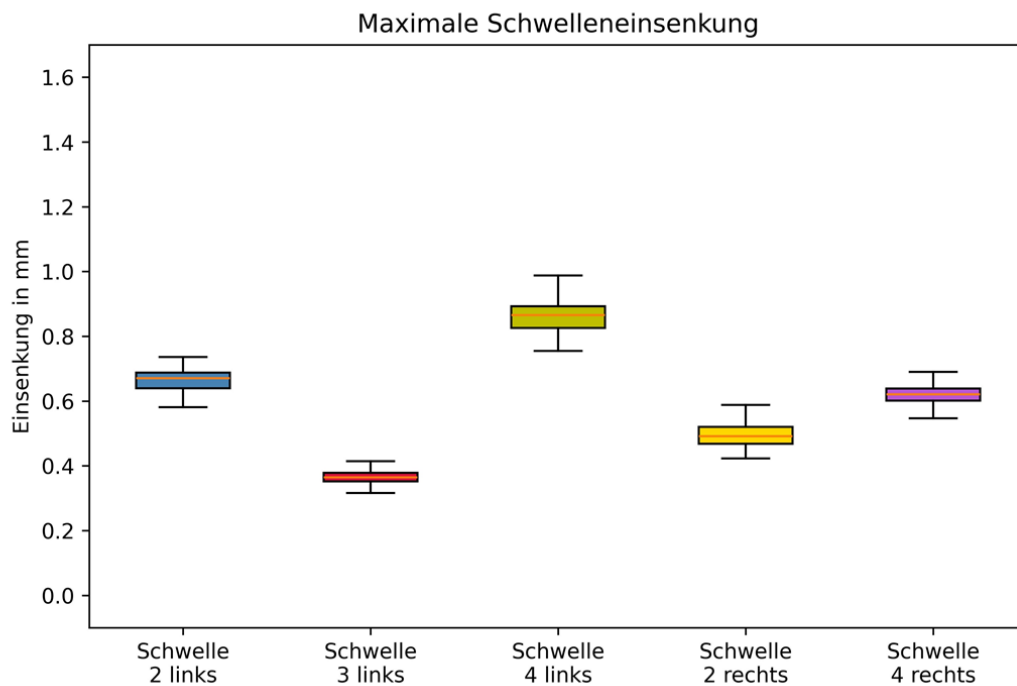


Abbildung 5-37: Maximale Schwelleneinsenkung - nach Pads Einbau

Tabelle 5-23: Vergleich der maximalen Schwelleneinsenkung

Schwelleneinsenkung		Schwelle 2	Schwelle 3	Schwelle 4	Schwelle 2	Schwelle 4
		links			rechts	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Mittelwert	VOR	0,49	0,52	1,38	0,58	0,61
	NACH	0,64	0,37	0,86	0,49	0,62
Median	VOR	0,5	0,51	1,36	0,58	0,61
	NACH	0,67	0,36	0,87	0,49	0,62
Kleinster Wert	VOR	0,38	0,46	1,18	0,48	0,53
	NACH	0,01	0,32	0,72	0,36	0,55
Größter Wert	VOR	0,57	0,58	1,61	0,68	0,69
	NACH	0,76	0,42	0,99	0,59	0,73
Standardabweichung	VOR	0,0372	0,0309	0,0996	0,0436	0,0329
	NACH	0,1199	0,0244	0,0515	0,0396	0,0300

Aus der zuvor gezeigten Schwelleneinsenkung kann die Schwellenverkipfung in Millimeter ermittelt werden. Dabei handelt es sich um die Differenz zwischen der rechten Einsenkung und der linken Einsenkung einer Schwelle, bezogen auf die Spurweite. Aufgrund des defekten Sensors bei Schwelle 3 konnte die Verkipfung in Abbildung 5-38 und Abbildung 5-39 nur für Schwelle 2 und Schwelle 4 dargestellt werden.

In der ersten Abbildung ist aufgrund der starken Einsenkung an Schwelle 4 links eine deutliche Verkipfung auf die linke Seite zu erkennen. Schwelle 2 weist eine geringe Verkipfung auf die rechte Seite auf. In der Abbildung mit den Verkipfungen nach dem Pads Einbau kann bei beiden Schwellen eine Verkipfung auf die linke Seite festgestellt werden. Das bedeutet die Verkipfung ist direkt abhängig von der Einsenkung der Schwellenaußenkanten.

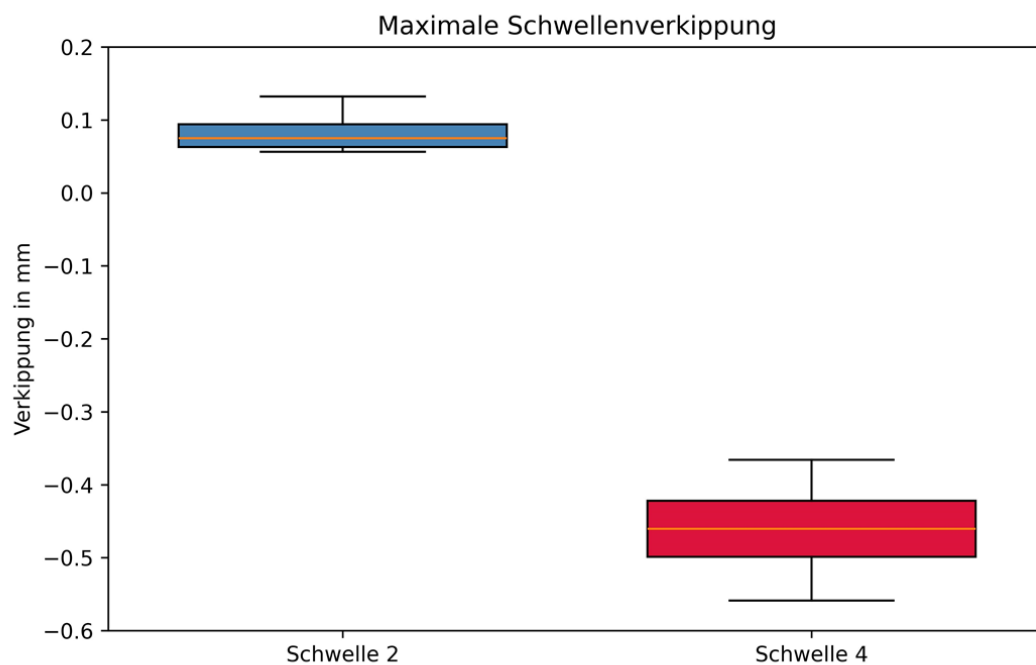


Abbildung 5-38: Maximale Schwellenverkipfung - vor Pads Einbau

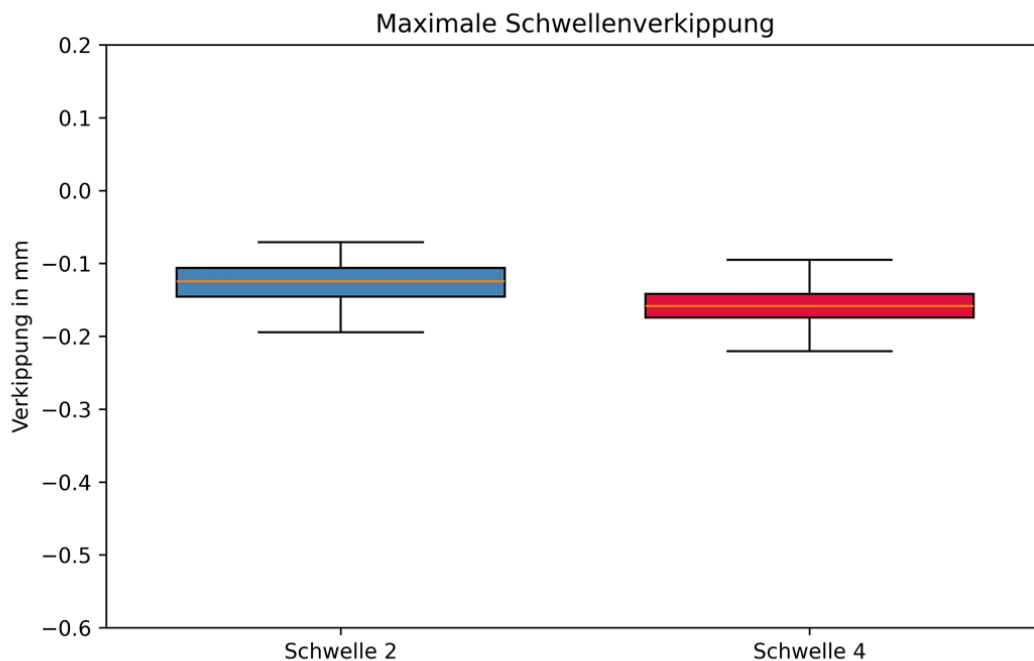


Abbildung 5-39: Maximale Schwellenverkipfung - nach Pads Einbau

Als nächster Punkt wird die Schieneneinsenkung genauer betrachtet. Dafür sind in Abbildung 5-40 und Abbildung 5-41 die Schieneneinsenkungen an verschiedenen Positionen im Gleis in Millimeter dargestellt. Es wird einerseits die Schiene über der Schwelle 3 und 4 und andererseits die Schiene im Schwellenfach 3-4, jeweils auf beiden Seiten, betrachtet. Außerdem handelt es sich bei den Werten von Schwelle 3 und im Schwellenfach 3-4 um die Einsenkung an der Schieneninnenseite und bei Schwelle 4 um die Einsenkung der Schienenaußenseite.

Es ist in der Darstellung vor dem Pads Einbau deutlich zu erkennen, dass das Verhalten der Schiene an der Position über der Schwelle 4 links anders ist, als an den restlichen Messstellen. Die Spannweite der Streuung befindet sich an diesem Punkt bei ca. 0,07 mm und in den anderen Punkten bei einem Wert von durchschnittlich 0,15 mm. Das heißt, die Streuung sowie die Einsenkung sind in Schwelle 4 links geringer.

Dafür können in der Abbildung nach dem Pads Einbau keine derartigen Unterschiede an den einzelnen Positionen festgestellt werden. Stattdessen zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen rechter und linker Seite. Die Mediane der linken Seite liegen bei ca. 0,30 mm, die Mediane der rechten Seite bei ca. 0,23 mm. Grundsätzlich sind alle Spannweiten der Streuung höher als zuvor und weisen im Durchschnitt Werte von ca. 0,20 mm auf.

Um die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen, befinden sich Werte, wie der Mittelwert, der Median, der kleinste und größte Wert sowie die Standardabweichung aus den beiden nachstehenden Abbildungen in Tabelle 5-24. Es ist zu beachten, dass die kleinsten und größten Werte in der Tabelle aufgrund von extremen Ausreißern beeinflusst werden und diese in den Boxplots nicht dargestellt sind.

