



Spannungszustände in Rillenschienen

Spannungsermittlung basierend auf
Mess- und Simulationsdaten

MASTERARBEIT

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Infrastruktur

vorgelegt von:

Isabel Fachbach, BSc

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

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

Mitbetreuender Assistent:

M.Sc. Farzad Farivar

Institut für Eisenbahn-Infrastrukturdesign

Graz, September 2023

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

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Zuge der Bearbeitung und Anfertigung dieser Masterarbeit fachlich sowie persönlich unterstützt haben. Bedanken möchte ich mich dabei zu aller erst bei Herrn Prof. Dr.techn. Ferdinand Pospischil für seine stete Unterstützung und Förderung und bei Herrn M.Sc. Farzad Farivar für die Betreuung und Beratung während des Verfassens der Masterarbeit. An das gesamte Team des Instituts für Eisenbahn-Infrastrukturdesign möchte ich ein herzliches Dankeschön aussprechen, für die permanente Unterstützung, Hilfsbereitschaft und gute Zusammenarbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dr. Markus Ossberger für die Ermöglichung der Masterarbeit und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Geiger für die gute Zusammenarbeit und fachliche Unterstützung. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Mitarbeiter/ Mitarbeiterinnen der Wiener Linien für die gute Kooperation.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Studienkolleginnen bedanken für die laufende Hilfsbereitschaft, den emotionalen Rückhalt und für die gemeinsame schöne Studienzeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, welche immer ein stets offenes Ohr für mich hatten und während meiner gesamten Studienzeit immer unterstützend und motivierend waren.

Kurzfassung

Aufgrund der Platzverhältnisse werden die Gleisbögen bei den Straßenbahnen meist sehr eng trassiert. Aus den engen Gleisbögen resultieren Schlupf und höhere Kontaktkräfte aufgrund des Fahrkantenkontaktes und des Spurkranzanlaufens, welche einen hohen Verschleiß sowohl an Rad und Schiene generieren. Ob die eingesetzten verschleißreduzierenden Maßnahmen den gewünschten Erfolg bringen, kann erst nach einer gewissen Zeit bewertet werden. Der Einsatz von numerischen Simulationen stellt eine Lösung dar, um die eingesetzten Maßnahmen im Vorhinein zu bewerten. Für den Aufbau einer Verschleißsimulation sind erste Grundlagenforschungen notwendig, um vor allem das Verhalten zwischen Rad und Schiene besser zu verstehen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es Erkenntnisse zum Rad-Schiene Verhalten unter unterschiedlichen Verschleißzuständen des Rades und der Schiene zu generieren. Dafür wird eine „Vollmessstelle“ im Wiener Linien Straßenbahnnetz aufgebaut, um die Spannungen bei Überfahrten in einem Gleisbogen zu messen und statische Kalibrierungsmessdaten für den Aufbau einer Finite-Elemente-Methode (FEM) zu erhalten. Die nachstehenden Erkenntnisse zum Spannungsverhalten der Rillenschiene beziehen sich ausschließlich auf den vorhandenen Straßenbahnoberbau, an denen die Spannungen gemessen worden sind. Die Erkenntnisse über das Spannungs- und Kippverhalten der Rillenschiene während des Normalbetriebes werden im Zuge einer ersten Messung im Gleis gewonnen. In einer zweiten Messung werden anhand eines spezifischen Fahrzeugtype statische und geschwindigkeitsabhängige Messungen durchgeführt. Die statischen Messungen kommen vor allem bei der Kalibrierung für den Aufbau der FEM-Simulation zum Einsatz. Dabei wird für die Annahme der Kraftangriffspunkte eine Einpunktberührung und für die Kontaktgebietsgröße vereinfachte Annahmen über die Hertzsche Theorie angenommen. Durch einen Vergleich der Messdaten aus der zweiten Messung mit den Simulationsdaten, sind annähernd gleiche Ergebnisse erzielt worden. Darüber hinaus werden durch die Simulation weitere Erkenntnisse über das Spannungsverhalten der Rillenschiene bei unterschiedlichen Krafteinleitungspunkten gewonnen.

Im Allgemeinen kann über einen vereinfachten Aufbau der Simulation das Verhalten der Rillenschiene im Gleisbogen bei einer Überfahrt nachvollzogen werden. Um zukünftige Verschleißprognosen für geeignete Maßnahmen zu erhalten sind weitere, vor allem in Hinblick auf die Kontaktanalyse, FE-Modelle aufzubauen. Der Einfluss der Einpunkt- und der Zweipunktberührung lässt sich im Spannungsverhalten der Rillenschienen widerspiegeln und ist von den Profilen des Rades und der Schiene abhängig. Ein FE-Modell für die Analyse des Kontaktes, welches abhängig vom Rad- und Schienenprofil ist, ist für weitere Analysen über das Kontaktverhalten notwendig.

Abstract

The track curves on the trams are usually very narrow due to the available space. The narrow track curves result in slippage and higher contact forces due to contact with the running edge and the wheel flange, which generate high wear on both wheel and rail. Whether the wear-reducing measures applied will bring the desired success can only be evaluated after a certain period of time. The use of numerical simulations provides a solution for evaluating the measures used in advance. For the development of a wear simulation, first basic research is necessary, especially to better understand the behavior between wheel and rail. The aim of the present work is to generate knowledge about the wheel-rail behavior under different wear conditions of the wheel and the rail. For this purpose, a "full measuring point" will be set up in the Wiener Linien tram network in order to measure the stresses when a tram crossing a curved track and to obtain static calibration measurement data for setting up a finite element method (FEM). The following findings on the stress behavior of the grooved rail relate exclusively to the existing tram superstructure on which the stresses were measured. The findings on the stress and tilting behavior of the grooved rail during normal operation are obtained during a first measurement in the track. In a second measurement, static and speed dependent measurements are carried out using a specific vehicle type. The static measurements are mainly used for the calibration for the setup of the FEM simulation. A single-point contact is assumed for the force application points and simplified assumptions about Hertzsche theory are made for the contact area size. By comparing the measurement data from the second measurement with the simulation data, approximately the same results were obtained. In addition, the simulation provides further insights into the stress behavior of the grooved rail at different force application points.

In general, the behavior of the grooved rail in the track curve can be reproduced via a simplified structure of the simulation. In order to obtain future wear predictions for suitable measures, further FE-models must be built, especially with regard to the contact analysis. The influence of single-point and two-point contact can be reflected in the stress behavior of the grooved rails and depends on the profiles of the wheel and the rail. An FE-model for the analysis of the contact, which depends on the wheel and rail profile, is necessary for further analyses on the contact behavior.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zur Verschleißsimulation	2
3 Messabschnitt	3
3.1 Gewählter Messabschnitt	3
3.1.1 Querschnittsaufbau	3
3.1.2 Fahrzeugtype	4
3.2 Aufbau der Messstelle	6
3.2.1 DMS Funktionsweise	7
3.2.2 Laser Funktionsweise	9
4 Erste Messung	10
4.1 Auswertung der ersten Messung	10
4.1.1 Dehnmessstreifen:	11
4.1.2 Lasersensoren:	15
5 Zweite Messung	19
5.1 Auswertung der zweiten Messung	19
5.1.1 Dehnmessstreifen	20
5.1.2 Lasersensoren	33
6 Erkenntnisse aus den Messungen	38
7 Rad-Schiene Kontakt	40
7.1 Kontaktfläche	42
7.1.1 Ermittlung der Kontaktfläche	43
8 Einwirkende Kräfte	47
8.1.1 Statische Betrachtung	48
8.1.2 Dynamische Betrachtung	49
9 Simulationsmodell	50

9.1	Simulationsbestandteile	50
9.1.1	Querschnittsaufbau	50
9.1.2	Halterungen	51
9.1.3	Kästen.....	52
9.1.4	Kontaktflächen	52
9.1.5	Einwirkende Kräfte	53
9.1.6	Zusammenfassung der modellierten Bestandteile	53
9.2	Simulationsdurchführung.....	54
9.3	Simulationskalibrierung	56
9.4	Vergleich: Messdaten – Simulationsdaten.....	57
10	Erkenntnisse aus der Simulation.....	64
11	Zusammenfassung und Ausblick	65
	Formelverzeichnis	67
	Literaturverzeichnis	68
	Anhang.....	A-1
	Anhang A: Messwerte der ersten Messung	A-2
	Anhang B: Messwerte der zweiten Messung	A-6

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Querschnittsaufbau [5]	4
Abbildung 3-2:	Fahrzeugtype ULF-B/B1 [12, S. 2]	5
Abbildung 3-3:	Radsätze bei Radialstellung ([6], Abb. 1.21 zitiert nach [13])	6
Abbildung 3-4:	Positionierung der Messquerschnitte [2]	6
Abbildung 3-5:	Positionierung der DMS und der Lasersensoren eines Messquerschnittes [eigene Darstellung]	7
Abbildung 3-6:	Aufbau der Dehnmessstreifen [14]	8
Abbildung 3-7:	Lasersensor [17, Abb. 5]	9
Abbildung 4-1:	DMS-Messpositionen [eigene Darstellung]	11
Abbildung 4-2:	1. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]	12
Abbildung 4-3:	1. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]	12
Abbildung 4-4:	2. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (14 km/h) [eigene Darstellung]	13
Abbildung 4-5:	2. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (14 km/h) [eigene Darstellung]	13
Abbildung 4-6:	3. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]	14
Abbildung 4-7:	3. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]	14
Abbildung 4-8:	Lasersensoren Positionierung und gemessene Auslenkungsrichtungen [eigene Darstellung]	15
Abbildung 4-9:	Einsenkung des 1. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]	16
Abbildung 4-10:	Einsenkung des 2. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]	16
Abbildung 4-11:	Auslenkung des 2. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]	17
Abbildung 4-12:	Einsenkung des 3. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]	17
Abbildung 4-13:	Auslenkung des 3. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]	18
Abbildung 5-1:	Nachtmessung [eigene Aufnahme]	19
Abbildung 5-2:	DMS-Messpositionen [eigene Darstellung]	20
Abbildung 5-3:	1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	21
Abbildung 5-4:	1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	21
Abbildung 5-5:	1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	22
Abbildung 5-6:	1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	23

Abbildung 5-7:	1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	24
Abbildung 5-8:	1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	24
Abbildung 5-9:	2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	26
Abbildung 5-10:	2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	26
Abbildung 5-11:	2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	27
Abbildung 5-12:	2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	27
Abbildung 5-13:	2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	28
Abbildung 5-14:	2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	28
Abbildung 5-15:	3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	29
Abbildung 5-16:	3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]	30
Abbildung 5-17:	3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	30
Abbildung 5-18:	3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]	31
Abbildung 5-19:	3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	31
Abbildung 5-20:	3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung].....	32
Abbildung 5-21:	Lasersensoren Positionierung und gemessene Auslenkungsrichtungen [eigene Darstellung].....	33
Abbildung 5-22:	Einsenkung des 1. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	34
Abbildung 5-23:	Auslenkung des 1. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	34
Abbildung 5-24:	Einsenkung des 2. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	35
Abbildung 5-25:	Auslenkung des 2. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	35
Abbildung 5-26:	Einsenkung des 3. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	36
Abbildung 5-27:	Auslenkung des 3. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung].....	37
Abbildung 7-1:	Berührgeometrie Rad-Schiene [19, S. 85].....	40
Abbildung 7-2:	Schwerpunkt und Schubmittelpunkt der 60R1 Schiene [eigene Darstellung zitiert nach [22]].....	41
Abbildung 7-3:	Querschnittsbezeichnung - Rad und Rillenschiene [23, Abb. 1]	41

Abbildung 7-4:	Originalschienenprofil im Vergleich zu gemessenes Schienenprofil [eigene Darstellung]	42
Abbildung 7-5:	Kontaktmodelle-Punktkontakt [25, Abb. 2.5]	44
Abbildung 7-6:	Kontaktmodell-Linienkontakt [25, Abb. 2.9]	44
Abbildung 7-7:	Kontaktflächen Ermittlung anhand von Zylindern [1, Abb. 2.8]	45
Abbildung 8-1:	Einwirkende Kräfte ([6], Abb. 1.17 zitiert nach [27])	47
Abbildung 8-2:	Formschlusskräfte (Zwangskräfte) [1, Abb. 2.3]	49
Abbildung 9-1:	FEM-Modell [eigene Darstellung]	54
Abbildung 9-2:	Statische Messung des ersten Losradpaares [eigene Aufnahme]	55
Abbildung 9-3:	Einpunktberührungen Varianten: auf die Lauffläche (links) – auf die Kopfeckabrundung (rechts) [eigene Darstellung]	56
Abbildung 9-4:	Normalspannungen in Schienenachse bei einer Belastung auf den Fahrkopfbereich (links) und einer Belastung auf die Kopfeckabrundung (rechts) [eigene Darstellung]	57
Abbildung 9-5:	Krafteinleitungspunkte - 1.Messquerschnitt (blau – Krafteinleitungspunkt Außenschiene; rot – Krafteinleitungspunkt Innenschiene) [eigene Darstellung]	58
Abbildung 9-6:	Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 1. MQS [eigene Darstellung]	58
Abbildung 9-7:	Krafteinleitungspunkte - 3.Messquerschnitt – 1.Variante (blau – Krafteinleitungspunkt Außenschiene; rot – Krafteinleitungspunkt Innenschiene) [eigene Darstellung]	60
Abbildung 9-8:	Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 1. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]	61
Abbildung 9-9:	Krafteinleitungspunkte - 3. Messquerschnitt – 2. Variante [eigene Darstellung]	62
Abbildung 9-10:	Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 2. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Schienenfahrzeugtypen [18].....	10
Tabelle 4-2:	Detaillierte Auflistung der einzelnen Spannungswerte je Achse [eigene Darstellung]	15
Tabelle 5-1:	Vergleich der einzelnen Spannungswerte je Achse für den Messpunkt SKS_6 (Bogenmitte) [eigene Darstellung]	25
Tabelle 7-1:	Radien für die Kontaktflächenermittlung [eigene Darstellung]	46
Tabelle 7-2:	Kontaktflächen Parameter [eigene Darstellung]	46
Tabelle 9-1:	Modellierte Bestandteile [eigene Darstellung].....	53
Tabelle 9-2:	Modellierte Kräfte [12]	53
Tabelle 9-3:	Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 1. MQS [eigene Darstellung]	59
Tabelle 9-4:	Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 1. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]	61
Tabelle 9-5:	Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 2. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]	63

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

BA	Bogenanfang
BE	Bogenende
BM	Bogenmitte
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methode
MB	Messbereich
MBA	Messbereichsanfang
MBE	Messbereichsende
MBM	Messbereichsmittle
MKS	Mehrkörpersimulation
MQS	Messquerschnitt
SFS	Schienenfuß seitlich
SFU	Schienenfuß unten
SKS	Schienenkopf seitlich
SKU	Schienenkopf unten
SSS	Schienensteg
ULF	Ultra Low Floor

Griechisch

α	Winkel zwischen den Ebenen der Hauptkrümmungen am Berührungspunkt	[rad]
γ	Tangentenneigung	[rad]
ε	Dehnung	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
σ	Spannung	[MPa]
ν	Querkontraktionszahl	

Römisch

A	Konstante	
a	Große Halbachse der Kontaktellipse	[mm]
B	Konstante	
b	Kleine Halbachse der Kontaktellipse	[mm]
E	Elastizitätsmodul	[MPa]
k	k-Faktor des DMS	
N	Normalkraft in der Berührfläche	[kN]
P	Einwirkende Kraft von Körper 1 auf Körper 2 bzw. Körper 2 auf Körper 1	[N]
Q	Radlast	[kN]
R	Widerstand im DMS	
R_0	Grundwiderstand des DMS	
R_1, R_1'	Haupttradien Körper 1	[mm]
R_2, R_2'	Haupttradien Körper 2	[mm]
Y	Profilseitenkraft	[kN]

Operatoren und Symbole

Δ	Änderung
----------	----------

1 Einleitung

Der Rad-Schiene Verschleiß ist bei der Straßenbahn aufgrund der engen Bögen ein wesentliches Thema. Aufgrund der daraus resultierenden erhöhten Instandhaltungskosten sind Maßnahmen für die Verschleißreduzierung notwendig. Um mögliche Maßnahmen zu bewerten, können numerische Simulationen eingesetzt werden. Um zukünftig Prognosen über das Verschleißprofil zu erhalten, sind mehrere Berechnungsverfahren, unter anderem eine Fahrdynamikanalyse, eine dynamische Kontaktsimulation und eine Verschleißberechnung notwendig. Wesentlichen Einfluss auf den Verschleißzustand hat die Interaktion zwischen Rad und Schiene, deshalb ist eine dynamische Kontaktanalyse, welche auf Basis einer Finite-Elemente-Methode (FEM) aufbaut, von entscheidender Bedeutung. [1] Aufgrund dessen wird in der vorliegenden Arbeit eine FEM aufgebaut, um das Verhalten der Rillenschiene bei Überfahrten im Bogen unter unterschiedlichen Verschleißzuständen von Rad und Schiene zu erhalten. Folgende Ziele werden in Zuge dieser Arbeit verfolgt:

1. Grundlegendes Verständnis über das Verhalten von Rillenschienen bei Überfahrten zu erlangen
2. Durch eine Simulation das Verhalten der Rillenschiene nachzubilden und mittels Messungen Kalibrierungsdaten für die Simulation zu erhalten

Um das Spannungsverhalten bei Rillenschienen zu analysieren sind mehrere Aspekte zu beachten, welche das Spannungsverhalten beeinflussen. Unter anderem spielt die Größe der Kontaktfläche, die Anzahl der Berührungspunkte und die Umgebungsrandbedingungen eine wesentliche Rolle. Einfluss auf die Größe des Kontaktgebietes und die Anzahl der Berührungspunkte hat das Zusammenspiel zwischen Rad- und Schienenprofil. Je nach Profilform des Rades und der Schiene kommt es zu unterschiedlichen Spannungsausprägungen innerhalb der Rillenschiene. Der Verschleißzustand stellt einen Prozess über einen längeren Zeitraum dar. Aus diesem Grund wurde im Zuge der Masterarbeit in Wien eine „Vollmesssstelle“ errichtet, um Spannungsdaten über einen längeren Zeitraum zu ermitteln und somit eine Basis für die Validierung der Verschleißsimulation zu erhalten. Der Einbau der Messsstelle fand in einem neu verlegten Gleis im Herbst 2022 statt, zum Zeitpunkt der Auswertung konnte kein relevanter Verschleiß festgestellt werden und deshalb wird in der vorliegenden Arbeit von einem nicht verschlissenen Zustand der Rillenschiene ausgegangen und mit den Messdaten verglichen.

Vorgehensweise: Um die genannten Ziele zu erreichen wird im folgenden Kapitel ein detaillierter Überblick über die Vorgehensweise eines Aufbaus einer Verschleißsimulationsberechnung gegeben. Anschließend wird im Kapitel 3 auf die eingebaute Messsstelle eingegangen und die wesentlichen Aspekte zu dem ausgewählten Gleisbogen erläutert. Im Kapitel 4 und 5 werden die ersten Messungen analysiert und die Ergebnisse aufgezeigt und im anschließenden Kapitel 6 werden die Erkenntnisse aus den Messungen verdeutlicht. Die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene, welche für den Aufbau der FEM-Simulation relevant ist, wird im Kapitel 7 beschrieben. Im Kapitel 8 wird ein Überblick über die allgemein einwirkenden Kräfte auf das System gegeben, sowie für die FEM-Simulation relevanten Kräfte erläutert. In den abschließenden Kapitel 9 und 10 wird auf den Aufbau der FEM-Simulation genauer eingegangen und die Erkenntnisse bzw. Vergleiche mit den statischen Messungen aus dem Gleis analysiert. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick über mögliche weitere Vorgehensweisen zu der o.g. Problematik sind im abschließenden Kapitel der Masterarbeit veranschaulicht.

2 Grundlagen zur Verschleißsimulation

Der Schienenverschleiß stellt einen Prozess über einen längeren Zeitraum dar, welcher die Lebensdauer des Gleises wesentlich beeinflusst. Durch geeignete Maßnahmen wird dem Verschleiß entgegengewirkt, jedoch werden die Folgen der gesetzten Maßnahmen erst einige Jahre später verdeutlicht. Um Prognosen über zukünftige Verschleißprofile und eine optimale Verschleißreduktionsmaßnahme aus einem bewertenden Vergleich der möglich einsetzbaren Maßnahmen zu erhalten, ist ein Zusammenspiel von mehreren Berechnungsverfahren notwendig. Unter anderem wird eine Mehrkörpersimulation (MKS) für eine Fahrdynamikanalyse, eine dynamische Kontaktsimulation und letztendlich eine Verschleißberechnung für die Ermittlung des zu erwartenden Verschleißes benötigt. Die drei Berechnungsverfahren hängen miteinander zusammen, sodass die aus der MKS stammenden globalen Kontaktgrößen in die dynamische Kontaktanalyse und bestimmte Eingangsgrößen in die FEM einfließen. Darüber hinaus baut die dynamische Kontaktanalyse auf die FEM auf, welche für die detaillierte Berechnung über das Verhalten im Rad-Schiene Kontaktgebiet angewendet wird. Es folgt also eine Systemtrennung zwischen dem Gesamtsystem und dem Rad-Schiene-Kontakt, was relevant ist, um mit problemspezifischen Berechnungsverfahren beide Themengebiete zu behandeln. [1]

Aus der Forschung von J. Heck geht hervor, dass bei Straßenbahnen der Gleisbogenradius, die Fahrgeschwindigkeit, die Achslast bzw. Fahrzeugbeladung und der Reibwert in Hinblick auf den Einfluss des Verschleißes eine wesentliche Rolle spielen. Generell entsteht Verschleiß dort, wo aufgrund von zwei relativ zueinander bewegten Partikeln Reibenergie entsteht. Aufgrund der Aufteilung des Kontaktgebiets bei einem rollenden Rad in einen Gleit- und Haftbereich, entsteht demnach nur im Gleitbereich Verschleiß. In Hinblick auf die Verschleißuntersuchung stellt somit die Unterscheidung des Haft- und Gleitbereiches eine wesentliche Rolle für eine lokale dynamische Kontaktanalyse dar. Mittels einer FEM können diese Anforderungen abgedeckt werden. Durch die FEM wird die tatsächliche Profilform von Rad und Schiene berücksichtigt und der Rollkontakt (zwischen Lauffläche und Rad) zuverlässig abgebildet, was bei der Betrachtung von verschlissenen Profilen vorteilhaft ist. Die Eingangsgrößen für die FEM werden durch die MKS bereitgestellt und beinhaltet den Lateralversatz, den Anlaufwinkel, die translatorische Radgeschwindigkeit, die Winkelgeschwindigkeit des Rades und die Radkraft. [1]

Die folgende Arbeit widmet sich den spannungsabhängigen Zuständen bei unterschiedlichen Verschleißzuständen in Rillenschienen. Über die Spannungszustände können Aussagen über das Fahrverhalten bzw. über die Kontaktpunkte zwischen Rad und Schiene getroffen und daraus mögliche zukünftige Prognosen über das Verschleißverhalten der Rillenschienen getätigt werden. Anhand von spannungsbasierenden Messdaten wird ein FE-Modell aufgebaut, um das Verhalten bei einem definierten Rad- und Schienenprofil nachzubilden. Um die Kalibrierungsdaten für die FEM zu erhalten wird ein Messbereich benötigt, welcher im nachfolgenden Abschnitt genauer erläutert wird.

3 Messabschnitt

3.1 Gewählter Messabschnitt

Um das Verschleißverhalten eines Abschnittes über einen längeren Zeitraum beobachten und Messdaten jederzeit abrufen zu können, wird ein geeigneter Messbereich benötigt. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde ein Messbereich unter den folgenden Randbedingungen ausgewählt:

- ein eingedeckter Oberbau mit kaum verschlissenen bzw. neu verlegten Rillenschienen
- leichte Zugänglichkeit zu der Messstelle
- kleiner Radius, um ein möglichst zügiges und ausreichendes Verschleißverhalten zu erhalten

Ein den definierten Randbedingungen entsprechender Messbereich wurde in der Svetelskystraße-Etrichstraße in Wien gefunden, welcher einen neu eingedeckten Oberbau, einen Radius von 49,6 m und zusätzlich eine gute Zugänglichkeit zu der Messstelle aufweist. In diesem Bereich herrscht ausschließlich Fußgänger - Radverkehr, somit sind weitere Einflüsse vom Mischverkehr ausgeschlossen (außer durch Betriebsfahrzeuge der Wiener Linien). [2]

Der ausgewählte Bogen besitzt keine Überhöhung und weist ein Schienenprofil 60R1 mit einer Schienengüte von R 290 GHT auf. Weitere Eigenschaften des Gleises sind die kontinuierliche Lagerung und eine Spurweite von 1435 mm (Regelspur), welche aber aufgrund der Bogenfahrt mit einer etwas größeren Spurweite trassiert worden ist, um den Spurkranz mehr Platz bei der Bogenfahrt zu ermöglichen. [2] Je nachdem welcher Fahrzeugtyp eingesetzt wird, ist eine maximale Geschwindigkeit von 30 km/h möglich.

3.1.1 Querschnittsaufbau

Grundsätzlich kann zwischen dem offen und dem geschlossenen Oberbau unterschieden werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird aufgrund des ausgewählten Messbereiches nur der geschlossene Oberbau betrachtet. Im Allgemeinen kommt der geschlossene Oberbau zur Anwendung, wenn Kraftfahrzeugverkehr, also nicht schienengebundene Fahrzeuge, die Gleisanlage befahren sowie Fußgänger die Gleisanlage begehen. Dadurch wirken auf den Oberbau Beanspruchungen aus dem Schienen und Kraftfahrzeugverkehr. Für die Aufnahme der Beanspruchungen sind Anforderungen an folgende Komponenten zu stellen: an die Schienen, die Auflagerung, die Eindeckung, die Tragschicht und an die Entwässerung. [3] Wesentliche Anforderungen, welche das Straßenbahngleis betreffen sind laut der VDV-Schrift 604 folgende: [3, S. 16]

- ERHALTUNG DER SPUR- UND LAGEGENAUIGKEIT
- FREIHALTUNG DES SPURKANALS
- GUTE ENTWÄSSERUNG DER SCHIENENRILLE
- GLEICHMÄßIGE VERTEILUNG DER LAST AUF DIE TRAGSCHICHT UNTER DEM GLEIS

Im Allgemeinen kann die Auflagerung der Schienen entweder auf Einzelstützpunkte oder auf einen kontinuierlich gelagerten Unterguss basieren. Für die Spurerhaltung kommen vor allem Spurstangen oder Schienenbefestigungen (oder beide in Kombination) zum Einsatz. Abhängig von den optischen oder funktionalen Anforderungen werden Pflasterdecken/Plattenbeläge, Asphalteindeckungen, Betoneindeckungen oder Eindeckungen mit einer hochliegenden Vegetationsschicht eingesetzt. [3]

3.1.1.1 Vorhandener Querschnitt im Messbereich

Der betrachtete Oberbau im Messbereich ist eine Ausführungsform der Festen Fahrbahn, dabei wird eine Gleistragplatte für die kontinuierliche Schienenauflagerung gefertigt. Spurstangen verbinden die beiden Schienen miteinander. Nach der Justierung der Spurstangen in die gewünschte Lage wird ein Betonfundament darunter gegossen. Zwischen Schienenunterkante und Gleistragplatte wird noch eine dünne elastische Schicht dazwischen gelegt, ein sogenanntes Fußprofil aus SBR-Gummi (Styrol-Butadien-Kautschak). [4] Durch vorgefertigte Großflächenplatten erfolgt dann die Eindeckung, dadurch entstehen Querfugen ca. alle 1,5 m. [5]

Der Querschnittsaufbau des betrachteten Messbereichs setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen und ist in der Abbildung 3-1 bildlich dargestellt. [5]

- Gleistragplatte (Bestand)
- 15 cm Gleistragplatte
- Fußprofil aus SBR-Gummi
- Kammerfüllelement
- Rillenschiene 60R1
- Splitt
- Stahlbeton Großflächenplatten

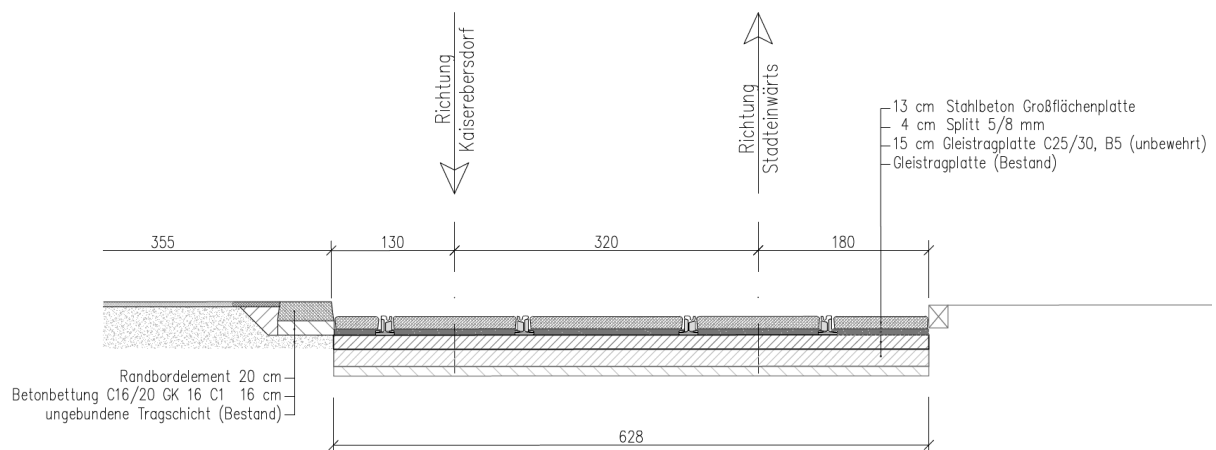


Abbildung 3-1: Querschnittsaufbau [5]

Für die Befestigung in der Lage dienen folgende Halterungen:

- Spurstangen
- Klemmplatten
- Seitliche Halterungen

3.1.2 Fahrzeugtype

Im vorhandenen Messbereich kommt es zum Einsatz von Niederflur- und Hochflurstraßenbahnen. In Absprache mit den Wiener Linien werden die Niederflurstraßenbahnen mit dem Schienenfahrzeugtype Siemens ULF-B1 als Referenzfahrzeug für die Auswertung herangezogen.

Der siebenteiliger ULF-B/B1 Type gehört zu den Langzügen (35,47 m) des Typs ULF und der fünfteilige ULF-A/A1 Type gehört mit einer Länge von 24,21 m zu den Kurzzügeln. ([6] zitiert nach [7]) Der B1 Type besitzt eine maximale Achslast von < 12 t, eine Höchstgeschwindigkeit

von 70 km/h mit einer Anfahrbeschleunigung von $1,3 \text{ m/s}^2$ und kann mit einer Kapazität von 4 Personen/m² insgesamt 207 Passagiere transportieren. [8] Die Abkürzung „ULF“ steht für „Ultra Low Floor“ und zeichnet sich durch die weltweit niedrigste Einstiegshöhe von 19,7 cm aus. [9] Durch die niedrige Einstiegshöhe kann keine Achsverbindung zwischen den Rädern beider Wagenseiten hergestellt werden. Es handelt sich somit um radial steuerbare Losradeinheiten, welche in den Portalfahrwerken angeordnet sind. Durch eine spezielle Fahrzeugkonstruktion kann eine gelenkige Verbindung der einzelnen Wagenkastensegmente und Portale realisiert werden. ([6] zitiert nach [7]) Integrierte Antriebs- und Bremsseinheiten sind im Portal seitlich federnd aufgehängt und beim B/B1 Typ werden die vier Mittelportale angetrieben. [8]

Durch die vertikal angeordneten Motoren an beiden Außenseiten der Portale (beim ULF B/B1 sind es insgesamt acht Motoren) werden über Winkelgetriebe die einzelnen Losradeinheiten angetrieben. Schwenkbare Losradeinheiten werden in der ersten (führenden) und im letzten Portal in den Einzelfahrwerken, welche radial einstellbar sind, eingebaut. Um eine Reduzierung des Anfahrwinkels zu gewährleisten verfügen die Losradeinheiten eine Richtungskorrekturmöglichkeit von bis zu 5° . Um einen optimalen Bogenverlauf in längeren Bögen sicherzustellen, beginnt bereits in der Geraden das Losradpaar des letzten Portals mit dem Anlaufen in Richtung Außenschienen. Eine quasiradiale Stellung der Räder wird in den anderen Gelenkportalen durch die Winkelsymmetrale der benachbarten Fahrgastmodule erzeugt. ([6] zitiert nach [10]) Entscheidend für die Spurführung von Einzelradfahrwerken ist die Radprofilform. Die Geometrie muss eine von der Radstirn bis zum Radrücken hin eine immer größer werdende Steigung aufweisen. [11]



Abbildung 3-2: Fahrzeugtype ULF-B/B1 [12, S. 2]

Grundsätzlich kommt es bei Fahrzeugtypen, welche starrachsig ausgelegt sind, zu vier wesentlichen Extremstellungen in einem engen Bogen. Dazu zählen der Freilauf, Spießgang, Außensehnenstellung und Innensehnenstellung. Der betrachtete Fahrzeugtype, welcher nicht starrachsig konzipiert ist und durch die besondere Bauweise eine radiale Selbsteinstellbarkeit der Räder zum Bogenmittelpunkt ermöglicht, kann (laut Theorie) eine optimale Position im Bogen, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, einnehmen. ([6] zitiert nach [13])

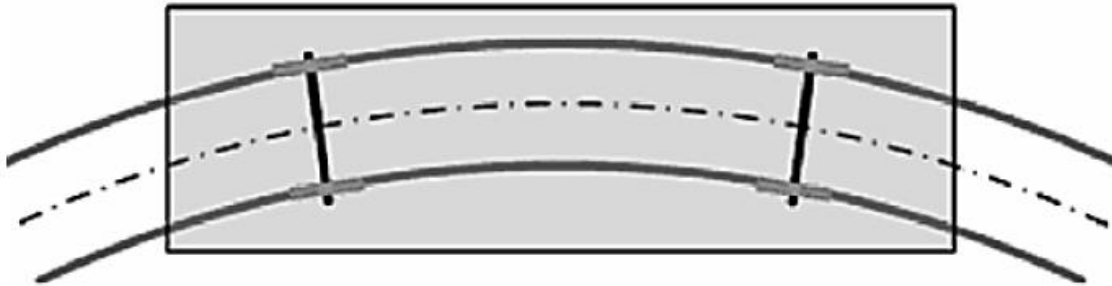


Abbildung 3-3: Radsätze bei Radialstellung ([6], Abb. 1.21 zitiert nach [13])

3.2 Aufbau der Messstelle

Um das Verschleißverhalten und das Verhalten bei Überfahrten zu erfassen, werden Dehnmessstreifen dauerhaft und Lasersensoren temporär angebracht. Um das Spannungsverhalten der Rillenschiene im Bogen nachvollziehen zu können werden insgesamt drei Messquerschnitte definiert. Der erste Messquerschnitt befindet sich im Bogenanfang (BA), der zweite Messquerschnitt in Bogenmitte (BM) und der dritte Messquerschnitt befindet sich am Bogenende (BE). Aus Sicherheitsgründen wurde noch eine Ersatzmessstelle in Bogenmitte angebracht, falls es zu mehrfachen Ausfällen von Dehnmessstreifen kommt. In der Abbildung 3-4 ist ein Überblick über die Positionierung der Messquerschnitte ersichtlich.