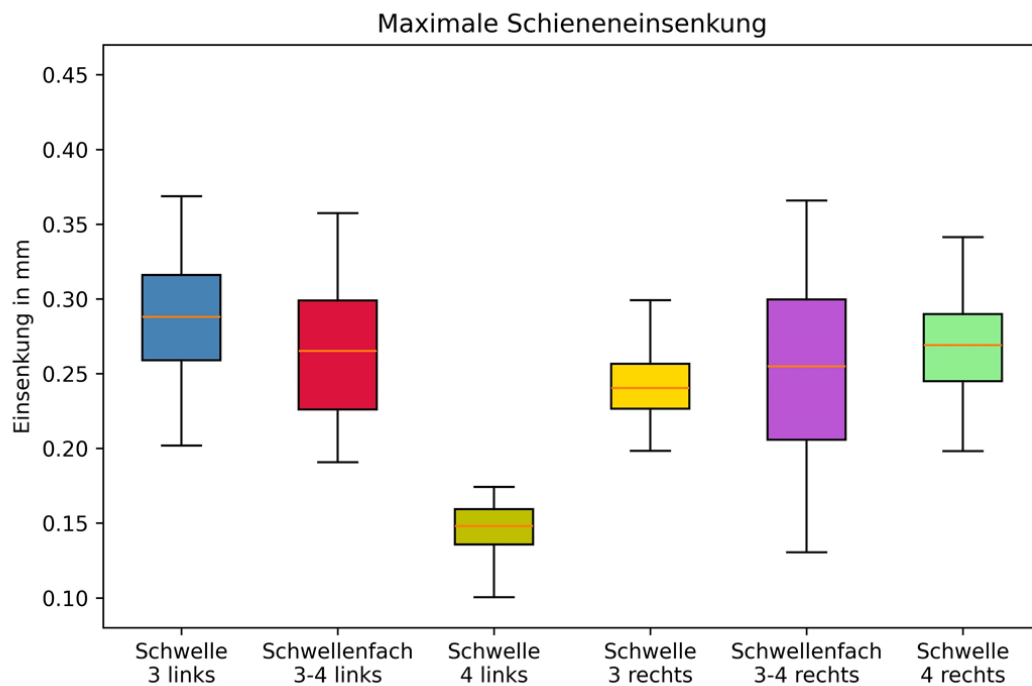


Abbildung 5-40: Maximale Schieneneinsenkung - vor Pads Einbau

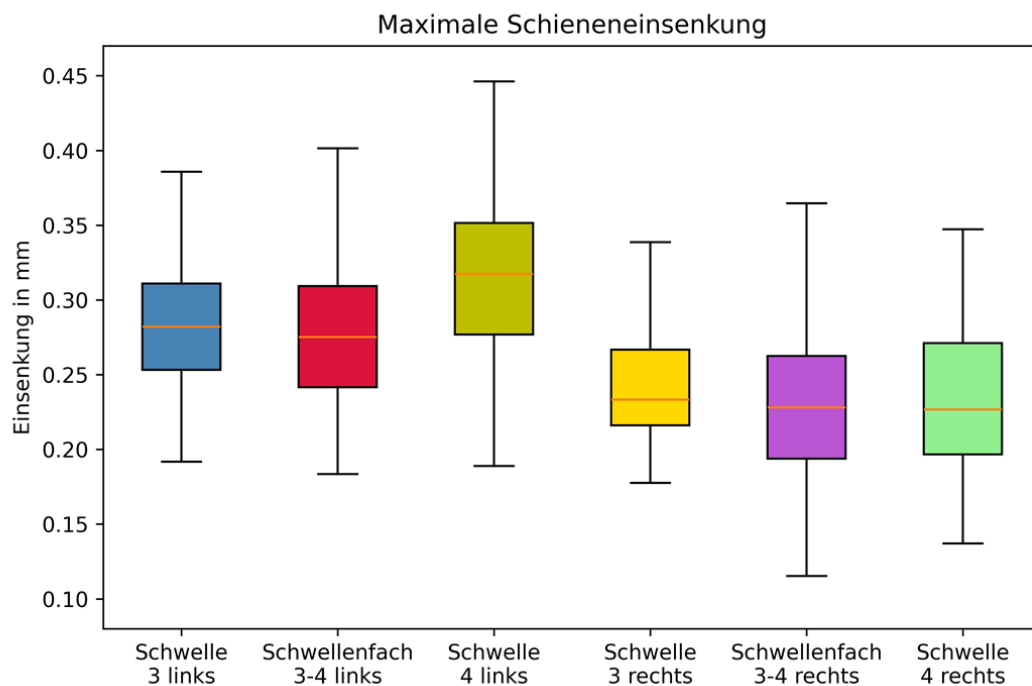


Abbildung 5-41: Maximale Schieneneinsenkung - nach Pads Einbau

Tabelle 5-24: Vergleich der maximalen Schieneneinsenkung

Schieneneinsenkung		Schwelle 3	Schwellenl. 3-4	Schwelle 4	Schwelle 3	Schwellenl. 3-4	Schwelle 4
		links			rechts		
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Mittelwert	VOR	0,55	0,26	0,19	0,49	0,46	0,31
	NACH	0,29	0,28	0,31	0,24	0,23	0,28
Median	VOR	0,29	0,27	0,15	0,24	0,25	0,27
	NACH	0,28	0,28	0,32	0,23	0,23	0,23
Kleinster Wert	VOR	0	0,19	0,08	0,2	0	0,2
	NACH	0,19	0,18	0,16	0,18	0,12	0,14
Größter Wert	VOR	13,5	0,36	1,21	12,83	10,67	1,25
	NACH	0,81	0,46	0,45	0,45	0,42	1,41
Standardabw.	VOR	1,8516	0,0448	0,2002	1,7625	1,4599	0,1935
	NACH	0,0672	0,0501	0,0582	0,0456	0,0503	0,1924

6 Erkenntnisse und Ausblick

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Auswertung eine große Anzahl an verschiedenen Ergebnissen von Vertikalkraft, Lateralkraft, Schwellen/Schieneneneinsenkung und Schwellen/Schienenverkippung umfasst. Insgesamt liefern die Auswertungen wichtige Informationen über die Kräfte, die auf den Oberbau wirken und wie sich unterschiedliche Zwischenlagen auf die Bewegungen und das Verhalten des Gleises auswirken.

Mit den Prüffahrten konnte der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und den auf das Schienensystem wirkenden Kräften untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vertikalkraft sowie die Einsenkungen und die Verkippungen nicht direkt von der Geschwindigkeit abhängig sind. Es ist aufgrund der geringen Menge von nur einer Überfahrt pro Geschwindigkeit nicht möglich, detaillierte Schlüsse ziehen zu können. Eine Vielzahl an Überfahrten mit jeder Geschwindigkeit wäre nötig, um Fehler einer Einzelmessung auszugleichen und valide Aussagen treffen zu können.

Im Gegensatz dazu war bei den S-Bahnen die Anzahl der Überfahrten hoch genug, um statistisch signifikante Ergebnisse zu erzielen. Dies ermöglichte auch einen deutlichen Vergleich von der Auswertung vor und nach dem Sensorpads Einbau. Die Ergebnisse der lokbespannten Zugüberfahrten verhalten sich grundsätzlich ähnlich zu jenen der S-Bahn, sind aber aufgrund der geringen Anzahl der Überfahrten für eine validierte Aussage nur bedingt geeignet.

Durch die Auswertung der S-Bahn Überfahrten konnte festgestellt werden, dass unter keinem der Betrachtungspunkte die Vertikalkräfte eine besondere Auffälligkeit aufweisen. Die Lateralkräfte hingegen verhalten sich bei der linken und rechten Schiene jeweils unterschiedlich. Zusätzlich zeigten diese vor dem Einbau der Sensorpads eine höhere Streuung der Werte, welche nach dem Einbau deutlich geringer wurde. Dies deutet auf eine erhöhte Steifigkeit der Sensorpads hin, die die Kraftübertragung zwischen Schiene und Schwelle beeinflusst und somit zu einer optimierten Lastverteilung führt.

Der Einleitungspunkt der Vertikalkraft verhält sich analog zu der Lateralkraft. Vor der Veränderung der Zwischenlage ist eine hohe Streuung zu erkennen. Dies ist auf die unterschiedliche Radgeometrie der unterschiedlichen S-Bahnen und auf die Tatsache, dass die Zugüberfahrten aus zwei verschiedenen Richtungen gemessen wurden, zurückzuführen. Nach dem Einbau konnte jedoch eine erhebliche Reduktion im Streubereich des Einleitungspunktes festgestellt werden. Ausschlaggebend dafür dürfte vermutlich die erhöhte Steifigkeit der Sensorpads sein, die zu einer gleichmäßigeren Lastübertragung beitragen.

Bei der Betrachtung der Einsenkungen in den Schwellen muss hauptsächlich auf die Auffälligkeit der Schwelle 4 auf der linken Seite hingewiesen werden. An dieser Stelle ist vor dem Pads Einbau eine mehr als doppelt so große Bewegung festzustellen, als an anderen Positionen im Gleissystem. Dies könnte auf einen Hohlraum im Schotterbett hinweisen. Nach dem Austausch der Zwischenlagen zeigte Schwelle 4 eine Angleichung der Einsenkungswerte an die übrigen Schwellen, was auf eine Verbesserung der Untergrundbedingungen und eine effektivere Lastverteilung hinweist.

Die Schieneneinsenkung zeigte ähnliche Tendenzen. Die größeren Einsenkungen der Schwelle führten zu relativen Verringerungen der Schieneneinsenkungen an denselben Stellen. Außerdem sind deutliche Unterschiede der Einsenkungen der Schiene durch den Einbau der Zwischenlage auf der rechten und linken Seite zu erkennen.

Die Messungen der Schienenspannungen verdeutlichen, dass trotz der variierenden Lasten durch unterschiedliche Fahrzeugtypen und Geschwindigkeiten die Spannungen im Schienenfuß ein ähnliches Verhalten aufweisen. Diese Ergebnisse sind entscheidend für die Bewertung der langfristigen Ermüdung des Materials und dem Aufbau des Gleisbetts. Die Spannungsverteilung vor und nach dem Einbau der Sensorpads weist darauf hin, dass durch die erhöhte Steifigkeit der Sensorpads eine gleichmäßigere Kraftverteilung erreicht wird, wodurch potenziell die Reduktion der Materialermüdung herbeigeführt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Einbau von steiferen Zwischenlagen zu einer signifikanten Veränderung der Interaktion zwischen Schienenfahrzeug und Oberbau führt. Zusätzlich können in allen untersuchten Bereichen auf der linken Seite erhöhte Werte im Gegensatz zu der rechten Schiene festgestellt werden. Alle beschriebenen und analysierten Werte liefern Auskunft über das Verhalten und die Bewegung im geraden Gleis und sollen helfen eine Simulation zur Weiterentwicklung von Gleiskomponenten realistischer durchführen zu können. Um noch genauere Ergebnisse zu bekommen, sollte bei zukünftigen Messungen die Anzahl der Überfahrten erhöht werden. Dadurch wird eine detailliertere Analyse der Auswirkungen von Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp auf den Oberbau ermöglicht. Zusätzlich wäre es sinnvoll, Messungen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen durchzuführen, um deren Einfluss auf das Gleis zu analysieren.

7 Zusammenfassung

Ziel der zugrundeliegenden Arbeit war es, ein tieferes Verständnis der Interaktionen zwischen Schienenfahrzeug und Gleis in der Geraden zu entwickeln und die Auswirkungen der auftretenden Kräfte auf den Oberbau der Infrastruktur der Eisenbahn genauer zu beleuchten.

Der erste Teil der Arbeit stellt mit einer detaillierten Darstellung den theoretischen Hintergrund der Kräfte im Gleis dar. Besonders wird dabei auf die Kontaktfläche und Kraftübertragung im Rad-Schiene Kontakt eingegangen. Außerdem wird für die Analyse der einwirkenden Kräfte auf den Oberbau der Querschnittsaufbau genauer betrachtet.

Diese theoretischen Grundlagen dienen als Basis für die Datenerhebung in der Geraden auf einem Streckenabschnitt der Graz-Köflacher Bahn. Mit speziell entwickelten Messmethoden und -techniken, darunter Dehnmessstreifen und Lasersensoren, konnten präzise Daten über das Verhalten des Oberbaus durch Lasteinwirkungen der unterschiedlichen Fahrzeugtypen bestimmt werden. Außerdem wird erläutert wie die Messergebnisse validiert und in weiterer Folge bereinigt und bearbeitet werden.

Die Ergebnisse der Analyse der Daten in Kapitel 6 zeigt die Auswirkungen der Kraftübertragung des Bahnverkehrs auf den Oberbau und bestätigt den theoretischen Hintergrund mit realen Messwerten. Dabei fanden die Lateralkraft, sowie der Einleitungspunkt der Vertikalkraft und die Einsenkungen von Schwelle sowie Schiene besondere Betrachtung, da es durch den Einbau von steiferen Zwischenlagen zu signifikanten Veränderungen der Messergebnisse gekommen ist. Durch diese Zwischenlagen ist es zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung gekommen, welche zu einer Reduktion der Materialermüdung beitragen kann.

Die gewonnenen Daten und statistischen Auswertungen liefern eine solide Basis für die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen, die zukünftig zur Prognose von Schäden und zur Optimierung und Weiterentwicklung von Gleiskomponenten eingesetzt werden können. Dies ermöglicht eine Verbesserung der Schieneninfrastruktur und führt in weiterer Folge zu einer erhöhten Sicherheit und Effizienz im Schienenverkehr.

Literaturverzeichnis

- [1] Reinhard Menius and Volker Matthews, *Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen*, 10th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- [2] Fabian Hansmann and Wolfgang Nemetz, *Der Gleislage auf der Spur: GRUNDLAGEN – FEHLERERMITTLUNG – KORREKTUR – QUALITÄT*, 1st ed. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2019.
- [3] Johannes Martin Mack, "Untersuchungen zum Schichtübergang Unterbau-Schotter unter Berücksichtigung verschiedener Oberbaukonfigurationen," Dissertation, Technische Universität München, München, 2021.
- [4] Günter Girnau and Friedrich Krüger, *FAHRWEGE DER BAHNEN im Nah- und Regionalverkehr in Deutschland*. Düsseldorf: Alba Fachverlag GmbH + Co. KG, 2007.
- [5] Bernhard Lichtberger, *Das große Handbuch der Gleisinstandhaltung*. Hamburg: tredition Verlag, 2022.
- [6] Wolfgang Fengler, "Skriptum Bahnkörper der Eisenbahn, Oberbau der Gleise - LV Verkehrsbau," Dresden.
- [7] Peter Veit, "Skriptum Eisenbahnwesen GL1 - LV 211.301," Graz.
- [8] *EN 13674-1: Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien. 01.08.2017.
- [9] Vossloh Fastening Systems GmbH, *Hochelastische Schienenbefestigung System W 14*. [Online]. Available: https://media.vossloh.com/media/01_product_finder/vfs/pf_system_w_14/Vossloh_System_W_14_DE.pdf (accessed: 09.04.2024).
- [10] Kirchdorfer Fertigteillholding GmbH, *Produktdatenblatt Betonschwelle L2*. [Online]. Available: <https://www.concrete-solutions.eu/pog4/l2/> (accessed: 09.04.2024).
- [11] Petra Weidinger, "Rauhigkeit im Rad-Schiene System," Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2008.
- [12] Oldrich Polach, "Kontakt zwischen Rad und Schiene - das Kernelement der Dynamik der Schienenfahrzeuge," Winterthur. 09.12.1999.
- [13] Bernhard Lichtberger, *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003.
- [14] Wolfgang Fengler, "Skriptum Konstruktion der Gleise - LV Verkehrsbau," Dresden.
- [15] Klaus Knothe and Sebastian Stichel, *Schienenfahrzeugdynamik*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2003.
- [16] Andreas Haigmoser, "Skriptum Schienenfahrzeuge - LV 310.214," Graz. 07/2002.
- [17] Dieter Jussel, "Skriptum Spurführung - LV 211.404," Graz. 02.03.2023.
- [18] Wolfgang Fengler, "Skriptum Spurführung - LV Verkehrsbau," Dresden.
- [19] Roman Schmid, "Systemtechnologie Rad-Schiene: Ein Überblick zum Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis," 09.03.2021.
- [20] Jennifer Heck, "Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen," Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- [21] Gleislauftechnik Müller, *Kontaktmechanik: Rad-Schiene*. [Online]. Available: <http://www.gleislauftechnik-mueller.ch/PDF/Kontaktmechanik.pdf> (accessed: 05.04.2024).
- [22] Stefan Keil, *Dehnungsmessstreifen*, 2nd ed. Lippstadt: Springer Vieweg, 2016.