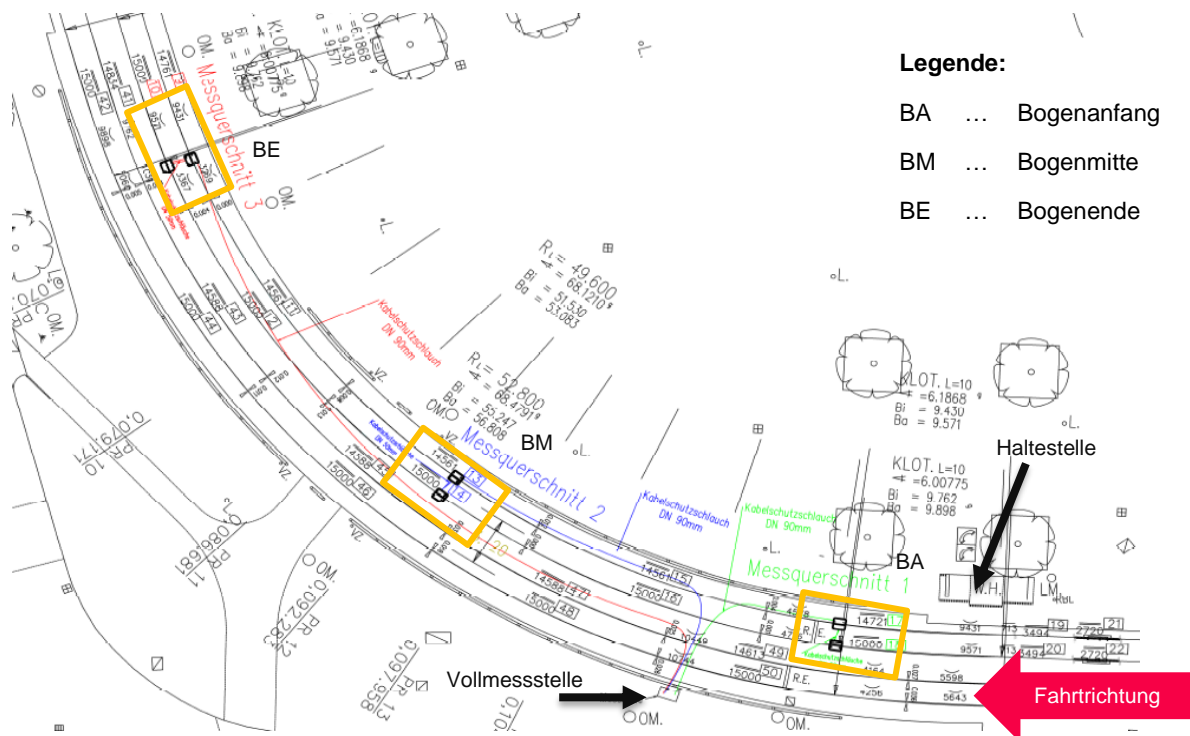


Abbildung 3-4: Positionierung der Messquerschnitte [2]

Pro Schiene werden jeweils 7 Dehnmessstreifen (DMS) angebracht, was in Summe pro Messquerschnitt 14 DMS ergibt. Die Lasersensoren werden temporär bei jeder Messung montiert und nicht dauerhaft eingebaut. Durch die Positionierung der Lasersensoren am Kopf und am Fußbereich kann die Verkipfung (Bewegung) der Schiene bei einer Überfahrt bestimmt und nachvollzogen werden. Insgesamt werden pro Messquerschnitt 6 Lasersensoren montiert, also pro Schiene 3 Lasersensoren. In der Abbildung 3-5 sind die Positionierungen der DMS und der Lasersensoren je Messquerschnitt ersichtlich.

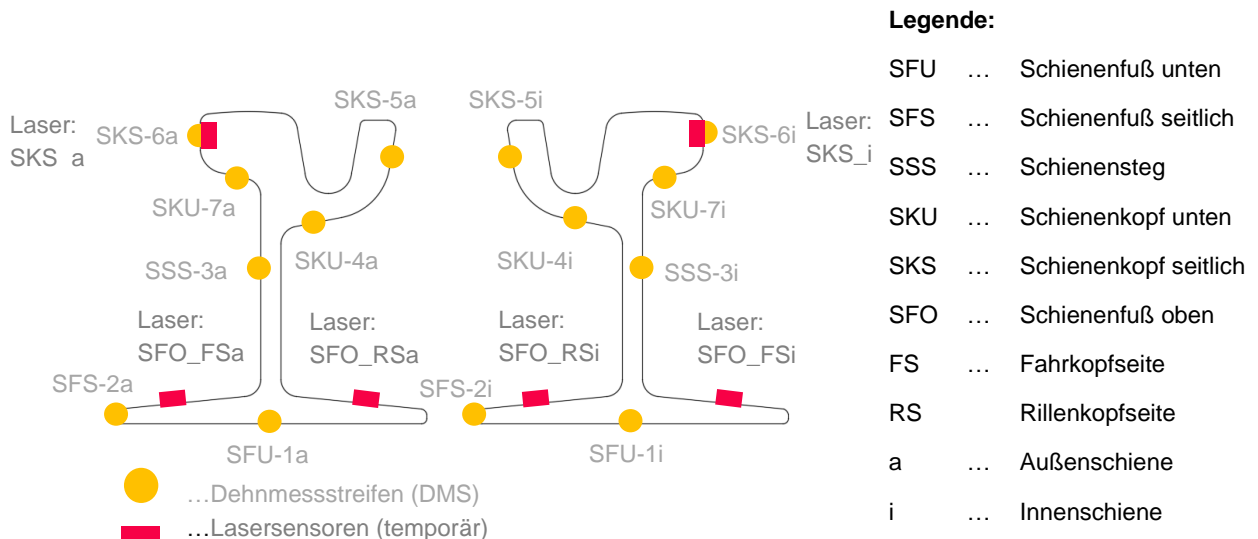


Abbildung 3-5: Positionierung der DMS und der Lasersensoren eines Messquerschnittes [eigene Darstellung]

3.2.1 DMS Funktionsweise

Für die Ermittlung des Spannungszustandes in Werkstoffen kommen Dehnmessstreifen (DMS) zum Einsatz, welche die relative Längenänderung (Dehnung) erfassen. Die Messung beruht dabei auf der Widerstandsänderung, aus welcher sich im weiteren DMS-Dehnungen ableiten lassen. Bei einer positiven Dehnung (Verlängerung) wird der elektrische Widerstand vergrößert und bei einer negativen Dehnung (Stauchung) wird der elektrische Widerstand verringert. [14] Die Messung des Dehnungsunterschiedes wird vom Ausgangszustand (z.B. lastfreien Zustand) in den veränderlichen Zustand gemessen. [15] Die Berechnung der Dehnung des DMS ist in der Gleichung 3-1 dargestellt.

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

ΔR	...	Widerstandsänderung im DMS aufgrund der Dehnung [Ω]
R_0	...	Grundwiderstand des DMS [Ω]
k	...	k -Faktor (Empfindlichkeit) des DMS (= 2,09 - wird im Messprogramm eingestellt)
ε	...	zu messende Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Gleichung 3-1: Dehnung des DMS [14]

Aufbau der DMS: wie in der Abbildung 3-6 ersichtlich, besteht der DMS aus einer Deckschicht, einem Träger, einem Messgitter und aus Anschlüssen. [14]

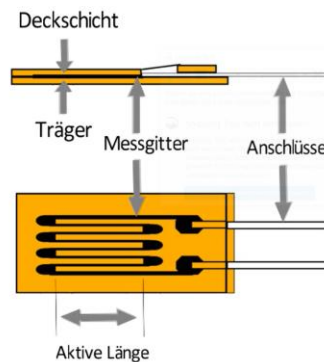


Abbildung 3-6: Aufbau der Dehnmessstreifen [14]

DMS Anordnung: es kommen nur Einzel-Folien DMS zum Einsatz, d.h. es wird nur ein Messgitter angebracht und keine Rosette mit DMS angeordnet. Somit werden nur Normaldehnungen gemessen und dadurch im Messgitter eine Dimensionsänderungen hervorrufen, wodurch der elektrische Widerstand des DMS verändert wird. Reine Schubdehnungen bewirken keine Längenänderung des Gitters welche für eine Widerstandsänderung des DMS sorgen. [16] Aufgrund des Einsatzes von lediglich Einzel-DMS kann über das Hookesche Gesetz die Spannungsberechnung wie in der nachstehenden Gleichung 3-2 erfolgen. [15]

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

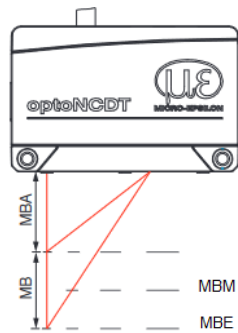
σ ... Spannung [N/mm²]
 ε ... Dehnung [μ m/m]
 E ... Elastizitätsmodul [N/mm²] (Stahl = 210000 N/mm²)

Gleichung 3-2: Hookesche Gesetz - Spannungsberechnung [15]

3.2.2 Laser Funktionsweise

Unter Anwendung des Prinzipes der optischen Triangulation wird auf die Oberfläche eines Messobjektes ein Lichtpunkt projiziert. Ein Empfängeroptik ist auf die optische Achse des Laserstrahls unter einem bestimmten Winkel ausgerichtet und reflektiert den diffusen Anteil des Lichtpunktes und bildet dies abstandsabhängig auf einem ortsauflösenden Element ab. Aufgrund des Ausgangssignales des ortsauflösenden Elements berechnet ein Signalprozessor den Abstand des Lichtpunktes, welcher vom Messobjekt bis zum Sensor reicht und anschließend wird dieser Abstandswert linearisiert und ausgegeben. [17]

Bei der Positionierung des Lasersensors ist zu beachten, dass der Abstand bis zum Messbereichsanfang eingehalten wird, ansonsten können keine Abstandswerte ausgegeben werden (siehe Abbildung 3-7).



Legende:

- MB – Messbereich
- MBA – Messbereichsanfang
- MBM – Messbereichsmitte
- MBE – Messbereichsende

Abbildung 3-7: Lasersensor [17, Abb. 5]

4 Erste Messung

Um das Verhalten der Rillenschiene in Hinblick auf die Spannungen und auf die Verkipfung zu verstehen, werden im Zuge der ersten Messung sämtliche Spannungen und Verkipfungen aufgezeichnet, damit das Verhalten im Normalbetrieb analysiert werden kann.

Die erste Messung erfolgte im Zeitraum vom 20.10. bis 22.10.2022. Es wurden alle drei Messquerschnitte (einschließlich der Ersatzmessstelle) gemessen, dabei dauerte die Messung je Messquerschnitt eine Stunde. Die Uhrzeiten und die Fahrzeugnummern wurden dabei dokumentiert, damit anschließend Rückschlüsse auf die Fahrzeugtypen gezogen werden können. Zusätzlich zu den DMS wurden noch die sechs Lasersensoren montiert, damit mögliche Verkipfungen der Schiene gemessen werden.

Aufgrund von unbekannten äußeren Einflüssen auf die Messeinheiten kam es zu einem defekten DMS im Kopfbereich des 1. Messquerschnittes und zu einem weiteren defekten DMS im Kopfbereich des 3. Messquerschnittes. Bei den Lasersensoren kam es aufgrund der zu gering eingehaltenen Abständen zum Messbereichsanfang zu Ausfällen während den Überfahrten.

4.1 Auswertung der ersten Messung

Die Auswertung erfolgt für alle drei Messquerschnitte getrennt. Durch die Dokumentation der Messung über die einzelnen Schienenfahrzeugtypen konnten die Messungen mit Abgleich der Fahrzeugliste der Wiener Linien auf folgende Schienenfahrzeugtypen zusammengefasst werden (siehe Tabelle 4-1). Der Fokus der Auswertung liegt beim Fahrzeugtype ULF-B1 und dessen Ergebnisse werden im Zuge dieser Arbeit behandelt.

Tabelle 4-1: Schienenfahrzeugtypen [18]

<i>Fahrzeugnummer</i>	<i>Fahrzeugtypen</i>
301-339	Bombardier Flexity Wien (Typ D)
601-699	Siemens ULF-B
700-801	Siemens ULF-B1 (langer ULF)
4001-4098 + 1401-1517	SGP Type E2 + Bombardier Type c5
4301-4324 + 1401-1517	Lohner Type E2 + Bombardier Type c5

Bei der Auswertung der Daten werden die Ausreißer durch einen Butterworth-Lowpass-Filter mit einer geeigneten Frequenz entfernt und anschließend jene Peaks herangezogen an denen die sechs Achsen des ULF-B1 die Messbereiche überqueren. Für die Geschwindigkeitsbestimmung werden die Messdaten vom Schienenfuß herangezogen aufgrund der präziseren Peak- und Zeitbestimmung. Aus der ersten Messung konnten dann erste Erkenntnisse über das Verhalten der Rillenschiene bei einer Überfahrt gezogen werden.

Die Auswertung der Messdaten der ersten Messung spiegelt das Fahrverhalten im allgemeinen Betrieb wieder. Aufgrund der Haltestelle welche vor dem ersten Messquerschnitt ist, treten keine großen Geschwindigkeiten im Bogen auf.

4.1.1 Dehnmessstreifen:

Die einzelnen Überfahrten hatten Geschwindigkeiten im Bereich von 10 – 18 km/h. Grundsätzlich ist zu beobachten, dass im Fuß- und im Stegbereich positive, im Rillenkopfbereich überwiegend negative (Stauchung) und im Fahrkopfbereich wiederum positive (Dehnung) Spannungen auftreten.

Bei der Auswertung der Peaks ist zu beobachten, dass im Fußbereich klare Spannungsspitzen auftreten, aufgrund der erhöhten Steifigkeit und der besseren fixierten Lage. Im Kopfbereich kommt es zu größeren Schwankungen um den Peakbereich, dies ist zum einen auf die besondere Kopfgeometrie der Schiene zurückzuführen und unter anderem auf die statischen Kräfte von der Berührfläche und von den dynamischen Kräften von der Überfahrt.

Da bei jedem Messquerschnitt eine Überfahrt mit ca. 15 km/h stattgefunden hat, werden diese Überfahrten zur Veranschaulichung hergenommen, um die Unterschiede zwischen den drei Messquerschnitten im Normalbetrieb aufzuzeigen und zu vergleichen.

In den nachstehenden Abbildungen werden für jeden Messquerschnitt getrennt für die Innenschiene und für die Außenschiene die Spannungsverteilung der einzelnen Achsen in einer Boxplotverteilung bei den ausgewählten Überfahrten von ca. 15 km/h dargestellt. Um die nachfolgenden Abbildungen mit den jeweiligen Spannungsverteilungen besser nachzuvollziehen, wird in der Abbildung 4-1 ein Überblick über die einzelnen DMS-Messpositionen gegeben. Die detaillierte Auflistung der einzelnen Spannungswerte kann je Achse dem „Anhang A: Messwerte der ersten“ entnommen werden.

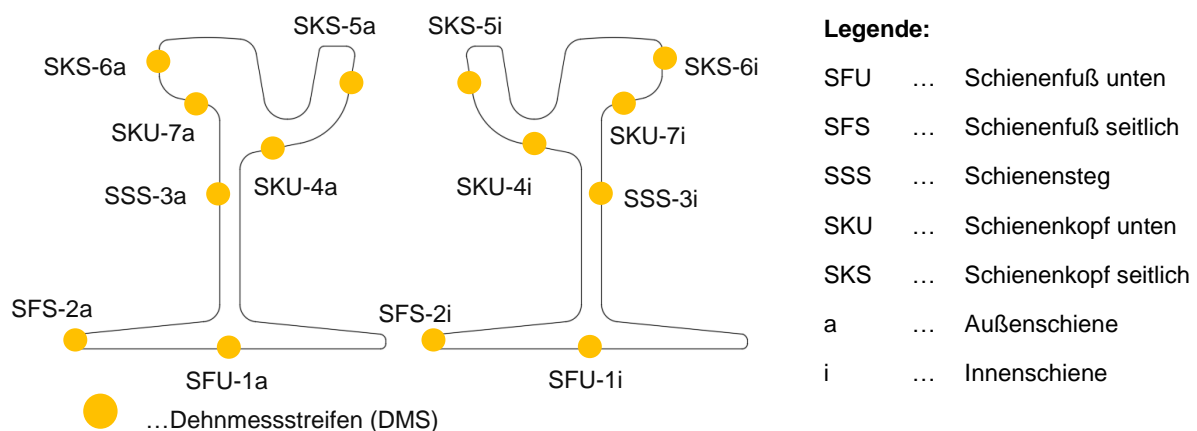


Abbildung 4-1: DMS-Messpositionen [eigene Darstellung]

1. Messquerschnitt (Bogenanfang):

Ein Vergleich der Spannungen der Innenschiene (siehe Abbildung 4-2) mit den Spannungen der Außenschiene (siehe Abbildung 4-3) zeigt, dass ein wesentlicher Spannungsunterschied zwischen Außen- und Innenschiene an der Schienenfußunterseite (SFU_1), der Schienenfußseite (SFS_2) und an der Fahrkopfunterseite (SKU_7) entsteht. In Hinblick auf den Fuß- und Stegbereich ist zu erkennen, dass bei der Bogeneinfahrt die Innenschiene mehr in Anspruch genommen wird als die Außenschiene. Die geringere Beanspruchung der Außenschiene ist ebenfalls in der geringeren Schwankungsbreite der einzelnen gemessenen Radüberfahrten zu erkennen. Grundsätzlich ist sowohl bei der Innen- als auch bei der Außenschiene ersichtlich, dass je näher die Messpositionen im Kopfbereich sind, desto mehr Schwankungen in den Messwerten zu erkennen sind, dies ist vor allem der Nähe des Radkontaktes geschuldet.

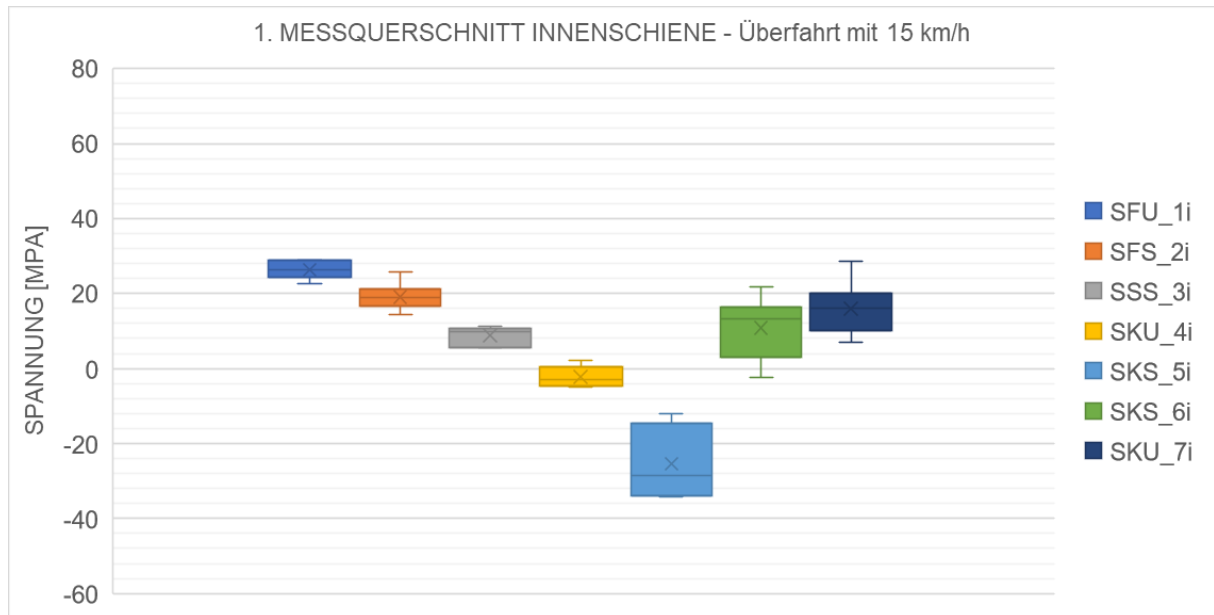


Abbildung 4-2: 1. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]

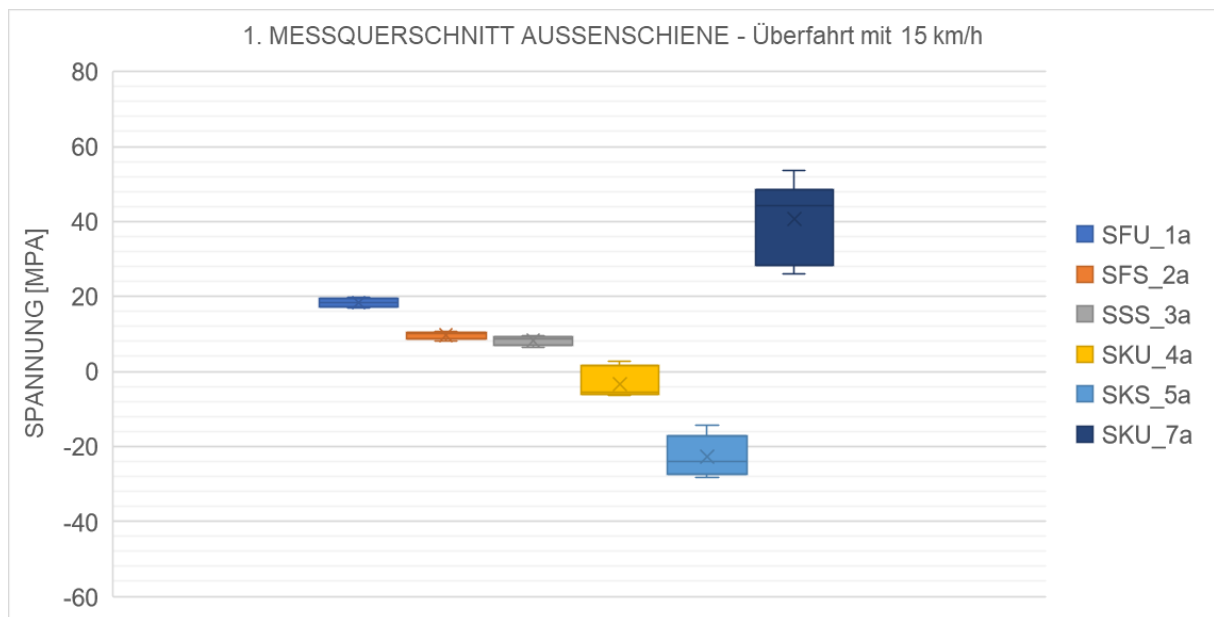


Abbildung 4-3: 1. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]

2. Messquerschnitt (Bogenmitte):

Die gemessenen Spannungen in der Bogenmitte weisen vor allem in der Innenschiene deutlich geringere Spannungsschwankungen auf als beim ersten Messquerschnitt. Im Vergleich zu der Innenschiene wird die Außenschiene höher belastet, vor allem im Kopfbereich (siehe Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5). Dies spiegelt das Fahrverhalten im Bogen wieder, da aufgrund der Fliehkraft das Fahrzeug nach bogenaußen gedrückt wird und die Räder gegen die Außenschiene anlaufen.

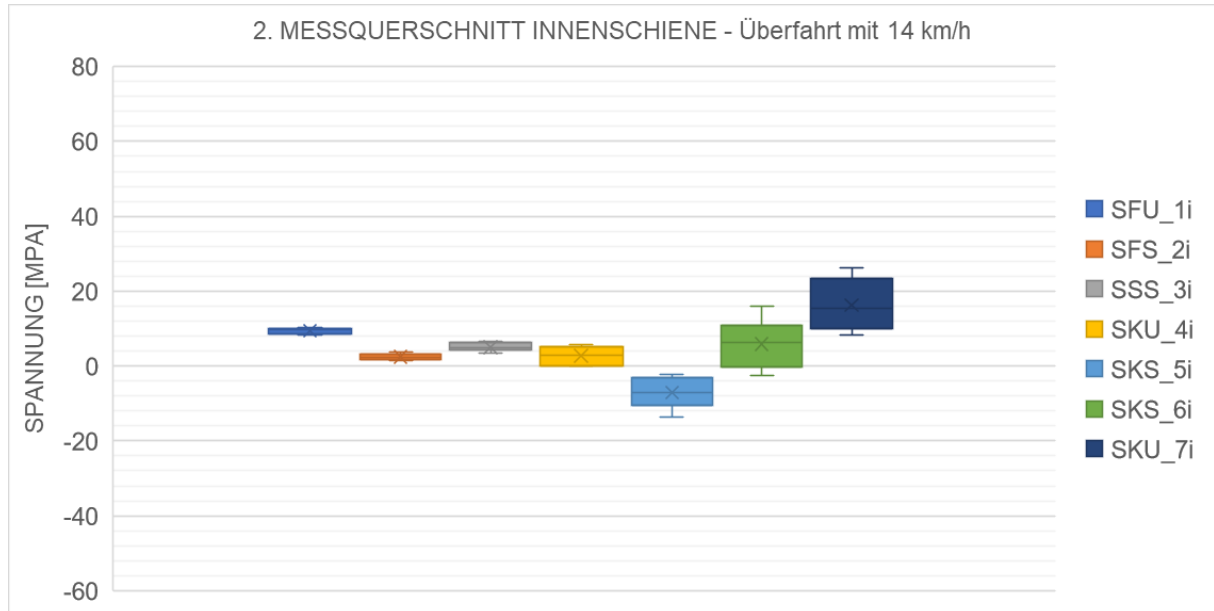


Abbildung 4-4: 2. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (14 km/h) [eigene Darstellung]

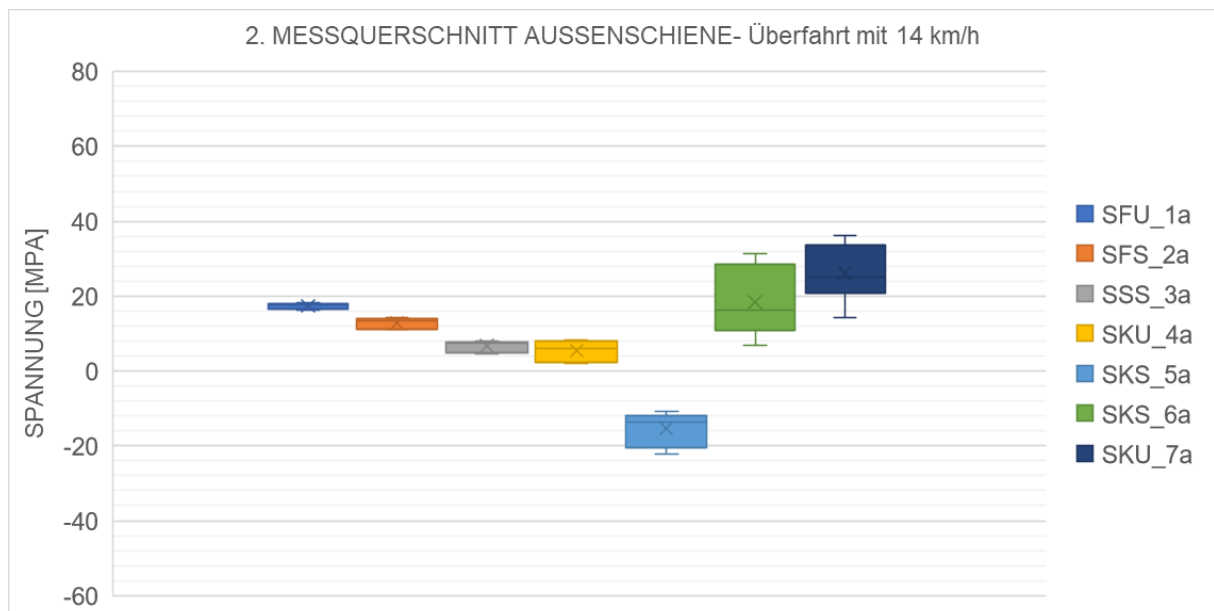


Abbildung 4-5: 2. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (14 km/h) [eigene Darstellung]

3. Messquerschnitt (Bogenende):

Die gemessenen Spannungen in der Bogenausfahrt weisen vom Spannungsbereich von den einzelnen gemessenen sechs Losradpaaren keine großen Unterschiede im Vergleich zum ersten Messquerschnitt (Bogenanfang) auf (siehe Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass in der Bogenausfahrt die Innenschiene und die Außenschiene annähernd gleich in Anspruch genommen werden. Die großen Spannungsschwankungen vor allem im Kopfbereich sind vor allem dem Losradpaar des ersten und letzten Portals geschuldet, welche einen meist höheren Wert als die mittleren vier Antriebsräder aufweisen. In der Tabelle 4-2 wird der Spannungsunterschied der einzelnen Achsen an den Messpositionen am Kopf SKU_6a und SKU_7a veranschaulicht.

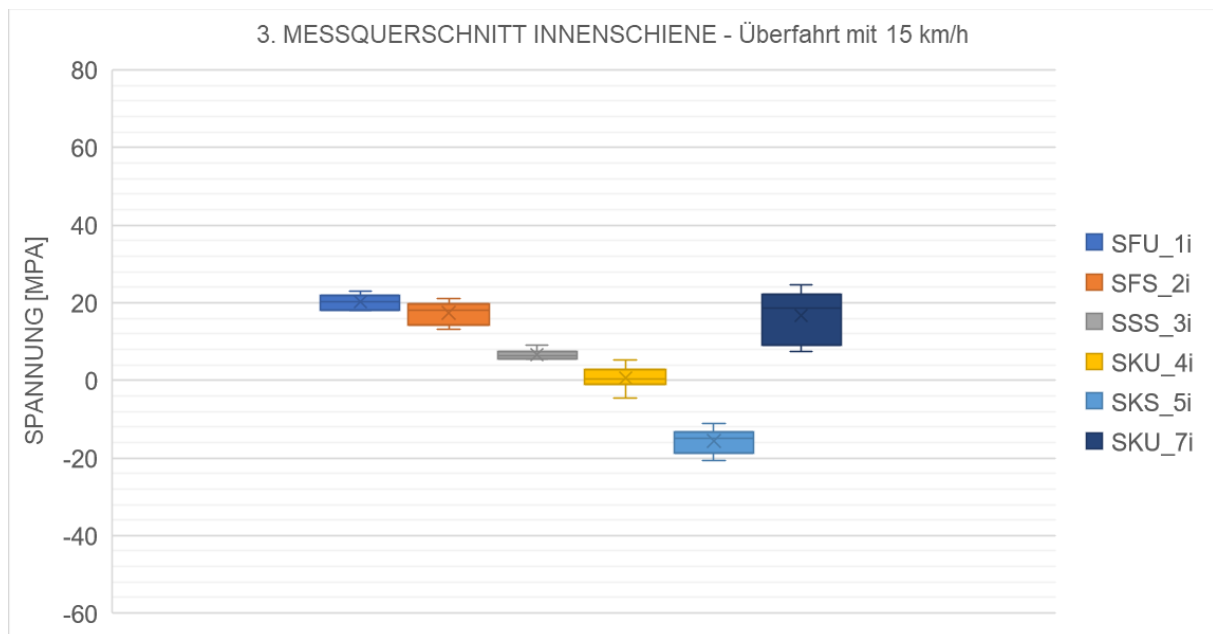


Abbildung 4-6: 3. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Innenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]

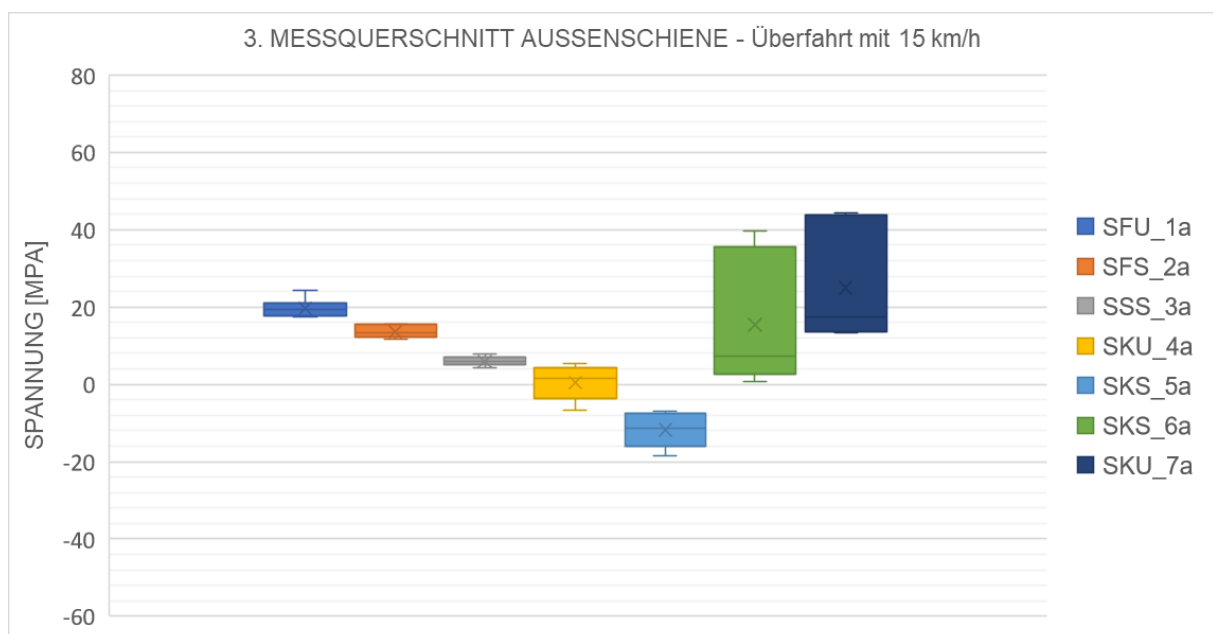


Abbildung 4-7: 3. Messquerschnitt - gemessene Spannungen an der Außenschiene (15 km/h) [eigene Darstellung]

Tabelle 4-2: Detaillierte Auflistung der einzelnen Spannungswerte je Achse [eigene Darstellung]

Achse	SKU_6a Spannungen [MPa]	SKU_7a Spannungen [MPa]
1	33,98	43,67
2	3,16	13,28
3	0,63	13,56
4	6,42	19,52
5	8,09	15,25
6	39,79	44,31

4.1.2 Lasersensoren:

Aufgrund der höheren Ausfallrate der Lasersensoren konnte keine präzise Aussage über das Kippverhalten der Rillenschiene bei einer Überfahrt getroffen werden. Für die Auswertung der vorhandenen Messdaten wird die Auslenkung des Schienenkopfes und die Einsenkung des Schienenfußes in einer Boxplotverteilung bei 15 km/h dargestellt, in der Boxplotverteilung werden die einzelnen Achsen berücksichtigt. Um die nachfolgenden Abbildungen mit den jeweiligen Verkippungen besser nachzuvollziehen, wird in der Abbildung 4-8 ein Überblick über die einzelnen Lasersensoren Positionen und die möglichen Auslenkungsrichtungen gegeben.

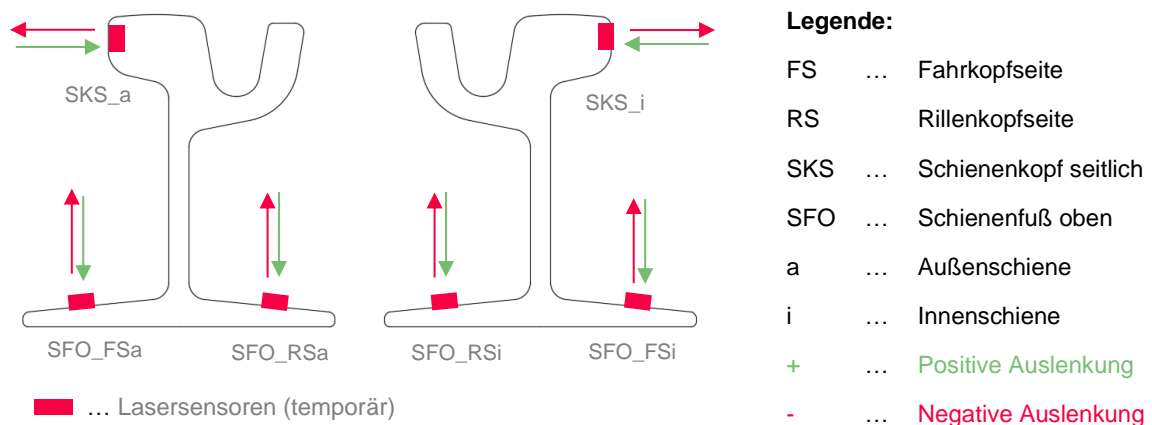


Abbildung 4-8: Lasersensoren Positionierung und gemessene Auslenkungsrichtungen [eigene Darstellung]

1. Messquerschnitt (Bogenanfang):

Im ersten Messquerschnitt konnte lediglich beobachtet werden, dass es zu einer vertikalen Einsenkung des Fußbereiches der Rillenschiene kommt. Ein Vergleich der Einsenkung auf der Fahrkopfseite (FSi) und der Rillenkopfseite (RSi) kann lediglich bei der Innenschiene erfolgen, dort ist die Einsenkung auf der Fahrkopfseite deutlich größer als die Einsenkung auf der Rillenkopfseite. Zusätzlich ist ein Einsenkungsunterschied zwischen Außen- und Innenschiene zu erkennen, die Innenschiene erfährt eine fast doppelte rillenseitige Einsenkung (RSi) als die Außenschiene (RSa). In der nachfolgenden Abbildung 4-9 sind die Einsenkungen für die Innen- und Außenschiene dargestellt.



Abbildung 4-9: Eiseinkung des 1. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]

2. Messquerschnitt (Bogenmitte):

Beim Messquerschnitt zwei fiel im Vergleich zu den anderen Messquerschnitten lediglich nur ein Lasersensor aus. Dadurch können präzisere Aussagen über das Verhalten der Rillenschiene in der Bogenmitte getroffen werden. Die Eiseinkungen auf der Innenschiene weisen auf der Fahrkopf- und Rillenkopfseite (FSi, RSi) eine annähernd gleiche Eiseinkung auf. Bei der Kopfauslenkung wurde auf der Innenschiene (SKS_i) eine sehr geringe Auslenkung und bei der Außenschiene (SKS_a) eine doppelt so große Auslenkung gemessen. Die Auslenkungs- und Eiseinkungswerte für die Innen- und Außenschiene sind in der Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 ersichtlich.



Abbildung 4-10: Eiseinkung des 2. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]



Abbildung 4-11: Auslenkung des 2. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]

3. Messquerschnitt (Bogenende):

Im dritten Messquerschnitt kam es zu zwei Ausfällen von Lasersensoren und die gemessenen Einsenkungen konnten nur auf der Fahrkopfseite bei der Innenschiene (FSi) und auf der Rillenkopfseite bei der Außenschiene (RSa) dokumentiert werden. Dadurch können keine präzisen Aussagen über das Verhalten hinsichtlich der Einsenkung getroffen werden (siehe Abbildung 4-12). Ein deutlicher Unterschied der Fahrkopfauslenkung ist zwischen Außen- und Innenschien zu erkennen, dabei lenkt die Fahrkopfseite der Innenschiene (SKS_i) mehr als die Außenschiene (SKS_a) aus (siehe Abbildung 4-13).

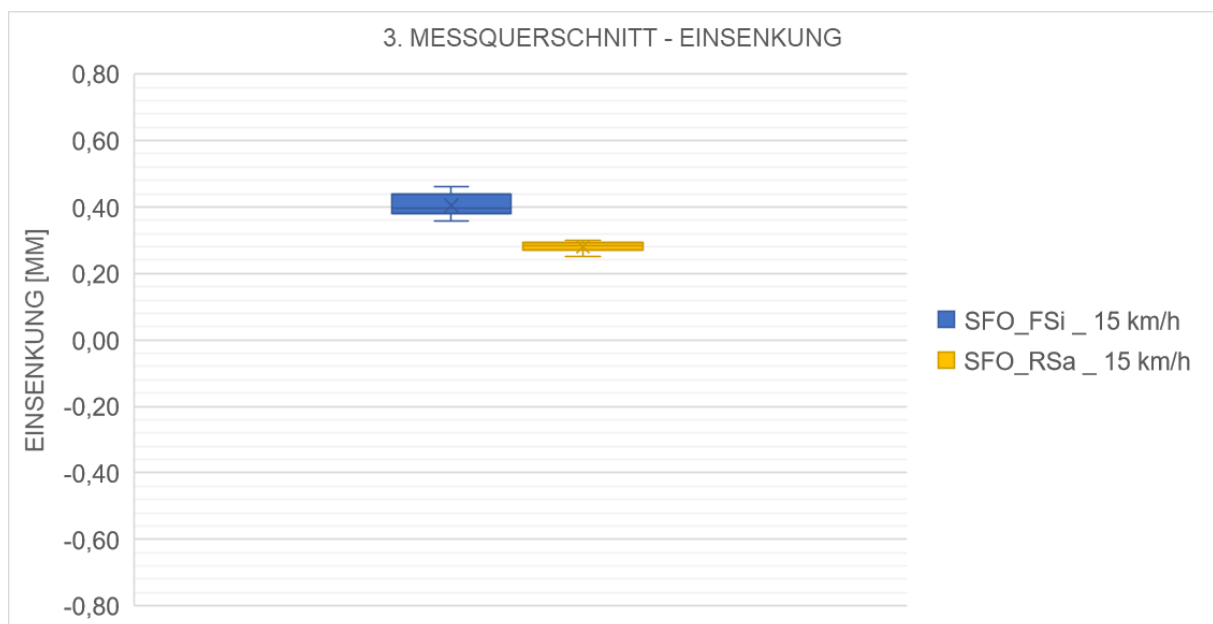


Abbildung 4-12: Einsenkung des 3. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]



Abbildung 4-13: Auslenkung des 3. Messquerschnittes (1. Messung) [eigene Darstellung]

5 Zweite Messung

Um spezifischere Messdaten zu erlangen wurde für die zweite Messung ein ausgewählter Fahrzeugtyp (Ulf B1) herangezogen. Im Zuge einer Nachtmessung wurden dann statische und dynamische Messungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Für die Bestimmung und Nachvollziehbarkeit des Rad-Schiene Kontaktes spielt das Radprofil und das Schienenprofil eine wesentliche Rolle. Daher wurde das Schienenprofil gemessen und die Radprofile des verwendeten Fahrzeugs zuvor in die Rädermessanlage für eine Radprofilmessung geführt. Ein Einblick über den Messaufbau der Nachtmessung liefert die Abbildung 5-1.



Abbildung 5-1: Nachtmessung [eigene Aufnahme]

Im Zuge der zweiten Messung wurde festgestellt, dass noch ein weiterer DMS an der Fahrkopfseite im 1. Messquerschnitt ausgefallen ist, insgesamt sind drei fahrkopfseitige DMS von insgesamt 56 DMS ausgefallen. Dafür sind, im Vergleich zur ersten Messung, deutlich weniger Lasersensoren ausgefallen.

5.1 Auswertung der zweiten Messung

Die Vorgehensweise der Auswertung der Daten kann aus dem Kapitel 4.1 „Auswertung der ersten Messung“ entnommen werden. Die statische Messung dient in erster Linie für die Kalibrierung der Simulation, welche im Kapitel 9.3 „Simulationskalibrierung“ genauer beschrieben ist. Die dynamischen Messungen mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten bis maximal 30 km/h soll mehr Aufschluss über das Spannungsverhalten der Rillenschienen bei einer Bogenfahrt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten geben.

Um die unterschiedlichen Bewegungs- und Spannungsverhalten der Rillenschiene bei den verschiedenen Geschwindigkeiten aufzuzeigen, werden für jeden Messquerschnitt Spannungs-, Auslenkungs- und Einsenkungsvergleiche mit den Geschwindigkeiten 5 km/h, 15 km/h, 25 km/h und mit der maximal möglichen Geschwindigkeit von 30 km/h aufgezeigt. Die verwendeten Messdaten für die Vergleiche sind Durchschnittswerte der einzelnen Überfahrten je Geschwindigkeit.

Um die nachfolgenden Abbildungen mit den jeweiligen Spannungsverteilungen besser nachzuvollziehen wird in der Abbildung 5-2 ein Überblick über die einzelnen DMS-Messpositionen gegeben.

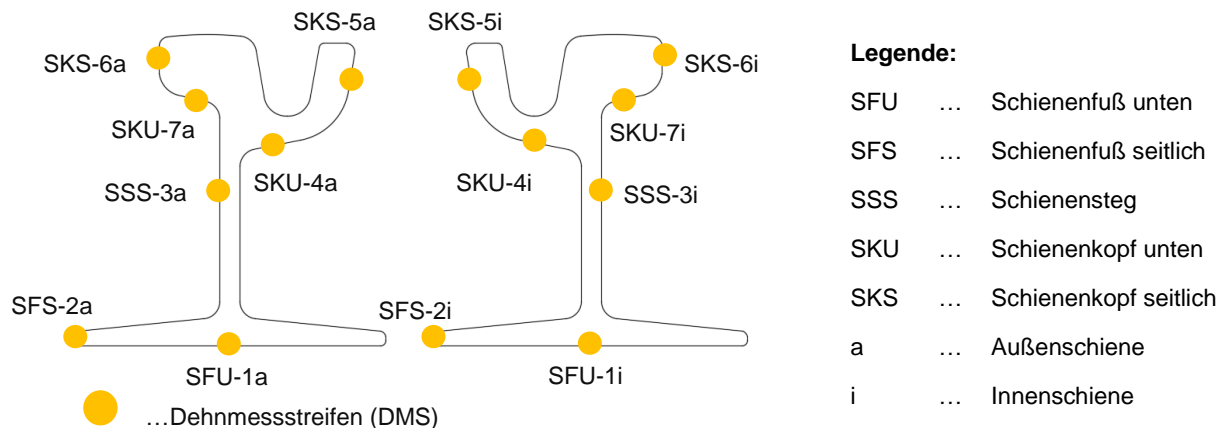


Abbildung 5-2: DMS-Messpositionen [eigene Darstellung]

5.1.1 Dehnmessstreifen

Um einen Vergleich zwischen den Messpunkten zwischen Außen- und Innenschiene aller drei Messquerschnitte bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten herzustellen, werden für die Außen- und Innenschiene jeweils getrennt die Schienenfußmesspunkte mit dem Stegmesspunkt, die Messpunkte auf der Rillenkopfseite und die Messpunkte auf der Fahrkopfseite dargestellt.

1. Messquerschnitt (Bogenanfang):

In den Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 sind die Spannungen auf der Schienenfußunterseite, Schienenfußseite und in der Stegmitte für die Innen- und Außenschiene dargestellt. Ein Vergleich der Schienenfußmesspunkte der Innenschiene (SFU_1i, SFS_2i) bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten zeigt, dass es bei der Innenschiene im Durchschnitt zu abfallenden Spannungswerten bei immer steigenden Geschwindigkeiten führt. Bei der Außenschiene steigen jedoch auf der Schienenfußunterseite (SFU_1a) die Spannungen an je höher die Geschwindigkeiten werden. Bei dem Messpunkt auf der Schienenfußseiten (SFS_2a) von der Außenschiene sinken die Spannungen im Durchschnitt nicht so stark bei zunehmender Geschwindigkeit, sondern bleiben annähernd gleich. Zusätzlich ist zu beobachten, dass die Spannungen am Schienenfuß bei der Innenschiene (SFU_1i, SFS_2i) eindeutig höher als bei der Außenschiene liegen (Ausnahme bei SFU_1i_30km/h). Bei der Betrachtung der Spannungen im Stegbereich fällt auf, dass bei der Innenschiene es zu abfallenden Werten bei steigender Geschwindigkeit kommt und bei der Außenschiene tendenziell zu höheren Spannungen.

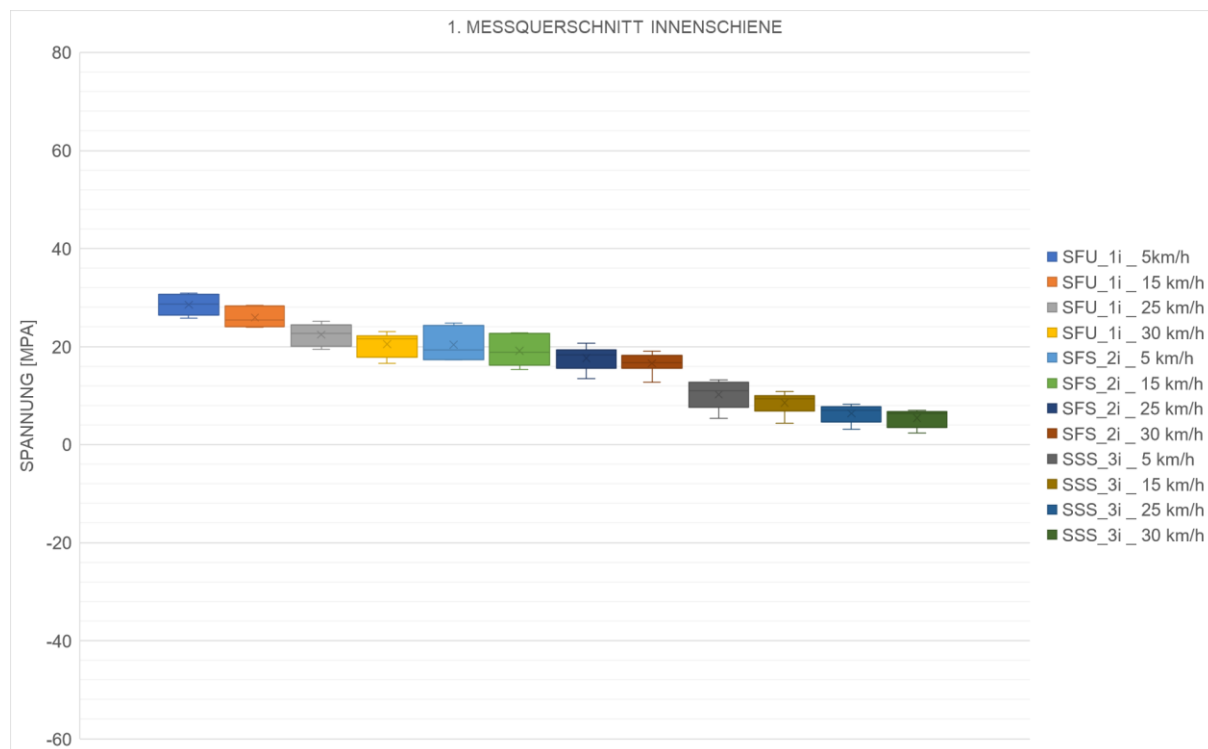


Abbildung 5-3: 1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

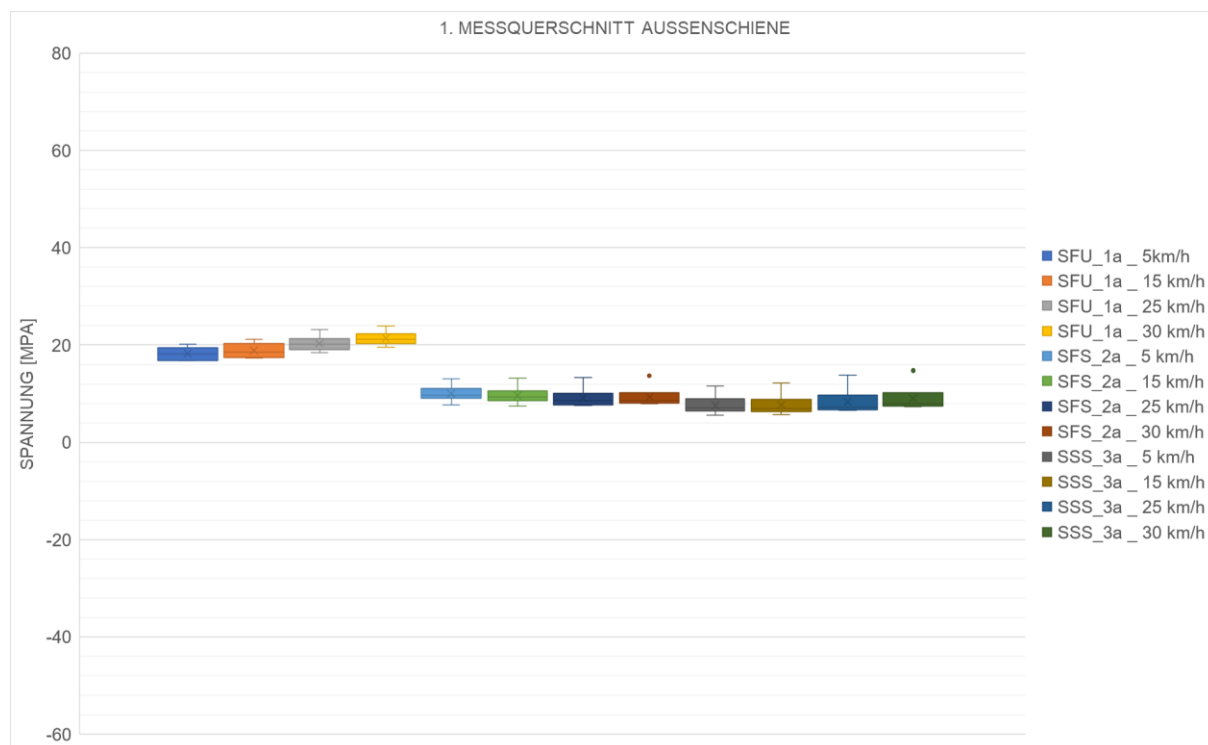


Abbildung 5-4: 1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

Bei der Spannungsbetrachtung der rillenkopfseitigen Messpunkte, welche für die Innenschiene in der Abbildung 5-5 und für die Außenschiene in der Abbildung 5-6 dargestellt sind, ist erkennbar, dass beim Messpunkt auf der Rillenkopfunterseite der Innenschiene (SKU_4i) es zu einer Erhöhung der Spannungen bei zunehmender Geschwindigkeit führt und bei der Außenschiene (SKU_4a) tendenziell zu einer Verringerung der Spannungen. Dieses gleiche Verhalten der Spannungen von der Rillenkopfunterseite der Innen- und Außenschiene ist ebenfalls beim Messpunkt auf der Rillenkopfseite (SKS_5i, SKS_5a) zu beobachten. Ebenfalls ist gut erkenntlich, dass es zu größeren Spannungsschwankungen bei den niedrigeren Geschwindigkeiten kommt als bei den höheren Geschwindigkeiten. Die enorme Beanspruchung der Rillenkopfunterseite bei der Außenschiene (SKU_4a) ist vor allem durch das Auftreten von negativen und positiven Spannungen zu erkennen. Vorwiegend kommt es zu negativen Spannungen in den mittleren Achsen und bei den ersten und letzten Achsen zu positiven. Beim Messpunkt auf der Rillenkopfunterseite bei der Innenschiene (SKU_4i) kommt es nur bei den Geschwindigkeiten von 5 km/h und 15 km/h zu vereinzelt negativen Peaks und bei den Geschwindigkeiten von 25 km/h und 30 km/h zu einheitlichen positiven Achsenspannungen. (siehe „Anhang B: Messwerte der zweiten “ unter 1. Messquerschnitt).

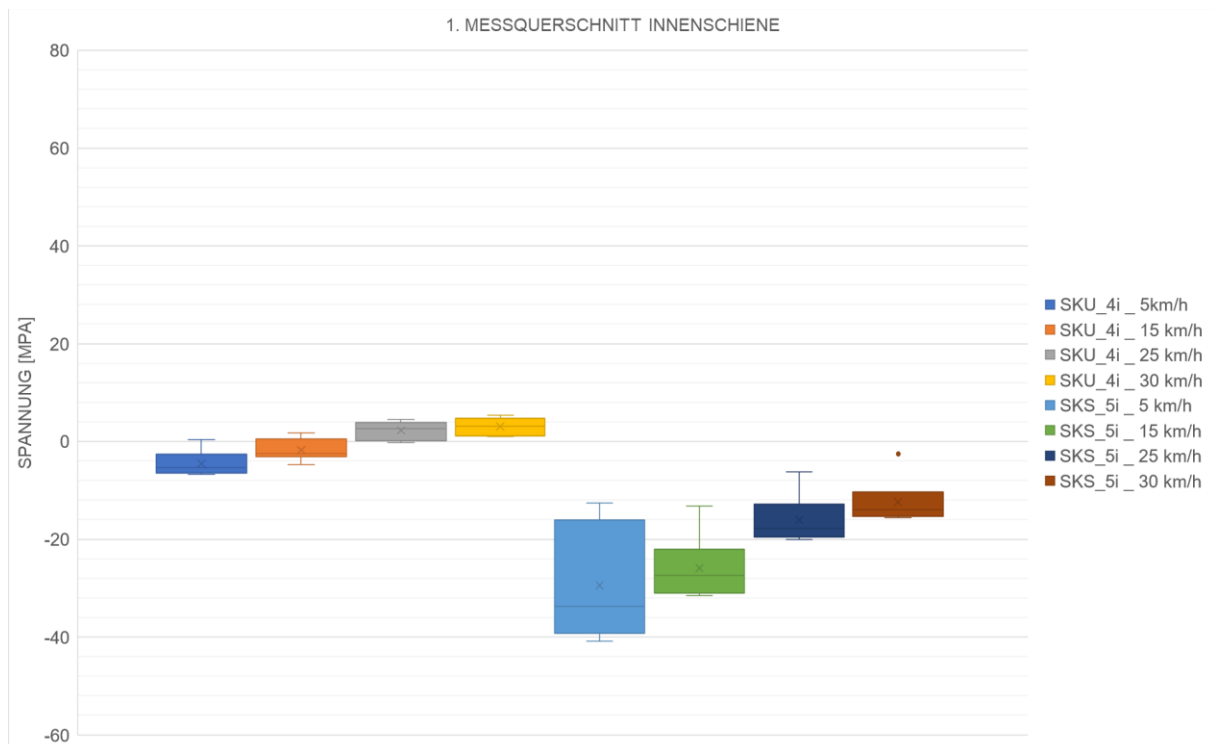


Abbildung 5-5: 1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]

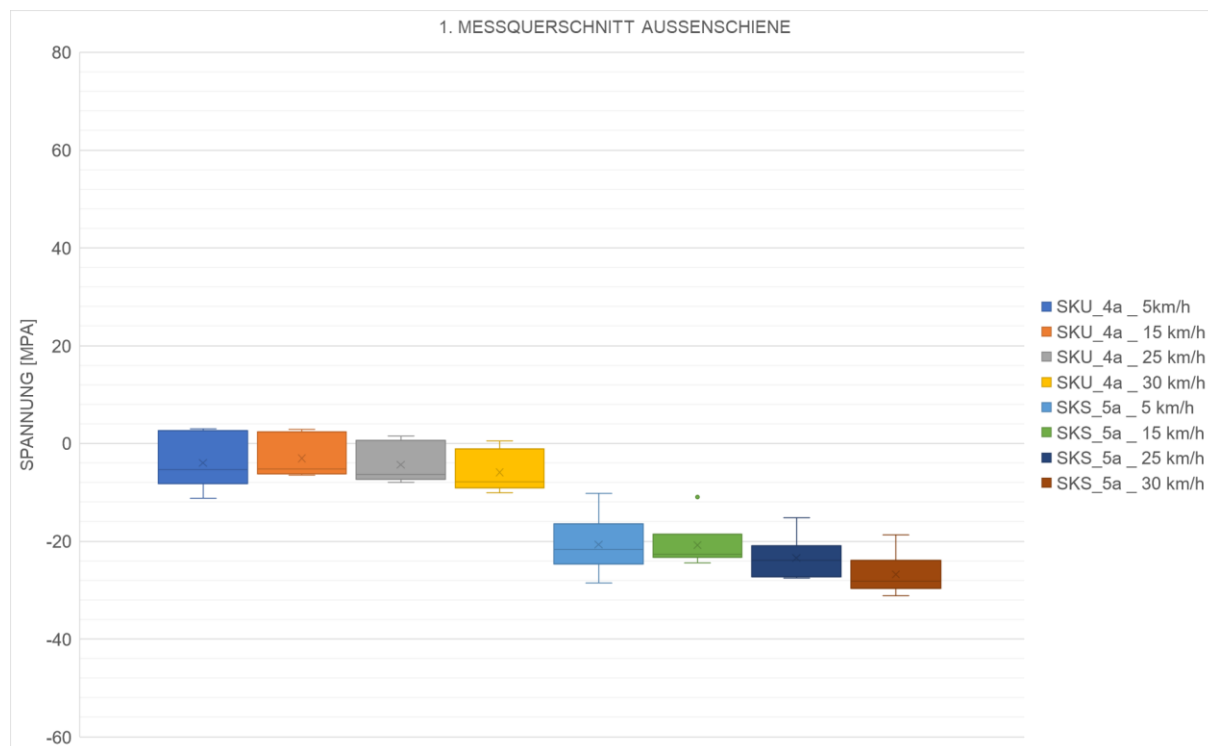


Abbildung 5-6: 1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]

Bei der Fahrkopfseite sind nur die Messdaten für die Spannungen auf der Schienenkopfunterseite (SKU_7) ersichtlich (siehe Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8). Deutliche Spannungsunterschiede sind zwischen der Außen- und Innenschiene zu erkennen, die Außenschiene besitzt deutlich größere Schwankungsbreiten und Spannungsgrößen im Vergleich zu der Innenschiene. Bei der Außenschiene kommt es zu deutlich höheren Spannungen im Vergleich zu der Innenschiene. Ebenfalls kommt es bei zunehmender Geschwindigkeit zur durchschnittlichen Steigerung und bei der Innenschiene zu einem deutlichen Abfall der Spannungswerte.