- [23] Ferdinand Pospischil, "Messung, Monitoring und Design im System Eisenbahn - LV 212.541," Graz. WS 22/23.
- [24] HBM, *Wie funktioniert ein elektrischer Dehnungsmessstreifen?* [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/7328/wie-funktioniert-ein-elektrischer-dehnungsmessstreifen/> (accessed: 02.04.2024).
- [25] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, *Betriebsanleitung optoNCDT 1420*. [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/manuals/man--optoNCDT-1420--de.pdf> (accessed: 02.04.2024).
- [26] Messotron GmbH & Co KG, *LVDT und LVIT Wegaufnehmer*. [Online]. Available: <https://www.messotron.de/blog/funktionsweise-langwegaufnehmer#:~:text=Wegaufnehmer%20nach%20dem%20Differentialdrossel%2DPrinzip,in%20Reihe%20miteinander%20verschaltetet%20sind.> (accessed: 09.04.2024).
- [27] L. Bi, P. Zhao, M. Teng, L. Zhao, X. Liu, and M. Xing, *Wayside testing methods for high-frequency vertical wheel-rail impact forces and its applicability*.
- [28] M. F. Rabbi, D. K. Johnson, D. Mishra, and R. Bruzek, *Effect of Track Configuration and Loading Conditions on Vertical Wheel Load Measurements using the Differential Shear Approach* (accessed: 10.04.2024).
- [29] Fritz Fastenrath, *Die Eisenbahnschiene: Theoretische und praktische HInweise zur Beanspruchung, Werkstoffbeschaffenheit, Profilwahl, Verschweißung und Behandlung in Gleis und Werkstatt*. Berlin - München - Düsseldorf: Wilhelm Ernst & Sohn, 1977.
- [30] Esveld Coenraad, *Modern railway track*, 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001.
- [31] Steirische Eisenbahnfreunde, GKB, and A. Konecnik, *GKB Dieseltriebwagen: Triebwagen GTW - VT 5063* (accessed: 31.03.2024).
- [32] Steirische Eisenbahnfreunde, GKB, and A. Konecnik, *GKB Diesellokomotiven: Diesellok DH 1700* (accessed: 31.03.2024).
- [33] Vossloh Schienenfahrzeugtechnik GmbH, "Dieselhydraulische Lokomotive Typ G 1700-2 BB für Graz-Köflacher Eisenbahn GmbH," 02.01.2003.
- [34] Stadler, "Prüfprotokoll: Radlasten GTW 2/8 (AB-EBV Art. 46)," 27.09.2010.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Systemquerschnitt des Gleisaufbaus [3]	2
Abbildung 2-2:	Gemessene Schienenprofile bei der Messstelle	5
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung der Schienenbefestigung [9]	5
Abbildung 2-4:	Statische Kräfte im Rad-Schiene System [12]	7
Abbildung 2-5:	Horizontale Führungskräfte in Abhängigkeit des Bogenradius [13]	8
Abbildung 2-6:	Kraftverteilung von Rad bis in Untergrund [13]	11
Abbildung 2-7:	Elemente der Schiene und des Radsatzes [16]	12
Abbildung 2-8:	Bewegung des Radsatzes in der Geraden [19]	13
Abbildung 2-9:	Zwangs- und Reibkräfte im Kontaktpunkt [16]	14
Abbildung 2-10:	Zwangskräfte im Kontaktpunkt [16]	15
Abbildung 2-11:	Hertz'sche Fläche [7]	17
Abbildung 2-12:	Berührungspunkte [16]	17
Abbildung 2-13:	Einpunktberührung zwischen Rad und Schiene [7]	18
Abbildung 2-14:	Zweipunktberührung zwischen Rad und Schiene [7]	18
Abbildung 3-1:	Gewählter Messabschnitt mit Blickrichtung Lieboch	19
Abbildung 3-2:	Schematischer Messaufbau – Schwellenübersicht	20
Abbildung 3-3:	Messaufbau mit Blickrichtung Lieboch	21
Abbildung 3-4:	Schematischer Messaufbau der (Scher-) DMS bei Schwelle 3 und 4	21
Abbildung 3-5:	Messaufbau der (Scher-) DMS	22
Abbildung 3-6:	Schematische Darstellung DMS [23]	24
Abbildung 3-7:	Schrittweises Anbringen eines DMS [23]	24
Abbildung 3-8:	Lasersensor	25
Abbildung 3-9:	Schematische Darstellung Lasersensor [25]	26
Abbildung 3-10:	Induktiver Wegsensor [23]	26
Abbildung 3-11:	Ausrichtung der DMS und Dehnungszustand im Schienensteg	28
Abbildung 3-12:	Theoretische Spannungsverteilung für die Überlagerung einer Vertikal- und Lateralkraft [30]	29
Abbildung 3-13:	Technische Daten von Diesellok DH 1700.1 [32]	30
Abbildung 3-14:	Technische Daten von Triebwagen GTW - VT 5063 [31]	31
Abbildung 3-15:	Statische Messung	32
Abbildung 3-16:	Beispielaufbau eines Fallgewichts mit Beschleunigungssensor	33
Abbildung 3-17:	Vertikalkraft von Beschleunigungssensor und DMS	34
Abbildung 3-18:	Hochpunkt der Vertikalkraft von Beschleunigungssensor und DMS	34
Abbildung 4-1:	Beispiel an Auswertungen der Überfahrt am 04.11.2023 um 14:41:37	37
Abbildung 4-2:	Vertikalkraft in Schwellenfach	38

Abbildung 4-3:	Vertikalkraft im Bereich der Schwelle.....	38
Abbildung 4-4:	Vorzeichenkonvention des Einleitungspunktes der Vertikalkraft.....	39
Abbildung 4-5:	Vorzeichenkonvention der Lateralkraft.....	39
Abbildung 4-6:	Vorzeichenkonvention von Schwellen- und Schieneneinsenkung.....	40
Abbildung 4-7:	Vorzeichenkonvention von Schwellenverkipfung	40
Abbildung 4-8:	Vorzeichenkonvention von Schienenverkipfung.....	40
Abbildung 5-1:	Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 links.....	42
Abbildung 5-2:	Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 rechts	43
Abbildung 5-3:	Maximale Vertikalkraft in 1.Achse bei Prüffahrten.....	44
Abbildung 5-4:	Maximale Schwelleneinsenkung links bei Prüffahrten.....	45
Abbildung 5-5:	Maximale Schwellenverkipfung bei Prüffahrten	46
Abbildung 5-6:	Maximale Schieneneinsenkung bei Prüffahrten	47
Abbildung 5-7:	Maximale Schienenverkipfung bei Prüffahrten	48
Abbildung 5-8:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwellenfach 3-4.....	50
Abbildung 5-9:	abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwelle 4.....	51
Abbildung 5-10:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4.....	52
Abbildung 5-11:	Lateralkraft in einzelnen Achsen der Lok – Schwellenfach 3-4.....	53
Abbildung 5-12:	Maximale Schwelleneinsenkung bei Lok.....	54
Abbildung 5-13:	Maximale Schieneneinsenkung bei Lok	55
Abbildung 5-14:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - vor Pads Einbau	57
Abbildung 5-15:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 rechts - vor Pads Einbau.....	58
Abbildung 5-16:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für alle Achsen – vor Pads Einbau	59
Abbildung 5-17:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau.....	59
Abbildung 5-18:	Lateralkraft bei S-Bahn Überfahrten – Schwellenfach 3-4 - vor Pads Einbau.....	60
Abbildung 5-19:	Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau.....	61
Abbildung 5-20:	Schienenspannung Schienenfuß Unten in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau	62
Abbildung 5-21:	Schienenspannung Schienenfuß Seite in Schwellenfach 3- 4 für 1. Achse – vor Pads Einbau.....	63
Abbildung 5-22:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - nach Pads Einbau.....	64

Abbildung 5-23:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 rechts - nach Pads Einbau	64
Abbildung 5-24:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für alle Achsen – nach Pads Einbau	66
Abbildung 5-25:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau	66
Abbildung 5-26:	Lateralkraft bei S-Bahn Überfahrten – Schwellenfach 3-4 - nach Pads Einbau	67
Abbildung 5-27:	Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	68
Abbildung 5-28:	Schienenspannung Schienenfuß Unten in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau	69
Abbildung 5-29:	Schienenspannung Schienenfuß Seite in Schwellenfach 3- 4 für 1. Achse – nach Pads Einbau	70
Abbildung 5-30:	abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen - Schwelle 4 links - vor Pads Einbau	71
Abbildung 5-31:	abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen - Schwelle 4 links - nach Pads Einbau	72
Abbildung 5-32:	Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau	73
Abbildung 5-33:	Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	73
Abbildung 5-34:	Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau	75
Abbildung 5-35:	Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	75
Abbildung 5-36:	Maximale Schwelleneinsenkung - vor Pads Einbau	76
Abbildung 5-37:	Maximale Schwelleneinsenkung - nach Pads Einbau	77
Abbildung 5-38:	Maximale Schwellenverkipfung - vor Pads Einbau	78
Abbildung 5-39:	Maximale Schwellenverkipfung - nach Pads Einbau	79
Abbildung 5-40:	Maximale Schieneneinsenkung - vor Pads Einbau	80
Abbildung 5-41:	Maximale Schieneneinsenkung - nach Pads Einbau	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Geometrische Parameter des Standardprofils 60E1 [2] nach [8]	4
Tabelle 2-2:	Abmessung der Betonschwelle L2 [10]	6
Tabelle 3-1:	Berechnung der Abweichung der Messmethoden	35
Tabelle 5-1:	Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 links	42
Tabelle 5-2:	Vertikalkraft bei Prüffahrten in Schwellenfach 3-4 rechts	43
Tabelle 5-3:	Maximale Vertikalkraft in 1.Achse bei Prüffahrten	44
Tabelle 5-4:	Maximale Schwelleneinsenkung bei Prüffahrten	45
Tabelle 5-5:	Maximale Schwellenverkipfung bei Prüffahrten	46
Tabelle 5-6:	Maximale Schieneneinsenkung bei Prüffahrten	47
Tabelle 5-7:	Maximale Schienenverkipfung bei Prüffahrten	48
Tabelle 5-8:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwellenfach 3-4	50
Tabelle 5-9:	abgeleitete Vertikalkraft in einzelnen Achsen der Lok - Schwelle 4	51
Tabelle 5-10:	Einleitungspunkt der Vertikalkraft bei Schwellenfach 3-4	52
Tabelle 5-11:	Absolutwerte der Lateralkraft in einzelnen Achsen der Lok – Schwellenfach 3-4	53
Tabelle 5-12:	Maximale Schwelleneinsenkung bei Lok	54
Tabelle 5-13:	Maximale Schieneneinsenkung bei Lok	55
Tabelle 5-14:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - vor Pads Einbau	57
Tabelle 5-15:	Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – vor Pads Einbau	61
Tabelle 5-16:	Mittelwerte der Schienenspannung SFU und SFS in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – vor Pads Einbau	62
Tabelle 5-17:	Vertikalkraft in einzelnen Achsen – Schwellenfach 3-4 links - nach Pads Einbau	65
Tabelle 5-18:	Lateralkraft in 1.Achse - Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	68
Tabelle 5-19:	Mittelwerte der Schienenspannung SFU und SFS in Schwellenfach 3-4 für 1. Achse – nach Pads Einbau	69
Tabelle 5-20:	Vergleich von der abgeleiteten Vertikalkraft - Schwelle 4 links	71
Tabelle 5-21:	Durchschnittliche Lateralkraft über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	74
Tabelle 5-22:	Durchschnittliche Schienenspannung Schienenfuß Unten über alle Achsen in Schwellenfach 3-4 – nach Pads Einbau	74
Tabelle 5-23:	Vergleich der maximalen Schwelleneinsenkung	77
Tabelle 5-24:	Vergleich der maximalen Schieneneinsenkung	81