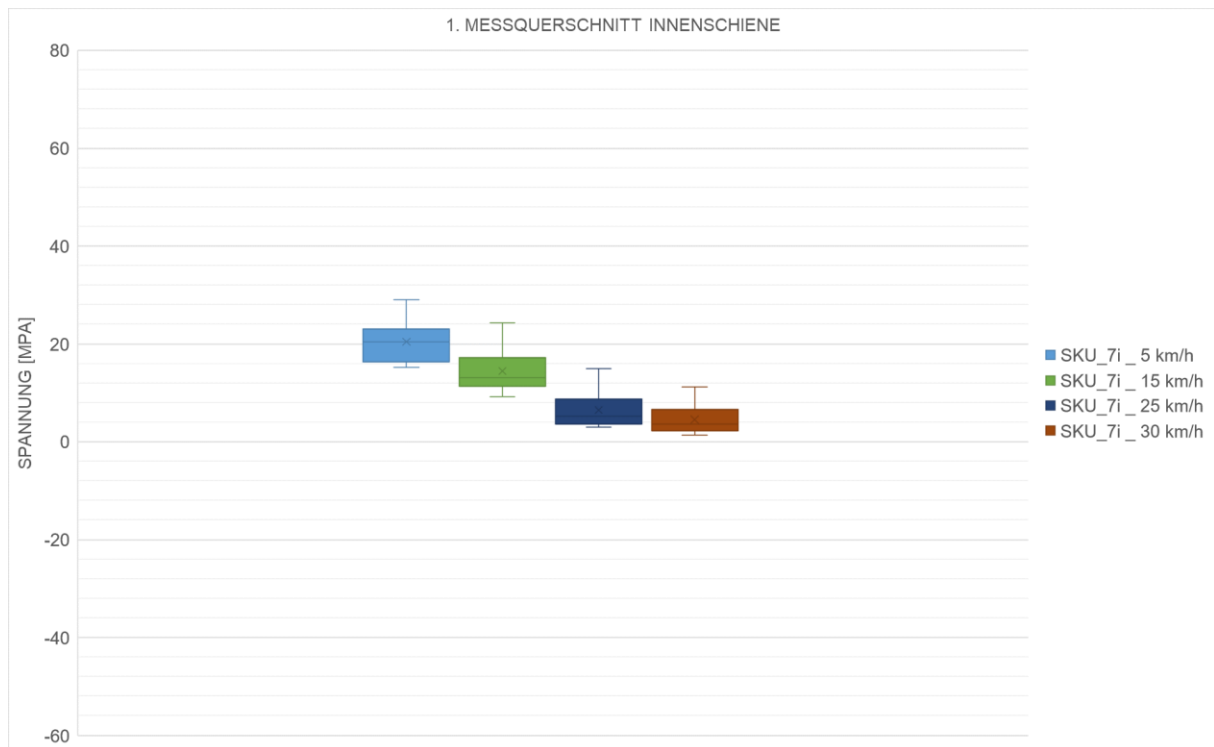


Abbildung 5-7: 1. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

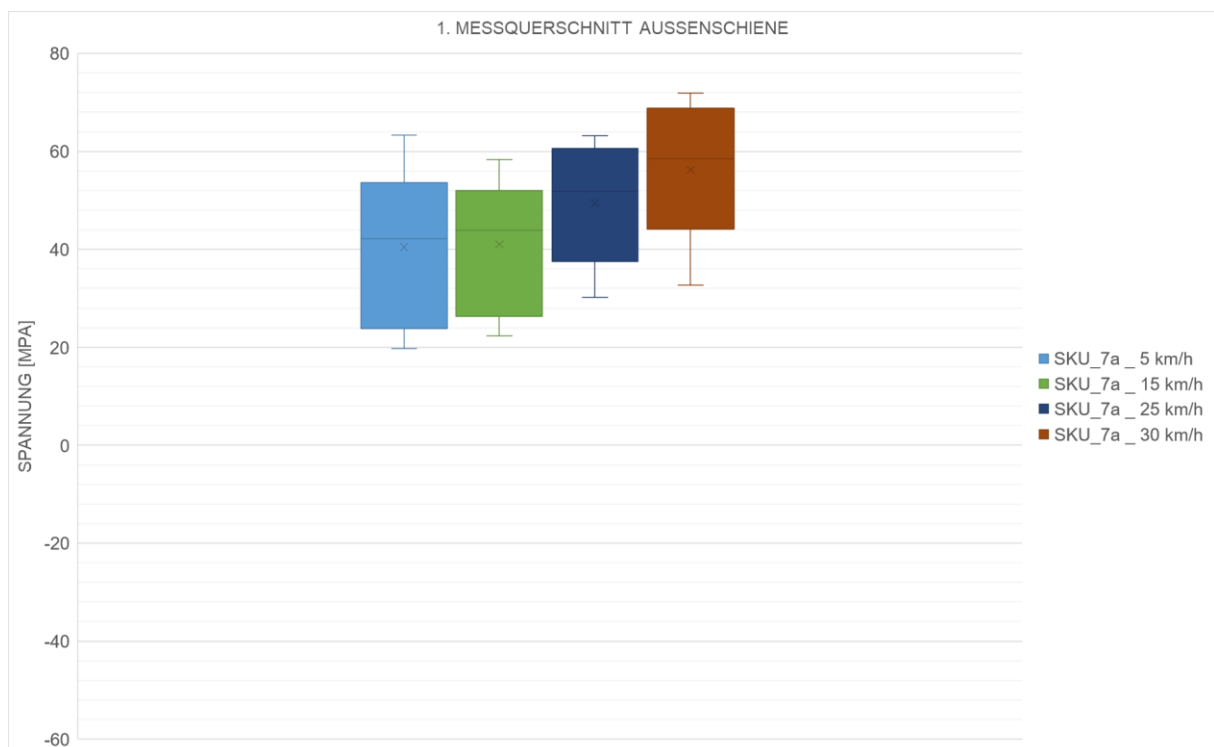


Abbildung 5-8: 1. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

2. Messquerschnitt (Bogenmitte):

Wie in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen ist, kommt es zu den gleichen Verhalten der Außen- und Innenschiene wie beim ersten Messquerschnitt. Der einzige große Unterschied zwischen Messquerschnitt eins (Bogenanfang) und dem zweiten Messquerschnitt (Bogenmitte) ist, dass es zu deutlich geringeren Spannungen in den Schienenfußmesspunkten (SFU, SFS), den rillenkopfseitigen Messpunkten (SKS_5i, SKU_4a) und beim Messpunkt auf der Fahrkopfunterseite (SKU_7a) kommt. Der fahrkopfseitige Messpunkt auf der Innenschiene (SKS_6i) weist positive und negative Spannungen auf, hingegen führt beim Messpunkt auf der Außenschiene (SKS_6a) es zu klaren positiven Spannungen. Ein Vergleich der einzelnen Spannungswerte der Achsen des Messpunktes auf der Fahrkopfseite der Innen- und Außenschiene bei 15 km/h ist in der Tabelle 5-1 aufgezeigt.

Tabelle 5-1: Vergleich der einzelnen Spannungswerte je Achse für den Messpunkt SKS_6 (Bogenmitte) [eigene Darstellung]

<i>Achse</i>	<i>SKS_6i Spannungen [MPa]</i>	<i>SKS_6a Spannungen [MPa]</i>
1	4,66	69,03
2	9,19	25,39
3	-11,03	29,12
4	-11,66	29,34
5	0,21	45,55
6	-1,88	37,96

Bei der Auswertung ist ein zusätzlicher Unterschied beim Verhalten des Messpunktes auf der Rillenkopfunterseite an der Außenschiene (SKU_4a) aufgefallen. Beim ersten Messquerschnitt liegen hauptsächlich die mittleren vier Achsen im negativen und die erste und letzte Achse im positiven Bereich. Beim zweiten Messquerschnitt liegen vor allem bei den höheren Geschwindigkeiten (25, 30 km/h) die mittleren Achsen im positiven und die erste und letzte Achse dafür im negativen Bereich. Bei den niedrigeren Geschwindigkeiten kommt es jedoch beim Messquerschnitt zwei zu keinem Wechsel der Spannungen an der Rillenkopfunterseite an der Außenschiene (SKU_4a) in den positiven und negativen Bereich, sondern die Spannungen liegen lediglich im positiven Bereich. Beim Messpunkt auf der Rillenkopfunterseite an der Innenschiene (SKU_4i) kommt es im Vergleich zum ersten Messquerschnitt ausschließlich zu positiven Spannungen bei allen Geschwindigkeiten. Auffälligkeiten sind ebenfalls an der Rillenkopfseite an der Innenschiene (SKU_5i) zu beobachten, dort treten bei den Geschwindigkeiten 5 km/h und 15 km/h ausschließlich negative Spannungen auf. Bei 25 km/h treten hauptsächlich negative Spannungen (außer bei zwei Achsen) und bei 30 km/h nur positive Spannungen auf. Die detaillierte Auswertung der einzelnen Spannungswerte je Achse ist im „Anhang B: Messwerte der zweiten“ unter 2. Messquerschnitt ersichtliche.

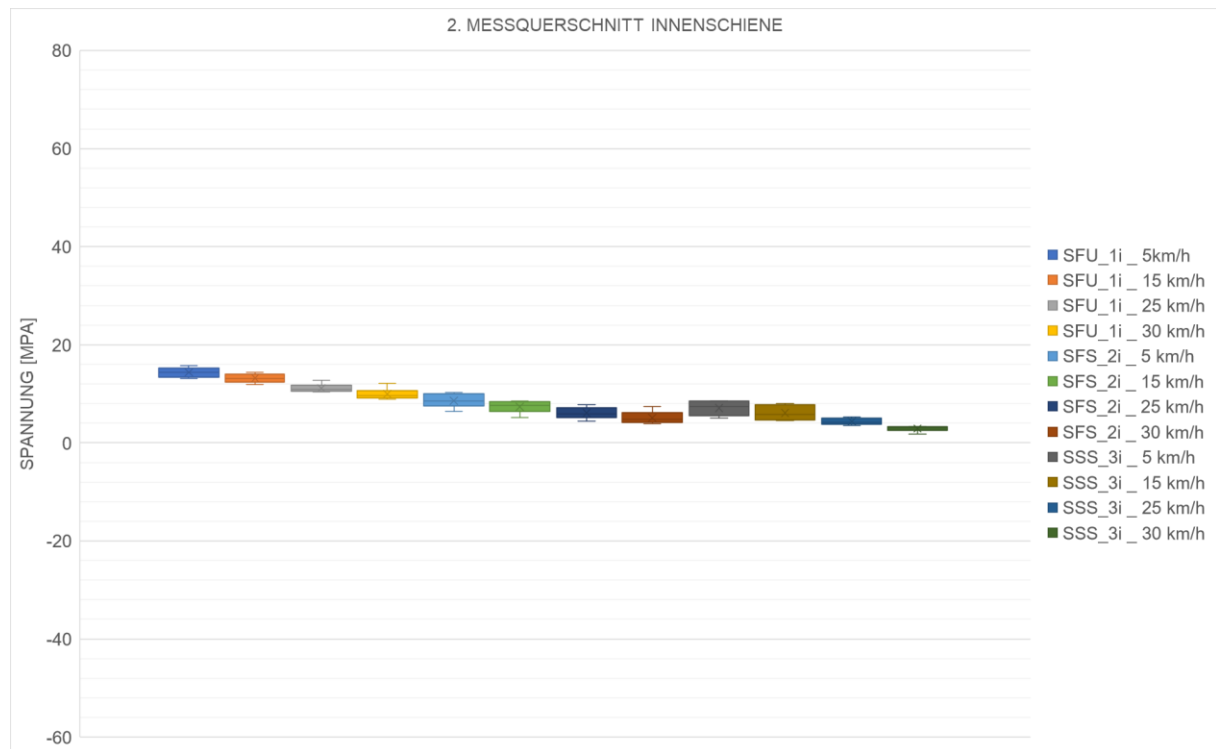


Abbildung 5-9: 2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

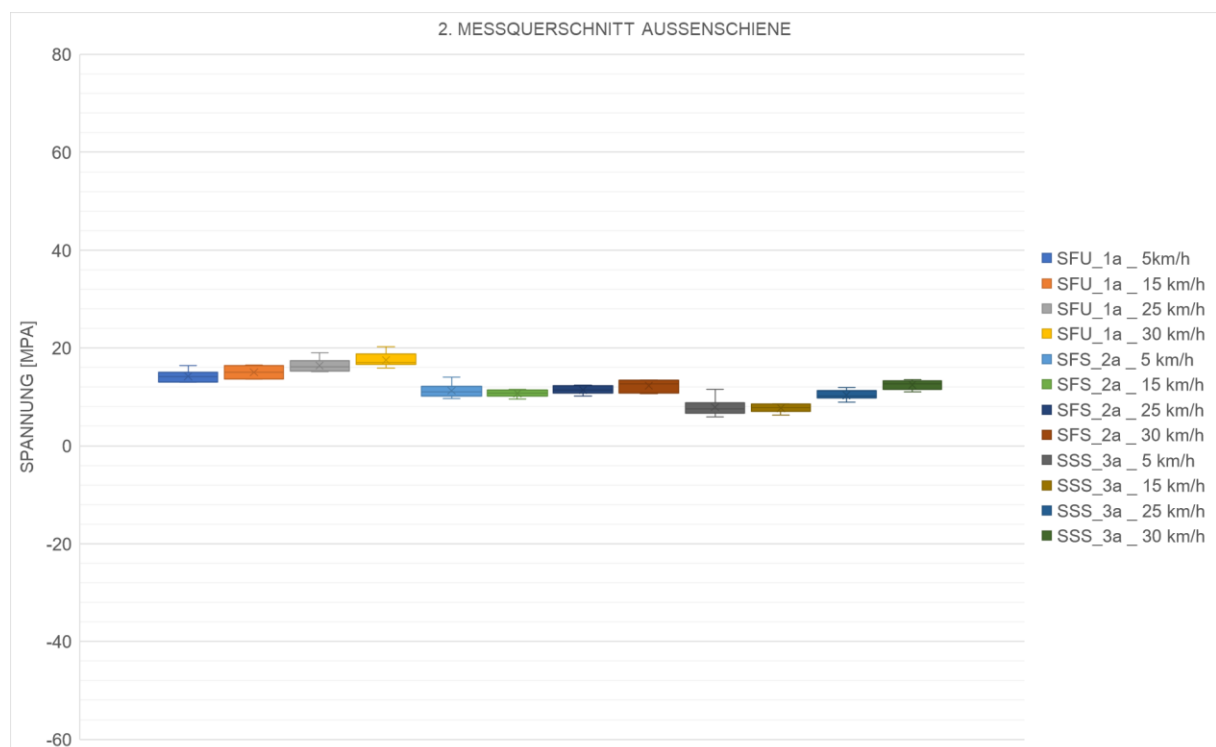


Abbildung 5-10: 2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

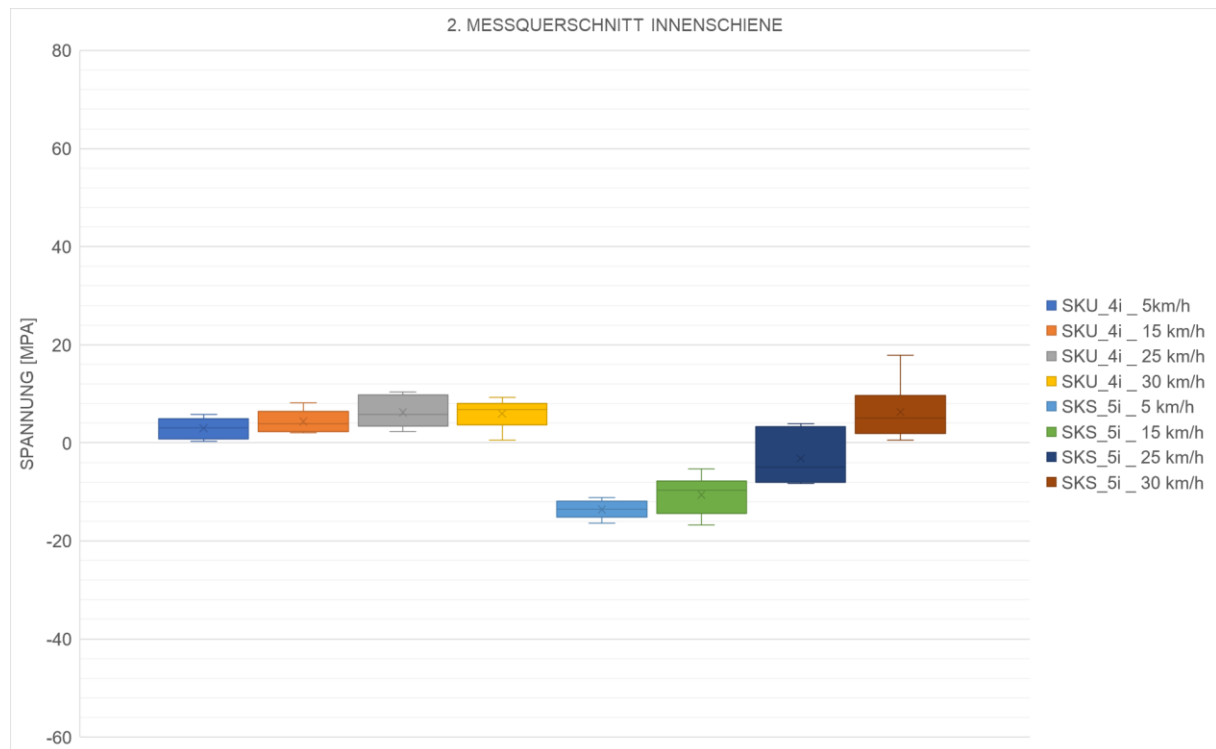


Abbildung 5-11: 2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]

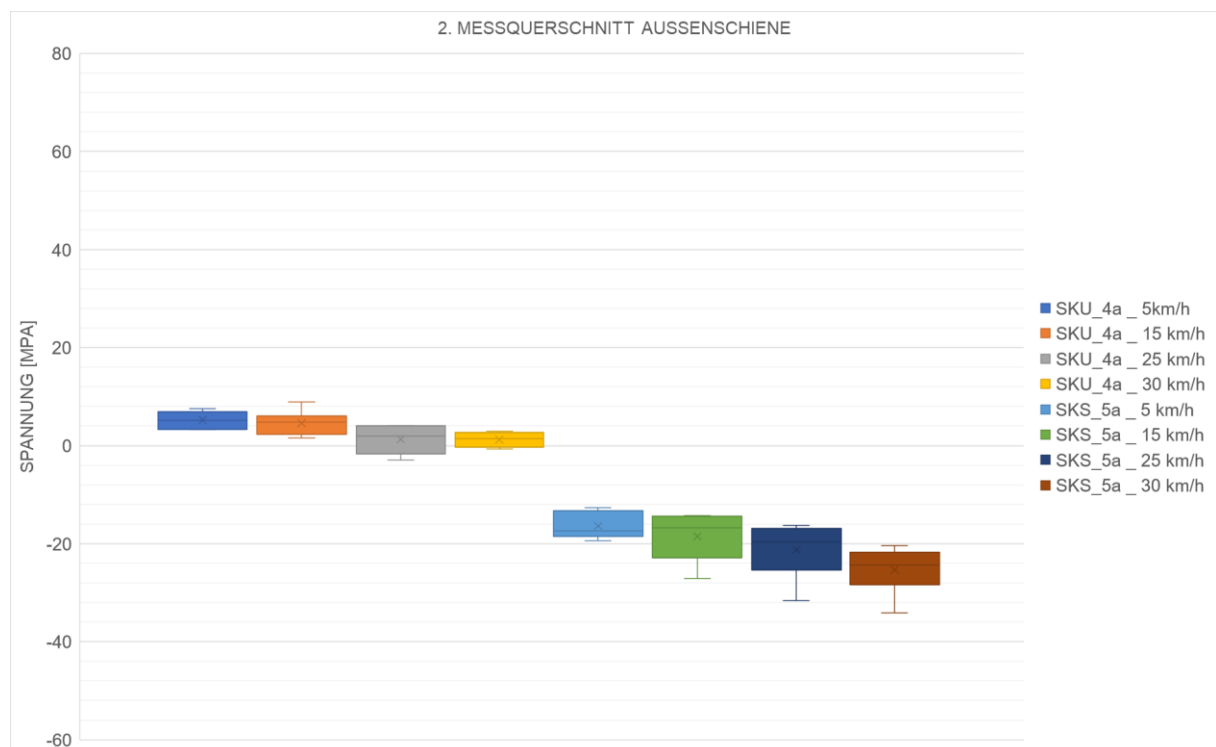


Abbildung 5-12: 2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]



Abbildung 5-13: 2. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

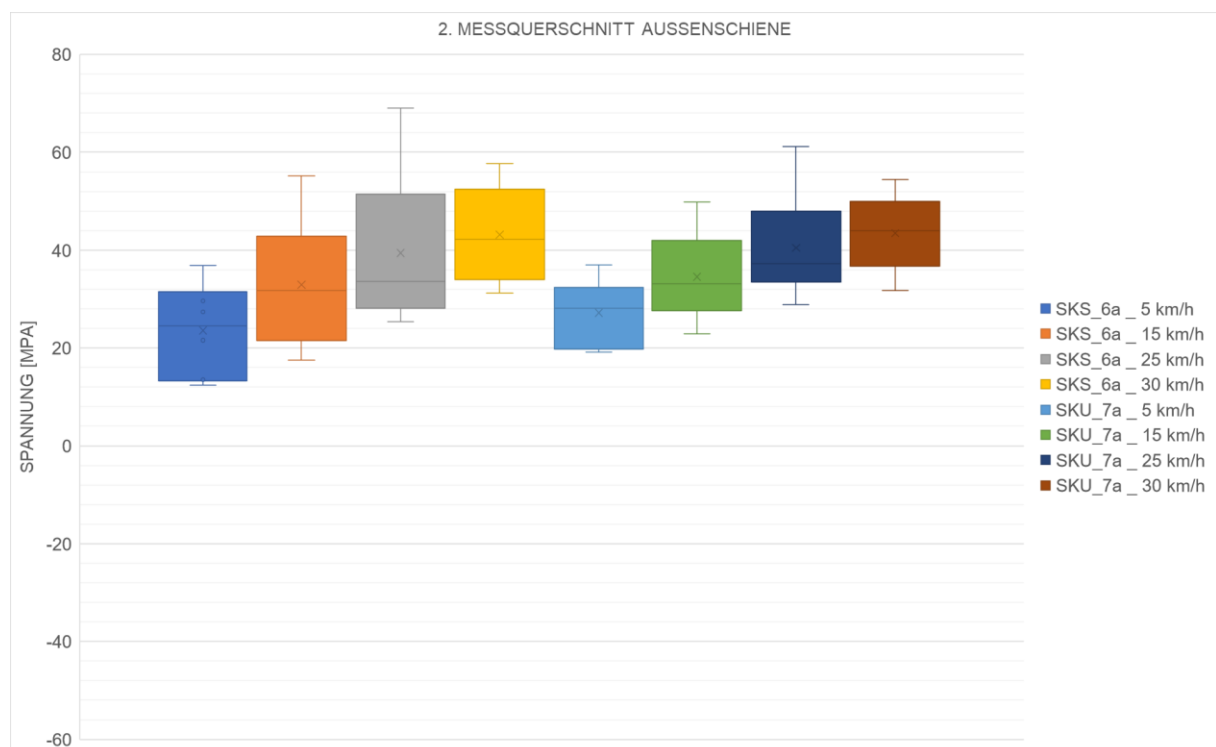


Abbildung 5-14: 2. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

3. Messquerschnitt (Bogenende):

Beim dritten Messquerschnitt (Bogenausfahrt) kommt es ebenfalls zu dem gleichen Verhalten der Messpunkte wie in den vorherigen Messquerschnitten (siehe nachfolgende Abbildungen). Die Wertebereiche der Spannungen befinden sich in annähernd identen Dimensionen wie beim Messquerschnitt eins (Bogenanfang), außer bei den Messpunkten auf der Rillenkopfseite der Innenschiene (SKS_5i) und auf der Fahrkopfunterseite der Außenschiene (SKU_7a) kommt es zu eindeutig verringerten Werten. Beim Messpunkt auf der Schienenfußseite der Außenschiene (SFS_2a) kommt es im Vergleich zum ersten Messquerschnitt zu einem veränderten Verhalten, dort steigen die Spannungen bei zunehmender Geschwindigkeit an und fallen nicht wie beim ersten Messquerschnitt ab. Eine zusätzliche Änderung des Spannungsverhaltens ist im Messpunkt auf der Rillenkopfunterseite bei der Außenschiene (SKU_4a) zu erkennen (Ausnahme bei 5 km/h). Dort kommt es nur zu negativen Spannungen bei den Achsen, außer bei 5 km/h weisen die Messwerte positive und negative Spannungen auf.

Beim Messpunkt auf der Rillenkopfunterseite bei der Innenschiene (SKU_4i) ist zu erkennen, dass es vor allem bei den höheren Geschwindigkeiten (25 km/h, 30 km/h) überwiegend zu positiven Spannungen bei den Achsen kommt. Beim Messpunkt auf der Rillenkopfseite der Innenschiene (SKS_5i) kommt es ausschließlich zu negativen Spannungen an allen sechs Achsen außer bei der Geschwindigkeit von 30 km/h treten positive Spannungen auf. Der fahrkopfseitige Messpunkt auf der Außenschiene (SKS_6a) weist klare positive Spannungen auf, welche bei zunehmender Geschwindigkeit ansteigen. Aufgrund des Ausfalls des DMS an der Fahrkopfseite der Innenschiene (SKS_6i) sind keine Messdaten vorhanden. Die detaillierte Auswertung der einzelnen Spannungswerte je Achse ist im „Anhang B: Messwerte der zweiten“ unter 3. Messquerschnitt ersichtlich.



Abbildung 5-15: 3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

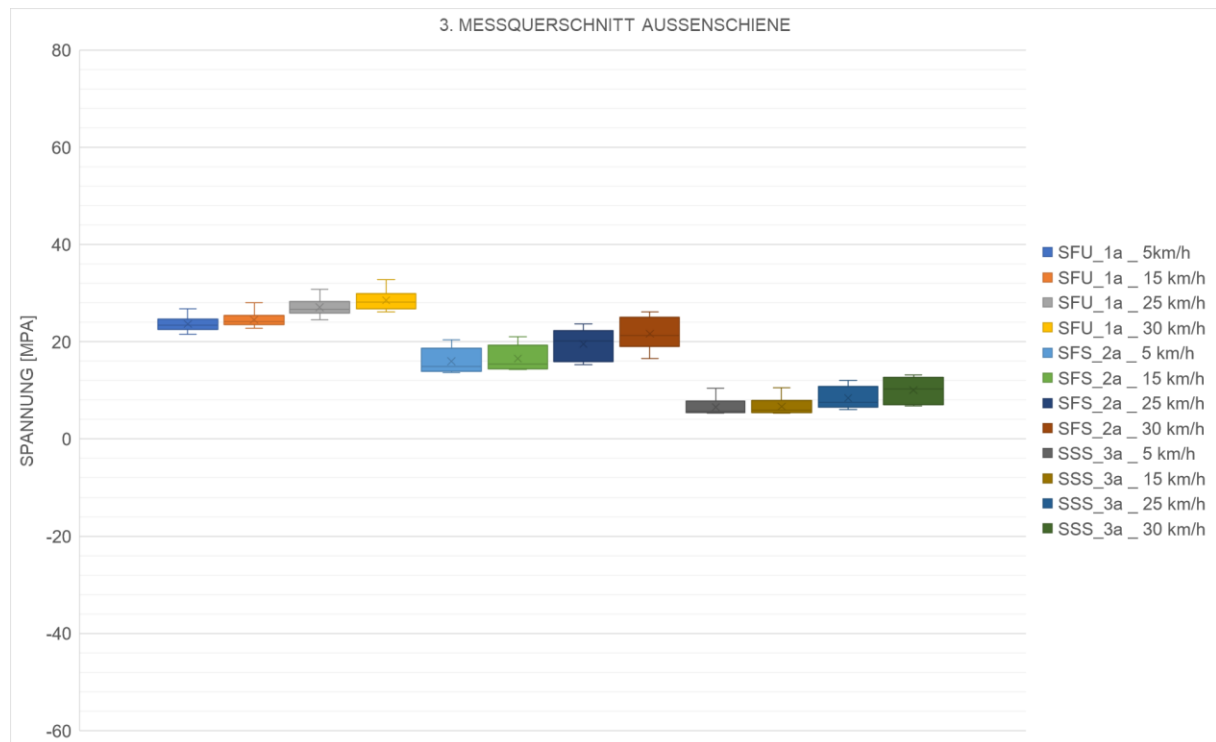


Abbildung 5-16: 3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen im Fuß- und Stegbereich [eigene Darstellung]

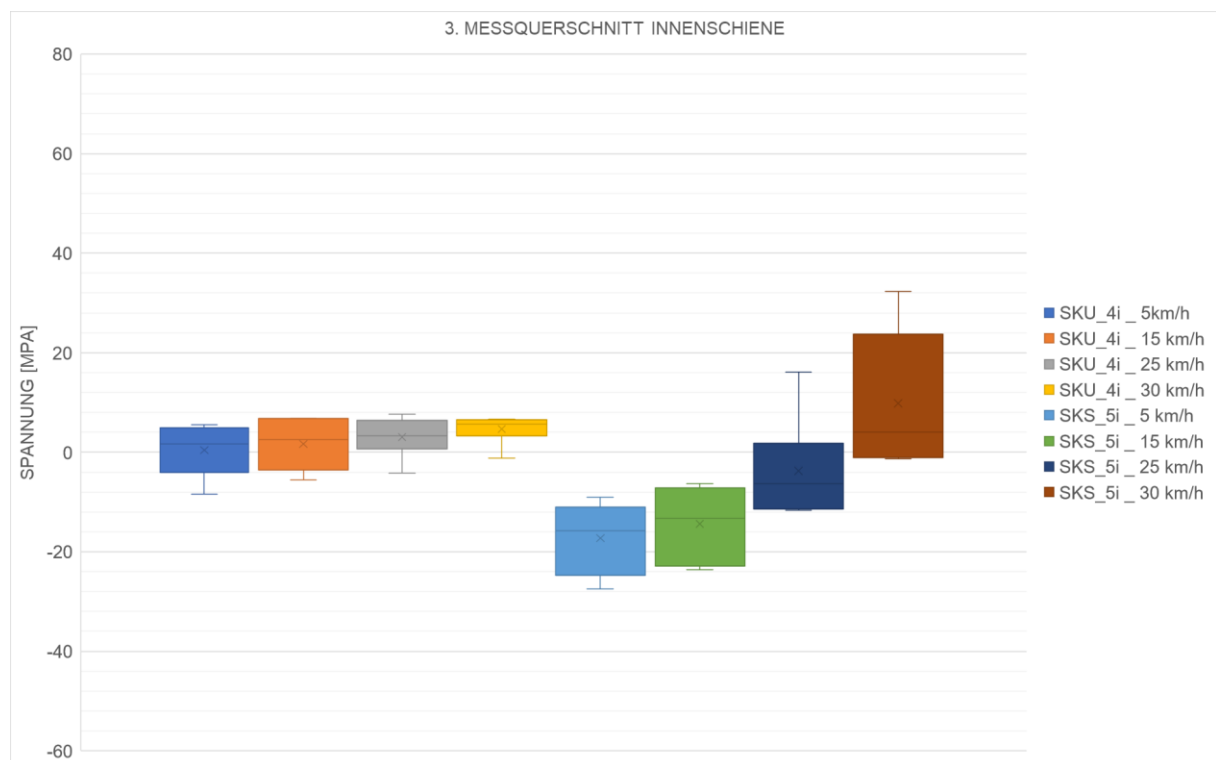


Abbildung 5-17: 3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]

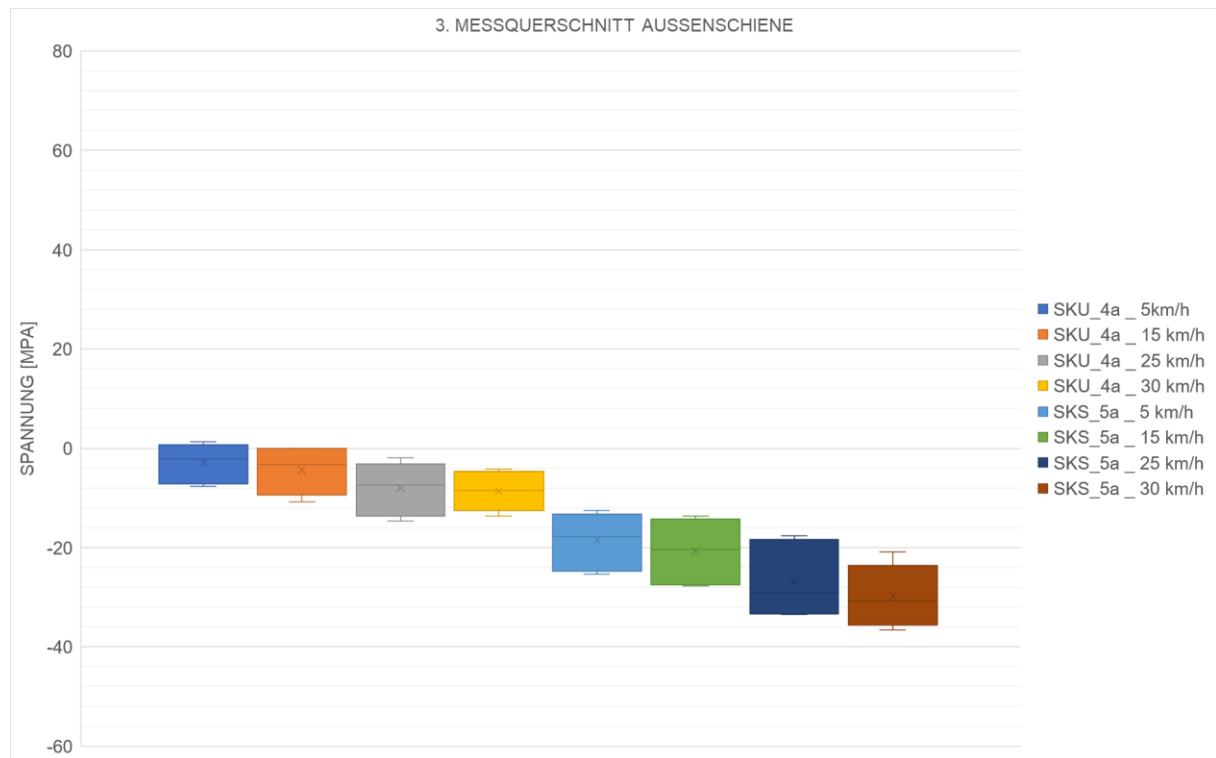


Abbildung 5-18: 3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Rillenkopfseite [eigene Darstellung]

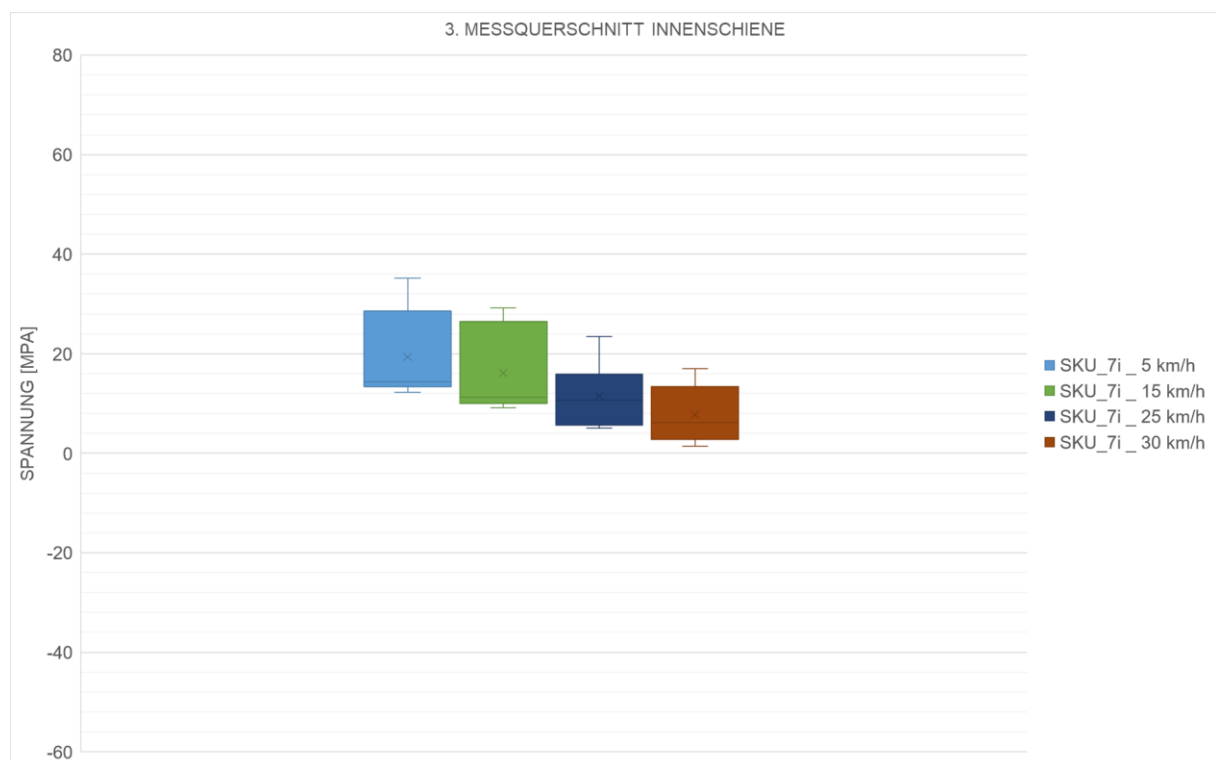


Abbildung 5-19: 3. Messquerschnitt Innenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

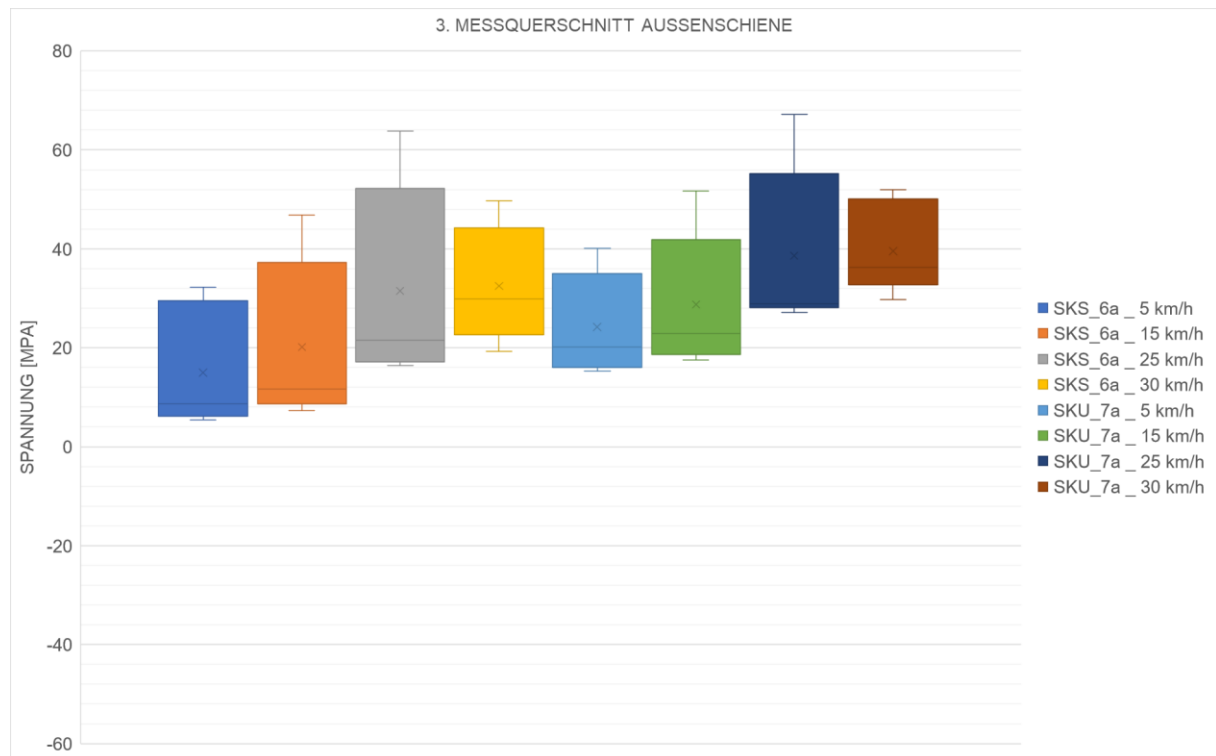


Abbildung 5-20: 3. Messquerschnitt Außenschiene - DMS Positionen auf der Fahrkopfseite [eigene Darstellung]

5.1.2 Lasersensoren

Während der zweiten Messung fielen im Vergleich zu der ersten Messung nur sehr wenige Lasersensoren aus und deshalb konnten präzisere Aussagen über das Kippverhalten der Rillenschiene bei einer Überfahrt getroffen werden. Für die Auswertung der vorhandenen Messdaten wird die Auslenkung des Schienenkopfes und die Einsenkung des Schienenfußes in einer Boxplotverteilung bei 5 km/h, 15 km/h, 25 km/h und 30 km/h dargestellt. In die Boxplotverteilung werden die einzelnen Achsen berücksichtigt. Um die nachfolgenden Abbildungen mit den jeweiligen Verkippungen besser nachzuvollziehen, wird in der Abbildung 5-21 ein Überblick über die einzelnen Positionen der Lasersensoren und die möglichen Auslenkungsrichtungen gegeben.

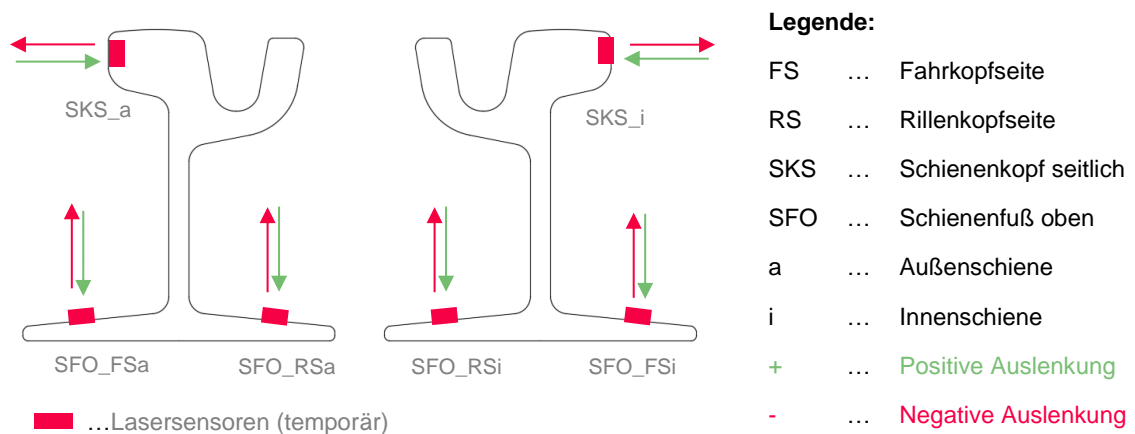


Abbildung 5-21: Lasersensoren Positionierung und gemessene Auslenkungsrichtungen [eigene Darstellung]

1. Messquerschnitt (Bogenanfang):

Wie in der Abbildung 5-23 ersichtlich treten bei den Schienenkopfauslenkung an der Innenschiene im fahrkopfseitigen Bereich (SKS_i) ein lineares Verhalten auf. Mit steigender Geschwindigkeit ändert sich das Verhalten von einer Auslenkung nach außen zu einer Auslenkung in Richtung Gleismitte. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Schienenkopfauslenkung an der Außenschiene (SKS_a) zu einer steigender Auslenkung nach außen bei steigender Geschwindigkeit. Die Einsenkungen auf der Innenschiene und Außenschiene im Fußbereich auf der Rillenkopfseite (RSi, RSa) bleiben bei zunehmender Geschwindigkeit gleich, wobei es zu einer deutlich erhöhten Einsenkung an der Innenschiene kommt (siehe Abbildung 5-22). Bei der Einsenkung der Innenschiene im Fußbereich auf der Fahrkopfseite (FSi) kommt es zu einem annähernd linearen Abfall der Einsenkung bei zunehmender Geschwindigkeit. Die Einsenkung der Außenschiene auf der Fahrkopfseite (FSa) konnte aufgrund des Ausfalls des Lasers nicht gemessen werden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite der Messwerte bei der Rillenkopfseite an der Außenschiene (RSa) deutlich geringer, im Vergleich zu den anderen Einsenkungsmessdaten, ist.

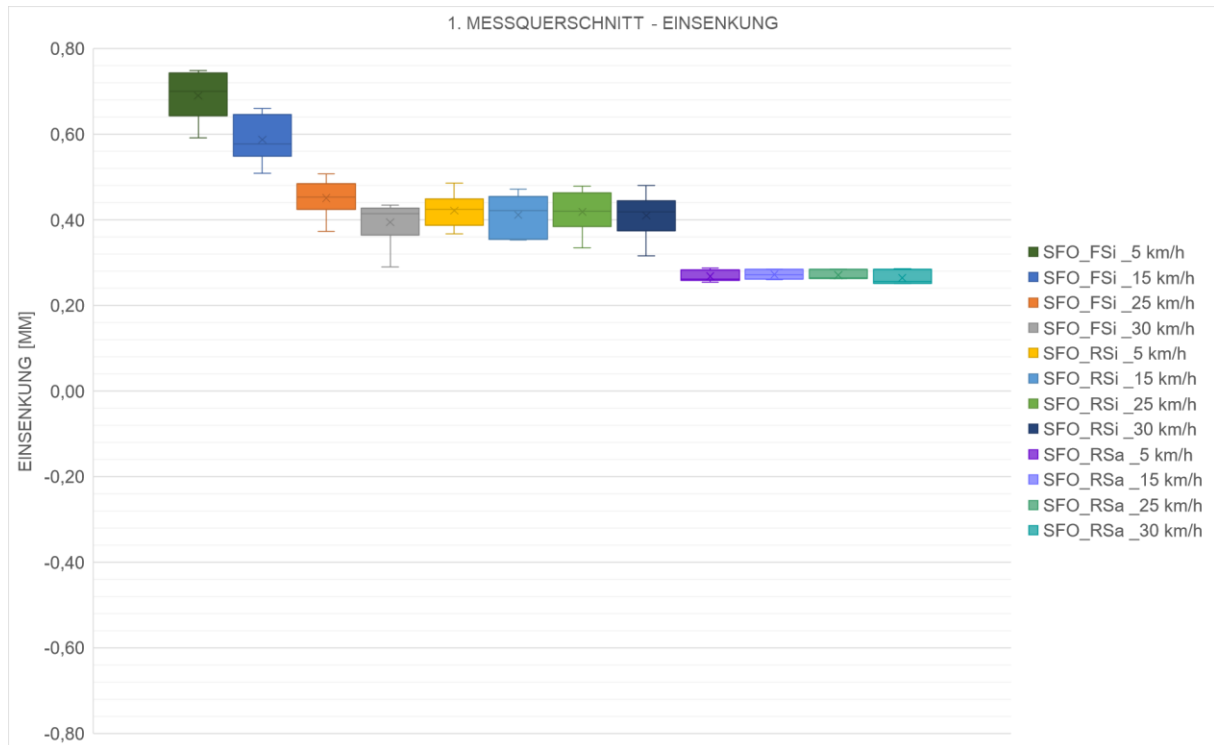


Abbildung 5-22: Einsenkung des 1. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

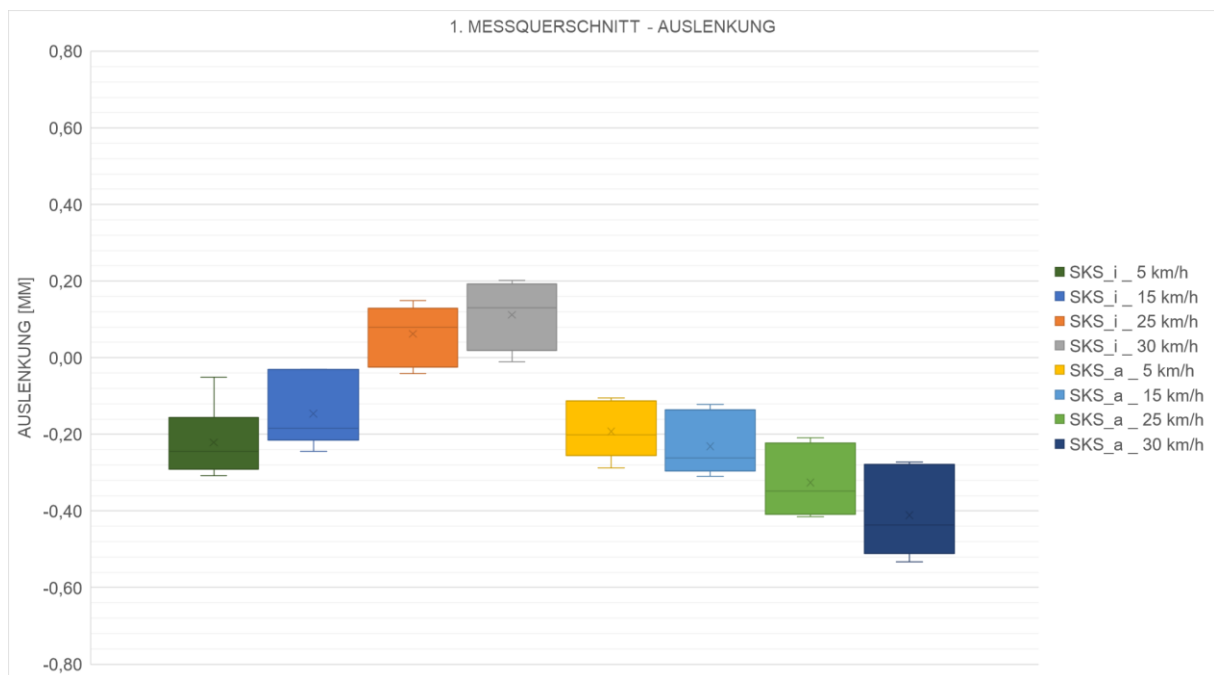


Abbildung 5-23: Auslenkung des 1. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

2. Messquerschnitt (Bogenmitte):

In der Bogenmitte kommt es wie in der Abbildung 5-25 ersichtlich bei zunehmender Geschwindigkeit zu einer Verringerung der Auslenkung an der Innenschiene (SKS_i) und zu einer Steigerung der Auslenkung an der Außenschiene (SKS_a). Die Einsenkungen an der Innenschiene auf der Fahrkopfseite (FSi) werden immer geringer je höher die Geschwindigkeiten werden, dafür bleiben die Einsenkungen an der Rillenkopfseite annähernd gleich (RSi). Bei

der Außenschiene bleiben die Einsenkungen auf der Fahrkopfseite ebenfalls annähernd gleich (FSa) bei zunehmender Geschwindigkeit und weisen zusätzlich eine sehr geringe Schwankungsbreite auf (siehe Abbildung 5-24). Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Außenschiene auf der Fahrkopfseite deutlich weniger belastet wird, als die Einsenkung der Innenschiene. Die Einsenkung der Außenschiene auf der Rillenseite (RSa) konnte aufgrund des Ausfalls des Lasers nicht gemessen werden.

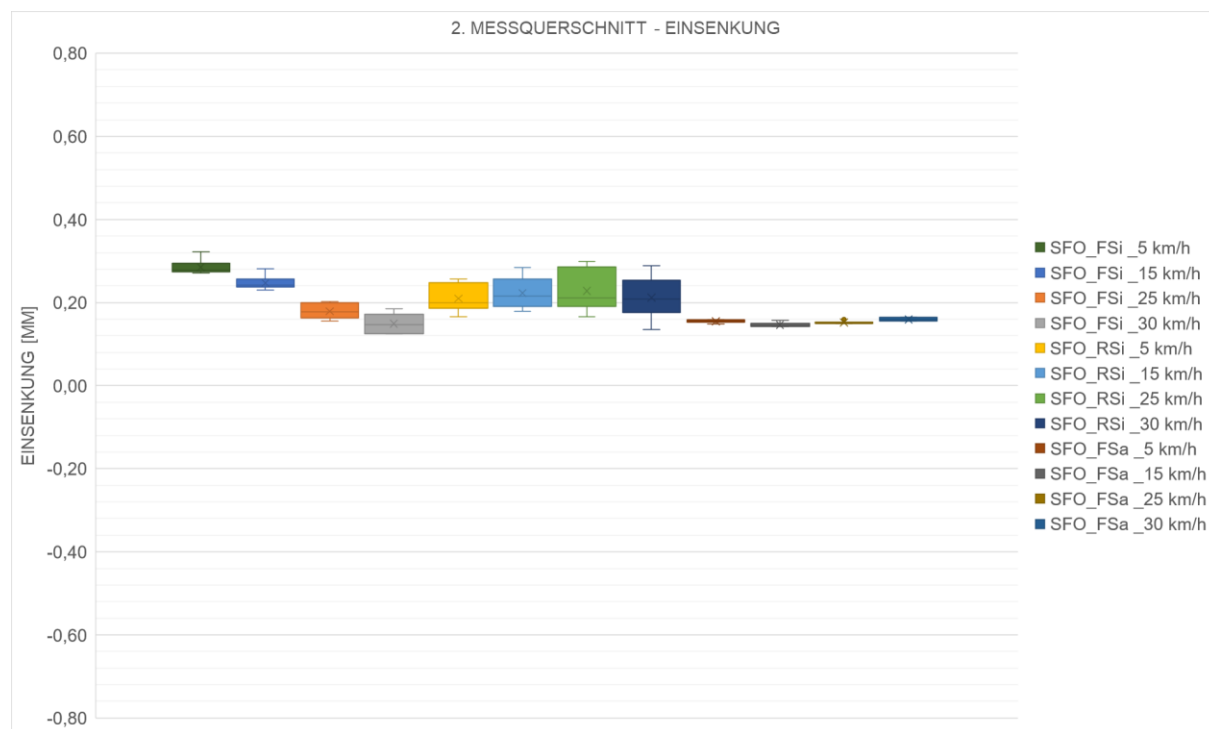


Abbildung 5-24: Einsenkung des 2. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

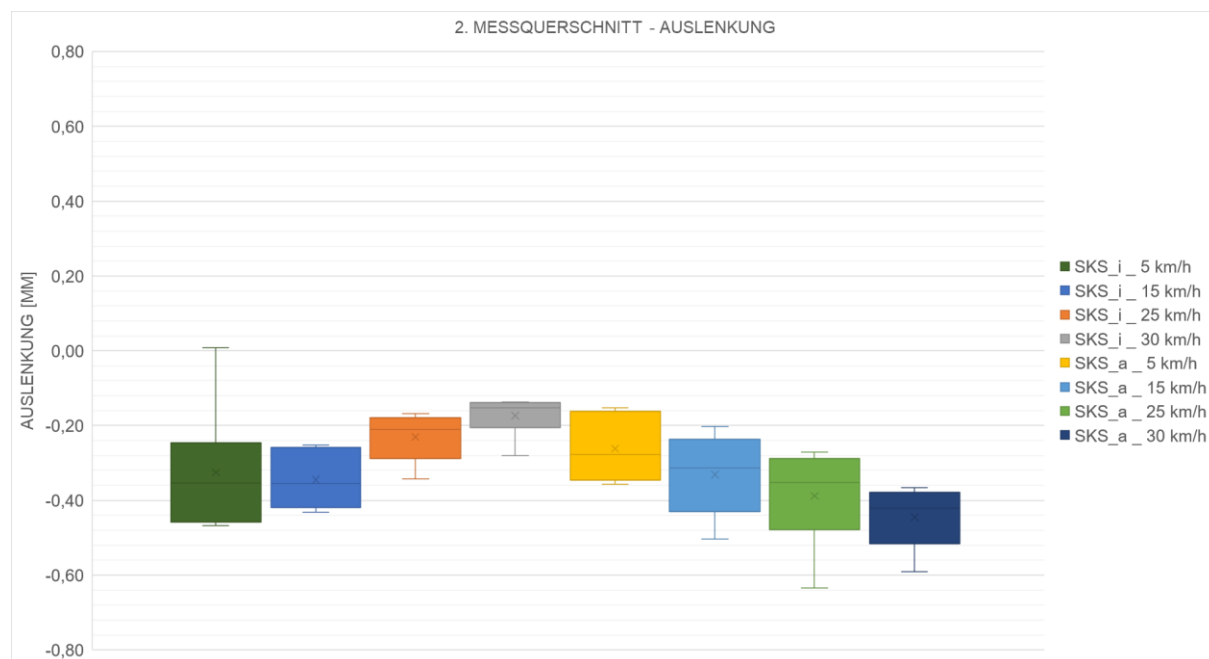


Abbildung 5-25: Auslenkung des 2. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

3. Messquerschnitt (Bogenende):

Bei der Bogenausfahrt kommt es zu einer vermehrten Auslenkung der Außenschiene auf der Fahrkopfseite (SKS_a) bei zunehmender Geschwindigkeit nach Gleis außen (siehe Abbildung 5-27). An der Innenschiene wird eine Verringerung der Auslenkung Richtung Gleis außen angenommen, aufgrund der fehlenden Messdaten. Zu einer Verringerung der Einsenkung kommt es bei zunehmender Geschwindigkeit bei der Innenschiene sowohl beim Fußbereich auf der Fahrkopfseite (FSi) als auch auf der Rillenkopfseite (RSi). Zu einer größeren Einsenkung kommt es bei der Außenschiene auf der Fahrkopfseite (FSa) und auf der Rillenkopfseite (RSa) bei zunehmender Geschwindigkeit, jedoch steigen die Einsenkungen auf der Rillenkopfseite deutlich geringer an (siehe Abbildung 5-26). Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite der Messwerte bei der Rillenkopfseite an der Außenschiene (RSa) deutlich geringer, im Vergleich zu den anderen Einsenkungsmessdaten, ist. Dieses ähnliche Verhalten ist ebenfalls beim Bogenanfang (1. Messquerschnitt) zu erkennen.

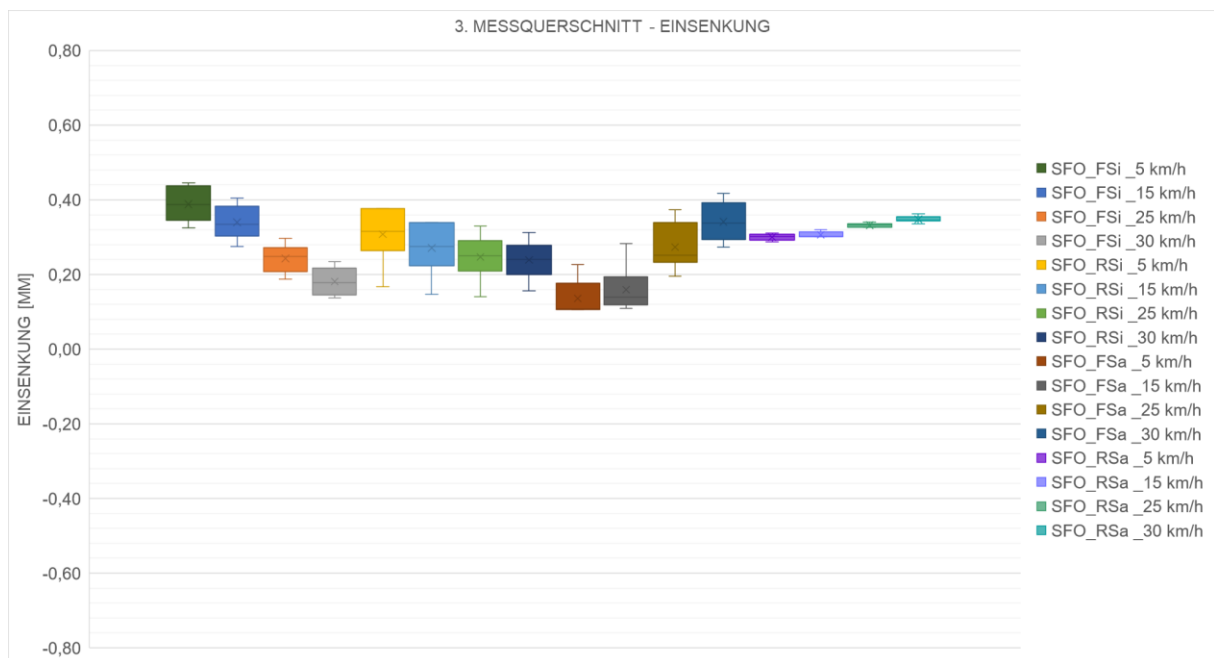


Abbildung 5-26: Einsenkung des 3. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

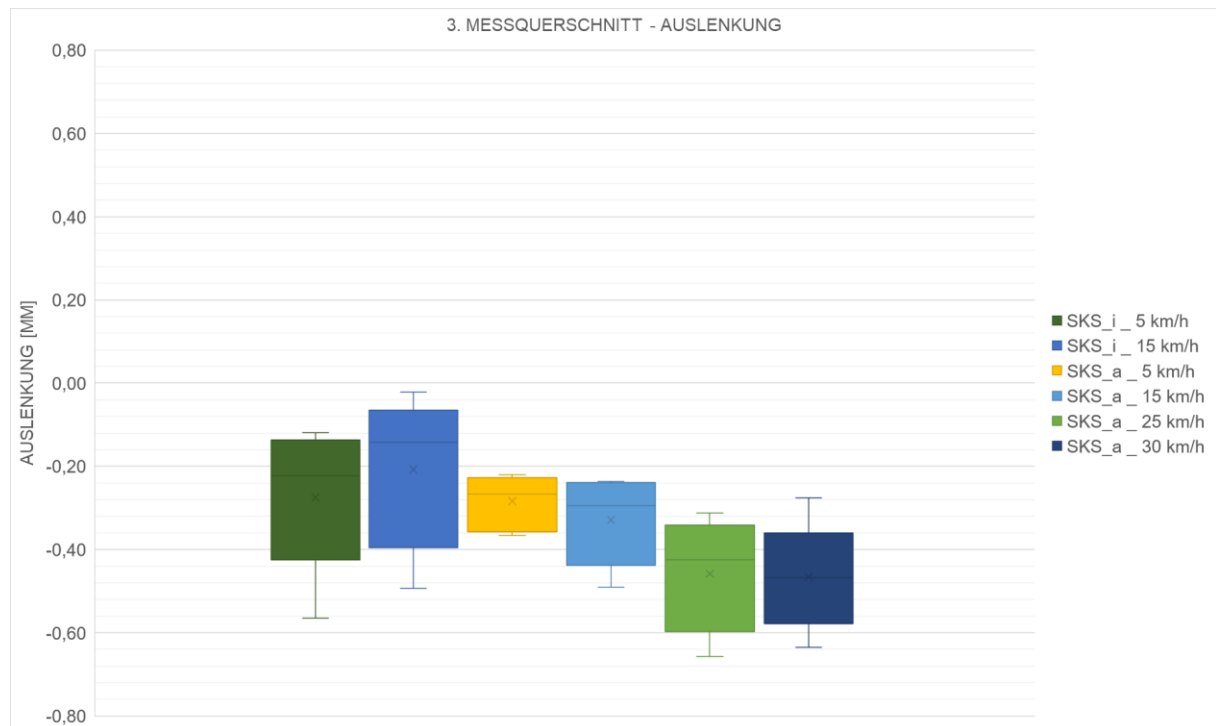


Abbildung 5-27: Auslenkung des 3. Messquerschnittes (2. Messung) [eigene Darstellung]

6 Erkenntnisse aus den Messungen

Der Einfluss der einzelnen Krafteinwirkungen aufgrund der Bogenfahrt und die asymmetrische Geometrieform der Rillenschiene spiegeln sich in der Auswertung der Peaks bei den DMS im Kopfbereich wider. Je weiter die DMS-Messposition vom Schienenkopf entfernt ist, desto klarer werden die Peaks angezeigt aufgrund der verringerten „Pendelbewegungen“ der Schiene. Dies bedeutet, dass es im Kopfbereich zu erhöhten Auslenkungen bzw. seitlichen Bewegungen aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene kommt. Diese „Pendelbewegungen“ spiegeln sich teils bei den schwankenden positiven und negativen Messdaten einer DMS-Messposition im Kopfbereich wider.

Ein Vergleich der ersten Messung unter Normalbetrieb mit der zweiten Messung mit 15 km/h zeigen das gleiche Spannungsverhalten bezüglich der einzelnen Messpunkte. Abweichung der Dimensionen der Spannungen sind vorwiegend im Kopfbereich. Sowohl bei der ersten und bei der zweiten Messung zeigt ein Vergleich der drei Messquerschnitte eine ähnliche Größenordnung der Spannungen bei der Bogeneinfahrt (1. Messquerschnitt) und bei der Bogenausfahrt (3. Messquerschnitt). In der Bogenmitte treten im Durchschnitt geringere Spannungen an im Vergleich zu den anderen beiden Messquerschnitten (Bogeneinfahrt und Bogenausfahrt) auf. Diese niedrigeren Spannungen sind mögliche Resultate aus der fehlenden Kenntnis über die Kontaktpunktberührung. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit die Berührungspunkte zwischen Rad- und Schienenprofil zu erfassen, ist somit ein Rückschluss auf die möglichen Punktberührungen während Messungen nicht möglich. Ein abhängiges Verhalten der Spannungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist eindeutig zu erkennen, wie erwartet steigen die Spannungen an den jeweiligen DMS Positionen am Schienenfuß (SFU_1a, SFS_2a) und an der Fahrkopfseite (SKS_6a, SKU_7a) mit zunehmender Geschwindigkeit an der Außenschiene aufgrund der Bogenfahrt an. An der Innenschienen ist eine abnehmende Tendenz der Schienenfuß- und Fahrkopfspannungen ersichtlich. Jene Messpunkte am Rillenkopf an der Außenschiene (SKU_4a, SKS_5a) weisen eine abnehmende Spannungsbeanspruchung bei steigender Geschwindigkeit auf und jene an der Innenschiene (SKU_4i, SKS_5i) eine steigende Spannungsbeanspruchung. Diese höhere Beanspruchung des Rillenkopfes bei der Innenschiene bei zunehmender Geschwindigkeit spiegelt sich ebenfalls in der Peak Auswertung wider. Bei den höheren Geschwindigkeiten kommt es zu einem vermehrten Wechsel zwischen positiven und negativen Spannungen in der Bogenmitte und am Bogenende.

Bei der Betrachtung der Auslenkungen und Einsenkungen der Rillenschiene ist ein klares Verhalten der Außen- und Innenschiene zu erkennen. Sowohl Außen- als auch die Innenschiene erfahren eine Verdrehung/Verdrillung was unter anderem aufgrund der Punktberührgeometrie zwischen Rad und Schiene in Kombination mit der Lage des Schubmittelpunktes zurückzuführen ist (siehe Kapitel 7 „Rad-Schiene Kontakt“). Bei einer Querkraftbelastung bei der die Wirkungslinie der Querkraft nicht durch den Schubmittelpunkt geht, kommt es zu einer Verdrehung des gesamten Querschnittes. Aufgrund des Anlaufens des Spurkranzes an die Außenschiene kommt es bei zunehmender Geschwindigkeit zu einer Bewegung der Außenschiene nach Gleis außen und zu einer Bewegung der Innenschiene nach Gleismitte.

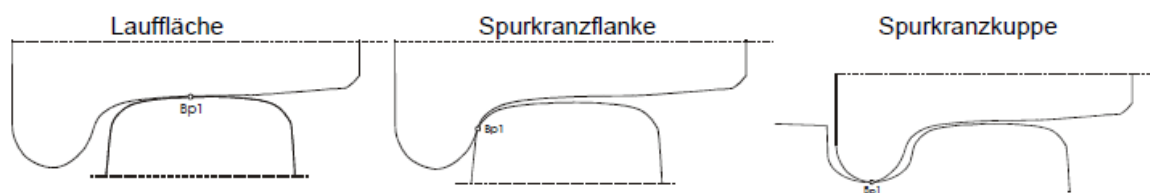
Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Einsenkung der Innenschienen auf der Fahrkopfseite (FSi) bei allen Messquerschnitten eine Verringerung bei zunehmender Geschwindigkeit aufweist. Auf der Rillenkopfseite (RSi) herrscht eine annähernd gleiche Einsenkung bei zunehmender Geschwindigkeit beim ersten und zweiten Messquerschnitt vor, außer beim dritten Messquerschnitt (Bogenende) verringert sich die Einsenkung auf der Rillenkopfseite bei zunehmender Geschwindigkeit.