Formelverzeichnis

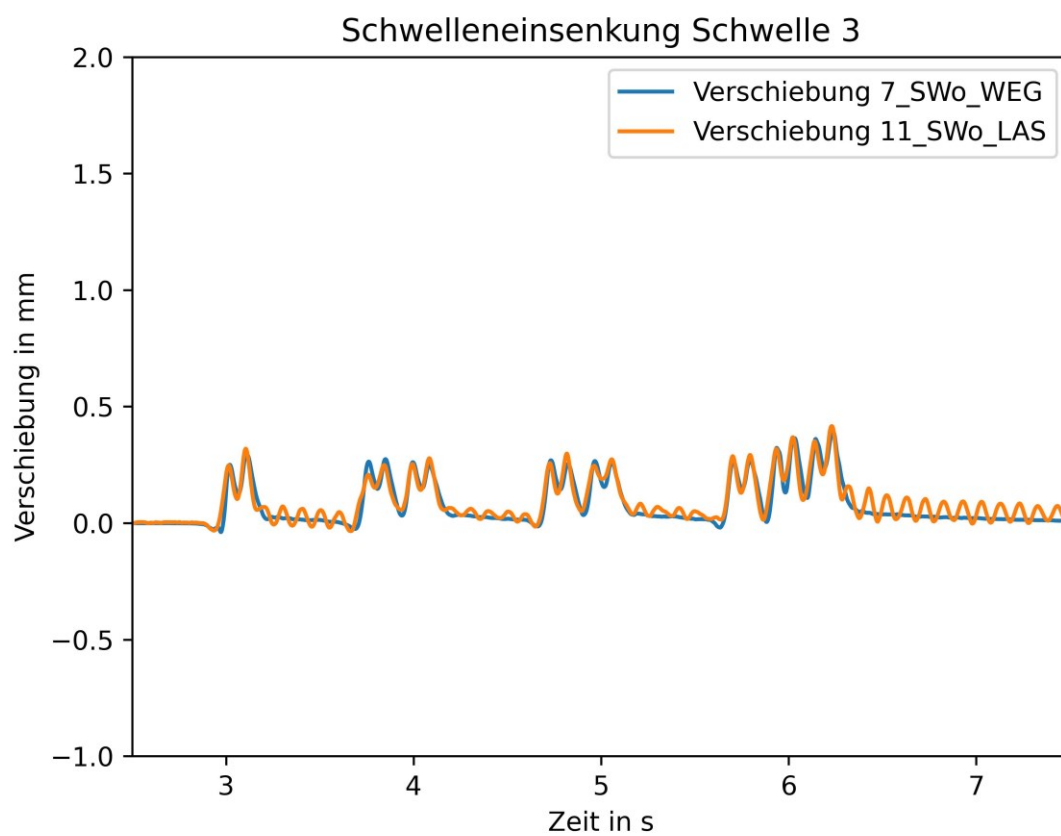
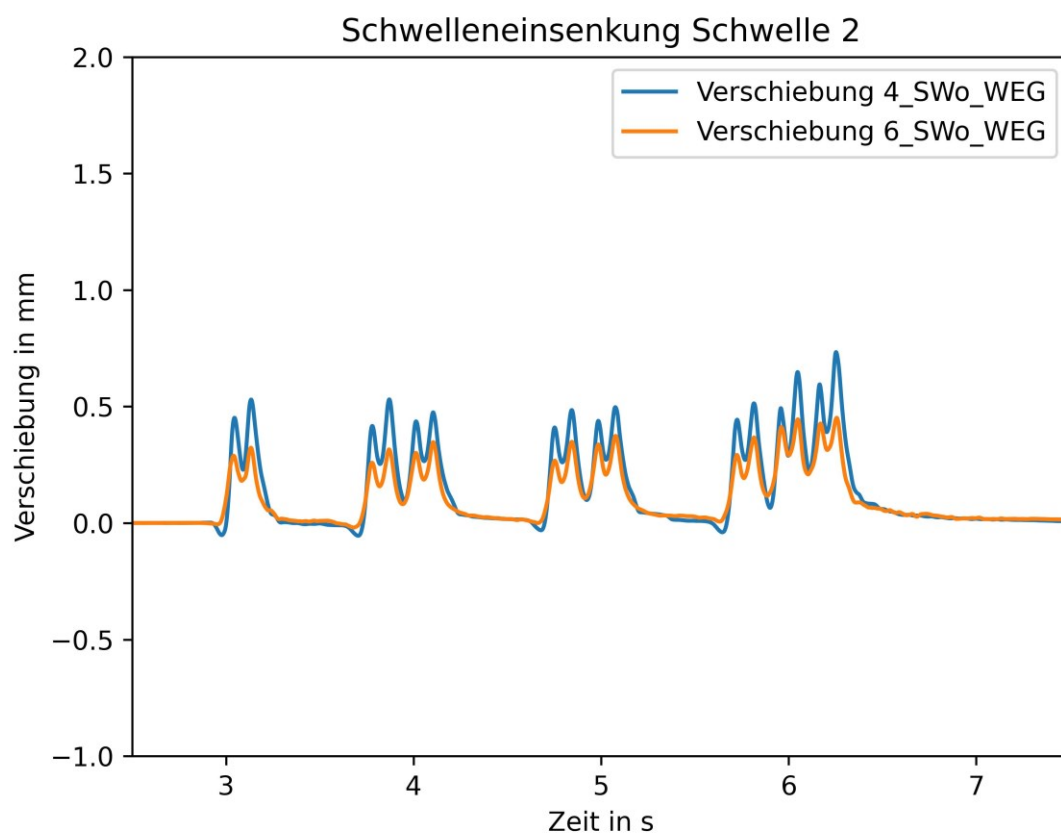
Gleichung 2-1:	Längenänderung [2]	9
Gleichung 2-2:	Normalkraft [16]	15
Gleichung 2-3:	Profilseitenkraft [16]	15
Gleichung 3-1:	Dehnung des DMS [24]	23
Gleichung 3-2:	Maximale Scherspannung [28]	28
Gleichung 3-3:	Vertikale Scherkraft [28]	28
Gleichung 3-4:	Vertikalkraft [28]	28
Gleichung 3-5:	Vereinfachung der Vertikalkraft	28

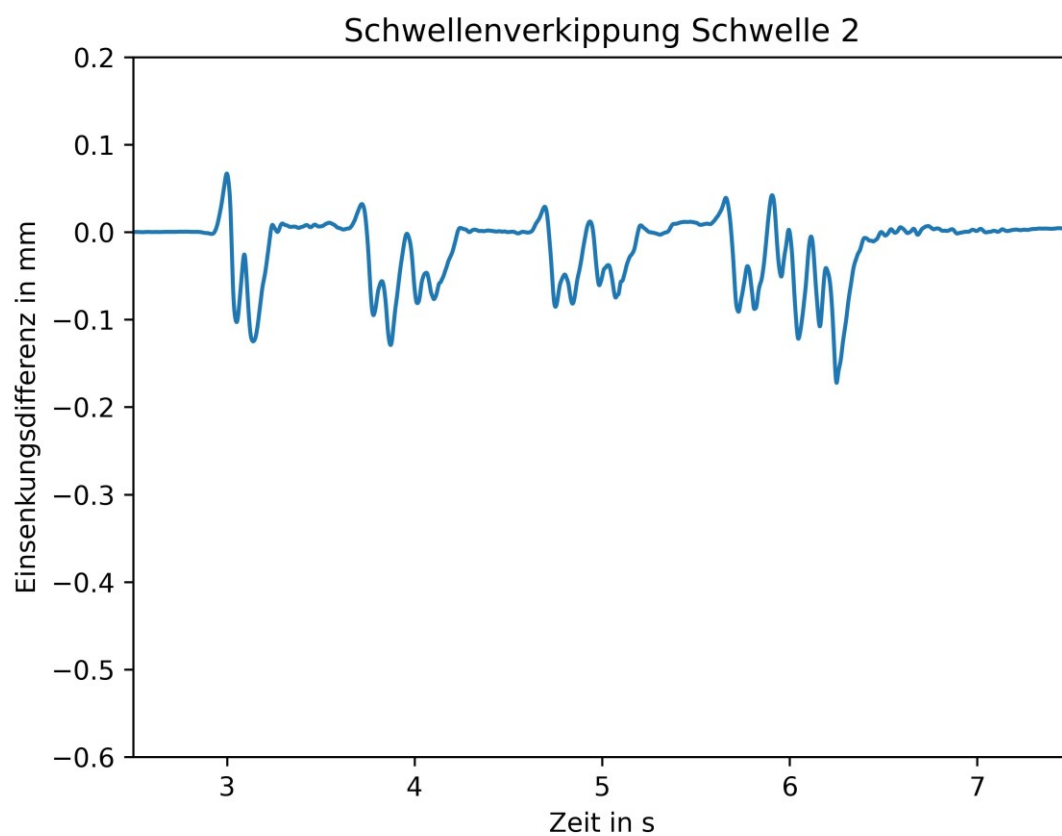
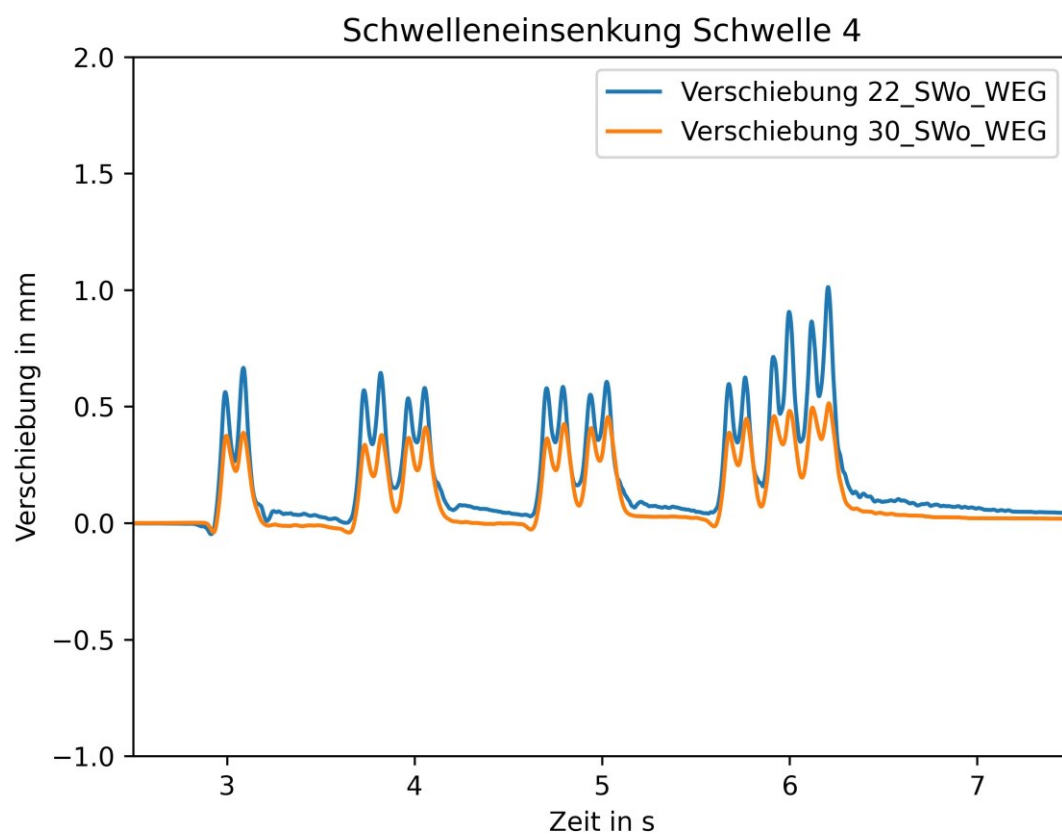
Anhang