Beim dritten Messquerschnitt ist auch klar zu erkennen, dass die Außenschiene auf der Fahrkopfseite (FSa) und auf der Rillenkopfseite (RSa) bei zunehmender Geschwindigkeit eine erhöhte Einsenkung aufweist. Beim ersten (Bogenanfang) und beim zweiten (Bogenmitte) Messquerschnitt kann aus den vorhandenen Messdaten keine signifikante Steigerung der Einsenkung der Außenschiene festgestellt werden.

7 Rad-Schiene Kontakt

Für das Spannungsverhalten spielt die einwirkende Kraft und die Größe des Kontaktgebietes eine wesentliche Rolle. Die Interaktion zwischen dem Rad und der Schienen wird in erster Linie vom Rad- und Schienenprofil beeinflusst und von dessen Berührgeometrie. [6] Die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene kann in eine Einpunktberührung oder in eine Zweipunktberührung auftreten (siehe Abbildung 7-1). [19] Eine Einpunktberührung wird bevorzugt, da es bei einer Zweipunktberührung zu einem großen Schlupf aufgrund der unterschiedlichen Radien (Lauflängen) an den Berührungspunkten kommt und dies zu einem erhöhten Verschleiß führt. ([6] zitiert nach [20]) Durch die Einpunktberührung kann der gewünschte Fahrkomfort durch den Sinuslauf vorwiegend bei höheren Geschwindigkeiten und in der Gerade hervorgerufen werden. Durch den Sinuslauf wird ein geringer Seitenverschleiß an Rad und Schiene erreicht. Durch das konische Fahrflächenprofil des Rades wird ein Sinuslauf der Fahrwerke eingestellt und ein kräftiges seitliches Anstoßen der Spurkränze an die Fahrflanke der Schiene vermieden. Bei der Zweipunktberührung kommt es aufgrund des ausgebildeten Radprofils zu einem Berührungspunkt auf der Fahrfläche und zu einem weiteren Berührungspunkt zwischen Spurkranzstirnflanke und Fahrflanke bzw. Kopfeckabrundung des Schienenkopfes, was aus der seitlichen Annäherung des Spurkranzes an die Schienenfahrflanke resultiert. Durch diese mögliche stoßartige seitliche Berührung kommt es zu einem erhöhtem Seitenverschleiß (Rad und Schiene) und zusätzlich zu einem geringeren Fahrkomfort. [21]

Einpunktberührung



Zweipunktberührung

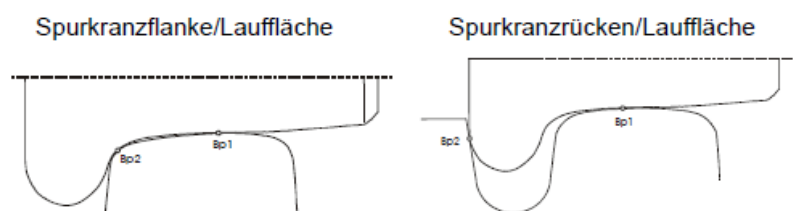


Abbildung 7-1: Berührgeometrie Rad-Schiene [19, S. 85]

Ein wesentlicher Faktor beim Angriffspunkt der einleitenden Kräfte ist die Geometrie des Schienenquerschnittes, bei der Rillenschiene 60R1 liegt aufgrund des asymmetrischen Querschnittes der Schwerpunkt außerhalb des Querschnittes (siehe Abbildung 7-2).

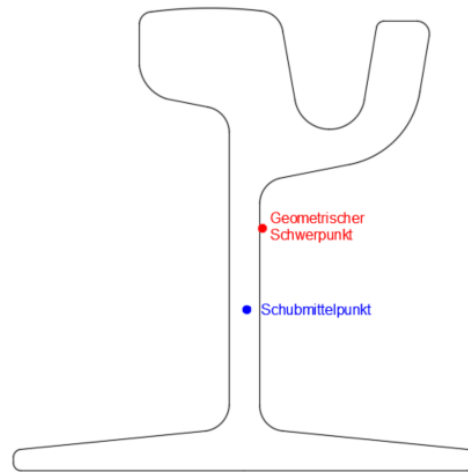
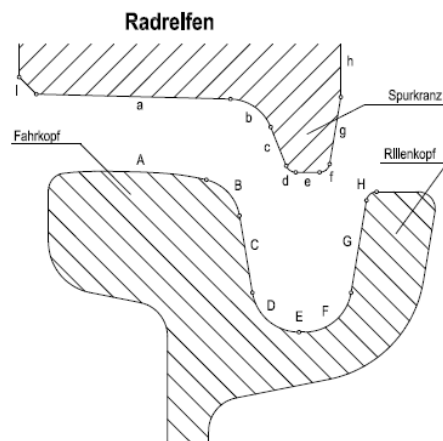


Abbildung 7-2: Schwerpunkt und Schubmittelpunkt der 60R1 Schiene [eigene Darstellung zitiert nach [22]]

Die in der Abbildung 7-3 dargestellten Bezeichnungen sind für die weitere Vorgehensweise von Relevanz, vor allem in Hinblick auf die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene.



Legende:

Rad:

- a – Fahrflächenprofil
- b – Spurkranzkehle
- c – Spurkranzstirnflanke
- d – äußere Spurkranzkuppenabrundung
- e – Spurkranzkuppe
- f – innere Spurkranzkuppenabrundung
- g – Spurkranzrückenflanke
- h – Radrücken
- i – Stirnfase

Schiene:

- A – Fahrflächenprofil
- B – Kopfeckabrundung
- C – Fahrflanke
- D – äußere Rillenausrundung
- E – Rillenboden
- F – innere Rillenausrundung
- G – Rillenflanke (Leitflanke)
- H – Rillenkopfabrundung

Abbildung 7-3: Querschnittsbezeichnung - Rad und Rillenschiene [23, Abb. 1]

7.1 Kontaktfläche

Die Kontaktfläche stellt eine wesentliche Relevanz für die Spannungsverteilung in der Schiene dar. Um die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene zu erfassen und die statischen Spannungsmessungen mit den Simulationsspannungen zu vergleichen, sind die vor Ort gemessenen Geometrien von Rad und Schienen einzusetzen.

- Schienenprofil: Innerhalb der definierten Messtoleranzen wurde im Vergleich zum Originalschienenprofil und des gemessenen Schienenprofils mit einer Liegedauer von ca. einem halben Jahr (wie in Abbildung 7-4 ersichtlich) keine relevanten Abweichungen festgestellt. Daher wird für die weitere Vorgehensweise von einem Originalschienenprofil ausgegangen.

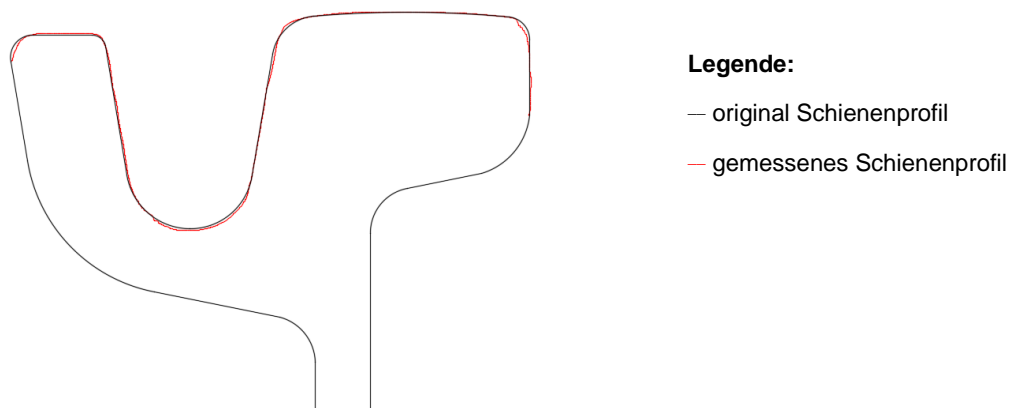


Abbildung 7-4: Originalschienenprofil im Vergleich zu gemessenes Schienenprofil [eigene Darstellung]

- Radprofil: Von den gemessenen Radprofilen des verwendeten Fahrzeugtype ULF-B1 wird ausschließlich das erste Losradpaar des ersten Portals hergenommen um mögliche Kontaktpunkte zu ermitteln. Bei den gemessenen Radprofilen des ersten Losradpaares ist eine Abnützung im Bereich der Spurkranzkehle und der Spurkranzstirnflanke zu erkennen. Die Neigung des Fahrflächenprofils ist annähernd gleich wie bei einem Originalradprofil, es ist aber ein vertikaler Verschleiß zu beobachten.

Auf Basis der Messdaten kann davon ausgegangen werden, dass es kein verschlissenes Schienenprofil zum Zeitpunkt der Messungen gab. Die Radprofile zeigten, dass es zu einem eindeutigen Kontakt zwischen Fahrkopfausrundung und Spurkranzkehle bzw. Spurkranzstirnflanke kommt und zu einem möglichen Kontakt von den Fahrprofil der Schiene mit dem Fahrprofil des Rades.

Fazit: Für die ersten FEM Modellschritte liegt der Fokus auf der Spannungsverteilung in der Rillenschiene und ob durch eine Simulation diese Spannungsverteilungen rekonstruiert werden können. Dabei wird von einer Einpunktberührung ausgegangen, da keine detaillierte Kontaktanalyse vorliegt und somit keine Rückschlüsse auf eine mögliche Zweipunktberührung gezogen werden können. Bei der Analyse auf mögliche Kontaktpunkte für die Simulation wird das Schienenprofil mit den gemessenen Radprofilen abgeglichen, denn durch die gemessenen Radprofile können Rückschlüsse auf das Fahrverhalten gezogen werden. Durch die klar abgefahrenen Spurkranzkehle und Spurkranzstirnflanke ist ein Kontakt zwischen Rad und Schiene hauptsächlich im Bereich der Spurkranzkehle zurückzuführen. Anzumerken ist, dass

für weitere Verschleißberechnungen eine detaillierte Kontaktanalyse zwischen Rad- und Schienenprofil benötigt wird.

7.1.1 Ermittlung der Kontaktfläche

Um die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene zu erfassen gibt es einige Varianten/Theorien, welche dazu herangezogen werden können. Die Hertzsche Theorie stellt für Simulationen in der Fahrdynamik eine bevorzugte Variante dar um Normalkontaktprobleme zu lösen. Da der Fokus der Masterarbeit auf die Ermittlung und Validierung der Spannungen aus den Messungen im Schienenkörper liegt und nicht auf die genaue Ermittlung der Kontaktfläche, wird die Hertzsche Theorie angewandt um eine annähernd passende Kontaktgebietsgröße zwischen Rad und Schiene zu erhalten. Für die zukünftige verschleißabhängige Simulationen sind die Berührgeometrie von größerer Bedeutung und die vereinfachte Annahme nach der Hertzschen Theorie ist nicht mehr ausreichend, dafür sind präzisere FE-Modelle aufzubauen. [1]

Um die Hertzsche Theorie anzuwenden sind gewisse Annahmen zu treffen: [1, S. 31]

- DIE KONTAKTOBERFLÄCHEN KÖNNEN ALS POLYNOME 2.ORDNUNG BESCHRIEBEN WERDEN
- DIE ABMESSUNGEN DES KONTAKTGEBIETES SIND KLEIN IM VERGLEICH ZU DEN ABMESSUNGEN UND KRÜMMUNGSRADIEN DER KONTAKTKÖRPER
- DIE KONTAKTKÖRPER WEISEN LINEAR-ELASTISCHES MATERIALVERHALTEN AUF
- DIE VERZERRUNG SIND KLEIN
- DIE KONTAKTOBERFLÄCHEN SIND GLATT
- DER KONTAKT IST REIBUNGSFREI

Durch die Annahmen kommt es zu Vereinfachungen des Systems. Da das Kontaktgebiet in derselben Größenordnung wie die Kontaktkörperradien sein kann, wird die Annahme, dass die Kontaktkörper als Halbräume betrachtet werden, an der Fahrkante und in der Hohlkehle verletzt. Aufgrund dieser Annahmeverletzung führt dies zu einer Unterschätzung der Größe des Kontaktgebietes und zufolge eine Überschätzung der lokalen auftretenden Spannungen ([1] zitiert nach [24]) Diese Verletzung über die Halbraumannahme wird aber in Kauf genommen, da die ersten Simulationsaufbauschritte einer MKS Fahrdynamiksimulation zugrunde liegen und in der MKS werden nur globale Kräfte benötigt. Das bedeutet, dass die lokalen Verteilungen inkorrekt sind aber das Flächenintegral korrekt ist. [1]

Grundsätzliches kommt es zu zwei wesentlichen Berührgeometrie Betrachtungen: zum einen zum Punktkontakt und zum anderen zu einem Linienkontakt.

○ Punktkontakt:

Grundlegend wird in drei Punktkontaktmodellen unterschieden: [25]

- Kugel-Kugel Kontaktmodell
- Kugel-Ebene Kontaktmodell
- Kugel-Zylinder Kontaktmodell

Bei den Kontaktmodellen Kugel-Kugel und Kugel-Ebene sind die Kontaktflächen kreisförmig (siehe Abbildung 7-5) und beim Modell Kugel-Zylinder ist die Kontaktfläche aufgrund der beiden gekrümmten Körper elliptisch. [25]

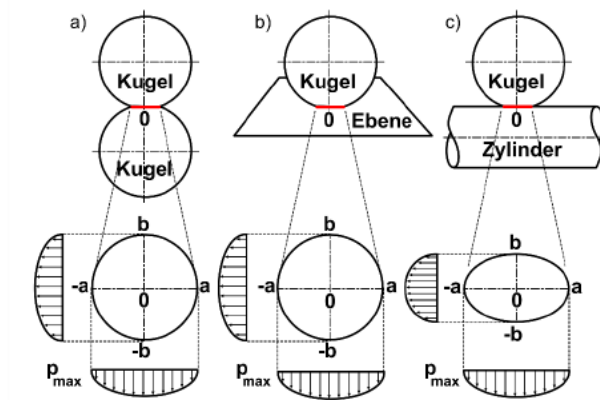


Abbildung 7-5: Kontaktmodelle-Punktkontakt [25, Abb. 2.5]

○ Linienkontakt:

Beim Linienkontakt wird zwischen zwei Modellen unterschieden (siehe Abbildung 7-6): [25]

- Zylinder-Zylinder Kontaktmodell
- Zylinder-Ebene Kontaktmodell

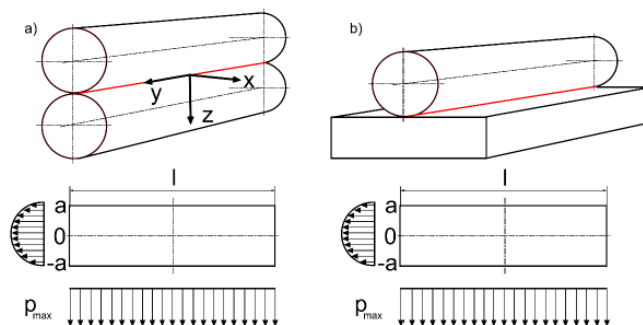


Abbildung 7-6: Kontaktmodell-Linienkontakt [25, Abb. 2.9]

Bei der Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene kann gemäß Hertz'sche Theorie eine elliptische Kontaktfläche betrachtet werden. Wie am Beispiel einer Vignolschiene ersichtlich (siehe Abbildung 7-7), kann das Kontaktproblem aus zwei Zylindern, welche orthogonal aufeinander stehen, identifiziert werden. [1]

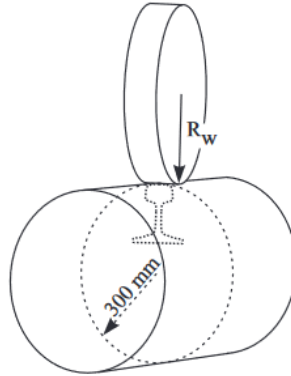


Abbildung 7-7: Kontaktflächen Ermittlung anhand von Zylindern [1, Abb. 2.8]

Die Ermittlung der Kontaktfläche erfolgt für den Kontakt zwischen Fahrflächenprofil von Rad und Schiene und zwischen Fahrkopfabrundung der Schiene und Spurkranzkehlen des Rades getrennt. Die Ermittlung der großen und der kleinen Hauptachse der Ellipse wird mit den nachstehenden Formeln (Gleichung 7-1 und Gleichung 7-2) aus dem Buch „Advanced Mechanics of Material“ von Boresi, Schmidt und Sidebottom ermittelt.

$$B = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{1'}} + \frac{1}{R_{2'}} \right) + \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{1'}} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_{2'}} \right) \right]^2 - 4 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{1'}} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_{2'}} \right) \sin^2 \alpha}$$

$$A = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{1'}} + \frac{1}{R_{2'}} \right) - \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{1'}} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_{2'}} \right) \right]^2 - 4 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{1'}} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_{2'}} \right) \sin^2 \alpha}$$

A, B	...	Konstanten
$R_1, R_{1'}$...	Hauptradien Körper 1
$R_2, R_{2'}$...	Hauptradien Körper 2
α	...	Winkel zwischen den Ebenen der Hauptkrümmungen am Berührungspunkt

$$\Delta = \frac{2(1 - \nu^2)}{(A + B)E}$$

ν	...	Querkontraktionszahl der Körper 1,2
A, B	...	Konstanten
E	...	Elastizitätsmodul der Körper 1,2

Gleichung 7-1: Gleichungen für die Bestimmung der Kontaktfläche Teil 1 [26, S. 698-712]

$$b = c_b \sqrt[3]{P\Delta}$$

b	...	Kleine Halbachse der Ellipse
c_b	...	Wert aus dem Diagramm „Spannungs- und Durchbiegungskoeffizienten für zwei Körper, die sich in einem Punkt berühren“ (S.709)
P	...	Einwirkende Kraft von Körper 1 auf Körper 2 bzw. Körper 2 auf Körper 1

$$a = \frac{b}{k}$$

a	...	Große Halbachse der Ellipse
b	...	Kleine Halbachse der Ellipse
k	...	Wert aus dem Diagramm „Spannungs- und Durchbiegungskoeffizienten für zwei Körper, die sich in einem Punkt berühren“ (S.709)

Gleichung 7-2: Gleichungen für die Bestimmung der Kontaktfläche Teil 2 [26, S. 698-712]

Für eine genaue Berechnung wird eine Demoversion von MESYS verwendet, welche die gleichen Gleichungen wie in Gleichung 7-1 verwendet, aber mit präziseren k und c_b Werten in die Berechnung hineingeht.

In Abhängigkeit der jeweiligen Radien für die Kontaktflächenermittlung ergeben sich für den Kontakt zwischen Fahrflächenprofil von Rad und Schiene und zwischen Fahrkopfabrundung der Schiene und Spurkranzkehle des Rades zwei unterschiedliche Kontaktflächen. Für den Radius der Fahrkopfabrundung wurde der Mittelwert von den einzelnen Radprofilradien entlang der Fahrkopfabrundung verwendet. In der Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 sind die gewählten Radien und die gewählten Kontaktflächen dargestellt.

Tabelle 7-1: Radien für die Kontaktflächenermittlung [eigene Darstellung]

Radien	Kontaktfläche zwischen	
	Fahrflächenprofil – Fahrflächenprofil	Fahrkopfabrundung – Spurkranzkehle
Schiene	225 mm	10 mm
Rad	345 mm	348 mm

Tabelle 7-2: Kontaktflächen Parameter [eigene Darstellung]

	Kontaktfläche zwischen	
	Fahrflächenprofil – Fahrflächenprofil	Fahrkopfabrundung – Spurkranzkehle
Halbachse a	4,75 mm	6,70 mm
Halbachse b	3,58 mm	0,69 mm
Hertzsche Fläche	54 mm ²	15 mm ²

8 Einwirkende Kräfte

Durch den Fahrweg wird die Bewegungsrichtung von Fahrzeugen vorgegeben, somit stellt die Spurführung die Vorgabe der Bewegungsrichtung von Fahrzeugen durch den Fahrweg dar. Durch die auftretenden Fehlstellungen, wie Querversatz, Verdrehung im Gleis und einer Kombination aus beiden sind Rad-Schiene Kräfte notwendig, damit Fahrwerke trotz dieser Fehlstellungen funktionieren. [11] Die Entstehung des Verschleißes an Rad und Schiene geht auf die vom Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene übertragenden Kräfte zurück. Bei Straßenbahnen kommt es aufgrund der baulichen Gegebenheiten zur Trassierung von besonders engen Gleisbögen, sodass es aufgrund der fehlenden Ausgleichsbewegungen der Abrollwege zwischen linken und rechten Rad zu intensiven Schlupfgegebenheiten und vor allem zum Anlaufen des Spurkranzes führt. Aufgrund der Gegebenheiten kommt es zu erhöhtem Verschleiß an Rad und Schiene. Zusätzlich kommt es wegen der engen Gleisbögen zu einem Fahrkantenkontakt und zum Anlaufen des Spurkranzes, wodurch hohe Kontaktkräfte und große Schlupfe entstehen und ein hoher Verschleiß an Rad und Schiene hervorgerufen wird. [1]

Die Übertragung der auftretenden Gewichtskräfte, Antriebs- und Bremskräfte und der Spurführungskräfte erfolgt über den Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene. [1] In der nachstehenden Abbildung 8-1 sind die einwirkende Kräfte des Rad-Schiene Modells aufgezeigt, dazu zählt die Radaufstandskraft (Q_F), die Normalkraft (N), die Profilseitenkraft (Y), der Schlupf und die Reibung, welche als grüne Ebene dargestellt ist. ([6] zitiert nach [27])

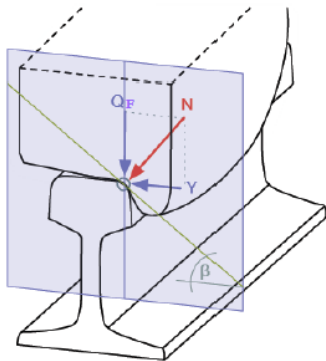


Abbildung 8-1: Einwirkende Kräfte ([6], Abb. 1.17 zitiert nach [27])

Antriebs- und Bremskräfte: Reibung zwischen Rad und Schiene ermöglicht, dass eine Kraftübertragung stattfinden kann. Keine Kraftübertragung entsteht bei reinem Abrollen, somit kann eine Kraftübertragung nur durch den Schlupf generiert werden, dies ist vor allem in Längsrichtung relevant. Im Allgemeinen ist der Schlupf definiert durch die Differenz zwischen der Winkelgeschwindigkeit (theoretisch zurückgelegtem Weg) und der Geschwindigkeit der Achse (tatsächlich zurückgelegtem Weg) bezogen auf den mittleren zurückgelegten Weg. Somit beinhaltet der Längsschlupf in x-Richtung eine Bewegung in x-Richtung (Längsrichtung) mit einer gewissen Geschwindigkeit und einer Winkelgeschwindigkeit (Drehgeschwindigkeit) des Rades. ([6] zitiert nach [27])

Statische Kräfte: zu den statischen Kräften zählen die Eigengewichte, die Rad- und Achslasten der jeweiligen Fahrzeugtypen und die statischen Kräfte, welche in Längsrichtung wirken. Die auftretenden statischen Kräfte in Längsrichtung entstehen aufgrund von Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgänge, Temperaturveränderungen und Schrumpfspannungen, welche nach dem Schweißen auftreten. ([6] zitiert nach [7])

- *Formschlusskraft (Zwangskräfte):* Darunter wird die Normalkraft verstanden, welche im Rad-Schiene Berührungspunkt auftritt. Zur Spurführung kann die gegeben falls vorhandene Komponente in Querrichtung der Normalkraft verwendet werden. In der Längsrichtung der Schiene erfolgt die Hauptbewegungsrichtung des Rades, die Komponente in Querrichtung (Y) steht senkrecht auf die Fahrgeschwindigkeit und leistet dadurch keine Arbeit. Wenn die Spurführung durch die Formschlusskräfte auftritt, findet dies nahezu verschleißfrei statt. [11]

Dynamische Kräfte: Dynamische Kräfte können in horizontaler, vertikaler und in Längsrichtung auftreten, welche aus Schwingungserscheinungen der Schiene und von den Fahrzeugtypen resultieren. Zusätzlich können dynamische Kräfte durch Lagefehler des Oberbaus entstehen. Die auftretenden Schwingungserscheinungen resultieren unter anderem aus dem vertikalen Stoß, welcher zum Beispiel durch Laufflächenunebenheiten der Schiene entsteht, durch den horizontalen Stoß, vom Seitenwind, von der Höhenlagedifferenz und zusätzlich von einer nicht ausgeglichenen Querbeschleunigung. ([6] zitiert nach [7])

- *Kraftschlusskräfte:* durch das Auftreten einer Relativbewegung (Schlupf) eines rollenden Rades kommt es zu Kraftschlusskräften. Schlupf kann in Längsrichtung (wie beim angetriebenen oder gebremsten Rad) oder in Querrichtung erfolgen. Durch die nicht parallele Ausrichtung des Rades zur Schiene tritt ein Schlupf in Querrichtung auf, da im Berührungspunkt die Bewegung durch das Abrollen nicht zur Gänze aufgenommen werden kann. Solche Längs- und Querkraftschlusskräfte sind verschleißbehaftet wegen der geleisteten Arbeit aufgrund der gleichen Ausrichtung von Schlupf und Kraft. [11]

Für das aufgebaute FEM-Modell werden folgende zwei Betrachtungen unterschieden, wobei in Zuge dieser Arbeit nur die statische Betrachtung herangezogen wird.

8.1.1 Statische Betrachtung

Für die statische Betrachtung und für die statische Simulation werden ausschließlich die im Kontaktpunkt einwirkenden Formschlusskräften (Zwangskräften) von Radlast (Q), Profilseitenkraft (Y) und Normalkraft (N) wie in der Abbildung 8-2 zu sehen betrachtet. In der Abbildung 8-2 ist ebenfalls ersichtlich, dass die Tangentenneigung stark zunimmt, sobald sich der Kontaktpunkt von der Lauffläche in Richtung Spurkranz verlagert, dadurch kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Normalkraft und der Profilseitenkraft. [1]

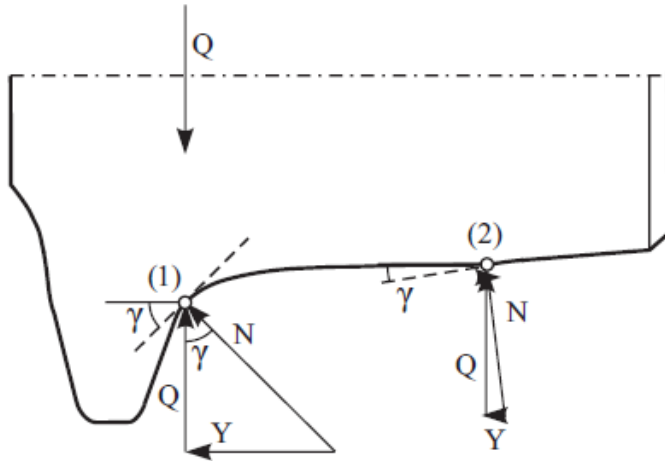


Abbildung 8-2: Formschlusskräfte (Zwangskräfte) [1, Abb. 2.3]

In Abhängigkeit der jeweiligen Positionen werden die entsprechende Normalkraft in der Berührfläche mit der nachstehenden Formel berechnet und die Normalkraft auf die jeweilige Kontaktfläche aufgetragen.

$$N = \frac{-Q}{\cos(\gamma)}$$

- N ... Normalkraft in der Berührfläche [kN]
 Q ... Radlast [kN]
 γ ... Tangentenneigung [°]

Gleichung 8-1: Gleichung für die Ermittlung der Normalkraft in der Berührfläche

8.1.2 Dynamische Betrachtung

Wie schon erwähnt entstehen bei einer dynamischen Betrachtung die horizontalen Kräfte in der Querrichtung des Gleises aus der Querbewegung, dem Seitenstoß, dem Seitenwind und aufgrund der Höhenlagedifferenz. [28] Im Zuge dieser Arbeit werden diese einzelnen dynamischen Faktoren nicht berücksichtigt, sondern der Fokus wird nur auf die statische Belastung und statische Validierung der Simulation gelegt.

9 Simulationsmodell

Um Rückschlüsse auf verschleißabhängige Spannungszustände in Rillenschienen zu erhalten, wird in den ersten Anfängen des FEM-Modellaufbaus das Bewegungsverhalten der Schiene sowie die Spannungszustände innerhalb der Rillenschiene nachgebildet und in Abgleich mit den statischen Messdaten kalibriert. Aufgrund der Abhängigkeiten der Umgebungsbedingungen (Querschnittsaufbau und Befestigungen) werden für die ersten Überlegungen vereinfachte Annahmen/Vereinfachungen für die einzelnen Komponenten des Querschnittes und der Befestigungen getroffen, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

9.1 Simulationsbestandteile

9.1.1 Querschnittsaufbau

Der Überblick über den Querschnittsaufbau ist im Kapitel 3.1.1.1 „Vorhandener Querschnitt im Messbereich“ erläutert und dargestellt. Nachfolgend wird ausgehend von der Gleistragplatte bis hin zur Schiene die einzelnen Komponenten des Querschnittsaufbaues kurz beschrieben und die Relevanz bezüglich des Simulationsaufbaus erläutert.

Gleistragplatte (Bestand):

Die unterste Gleistragplatte wird bei der Modellierung vernachlässigt. Als grundlegende stützende Basis, welche den Untergrund simuliert, wurde lediglich eine fixe Einspannung auf die Unterseite der neu eingebrachten 15 cm dicken Gleistragplatte aufgebracht. Eine höhere Relevanz wird der Gleistragplatte mit einer Dicke von 15 cm zugerechnet.

Gleistragplatte 15 cm:

Die neu betonierte 15 cm Gleistragplatte wird bei der Simulation modelliert und mit den spezifischen Materialeigenschaften hinterlegt. Dabei handelt es sich um einen Beton C25/30, B5 welcher unbewehrt eingebaut wird. [5]

- Maßgebende Materialeigenschaft:
 - E-Modul = 31000 N/mm² (MPa)

Fußprofil aus SBR-Gummi:

Da das Fußprofil eine elastische Funktion für das Gesamtsystem aufweist und einen gewissen Spielraum für Bewegungen bietet, wird dies bei der Simulation ebenfalls berücksichtigt. Das Fußprofil besteht aus SBR-Gummi (Styrol-Butadien-Kautschak) und der spezifische E-Modul wurde von der Herstellungsfirma SealAble übermittelt und mit 5,5 MPa mitberücksichtigt (M. Klug, persönliche Kommunikation, 30.01.2023). In der Simulation wird das Fußprofil an jenen Stellen berücksichtigt, an denen das Fußprofil angebracht worden ist. Für den Schutz der DMS wurden spezielle Kästen konstruiert, welche die DMS von äußeren Einflüssen schützen sollten. Die Kästen weisen eine Länge von 600 mm auf und in diesem Bereich ist kein Fußprofil angebracht und somit wird das Fußprofil in diesen Bereichen auch nicht modelliert.

- Maßgebende Materialeigenschaft:
 - E-Modul = 5,5 N/mm² (MPa)

Splitt:

Die 4 cm aufgeschüttete Splittschicht dient als Grundlage für die Großflächenplatten, für das Gesamtsystem besitzt der Splitt aber keine Stützfunktion, welche für das System relevante Kräfte aufweisen könnte und wird somit vernachlässigt. Er dient lediglich als gleichmäßige Auflagefläche für die Großflächenplatten.

Stahlbeton Großflächenplatten:

Die 13 cm Stahlbeton Großflächenplatten werden ebenfalls vernachlässigt. Sie besitzen eine Schutzfunktion für das System bzw. eine Tragfunktion von Fahrzeugen, Fußgänger und Radfahrer, sind aber für das Systemverhalten Rad-Schiene vernachlässigbar. Die Großflächenplatten grenzen nicht direkt an die Schiene an, somit ist ein Spielraum für die Kopfbewegungen vorhanden und durch ihre abgeschrägte Form liegen die Großflächenplatten nicht direkt auf den Schienenfuß auf. Eine zusätzliche Anpresskraft auf den Schienenfuß wird dadurch nicht erzeugt.