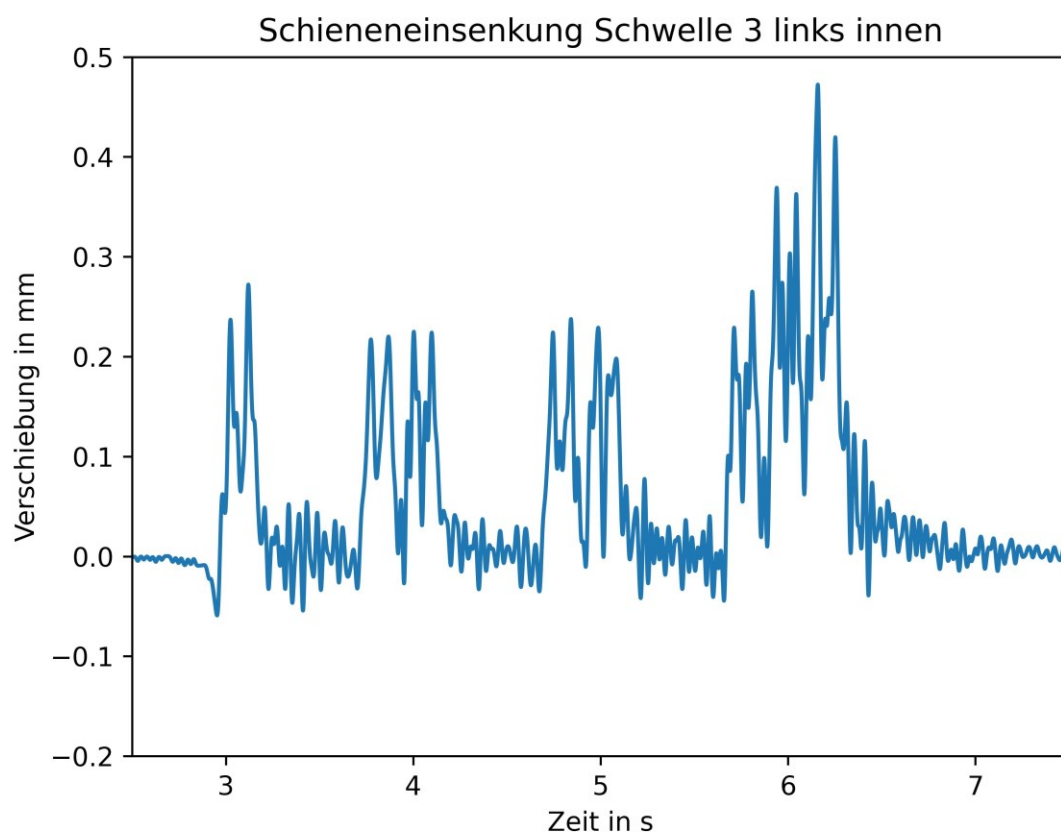
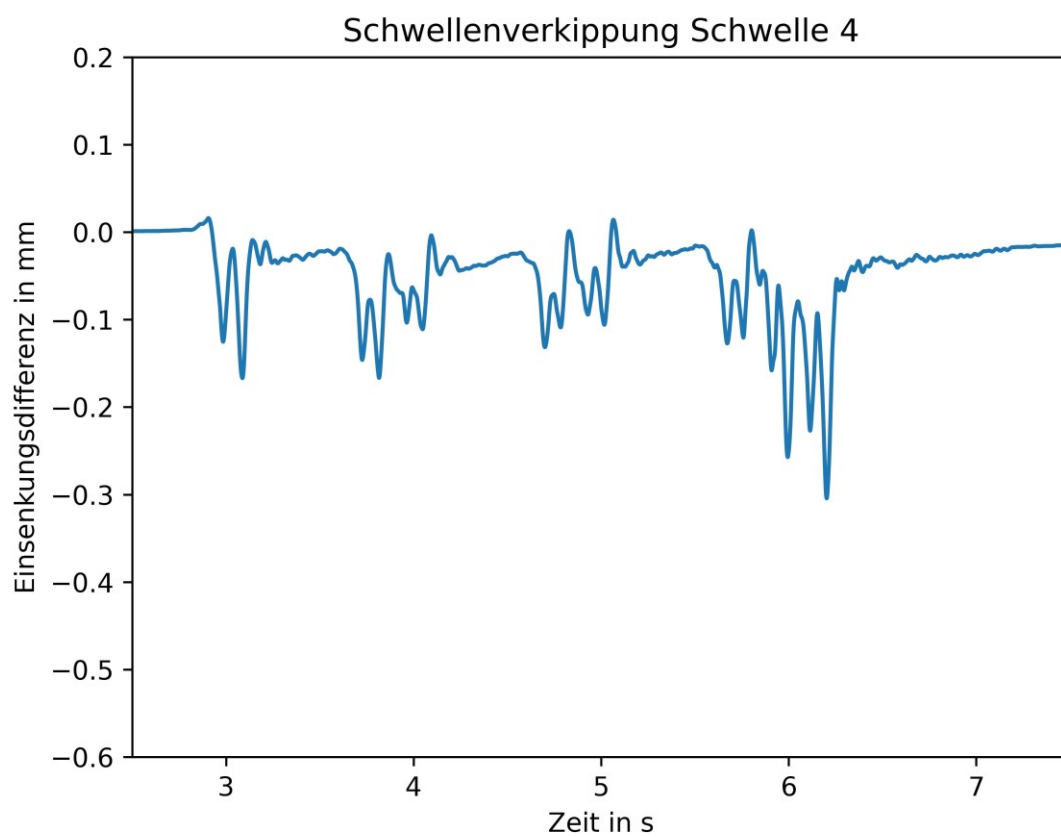
Anhang A Auswertung einer Überfahrt eines lokbespannten Zuges am 16.11.2023
um 16:57

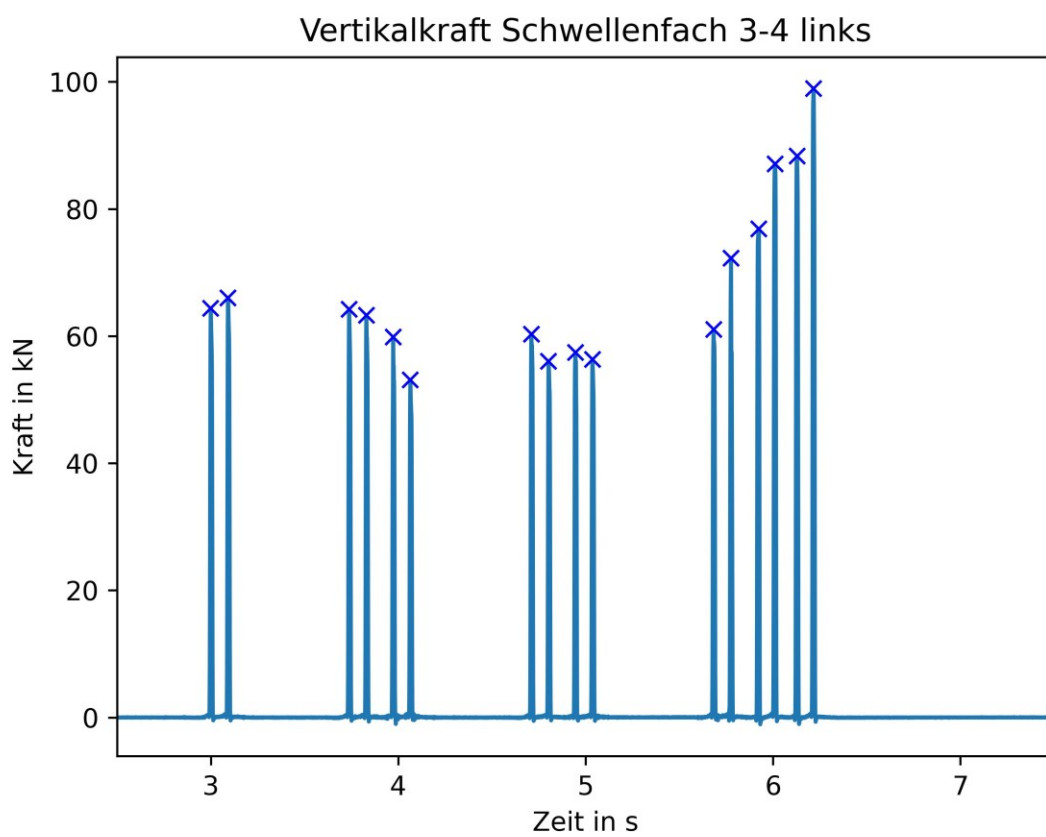
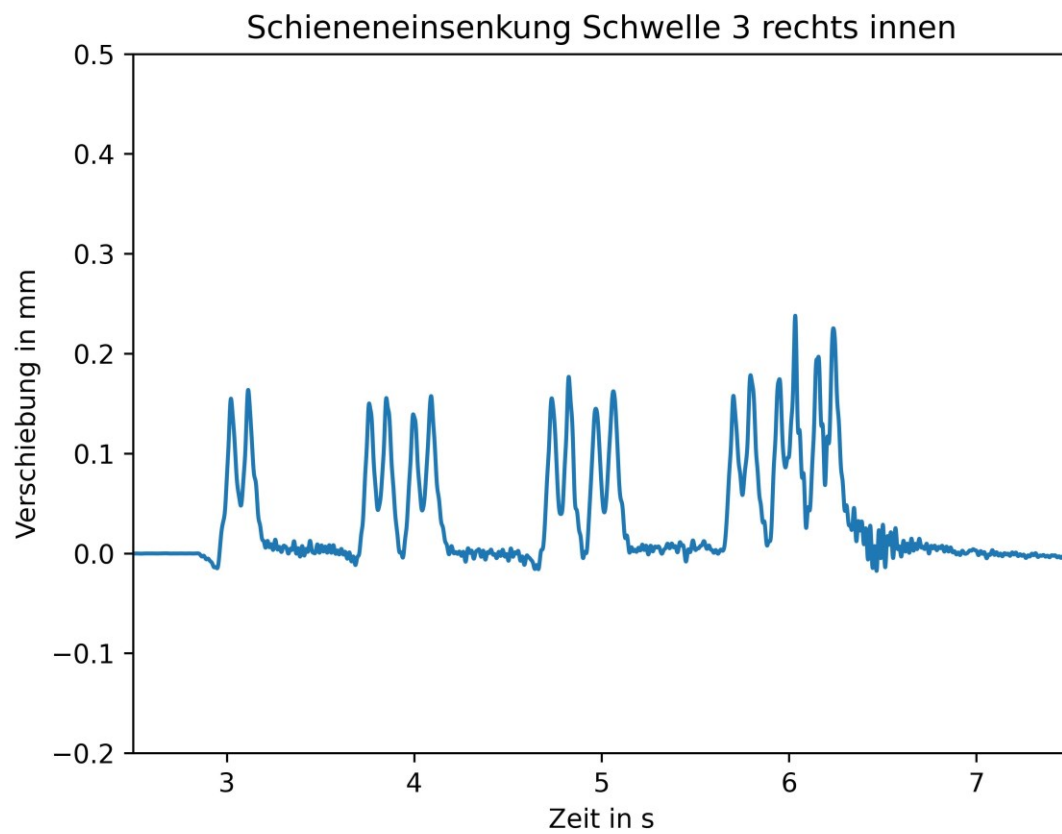
Anhang B Auswertung einer S-Bahn Überfahrt am 04.11.2023 um 14:41

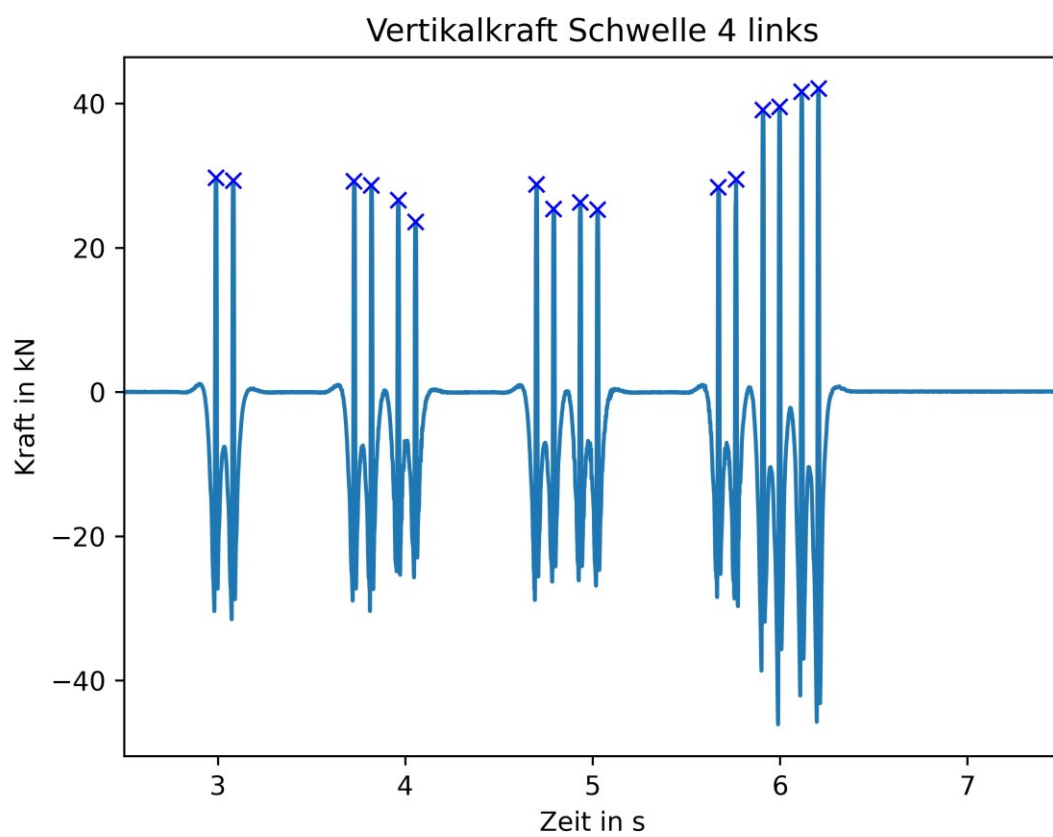
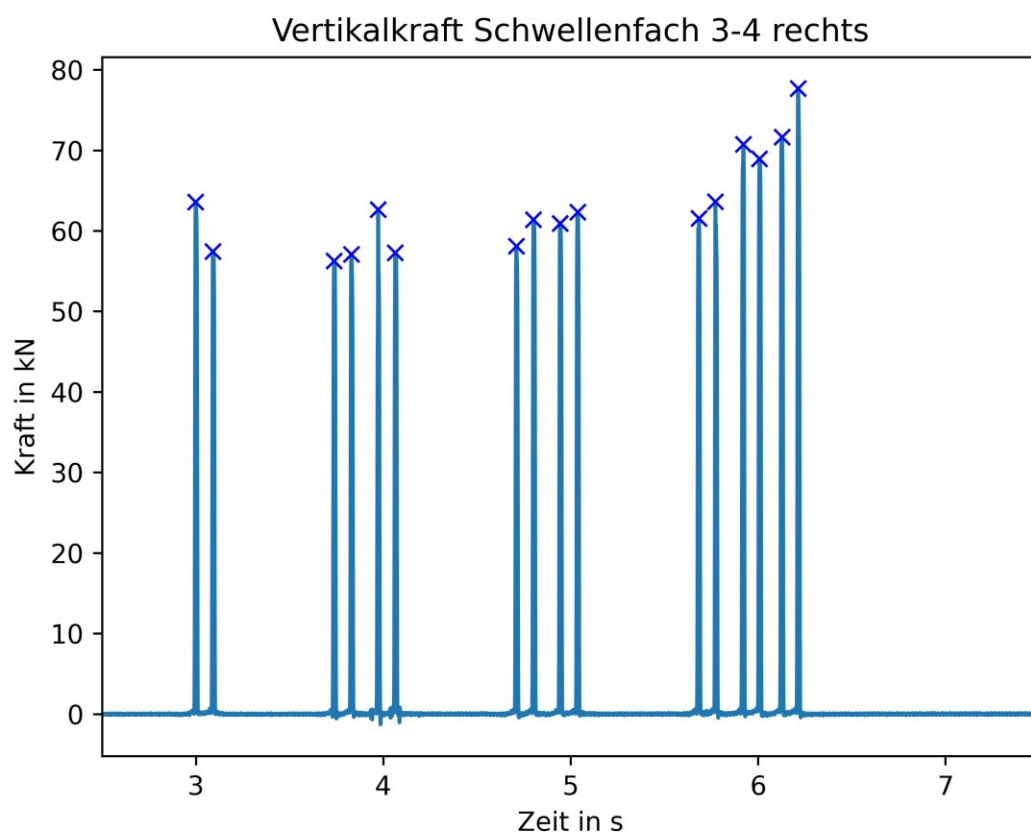
**Anhang A: Auswertung einer Überfahrt eines lokbespannten Zuges
am 16.11.2023 um 16:57**

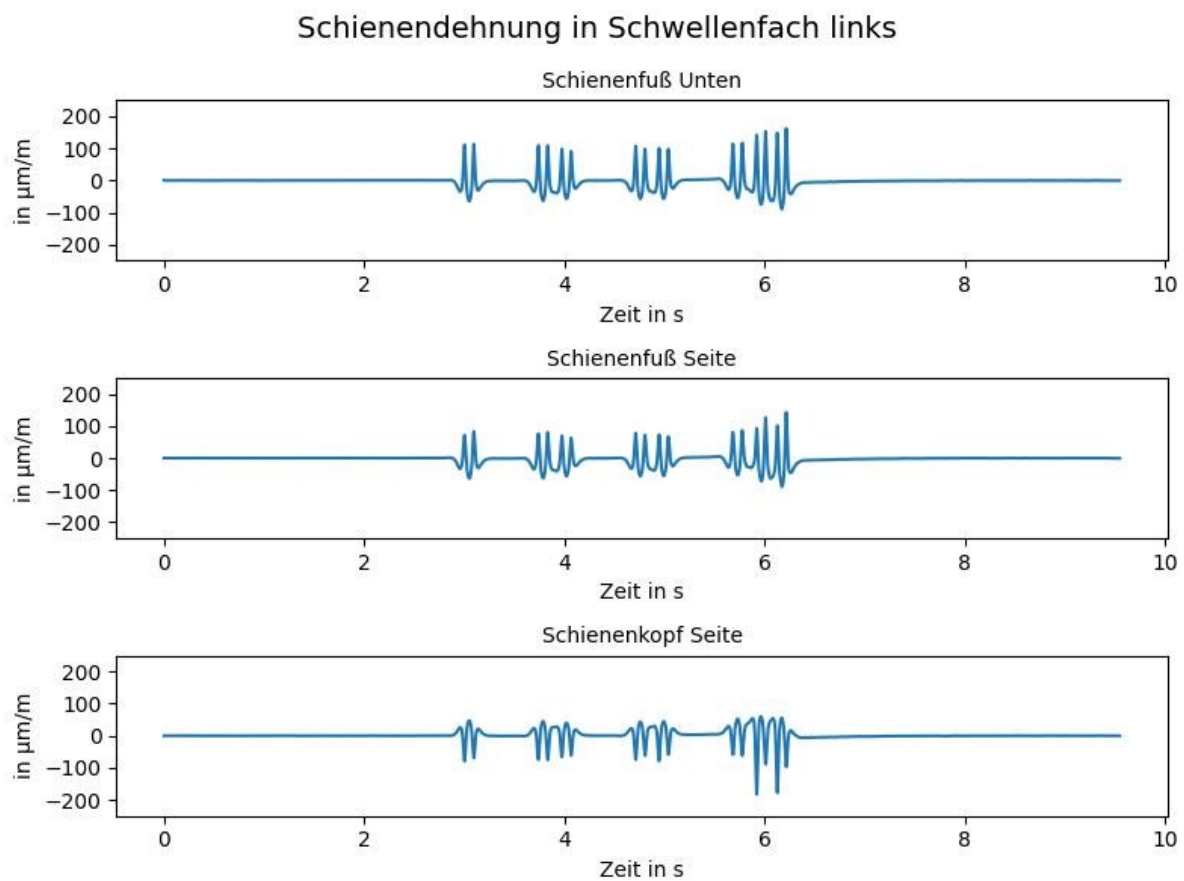
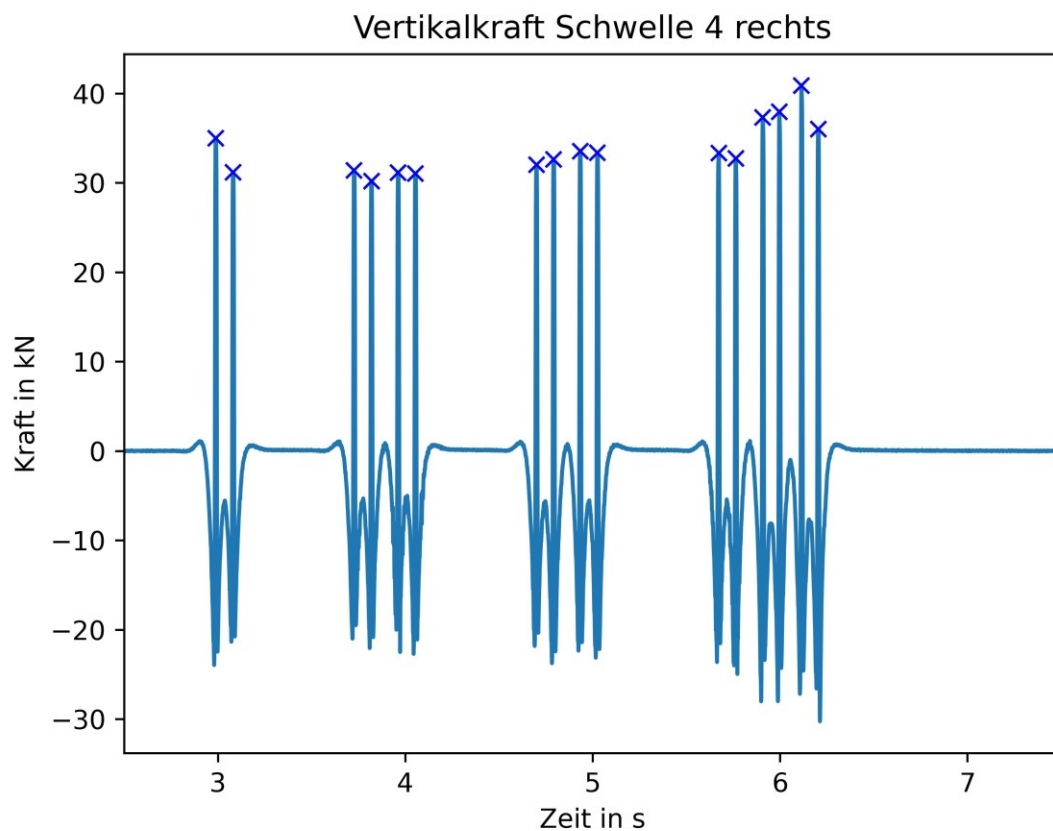




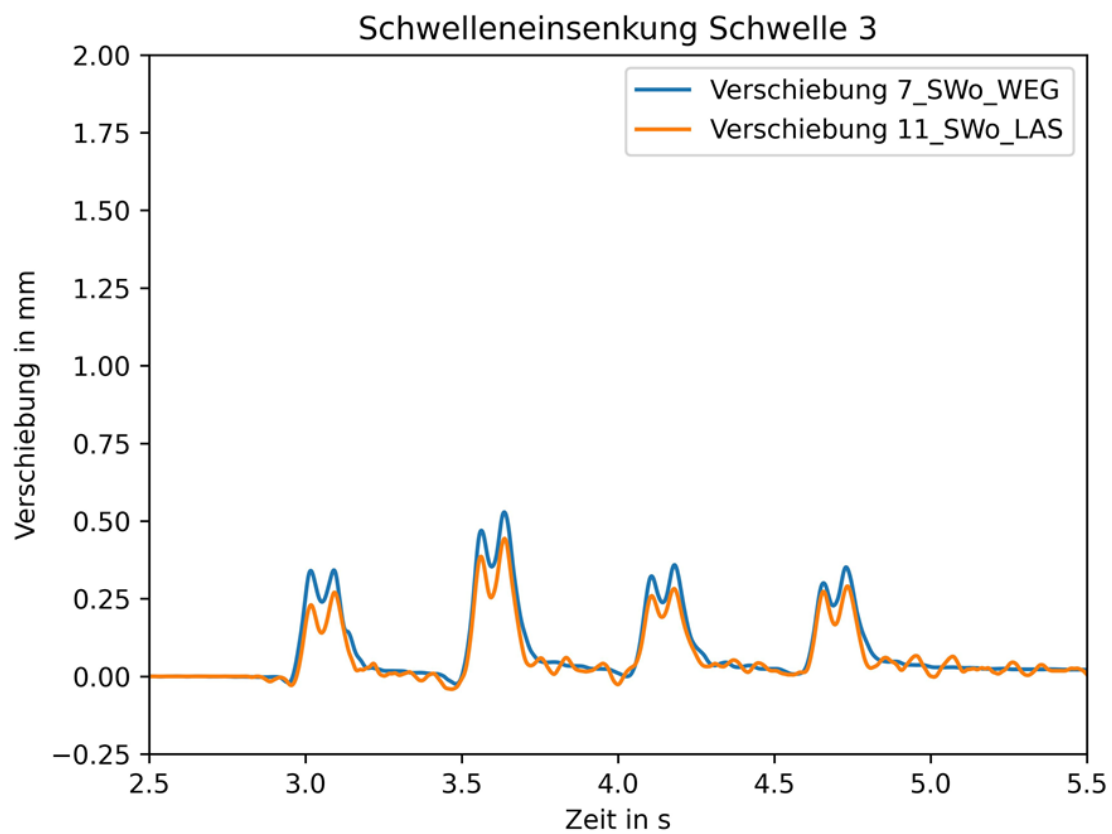
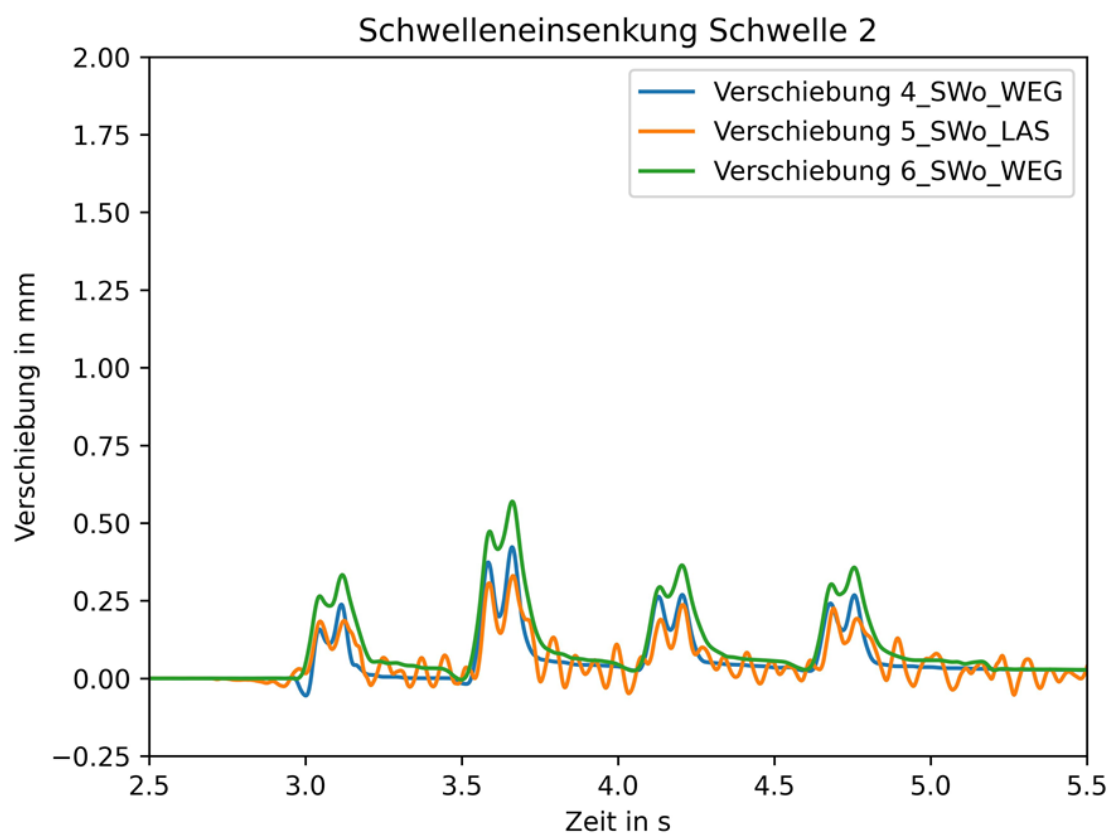