Kammerfüllelemente:

Die Kammerfüllelemente sind als Füllelemente zwischen den Hohlräumen des Rillenschienenprofils vorgesehen und besitzen keine Stützfunktion. Sie dienen im Wesentlichen als Dichtelement der Schiene für elektrische Sicherung und für die Aufnahme von akustischen Emissionen. Durch diese Ausführung der Kammerfüllelemente haben sie für die Kräftebildung im System in erster Linie keinen relevanten Einfluss und werden vernachlässigt. [29]

Rillenschiene 60R1:

Es werden Rillenschienen mit dem Profil 60R1 eingebaut, welche eine Güte UIC von R 290 GHT mit einem CEN/Walzzeichen HSHM aufweisen. [30] Durch die Wärmebehandlung und der HSH Technologie (Head Special Hardened Technologie) wird das Gefüge verfeinert und im Schienenkopf eine erhöhte Einhärtetiefe und Homogenität erzeugt. Der Schienenfuß und Schienensteg werden nicht wärmebehandelt und erhalten eine gleichbleibende Schienenhärte und dadurch eine hohe Zähigkeit. [6]

- Maßgebende Materialeigenschaft:
 - E-Modul = 210000 N/mm² (MPa)

9.1.2 HalterungenSpurstangen:

Für die ersten Simulationsschritte wird ein Spurstangenabstand von 1500 mm verwendet und mit den passenden Verschraubungen in der Simulation berücksichtigt. Für die Spurstangen und die Spurstangenschrauben werden die gleichen Materialparameter herangezogen wie für die Rillenschiene, damit der rechnerische Aufwand reduziert wird.

- Maßgebende Materialeigenschaft:
 - E-Modul = 210000 N/mm² (MPa)

Klemmplatten:

Klemmplatten werden in der Geraden alle 2 m und im Bogen alle 1,5 m auf der Innenseite des Gleises angeordnet. Sie dienen dazu, dass die Schiene nicht abhebt und nicht nach innen ausweichen kann. Aufgrund der nicht vorhandenen Feder kann eine Anpresskraft nur durch geeignete Versuche ermittelt werden. Das einzige „Federelement“ bei dieser Befestigung ist

eine Styroporplatte zwischen Schienenfuß und der Befestigung. Aufgrund der fehlenden Angaben zu der Anpresskraft der Klemmplatten wird davon ausgegangen, dass die Klemmplatten eine fixe Einspannung in vertikaler und horizontaler Lage bilden. Somit wird an jenen Punkten an denen die Klemmplatten montiert sind, eine horizontale und vertikale Einspannung definiert und dadurch die Klemmplatten in der Simulation berücksichtigt. Im Bereich der DMS konnten keine Klemmplatten montiert werden und wird somit in der Simulation nicht berücksichtigt.

Seitliche Halterungen:

Die länglichen mit einem quadratischen Querschnitt gestalteten Halterungen werden im gleichen Abstand wie die Klemmplatten im Beton eingelegt. Aus dem Beton ragen die seitlichen Halterungen ein kleines Stück hinaus und verhindern dadurch eine Verschiebung der Schiene nach Gleis außen. Die Ermittlung der Anpresskraft der seitlichen Halterungen muss ebenfalls mit Versuchen erfolgen, daher wird ebenfalls von einem idealen Zustand ausgegangen, und zwar dass die Schiene an jenen Punkten in horizontaler Richtung fixiert ist. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die seitlichen Halterungen gegen Rotation und vertikaler Verschiebung fixiert sind, da die seitlichen Halterungen in die Gleistragplatte mit einbetoniert sind. Somit wird eine fixe Einspannung als seitliche Halterung definiert.

9.1.3 Kästen

Die Kästen, welche zum Schutz der DMS montiert worden sind, bilden keinen unmittelbaren Kontakt mit der Schiene, da aber die Klemmplatte und die seitliche Halterungen im Bereich der DMS Positionierung fehlen, kommt es bei den ersten Simulationsdurchläufen im Vergleich zu den anderen fixierten Stellen zu erhöhten Auslenkung der Schiene. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Kästen eine stützende Funktion für die vertikale Verschiebung der Schiene haben und werden somit ebenfalls berücksichtigt.

9.1.4 Kontaktflächen

Um ein ganzheitliches System bei der Simulation zu modellieren werden zwischen den einzelnen Komponenten noch Kontaktflächen bzw. verbundene Flächen definiert. Folgende Verbindungsflächen werden hergestellt:

Kontaktflächen:

- Zwischen Gleistragplatte und Fußprofil: Haftreibungskoeffizient von 0,8
- Zwischen Fußprofil und Rillenschiene: Haftreibungskoeffizient von 0,4
- Zwischen Fußprofil und seitliche Halterung: Haftreibungskoeffizient von 0,4
- Zwischen Fußprofil und Klemmplatte: Haftreibungskoeffizient von 0,4
- Zwischen Kästen und Schiene: Haftreibungskoeffizient von 0,15
- Zwischen Kästen und Fußprofil: Haftreibungskoeffizient von 0,4
- Rad-Schiene Kontaktfläche (siehe Kapitel 7.1.1 „Ermittlung der Kontaktfläche“)

Verbundene Flächen:

- Zwischen Spurstange und Spurstangenschrauben
- Zwischen Spurstangenschrauben und Rillenschiene

9.1.5 Einwirkende Kräfte

Für die Radkräfte werden jeweils die Achsenlasten der einzelnen Fahrzeugtypen verwendet. Für die ersten Kalibrierungsmessungen wird nur die Kraft des ersten Losradpaares betrachtet, da nur vom ersten Losradpaar statische Messungen durchgeführt worden sind. Bei den statischen Messungen wurde eine leere Straßenbahn auf den jeweiligen Messquerschnittsbereich platziert. Für die erste Achse ergibt sich eine Radlast von einer leeren Straßenbahn von 4000 kg dies entspricht ca. 39 kN. [12] In Abhängigkeit von der Angriffsfläche des Kontaktpunktes wird die Radlast in eine Normalkraft umgerechnet, um dadurch den Querkraftanteil mit zu berücksichtigen. (siehe Kapitel 8.1.1 „Statische Betrachtung“)

9.1.6 Zusammenfassung der modellierten Bestandteile

In der Tabelle 9-1 werden die verwendeten Bestandteile mit den dazugehörigen maßgebenden Materialeigenschaften dargestellt.

Tabelle 9-1: Modellierte Bestandteile [eigene Darstellung]

<i>Modellierte Bestandteile</i>	<i>Maßgebende Materialeigenschaften</i>
<i>Gleistragplatte 15 cm</i>	E-Modul: 31000 N/mm ² (MPa)
<i>Fußgummi</i>	E-Modul: 5,5 MPa
<i>Rillenschiene 60R1</i>	E- Modul 210000 N/mm ² (MPa)
<i>Spurstange</i>	E-Modul: 210000 N/mm ²
<i>Kästen</i>	E-Modul: 210000 N/mm ²

In der Tabelle 9-2 wird die Annahme für die Achslast der ersten Achse dargestellt. Auf Basis dieser Achslast wird die jeweilige Normalkraft in Abhängigkeit der Kontaktfläche berechnet.

Tabelle 9-2: Modellierte Kräfte [12]

<i>Modellierte Kräfte</i>	<i>Kräfte</i>
<i>Radlast</i>	Nicht beladen 4000 kg = 39 kN

9.2 Simulationsdurchführung

Der Aufbau und die Durchführung der Simulation wird mit dem Simulationsprogramm Siemens NX vollzogen. Wie im Kapitel 9.1 „Simulationsbestandteile“ beschrieben, werden die relevanten Querschnittselemente für die Simulation verwendet. In der nachfolgenden Abbildung 9-1 werden die gesamten Bestandteile, welche in das FEM-Modell einfließen, dargestellt.

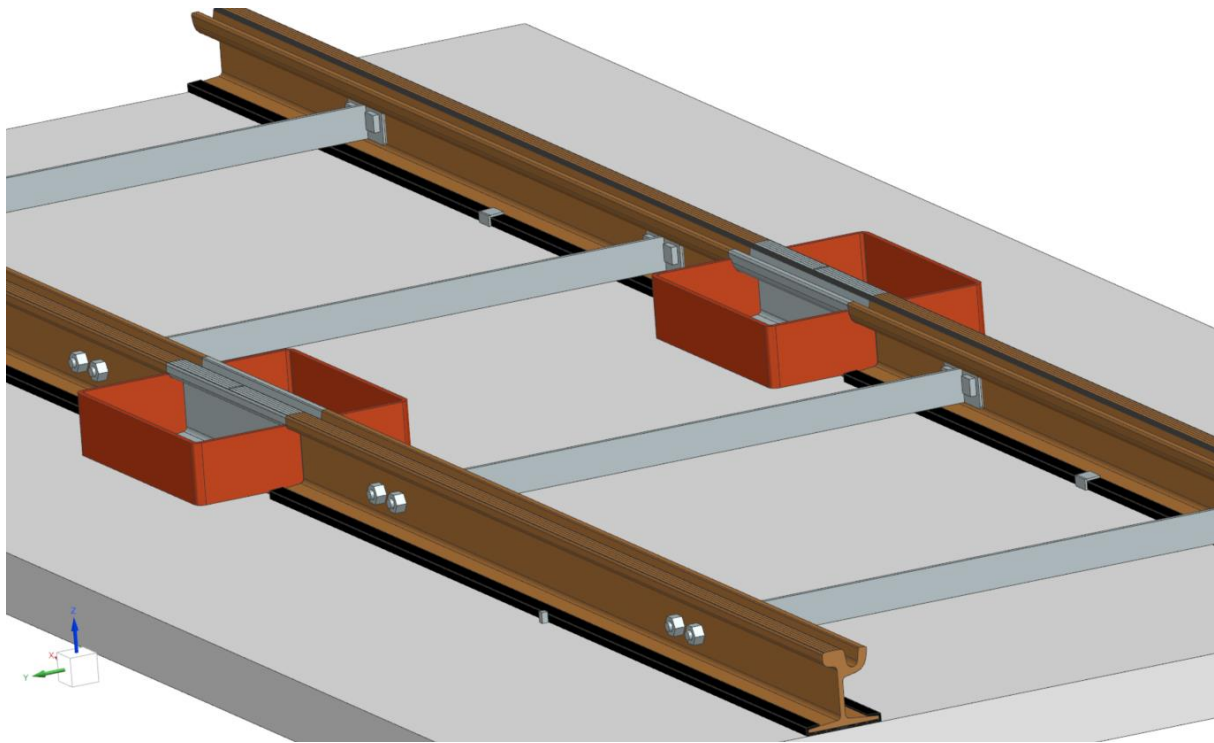


Abbildung 9-1: FEM-Modell [eigene Darstellung]

Um die komplexen Zusammenhänge nachzuvollziehen, werden in den ersten Simulationsschritten sehr vereinfachte Verhältnisse angenommen. Die ersten Simulationsschritte werden in einem idealisierten Geradengleis mit dem Originalprofil der Schiene durchgeführt. Die gemessenen Radprofile geben für die ersten Simulationsschritte Hinweise über die möglichen Berührungspunkte zwischen Rad und Schiene. (siehe Kapitel 7.1 „Kontaktfläche“)

Durch die lokale bzw. nur statische Betrachtung des Spannungszustandes fließt in das Modell nur die erste Achslast mit hinein. Unter Berücksichtigung der begrenzten Rechenleistung und aufgrund der Annahme, dass nur die erste Achse im Modell betrachtet wird, wurde eine Gleislänge von 6 m gewählt. Für weitere dynamische Betrachtungen ist ein längeres Modell zu berücksichtigen und auf den möglichen Einfluss der nächsten Radlasten (Achslasten) Rücksicht zu nehmen.

Passende feine 3D-Netze (10 Knoten) werden gewählt, um eine ausreichende Datengenauigkeit und gleichzeitig eine geeignete Rechenleistung zu erhalten. Für die Kontaktflächen werden die ermittelten Flächen aus Tabelle 7-2 aufgetragen. Nach der Wahl der geeigneten Kontaktverbindungen und der zulässigen Bewegungsfreiheit der einzelnen Komponenten werden die Simulationsergebnisse im ersten Schritt überschlagsmäßig mit den gemessenen Verkipnungen von den Überfahrten verglichen. Aufgrund der fehlenden dynamischen Komponente wurden keine Verkipnungen bei den statischen Messungen aufgenommen, daher wird für die Überprüfung der Verkipfung des FEM-Simulation überschlagsmäßig mit den gemessenen

Verkipungen aus den Überfahrten verglichen, um daraus eine Rückmeldung über die richtige Systemannahmen zu bekommen. Ein Einblick über die Durchführung der statischen Messung eines Losradpaares liefert die Abbildung 9-2.

Ein besonders relevanter Faktor spielt die Wahl der richtigen Belastung (Berührungspunktauswahl). Unter Berücksichtigung der Normalkraft, welche aus der Radlast resultiert, wird das System belastet und die Auslenkungen und Spannungszustände mit den statischen Messdaten verglichen. Für die Kalibrierung der Simulation spielt neben den ganzen Randbedingungen ebenfalls die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Rad und Schiene eine wesentliche Rolle. Die nachfolgenden Betrachtungen werden ausschließlich mit einer Einpunktberührung durchgeführt. Wie aus der Messdatenanalyse (siehe Kapitel 6 „Erkenntnisse aus den Messungen“) hervorgeht, wird eine Zweipunktberührung im zweiten Messquerschnitt, aufgrund der Lage in der Bogenmitte und wegen den deutlich geringeren Spannungen als bei den anderen Messquerschnitten, vermutet. Aufgrund dessen werden im Folgenden für die Kalibrierungsdaten ausschließlich der erste und dritte Messquerschnitte herangezogen.



Abbildung 9-2: Statische Messung des ersten Losradpaares [eigene Aufnahme]

9.3 Simulationskalibrierung

Trotz der vereinfachten Annahmen wird das grundlegende Spannungsverhalten von den unterschiedlichen Belastungsangriffspunkten auf der Rillenschiene verdeutlicht. Um den grundlegenden Einfluss der Lasteinleitung auf die Spannungsverteilung zu veranschaulichen werden die zwei wesentlichen Einpunktberührungen im Folgenden dargestellt. Unter einfachen Randbedingungen wird jeweils die Rillenschiene mit einer Krafteinleitung auf die Lauffläche und auf die Kopfeckabrundung belastet (siehe Abbildung 9-3). Bei einer Belastung auf die Lauffläche der Rillenschiene stellt sich der in der Abbildung 9-4 (linkes Bild) ersichtliche Spannungszustand ein. Ein Vergleich mit der Krafteinleitung auf die Kopfeckabrundung (siehe Abbildung 9-4 (rechts Bild)) zeigt, dass durch die Krafteinwirkung senkrecht auf die Lauffläche deutlich geringere Spannungen an der Fahrkopfseite und an der Rillenkopfseite wirken als bei der Krafteinleitung auf die Kopfeckabrundung. Ein wesentlicher Unterschied bei den zwei Einpunktbelastungsvarianten ist im Stegbereich und an der Rillenkopfunterseite zu erkennen. Positive Spannungen im Stegbereich (SSS_3) und negative Spannungen an der Rillenkopfunterseite (SKU_4) stellen sich ausschließlich bei einer Krafteinleitung auf die Kopfeckabrundung ein. Durch die erste simple Belastungsannahmen im vereinfachten Modell kann ein grundlegendes Spannungsverhaltensverhalten bei einer Einpunktberührung veranschaulicht werden.

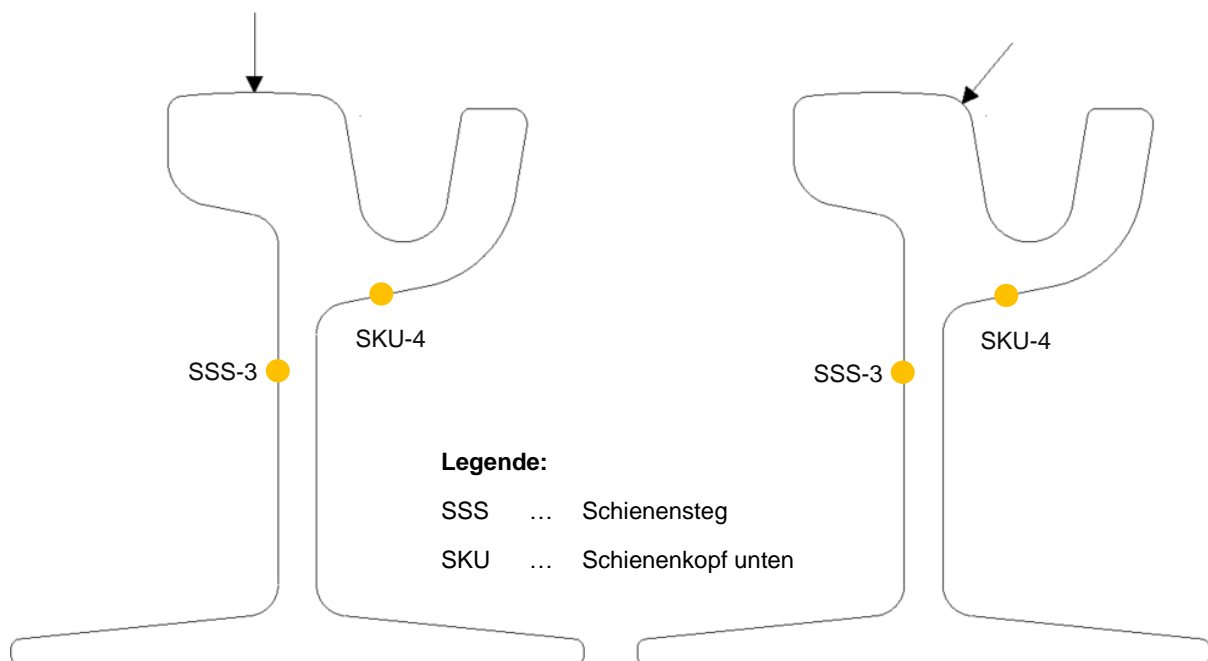


Abbildung 9-3: Einpunktberührungen Varianten: auf die Lauffläche (links) – auf die Kopfeckabrundung (rechts) [eigene Darstellung]

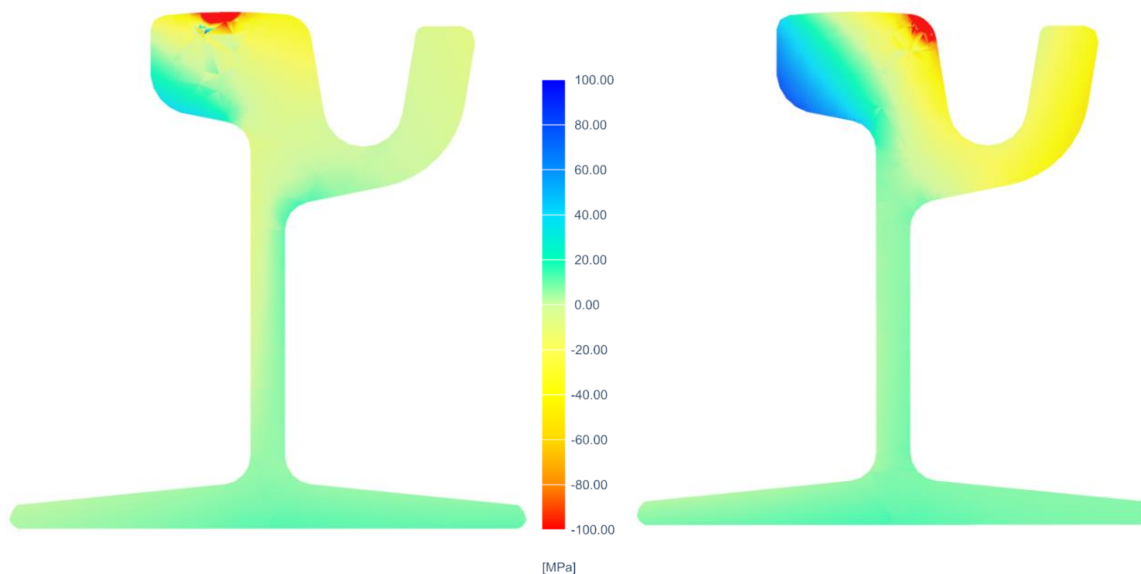


Abbildung 9-4: Normalspannungen in Schienenachse bei einer Belastung auf den Fahrkopfbereich (links) und einer Belastung auf die Kopfeckabrundung (rechts) [eigene Darstellung]

Aus diesen Erkenntnissen der Belastungen werden Rückschlüsse auf die mögliche Kontaktberührung zwischen Rad und Schiene während der statischen Messung gezogen und die ideale Kontaktberührung analysiert. Sobald die Belastung bei der Kopfeckausrundung angesetzt wird, stellte sich der gleiche grundlegende Spannungszustand ein, welcher bei allen drei Messquerschnitten bei der statischen Messung gemessen worden ist. Somit wird die Kopfeckausrundung mit der zugehörigen Normalkraft abhängig von der Lage der Kontaktfläche belastet und die Spannungen mit den statischen Messdaten verglichen, bis eine annähernd gleiche Spannungssituation vorherrscht.

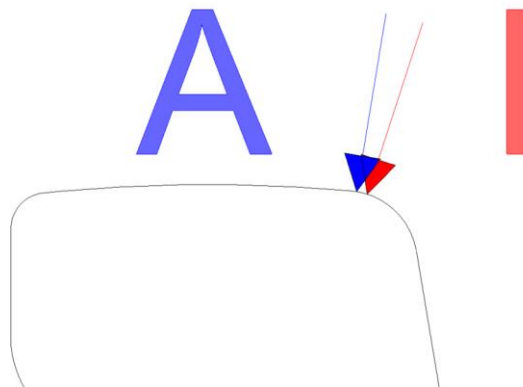
Aufgrund der vereinfachten Annahmen, dass es zu einer Einpunktberührung kommt und die Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene vereinfacht als Hertzsche Fläche berechnet sind, gibt es gewisse Abweichungen in manchen DMS Messpositionen. Abweichungen sind unter anderem auf die vereinfachte Kraftannahme und Kontaktberührung zurückzuführen, aber auch die angenommen Randbedingungen sind Ursachen für die Abweichungen. Weitere Abweichungen sind auf die statische Messung zurückzuführen, da eine genaue Positionierung der Räder über den Messquerschnitten für die statischen Messung nicht vollkommen möglich ist. Eine annähernd exakte Positionierung konnte im Bereich des ersten und letzten Messquerschnittes erfolgen, während bei der statischen Positionierung im zweiten Messquerschnitt (Bogenmitte) zu beachten ist, dass aufgrund der Bogenkrümmung die Räder nicht genau über den Messbereich gestanden sind und es aufgrund der geringen statischen Spannungen zu einer vermutlichen Zweipunktberührung geführt hat.

9.4 Vergleich: Messdaten – Simulationsdaten

Im nachfolgenden werden für den ersten und dritten Messquerschnitt der Vergleich der Messdaten und Simulationsdaten dargestellt. Die Normalspannungen in der Schienenachse werden aus der Simulation herausgelesen und mit den Messdaten verglichen und in den nachfolgenden Tabellen aufgerundet dargestellt.

1. Messquerschnitt (Bogenanfang):

Durch den Vergleich der Messdaten mit den Simulationsergebnissen ergibt sich die in Abbildung 9-5 dargestellte Stellung der Einpunktberührung. Dabei wird die Außenschiene (blau) weiter oben in der Kopfeckausrundung belastet als die Innenschiene (rot).



Kräfte:

$$N_A = 40 \text{ kN}$$

$$N_I = 41 \text{ kN}$$

Legende:

A ... Außenschiene

I ... Innenschiene

N_A ... Normalkraft Außenschiene

N_I ... Normalkraft Innenschiene

Abbildung 9-5: Kräfteinleitungspunkte - 1.Messquerschnitt (blau – Kräfteinleitungspunkt Außenschiene; rot – Kräfteinleitungspunkt Innenschiene) [eigene Darstellung]

In der nachfolgenden Abbildung 9-6 ist der Vergleich zwischen den gemessenen Spannungen im Gleis und jenen aus der Simulation dargestellt. Zu größeren Abweichungen kommt es bei den Messpunkt SFU_2i, SKS_5i und dem Messpunkt SKS_5a. Im Allgemeinen beschränken sich die Abweichungen durchschnittlich auf 20 % (siehe Tabelle 9-3).

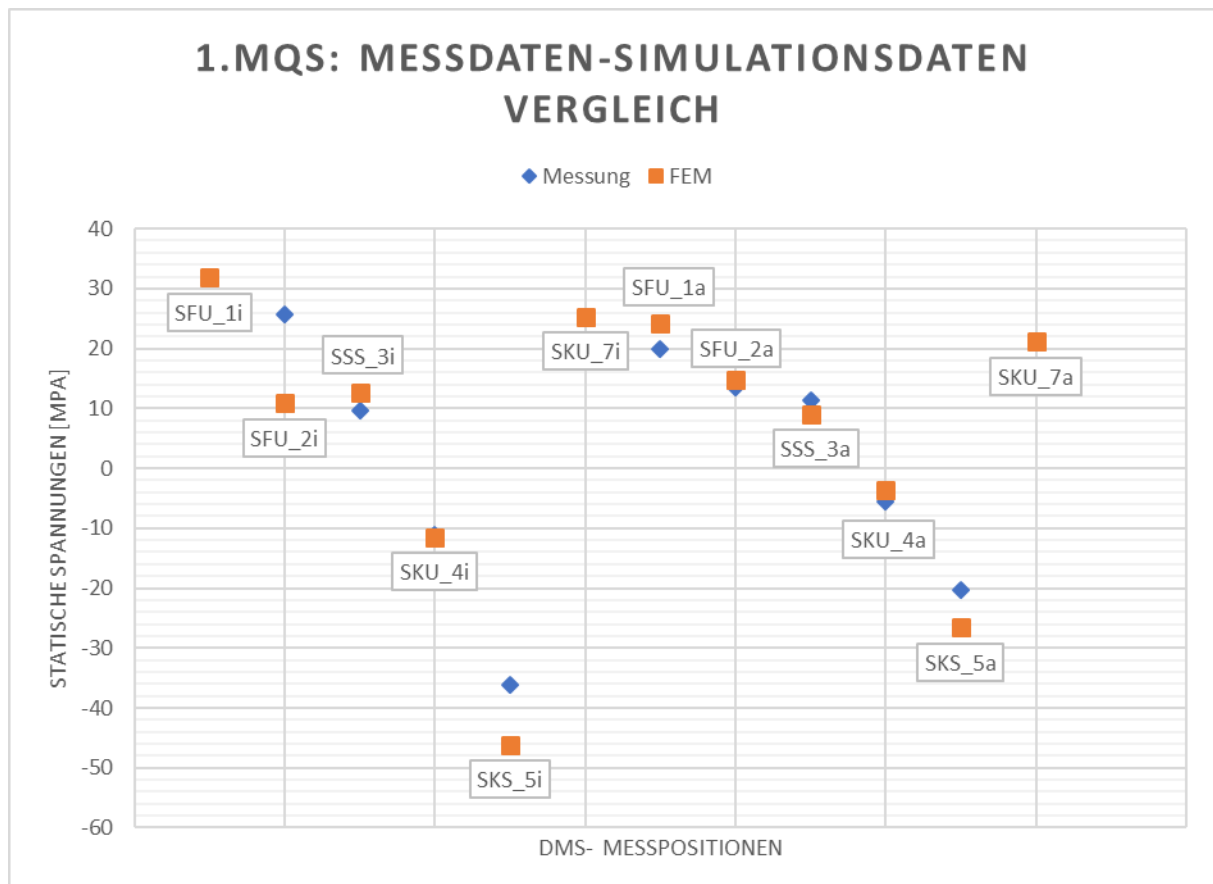


Abbildung 9-6: Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 1. MQS [eigene Darstellung]

Tabelle 9-3: Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 1. MQS [eigene Darstellung]

		Messung [MPa]	FEM [MPa]	Differenz [MPa]
Innenschiene	SFU_1i	32	32	0
	SFU_2i	26	11	-15
	SSS_3i	10	13	3
	SKU_4i	-11	-11	-0
	SKS_5i	-36	-46	-10
	SKS_6i	-	-	-
	SKU_7i	25	25	0
Außenschiene	SFU_1a	20	24	4
	SFU_2a	14	15	1
	SSS_3a	11	9	-2
	SKU_4a	-6	-4	2
	SKS_5a	-20	-27	-7
	SKS_6a	-	-	-
	SKU_7a	21	21	0

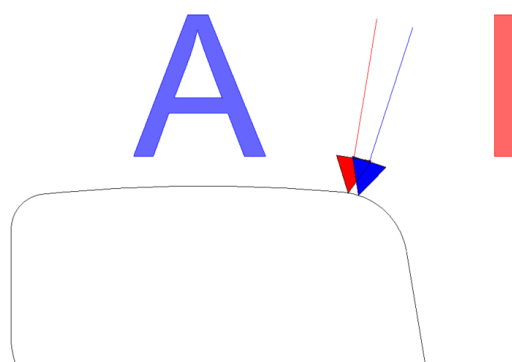
2. Messquerschnitt (Bogenmitte):

Aufgrund des vereinfachten Aufbaus der Simulation als Gerades Gleis ist kein Bogenlauf vorhanden. Auf Basis der Messdaten wird ein ähnliches Kontaktverhalten zwischen Rad und Schiene wie beim ersten Messquerschnitt festgestellt. Der einzige Unterschied liegt in den Dimensionen der Spannungswerte. Wie schon erwähnt, wird aufgrund der niedrigen Spannungswerte auf eine Zweipunktberührung geschlossen, welche in der Simulation aber nicht berücksichtigt wird.

3. Messquerschnitt (Bogenende):

Bei der Bogenausfahrt kommt es zu einer ähnlichen Kontaktberührung wie beim ersten Messquerschnitt (siehe Abbildung 9-7). Durch die Krafteinleitung kommt es im Vergleich zum ersten Messquerschnitt zu einer deutlich größeren absoluten Abweichung vor allem in den Messpunkten SKS_5a und SKU_7a. Die detaillierten Abweichungen sind der Tabelle 9-4 zu entnehmen und in der Abbildung 9-8 grafisch veranschaulicht, dabei kommt es zu einer durchschnittlichen Abweichung von 36 %. Für den Messquerschnitt drei wurde zusätzlich noch eine weitere passende Krafteinleitungskombination festgestellt, welche in der Abbildung 9-9 dargestellt ist. Dabei kommt es durchschnittlich zu geringeren Abweichungen von ca. 33 % als bei der ersten Krafteinleitungsvariante. Bei der zweiten Krafteinleitungsvariante kommt es zu einer größeren absoluten Abweichung vor allem in den Messpunkten SKS_6a und SKS_7a. Ein Vergleich der zwei Krafteinleitungsvarianten zeigt, dass vor allem im Kopfbereich (SKS_5, SKS_6, SKU_7) die Wahl des Krafteinleitungspunktes eine wesentliche Rolle spielt. In den Simulationsergebnissen der zweiten Krafteinleitungsvariante ist ebenfalls ersichtlich, dass trotz der symmetrischen Belastung leichte Unterschiede in den FEM Spannungswerten der Außen- und Innenschiene vorzufinden sind und dies Rückschlüsse auf das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem ergeben (siehe Tabelle 9-5 und Abbildung 9-10). Wie in der Abbildung 9-4 dargestellt, haben die Krafteinleitungspunkte auf der Lauffläche und in der Kopfeckabrundung unterschiedliche Auswirkungen auf die Spannungsverteilungen der Rillenschiene. Somit kann beim Messquerschnitt drei eine Verbesserung der FEM-Spannungsdaten der Außenschiene durch eine mögliche Zweipunktberührung erfolgen.