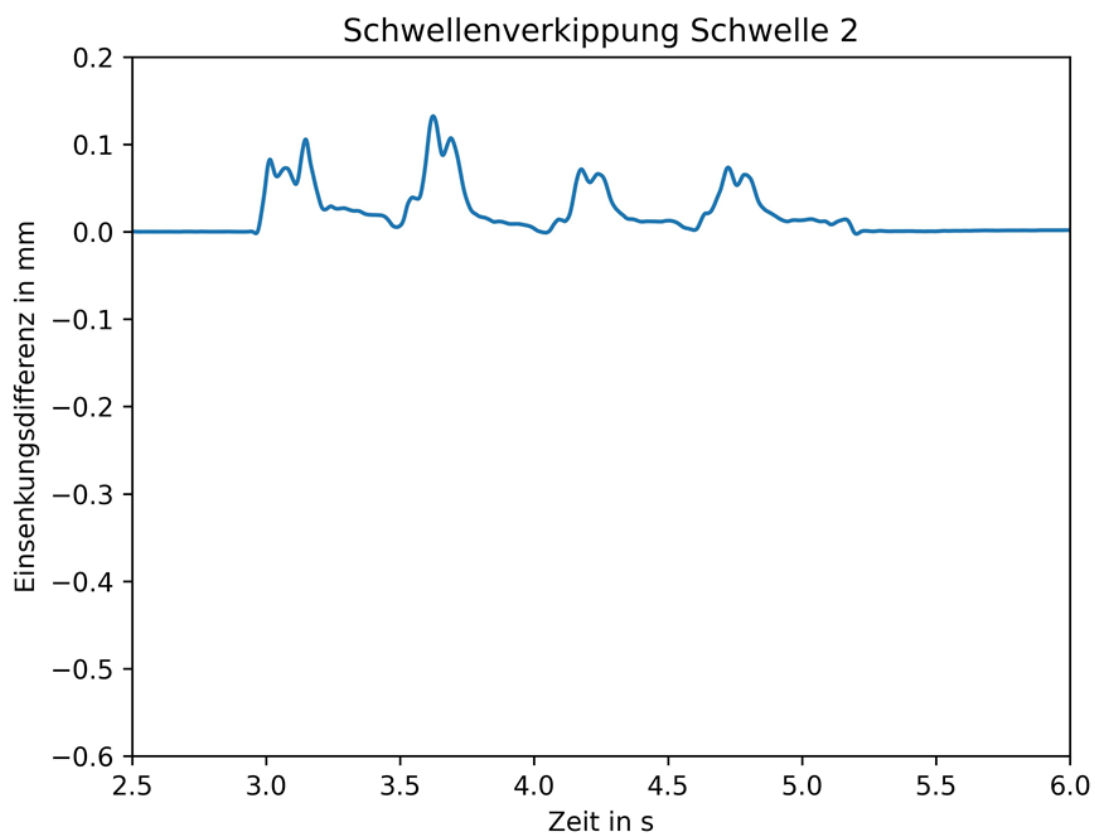
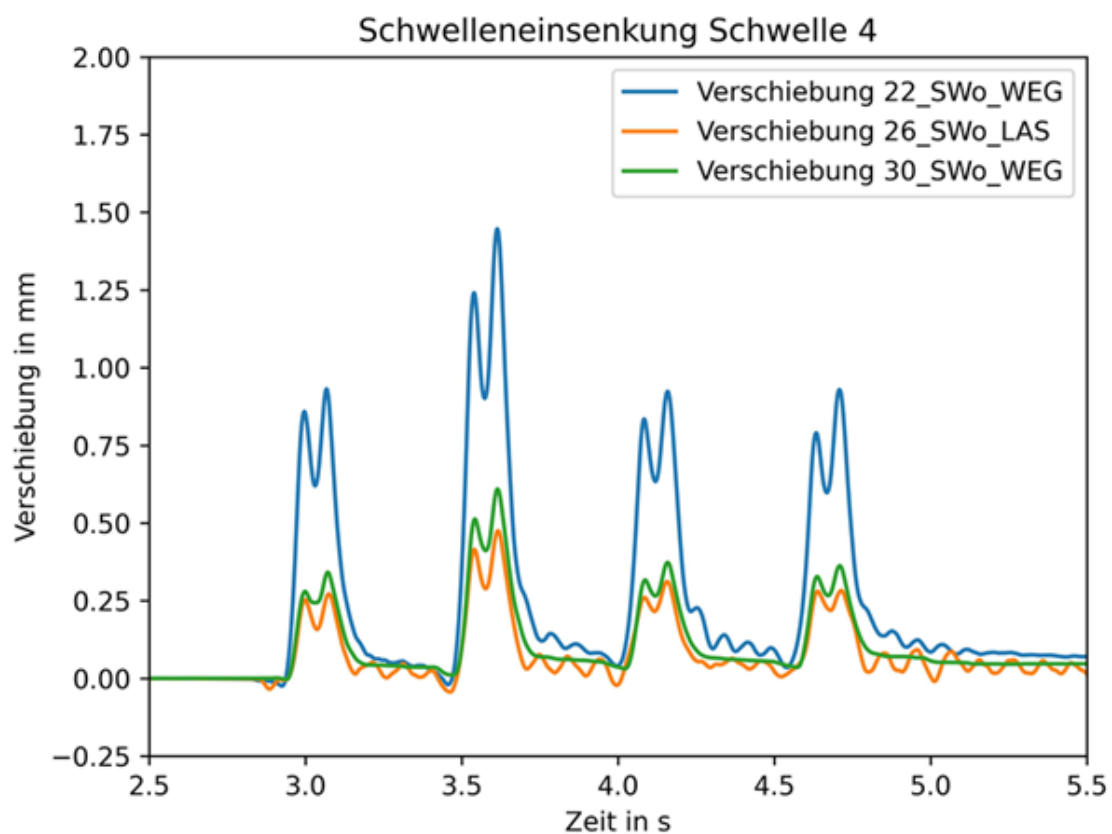


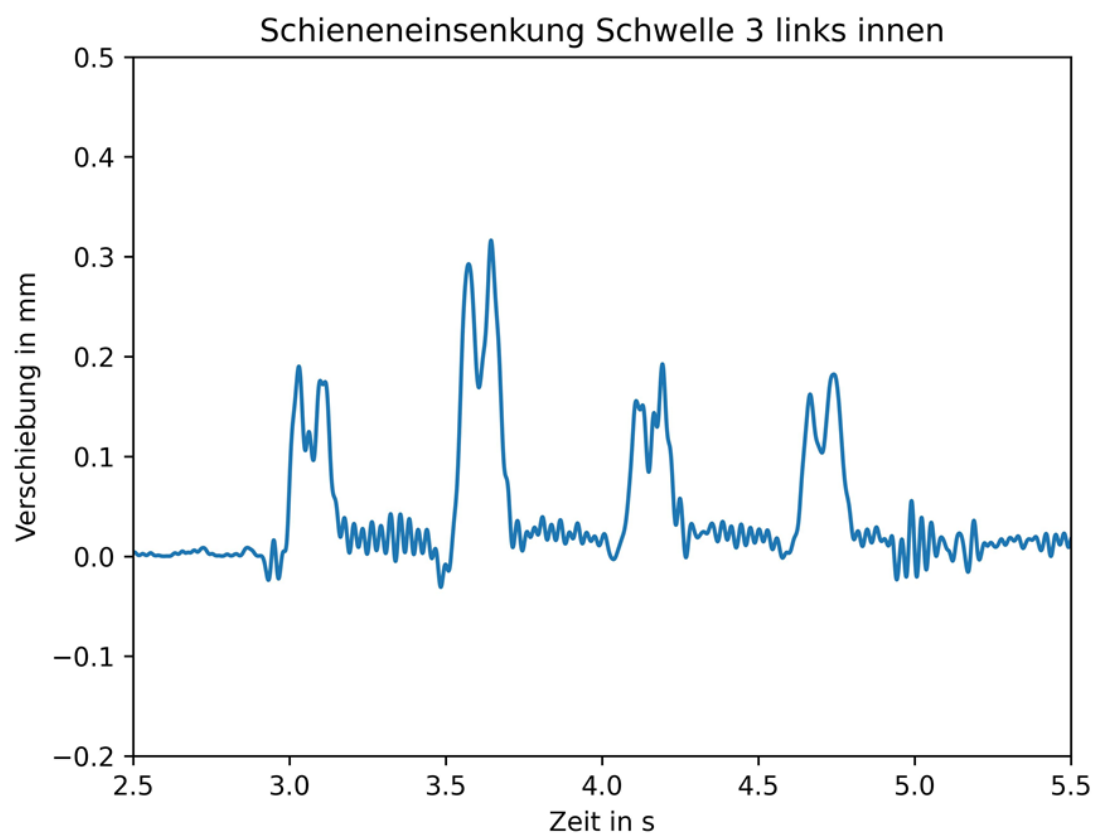
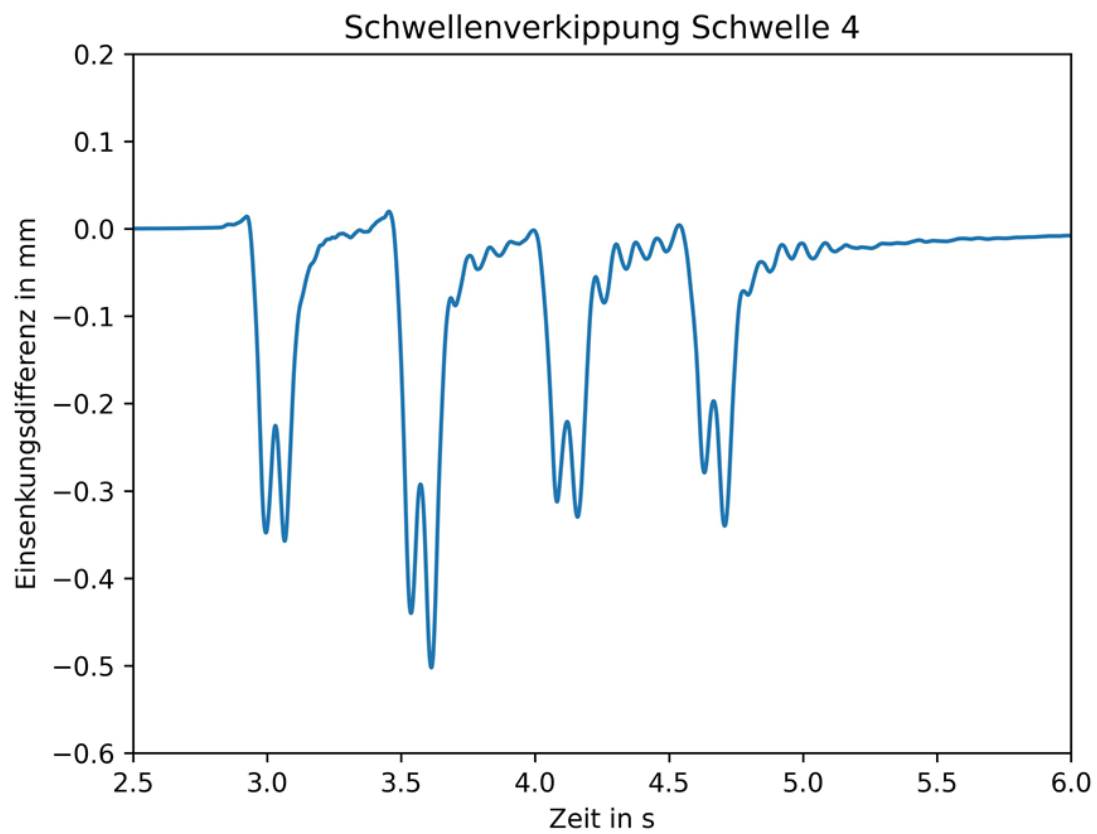


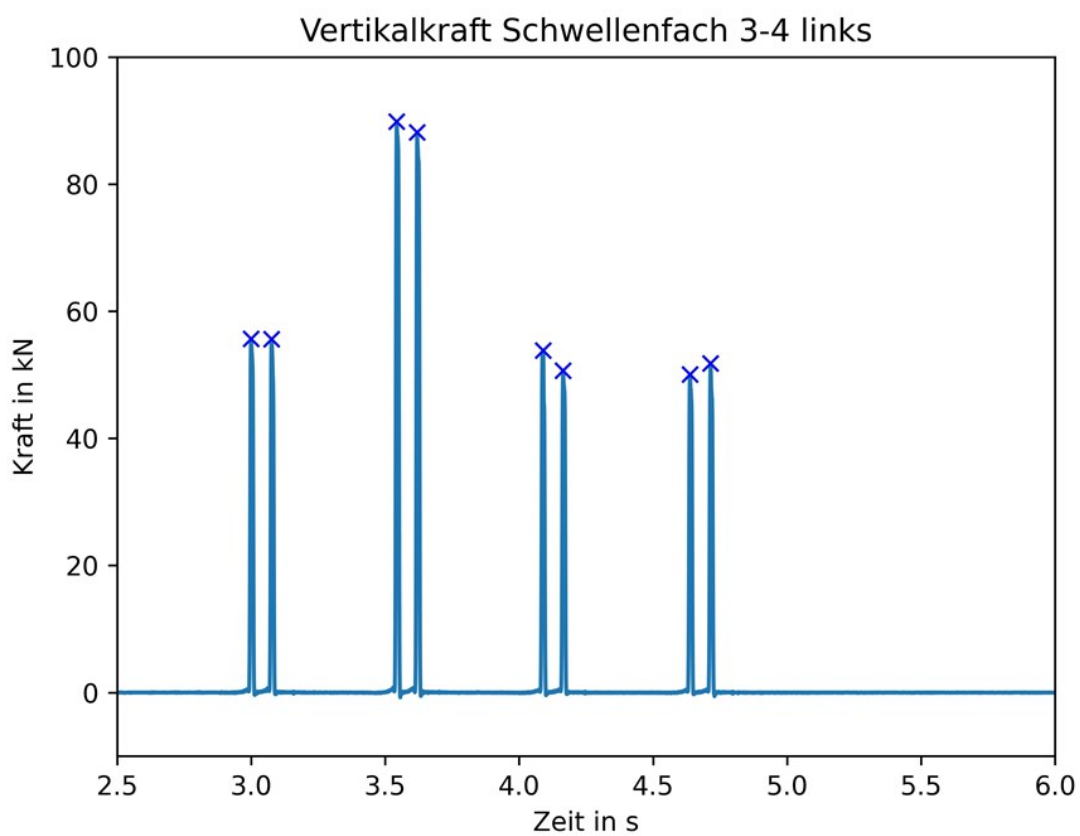
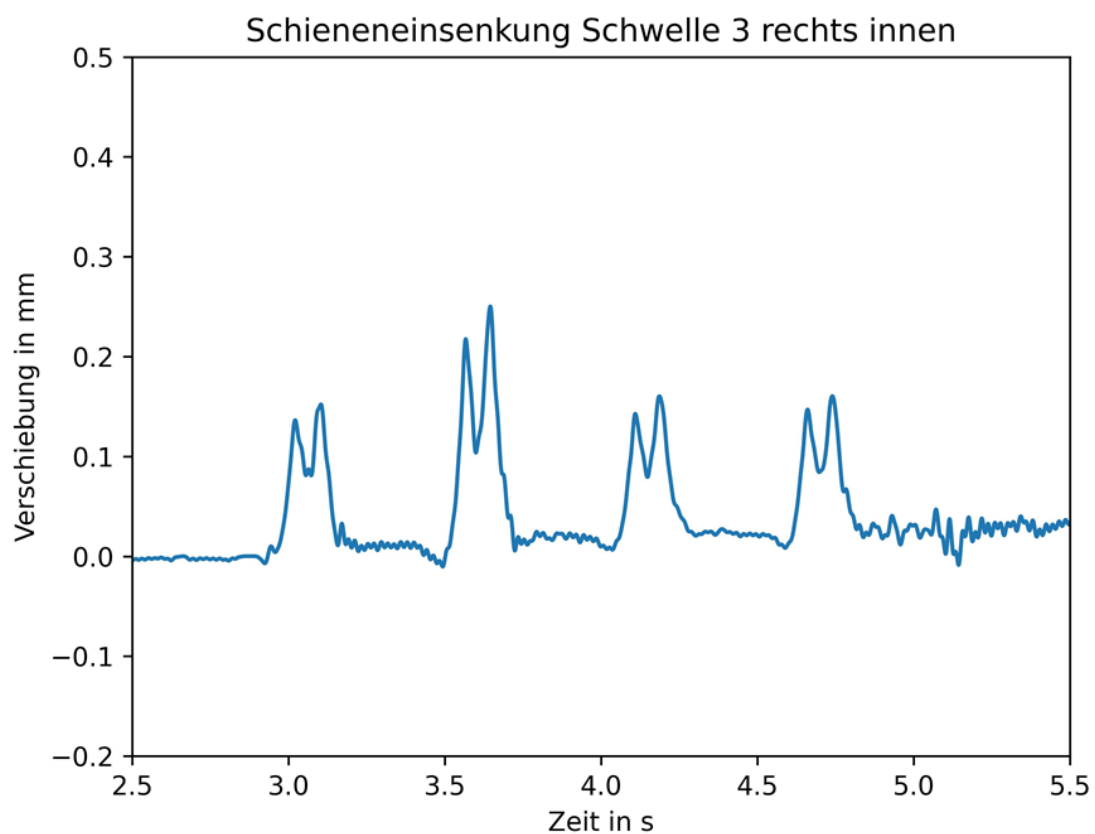


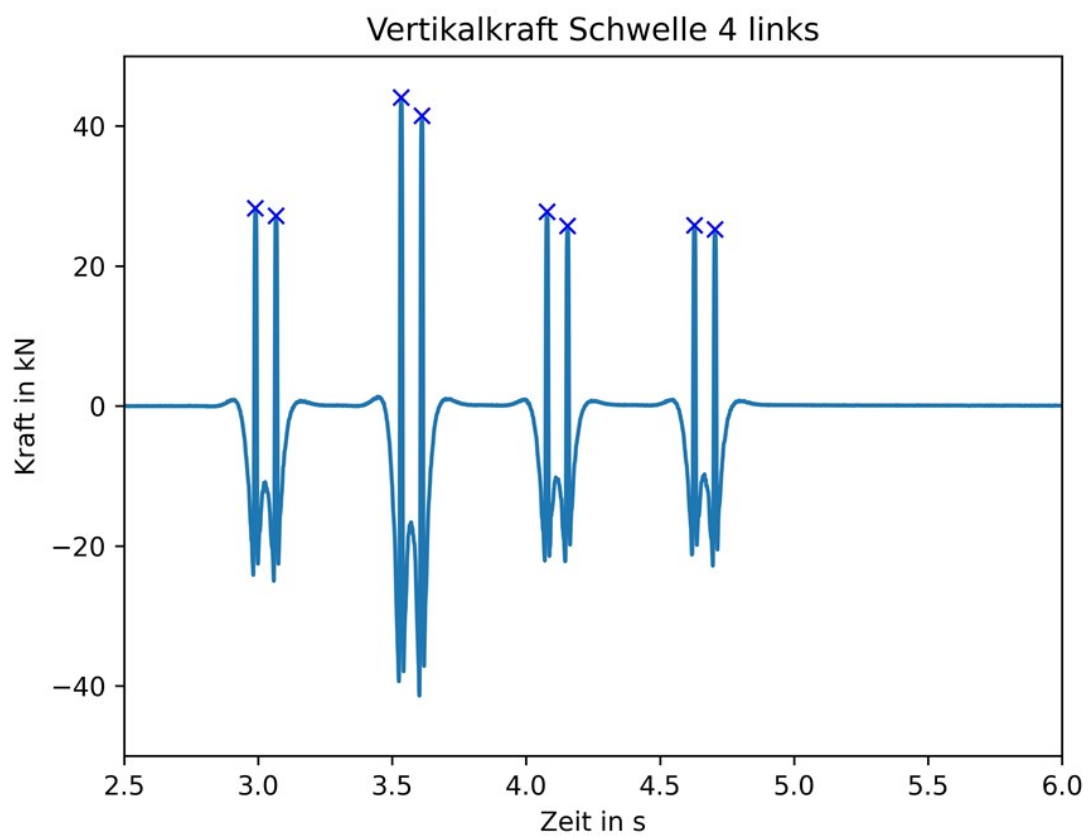
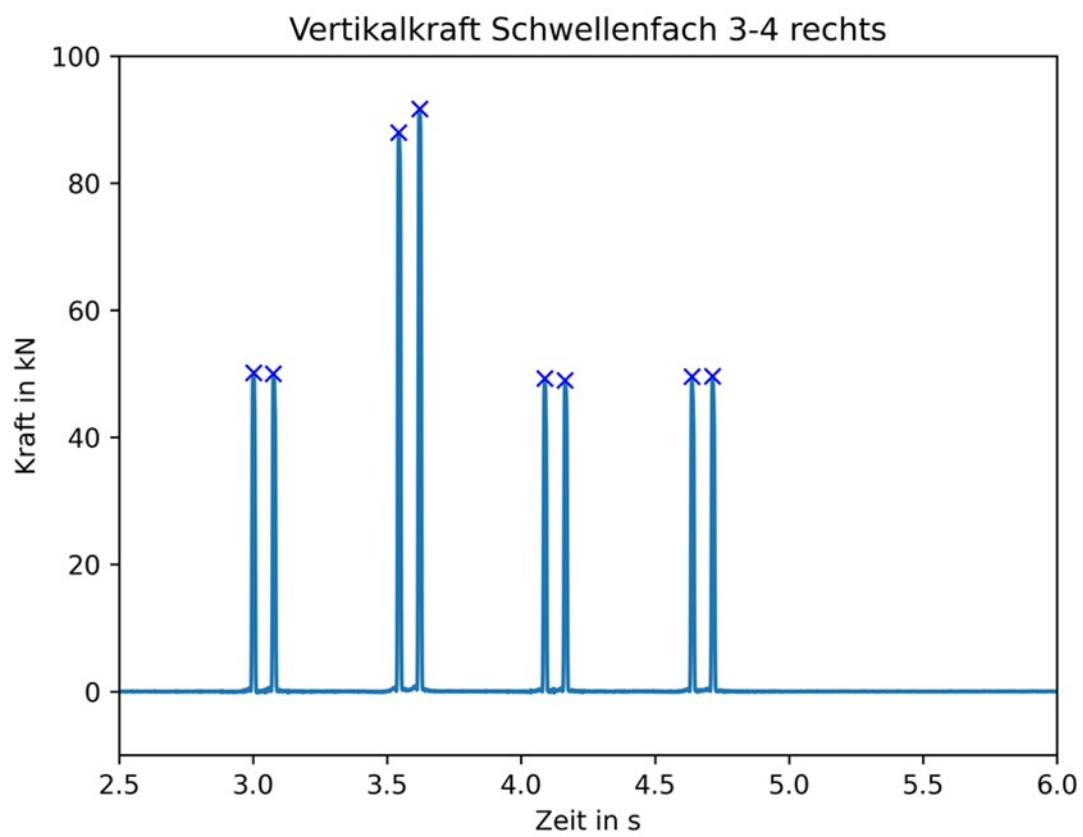
**Anhang B: Auswertung einer S-Bahn Überfahrt am 04.11.2023 um
14:41**

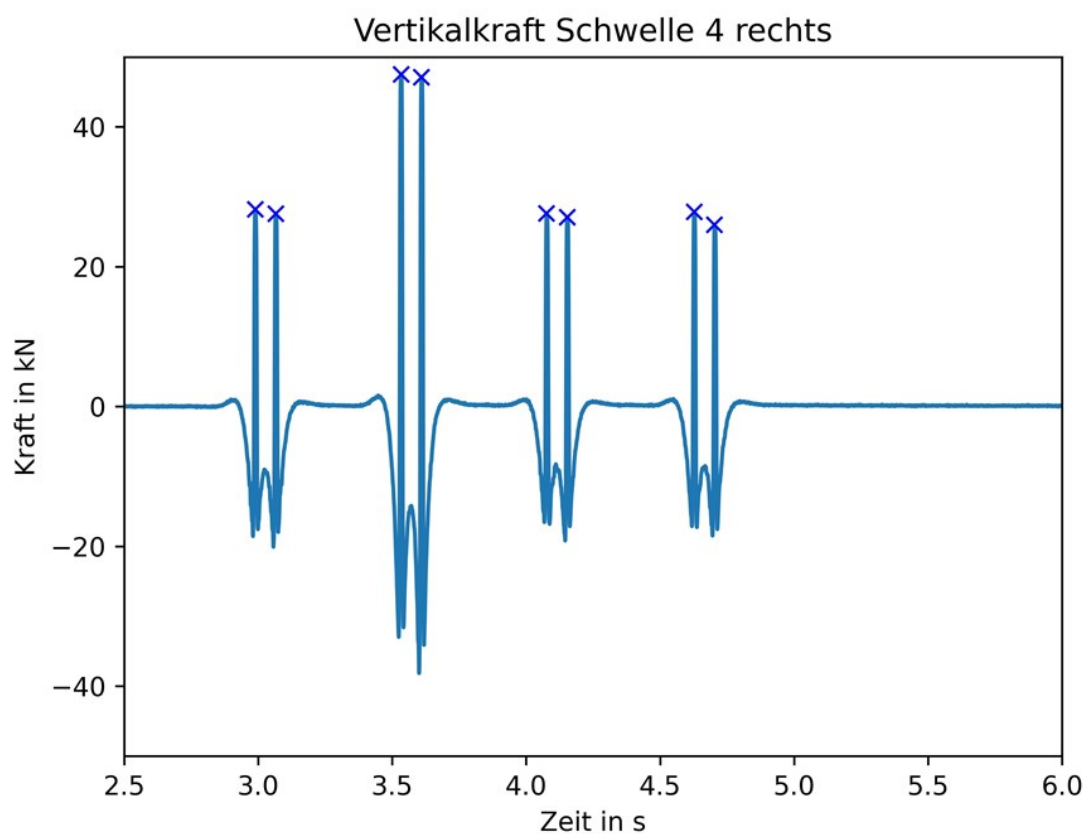












Schienendehnung in Schwellenfach links