1. Krafteinleitungsvariante:



Kräfte:

$$N_A = 41 \text{ kN}$$

$$N_I = 40 \text{ kN}$$

Legende:

A	...	Außenschiene
I	...	Innenschiene
N_A	...	Normalkraft Außenschiene
N_I	...	Normalkraft Innenschiene

Abbildung 9-7: Krafteinleitungspunkte - 3.Messquerschnitt – 1.Variante (blau – Krafteinleitungspunkt Außenschiene; rot – Krafteinleitungspunkt Innenschiene) [eigene Darstellung]

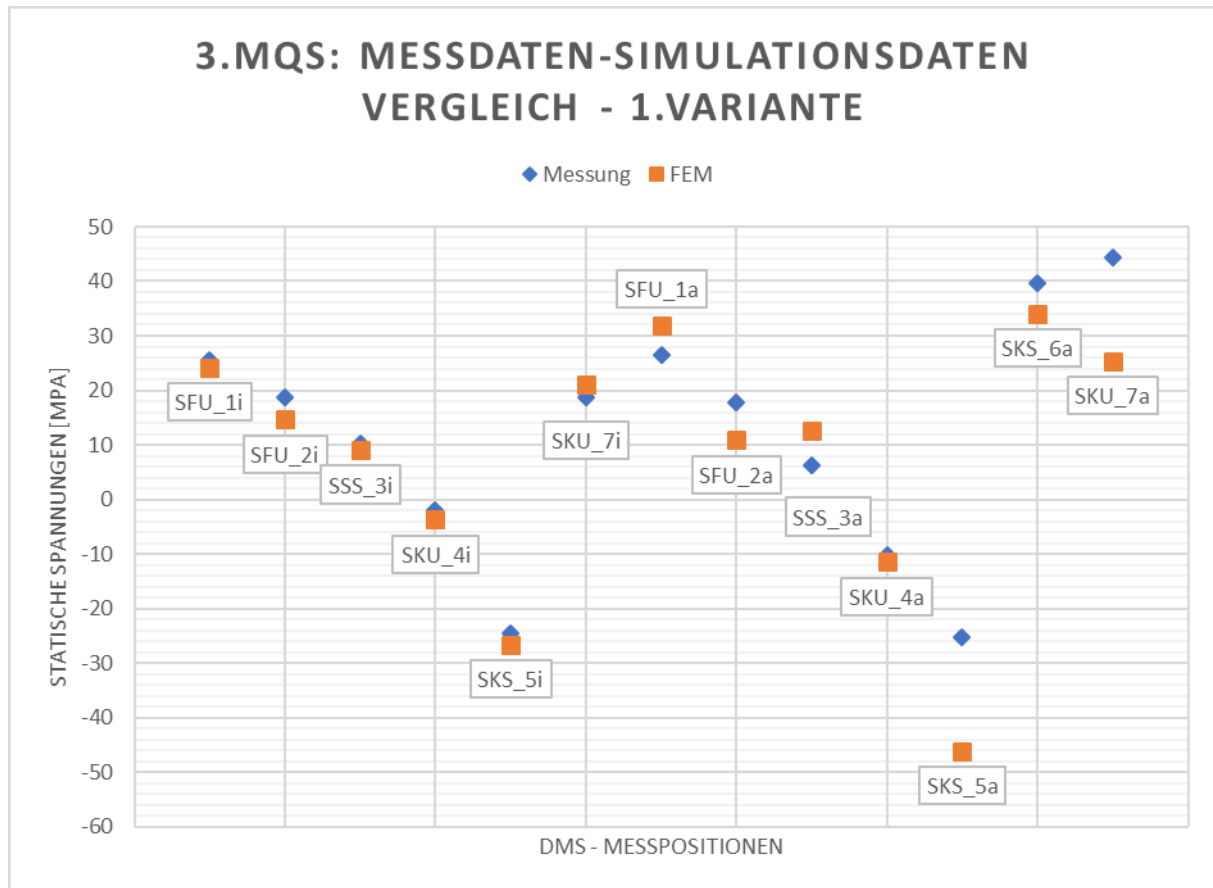
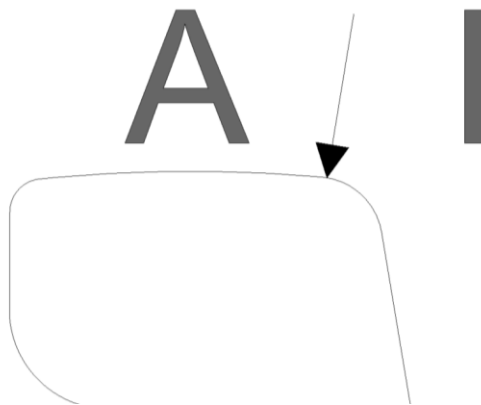


Abbildung 9-8: Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 1. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]

Tabelle 9-4: Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 1. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]

		Messung [MPa]	FEM [MPa]	Differenz [MPa]
Innenschiene	SFU_1i	26	24	-2
	SFU_2i	19	15	-4
	SSS_3i	10	9	-1
	SKU_4i	-2	-4	-2
	SKS_5i	-25	-27	-2
	SKS_6i	-	-	-
	SKU_7i	19	21	2
Außenschiene	SFU_1a	27	32	5
	SFU_2a	18	11	-7
	SSS_3a	6	13	7
	SKU_4a	-10	-11	-1
	SKS_5a	-25	-46	-21
	SKS_6a	40	34	-6
	SKU_7a	44	25	-19

2. Krafteinleitungsvariante:



Kräfte:

$N_A = 40 \text{ kN}$

$N_I = 40 \text{ kN}$

Legende:

A ... Außenschiene

I ... Innenschiene

N_A ... Normalkraft Außenschiene

N_I ... Normalkraft Innenschiene

Abbildung 9-9: Krafteinleitungspunkte - 3. Messquerschnitt – 2. Variante [eigene Darstellung]

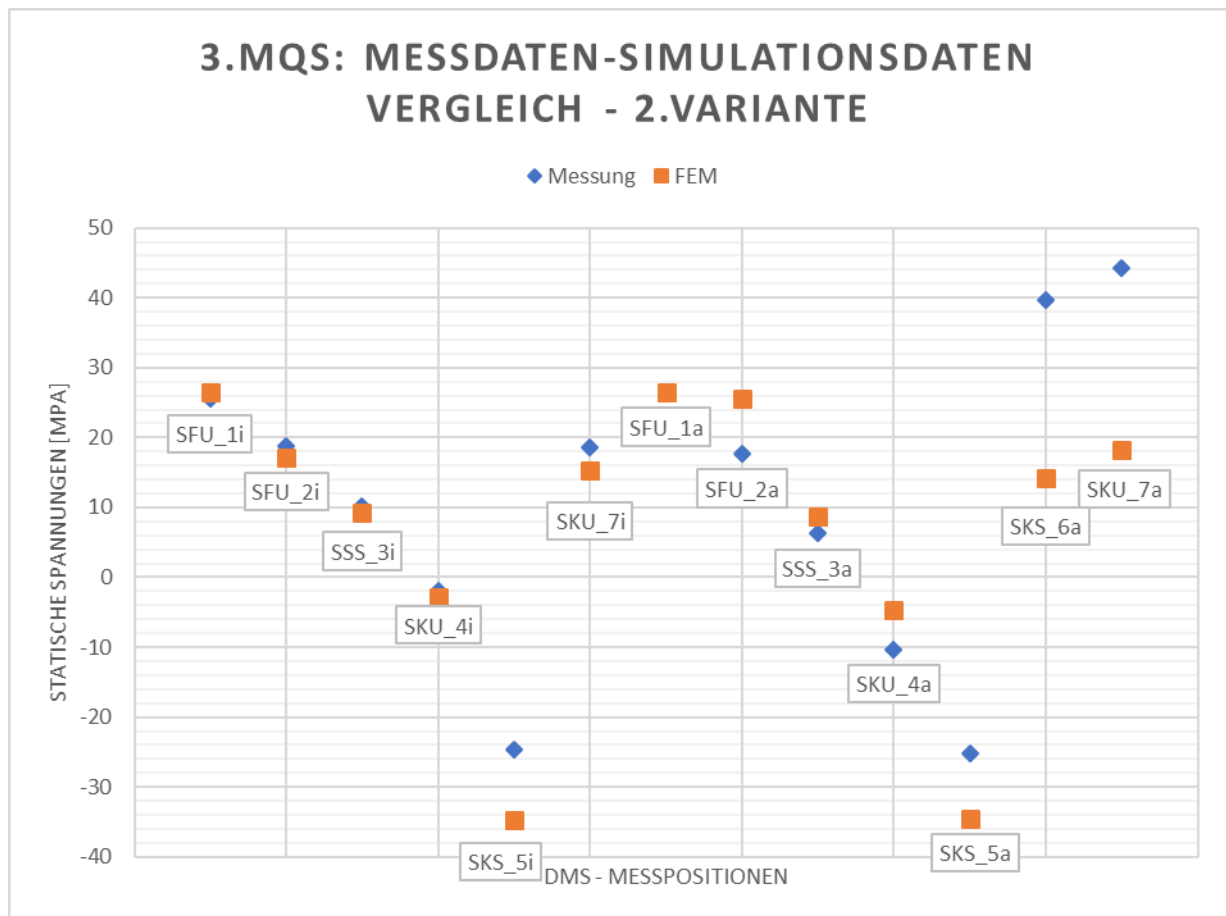


Abbildung 9-10: Grafische Darstellung der Spannungsvergleiche (Normalspannungen in Schienenachse) zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 2. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]

Tabelle 9-5: Spannungsvergleich zw. Mess- und Simulationsdaten des 3. MQS – 2. Krafteinleitungsvariante [eigene Darstellung]

		Messung [MPa]	FEM [MPa]	Differenz [MPa]
Innenschiene	SFU_1i	26	26	0
	SFU_2i	19	17	-2
	SSS_3i	10	9	-1
	SKU_4i	-2	-3	-1
	SKS_5i	-25	-35	-10
	SKS_6i	-	-	-
	SKU_7i	19	15	-4
Außenschiene	SFU_1a	27	26	-1
	SFU_2a	18	26	8
	SSS_3a	6	9	3
	SKU_4a	-10	-5	5
	SKS_5a	-25	-34	-9
	SKS_6a	40	14	-26
	SKU_7a	44	18	-26

10 Erkenntnisse aus der Simulation

Beim Aufbau der Simulation ist auf sämtliche Randbedingungen des Querschnittes Rücksicht zu nehmen, was folglich zu zahlreichen Annahmen führt. Ein Vergleich mit den Messdaten beinhaltet einige Fehlerquellen, welche eine zusätzliche Herausforderung für den Aufbau der Simulation darstellen. Beim Einbau der DMS wurde mittels Schablonen und präzisen Abmessungen darauf geachtet, dass die geplante Positionierung eingehalten wird, jedoch ist mit einer Einbautoleranz zu rechnen. Im Allgemeinen ist aber die Positionierung der einzelnen DMS bekannt und dieselben Positionierung können aus der Simulation ausgelesen werden. Natürlich sind aber beim Auslesen der Daten ebenfalls mit Fehlerquellen zu rechnen. Weitere mögliche Verbesserungsmöglichkeiten liegen in der Annahme der Materialwerte, der Reibwerte, der Verbindungen und durch eine noch genauere Betrachtung des Querschnittaufbaues. Unter anderem ist beim ersten Messquerschnitt unmittelbar in der Nähe eine angeschweißte Drainage am Schienenfuß platziert, dies könnte ebenfalls mögliche Einflüsse auf die Messdaten haben. Ebenfalls muss auch die Nachgiebigkeit der Befestigungen berücksichtigt werden, welche mit der Zeit nicht mehr die volle Befestigungskraft aufweisen wie beim Einbau, dafür sind mögliche Freiheitsgrade für die Befestigungen festzulegen. Bei den ersten Durchläufen hat sich gezeigt, dass vor allem die Befestigungsannahmen eine wesentliche Rolle spielen und einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Verbesserungspotential liegt definitiv bei der Kontaktflächengröße zwischen Rad und Schiene und den Krafteinleitungspunkten der Radlast (Einpunkt- oder Zweipunktberührung). Mögliche Effekte der weiteren Achslasten können vor allem bei der dynamischen Betrachtung eine wesentliche Rolle spielen. Darüber hinaus ist bei einer dynamischen Betrachtung auf die spezielle Fahrzeugkonstruktion des betrachteten Fahrzeugtype Rücksicht zu nehmen.

Die ersten Erkenntnisse über das spannungsabhängige Verhalten von Rillenschienen können durch die Simulation getätigt werden. Durch den Vergleich der Mess- mit den Simulationsspannungsdaten sind größere Abweichungen an jenen Messpunkten zu erkennen, welche einen höheren horizontalen Abstand zu dem Lastangriffspunkt besitzen. Im Messquerschnitt drei scheint, aufgrund der deutlich erhöhten Abweichungen hauptsächlich bei der Außenschiene, eine Zweipunktberührung als sehr wahrscheinlich.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht das Rad Schiene Verhalten in Abhängigkeit von den Spannungen und verdeutlicht die ersten Schritte für den Aufbau einer Simulation, um das Verhalten nachzubilden. Durch den Aufbau einer „Vollmessstelle“ kann über einen längeren Zeitraum das Verschleißverhalten beobachtet werden und liefert Daten für die Kalibrierung bzw. Validierung der Verschleißsimulation.

Die Ergebnisse der ersten und zweiten Messung zeigen, dass in der Bogenmitte im Durchschnitt geringere Spannungen auftreten als beim Bogenanfang und beim Bogenende, was ein mögliches Resultat aus der fehlenden Kenntnis der Kontaktpunktberührung ist. Durch die spezifische zweite Messung konnten noch weitere Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit gewonnen werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Spannungen an den DMS Positionen am Schienenfuß und an der Fahrkopfseite mit zunehmender Geschwindigkeit an der Außenschiene ansteigen und an der Innenschiene sinken. Auf der Rillenkopfseite ist bei zunehmender Geschwindigkeit eine steigende Spannungsbeanspruchung an der Innenschiene und eine abnehmende Spannungsbeanspruchung an der Außenschiene zu erkennen. In Hinblick auf die Auslenkung des Fahrkopfes kommt es bei zunehmender Geschwindigkeit zu einer Bewegung der Außenschiene nach Gleis außen und zu einer Bewegung der Innenschiene nach Gleismitte. Zusätzlich wurde bei der zweiten Messung das Schienenprofil und das Radprofil gemessen, um mögliche Kontaktpunktberührung nachzuvollziehen. Grundsätzlich können durch die Messungen bzw. Profilmessungen erste Rückschlüsse auf die Anzahl der Berührungspunkte gezogen werden, welche für die anschließende Modellierung von Vorteil sind. Dabei geht hervor, dass es in der Bogenmitte zu einer vermutlichen Zweipunktberührung kommt aufgrund der deutlich geringeren statischen Spannungswerten.

Beim Aufbau der Simulation wird vorerst eine genaue Kontaktanalyse zwischen Rad und Schiene durch eine vereinfachte Einpunktberührung vorausgesetzt. Darüber hinaus werden für die ersten Kalibrierungen mit dem Simulationssystem nur die statischen Messungen herangezogen, da bei einem dynamischen Vergleich zu viele Einflussgrößen einwirken und dies weitere Berechnungsverfahren benötigt. Aufgrund der statischen Betrachtung wird für den Vergleich nur ein idealisiertes gerades Gleis modelliert. Die ersten Durchführungen der Simulation werden mit zwei Einpunktberührungen auf der Lauffläche und auf der Kopfeckabrundung durchgeführt, um das generelle Verständnis der Spannungsverteilung innerhalb der Rillenschiene nachzuvollziehen. Anschließend konnten Rückschlüsse auf eine mögliche Kontaktberührung zwischen Rad und Schiene angenommen werden, um die Daten mit den ersten und dritten Messquerschnitt zu kalibrieren. Der Vergleich zeigte, dass beim ersten Messquerschnitt eine durchschnittliche Abweichung von 20 % erreicht werden konnte. Beim dritten Messquerschnitt passen die Werte bei der Innenschiene mit einer Abweichung von durchschnittlich 33 % gut überein, bei der Außenschiene wird aber eine Zweipunktberührung vermutet, da die Spannungswerte eine mögliche Kombination aus einer Laufflächen- und Kopfeckabrundungsberührung darstellen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation selbst unter den vereinfachten Annahmen das Spannungsverhalten im nicht dynamischen Zustand nachbildet und Rückschlüsse auf die Kontaktberührungen gibt. Es gibt verschiedene Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung der Simulationsmethodik. Eine detaillierte Kontaktanalyse spielt dabei eine wesentliche Rolle. Eine losgelöste Betrachtung der Berührungen zwischen Rad und Schiene

vom Gesamtsystem können wesentliche Aufschlüsse über die genauere Punktberührungen geben, welche einen relevanten Einfluss auf die Spannungsverteilung haben. Darüber hinaus können durch weitere Versuche die Randbedingungen verbessert werden um ein exakteres Abbild der Realität zu gewährleisten.

Formelverzeichnis

Gleichung 3-1:	Dehnung des DMS [14].....	7
Gleichung 3-2:	Hookesche Gesetz - Spannungsberechnung [15]	8
Gleichung 7-1:	Gleichungen für die Bestimmung der Kontaktfläche Teil 1 [26, S. 698-712].....	45
Gleichung 7-2:	Gleichungen für die Bestimmung der Kontaktfläche Teil 2 [26, S. 698-712].....	46
Gleichung 8-1:	Gleichung für die Ermittlung der Normalkraft in der Berührfläche	49

Literaturverzeichnis

- [1] J. Heck, *Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen*: KIT Scientific Publishing, 2016.
- [2] Institut für Eisenbahnwesen Infrastrukturdesign, *Vorprojekt - Verschleißgrenzen von Rillenschienen; Übersicht: Positionierung der Messquerschnitte, Rohrsystem; XI., Svetelskystraße-Etrichstraße*. Datum: 16.09.2022; Plangrundlage: Wiener Linien GmbH & Co KG, Ausführungsplan, XI., Svetelskystraße-Etrichstraße, Datum: 10.05.2022.
- [3] *VDV-Schrift 604: Oberbau-Arten und Oberbau-Formen bei Nahverkehrsbahnen*, VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Oct. 2019.
- [4] SEAL ABLE pioneers in profiles, *M38652: Fußprofil*. Datum: 28.04.2021.
- [5] Wiener Linien GmbH & Co KG, *Ausschreibungsplan, XI., Gleiserneuerung Svetelskystraße-Etrichstraße 1110 Wien*. Datum: 14.03.2022.
- [6] T. Hammer and F. Pototschnig, "Das Verschleißverhalten von Rillenschienen in engen Bögen für das Anlagenmanagement der Wiener Straßenbahn," Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen, TU Wien, Wien, 2013.
- [7] J. Zaussinger, "Der Raumbedarf des Spurkranzes," Wiener Linien GmbH & Co KG, Wien, 2006.
- [8] Siemens AG, *Straßenbahnsystem - ULF Wien, Österreich: 150 Niederflurstraßenbahnen*. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f39ceaa346cdf0aba91a72cd7f88dfdcfd766991/ulf-brochure-german.pdf> (accessed: Jul. 10 2023).
- [9] Siemens Mobility, *Innovative Straßen- und Stadtbahnen*. [Online]. Available: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/fahrzeuge/strassenbahnen.html> (accessed: Jul. 10 2023).
- [10] Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH, *GHH-Losradeinheit (schwenkbar/gebremst)*: Oberhausen: s.n, 1998.
- [11] A. Meyer, *Radsatz- oder Einzelradfahrwerke-von der Theorie zur Praxis*. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b7c0803b6b8fe5d48729b8c16ae00fb9d5c739ff/radsatz-einzelrad-de.pdf> (accessed: Jul. 15 2023).
- [12] Wiener Linien GmbH & Co KG, *Typenübersicht Type B/B1: NORM/00.005*, 5th ed.
- [13] J. Janicki, H. Reinhard, and M. Rüffer, *Schienenfahrzeugtechnik*. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH, 2012.
- [14] HBM, *Wie funktioniert ein elektrischer Dehnungsmessstreifen?* [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/7328/wie-funktioniert-ein-elektrischer-dehnungsmessstreifen/>
- [15] HBM, *Bestimmung von Werkstoffspannungen aus Dehnungsmessungen*. [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/7114/das-hookesche-gesetz-kurz-erklart/> (accessed: Feb. 2 2023).
- [16] MICOR-MEASUREMENTS, *Die Messung ebener Schubzustände mit DMS*. [Online]. Available: https://www.me-systeme.de/produkte/sensoren/dehnungsmessstreifen/tech-notes/TN-512-1-Schubspannungs_Messung_de.pdf
- [17] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co.KG, *Betriebsanleitung optoNCDT 1900*. [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--optoNCDT-1900--de.pdf>

-
- [18] *Elektrischer Nahverkehr: Fahrzeugliste Wien, Wiener Linien*. [Online]. Available: <https://transphoto.org/list.php?did=84&lang=de>
- [19] A. Haigermoser, "Schienenfahrzeuge: Vorlesungsskriptum," Graz, 07.2002.
- [20] M. Petz, "Spurführungstechnik," Wien, 2012.
- [21] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Ed., *Fahrwege der Bahnen: im Nah- und Regionalverkehr in Deutschland*. Local and regional railway tracks in Germany, 2007.
- [22] P. Hasslinger, A. Kurfürst, T. Hammer, E. Fischmeister, C. Hellmich, and S. Scheiner, "Shear stress concentrations in tramway rails: Results from beam theory-based cross-sectional 2D Finite Element analyses," *Engineering Structures*, vol. 195, pp. 579–590, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.081.
- [23] "Technische Regeln Spurführung - (TR Sp): für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)," Bearbeitungszustand: Mar. 2004; Ausgabe: May 2006.
- [24] T. Telliskivi and U. Olofsson, "Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method," *Journal of Rail and Rapid Transit*, F, pp. 65–72, 215 (2001).
- [25] M. Freudenberger, S. Krenn, G. Vorlaufer, and A. Trausmuth, *Rad / Schiene Interaktion - Analyse der Auswirkung von Fahrzeuglasten auf Schienenstößen ASF: Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2016 (VIF2016)*. [Online]. Available: https://projekte.ffg.at/anhang/5ef9b77c1a508_VIF2016_ASF_Ergebnisbericht.pdf
- [26] A. P. Boresi, R. J. Schmidt, and O. M. Sidebottom, *Advanced Mechanics of Materials*: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [27] N. Ostermann, "Skriptum Eisenbahnwesen," Wien, 2013.
- [28] W. Rollinger and J. Zaussinger, "Zur Beanspruchung und Tragfähigkeit von (Rillen-)schienen," Wiener Linien Bau- und Anlagenmanagement - Stabstelle Planung und Organisation, Wien, Jan. 2006.
- [29] Vossloh Fastening Systems GmbH, *Kammerfüllelemente im eingedeckten Gleis: Die optimale Abdichtung für Vossloh Befestigungssysteme*. [Online]. Available: https://www.vossloh.com/01_product_finder/VFS/Kammerfuellelemente/Vos_Produktbroschuere_Kammerfuellelemente_DE.pdf (accessed: Nov. 20 2022).
- [30] Wiener Linien GmbH & Co KG, *Ausführungsplan, XI., Svetelskystraße-Etrichstraße*. Datum: 10.05.2022.

Anhang

Anhang A	Messwerte der ersten Messung
Anhang B	Messwerte der zweiten Messung

Anhang A: Messwerte der ersten Messung

1. Messquerschnitt								
Überfahrt NR. 1.1: 15 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	28,81	25,72	5,46	-2,90	-12,04	21,81	28,60
	2	25,88	18,67	9,79	-0,03	-25,10	4,75	11,29
	3	28,77	19,75	11,13	-3,09	-33,84	13,98	17,13
	4	26,93	17,25	10,55	-4,58	-34,30	12,58	15,85
	5	24,87	14,44	10,15	-5,03	-32,11	14,55	16,11
	6	22,54	19,02	5,64	2,11	-15,32	-2,33	6,93
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	19,87	10,69	9,23	2,62	-18,34	-	29,04
	2	18,53	8,86	7,34	-5,47	-22,13	-	53,75
	3	19,24	10,44	9,42	-5,85	-27,36	-	46,58
	4	18,04	9,94	8,75	-6,44	-28,15	-	46,81
	5	17,32	10,23	8,36	-6,18	-25,79	-	42,07
	6	17,04	8,08	6,41	1,28	-14,34	-	26,00
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,66	0,40	-	-	0,22	-	
	2	0,61	0,40	-	-	0,21	-	
	3	0,71	0,41	-	-	0,20	-	
	4	0,69	0,40	-	-	0,20	-	
	5	0,62	0,36	-	-	0,20	-	
	6	0,50	0,39	-	-	0,21	-	
Überfahrt NR. 1.2: 10 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	30,24	25,00	7,60	-10,54	-37,84	44,04	44,14
	2	25,53	18,83	9,72	-0,53	-26,95	6,36	11,91
	3	28,42	19,67	11,49	-3,56	-33,53	14,22	18,19
	4	27,22	17,96	10,23	-5,47	-35,95	15,81	17,51
	5	25,27	16,64	10,60	-3,35	-30,13	12,60	14,84
	6	22,66	20,75	4,65	4,33	-11,95	-7,12	5,47
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	19,56	13,11	11,16	1,22	-24,46	-	24,49
	2	17,08	7,75	6,37	0,89	-20,69	-	47,40
	3	18,44	10,15	9,06	-3,67	-23,51	-	39,75
	4	17,20	9,95	7,51	-5,56	-26,12	-	42,31
	5	17,76	9,94	8,93	-5,29	-21,44	-	46,51
	6	15,64	6,73	4,92	4,07	-9,36	-	20,15
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,73	0,34	-	-	0,21	-	
	2	0,60	0,38	-	-	0,21	-	
	3	0,70	0,38	-	-	0,20	-	
	4	0,71	0,37	-	-	0,20	-	
	5	0,64	0,37	-	-	0,20	-	
	6	0,52	0,40	-	-	0,22	-	

2. Messquerschnitt								
Überfahrt NR. 2.1: 14 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	10,29	2,36	6,15	0,19	-13,71	9,37	22,28
	2	9,85	3,63	3,59	5,70	-8,76	15,86	26,18
	3	10,09	2,98	4,89	4,90	-5,35	4,76	15,64
	4	9,64	2,05	6,49	-0,01	-9,28	7,68	15,10
	5	8,33	1,57	4,45	3,75	-2,24	-2,52	8,16
	6	8,83	1,97	4,70	2,15	-3,42	0,43	10,49
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	18,20	13,42	7,70	2,26	-22,10	27,63	32,76
	2	17,22	14,31	7,88	2,15	-13,06	6,72	14,25
	3	17,98	13,88	7,53	6,90	-14,22	12,03	22,96
	4	17,92	13,34	7,46	5,26	-20,01	31,28	36,17
	5	16,52	11,10	4,62	8,39	-10,87	14,12	24,70
	6	16,22	11,12	4,81	7,86	-12,21	18,64	25,61
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,28	0,25	-	0,11	-	-0,28	
	2	0,23	0,19	-	0,10	-	-0,06	
	3	0,23	0,26	-	0,10	-	-0,16	
	4	0,24	0,20	-	0,11	-	-0,26	
	5	0,17	0,26	-	0,10	-	-0,17	
	6	0,19	0,25	-	0,10	-	-0,20	
Überfahrt NR. 2.2: 13 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	11,71	3,84	4,75	0,41	-14,01	24,41	30,86
	2	9,52	3,34	4,01	0,43	2,55	20,33	23,91
	3	10,83	2,38	8,11	3,45	-15,28	13,54	20,60
	4	9,74	2,75	6,44	3,72	-11,60	11,51	18,28
	5	8,19	2,46	3,51	7,32	-2,59	0,28	10,47
	6	9,23	2,60	5,47	3,53	-10,20	9,64	15,61
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	18,91	15,62	10,07	5,66	-18,33	9,95	17,97
	2	16,87	14,84	8,87	3,47	-17,51	11,32	19,10
	3	16,81	12,91	7,35	-2,65	-19,93	34,91	35,18
	4	17,33	13,12	8,19	0,44	-20,16	26,16	30,87
	5	16,34	12,12	6,25	6,30	-9,68	3,65	15,22
	6	16,23	12,68	7,10	-0,60	-19,33	25,40	28,87
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,31	0,23	-0,26	0,10	-	-0,15	
	2	0,26	0,21	-0,12	0,09	-	-0,07	
	3	0,32	0,26	-0,14	0,10	-	-0,23	
	4	0,28	0,25	-0,08	0,09	-	-0,22	
	5	0,19	0,23	0,00	0,09	-	-0,06	
	6	0,25	0,23	-0,05	0,09	-	-0,23	

3. Messquerschnitt

Überfahrt NR. 3.1: 15 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	23,05	17,70	9,05	0,09	-20,72	-	17,52
	2	19,85	18,46	5,63	0,40	-14,99	-	21,24
	3	21,64	21,02	6,22	1,98	-14,80	-	19,68
	4	20,49	19,22	6,74	5,25	-11,05	-	9,68
	5	18,16	14,76	5,60	-4,65	-14,07	-	24,63
	6	18,08	13,14	6,83	0,27	-18,15	-	7,42
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	24,34	15,55	6,15	-2,77	-14,54	33,98	43,67
	2	17,55	12,31	5,77	3,30	-7,89	3,16	13,28
	3	19,41	14,09	6,66	5,42	-7,73	0,63	13,56
	4	19,30	12,74	5,27	4,00	-6,83	6,42	19,52
	5	17,70	15,46	7,75	-0,14	-15,09	8,09	15,25
	6	19,74	11,82	4,38	-6,76	-18,40	39,79	44,31
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,43	-	-0,29	-	0,30	-0,21	
	2	0,40	-	-0,31	-	0,25	-0,09	
	3	0,46	-	-0,33	-	0,29	-0,10	
	4	0,40	-	-0,16	-	0,29	-0,08	
	5	0,39	-	-0,38	-	0,28	-0,10	
	6	0,36	-	-0,24	-	0,28	-0,24	
Überfahrt NR. 3.2: 18 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	21,48	18,34	7,61	-0,22	-18,85	-	21,24
	2	18,74	13,70	6,58	-3,56	-12,60	-	20,20
	3	20,91	19,33	7,67	6,68	-10,66	-	6,66
	4	19,92	17,98	6,90	4,04	-11,95	-	11,51
	5	18,25	15,34	5,47	-5,02	-15,00	-	27,04
	6	19,87	12,28	8,70	1,07	-18,00	-	9,97
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	23,40	20,15	10,18	3,50	-14,03	5,60	15,08
	2	20,11	18,08	9,28	-0,92	-17,78	12,68	20,11
	3	20,21	13,96	6,22	3,51	-8,44	6,93	18,95
	4	21,28	15,97	7,31	3,85	-9,66	4,70	16,49
	5	19,99	17,87	9,17	-1,43	-18,59	14,34	19,12
	6	20,89	15,64	6,54	-6,87	-20,53	35,08	38,98
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,42	-	-0,23	-	0,30	-0,14	
	2	0,37	-	-0,29	-	0,30	-0,15	
	3	0,38	-	-0,07	-	0,30	-0,11	
	4	0,38	-	-0,10	-	0,31	-0,11	
	5	0,39	-	-0,35	-	0,30	-0,16	
	6	0,39	-	-0,31	-	0,30	-0,29	

Anhang B: Messwerte der zweiten Messung

1. Messquerschnitt								
Überfahrt NR. 1.1: 5 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	30,96	24,85	8,43	-6,44	-12,56	-	29,00
	2	26,67	17,40	11,03	-5,86	-35,80	-	20,12
	3	30,55	20,27	12,50	-4,79	-38,68	-	20,71
	4	30,05	18,49	13,17	-6,67	-40,85	-	21,07
	5	27,22	17,28	10,87	-3,67	-31,69	-	15,21
	6	25,85	24,16	5,33	0,33	-17,21	-	16,66
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	20,22	13,08	11,52	2,99	-20,23	-	19,70
	2	17,18	9,81	6,79	-7,21	-23,39	-	45,04
	1	19,25	10,39	8,04	-6,81	-23,21	-	50,36
	4	19,20	9,58	7,38	-11,23	-28,58	-	63,33
	5	16,85	9,68	6,66	-3,99	-18,57	-	39,28
	6	16,87	7,71	5,60	2,55	-10,21	-	25,16
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,74	0,41	-0,31	-	0,29	-0,12	
	2	0,66	0,37	-0,29	-	0,26	-0,22	
	3	0,74	0,44	-0,24	-	0,26	-0,24	
	4	0,75	0,43	-0,25	-	0,25	-0,29	
	5	0,66	0,39	-0,19	-	0,26	-0,18	
	6	0,59	0,49	-0,05	-	0,28	-0,10	
Überfahrt NR. 1.2: 15 km/h								
DMS - Spannungen	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	28,22	22,87	7,67	-4,67	-30,82	-	24,30
	2	24,34	16,43	9,15	-2,39	-26,98	-	13,45
	3	28,46	19,11	10,86	-2,61	-31,51	-	14,89
	4	26,50	18,52	9,66	0,12	-25,04	-	9,27
	5	24,08	15,30	9,57	-2,53	-27,78	-	12,10
	6	23,91	22,67	4,41	1,76	-13,23	-	12,82
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	21,23	13,20	12,20	2,92	-22,90	-	22,34
	2	17,53	9,13	6,61	-5,31	-21,16	-	43,81
	3	19,26	9,69	7,68	-6,13	-24,43	-	49,84
	4	20,01	8,90	6,72	-6,44	-22,99	-	58,31
	5	17,96	9,49	7,11	-5,24	-22,32	-	44,01
	6	17,37	7,48	5,70	2,11	-11,00	-	27,69
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,64	0,41	-0,22	-	0,28	-0,14	
	2	0,57	0,35	-0,19	-	0,26	-0,26	
	3	0,66	0,43	-0,21	-	0,26	-0,31	
	4	0,59	0,45	-0,10	-	0,28	-0,29	
	5	0,56	0,36	-0,20	-	0,27	-0,26	
	6	0,51	0,47	0,02	-	0,28	-0,12	

Überfahrt NR. 1.3: 25 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	24,22	20,65	5,17	-0,20	-20,10	-	14,97
	2	22,39	16,27	7,27	1,62	-17,61	-	5,13
	3	25,24	18,67	8,28	3,56	-18,10	-	3,90
	4	23,04	17,88	6,78	3,65	-15,07	-	3,02
	5	20,20	13,46	7,54	0,27	-19,43	-	6,73
	6	19,46	18,86	3,11	4,48	-6,20	-	5,31
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	23,15	13,38	13,86	1,54	-27,14	-	30,14
	2	18,38	8,44	6,77	-6,50	-22,80	-	49,40
	3	20,70	9,04	8,34	-7,99	-27,50	-	59,63
	4	20,66	7,79	6,52	-6,20	-23,15	-	63,25
	5	19,28	8,69	7,46	-7,14	-24,69	-	54,26
	6	19,67	7,56	6,99	0,32	-15,20	-	40,02
Lasersensoren	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,48	0,41	-0,02	-	0,28	-0,23	
	2	0,45	0,40	0,05	-	0,26	-0,32	
	3	0,51	0,48	0,11	-	0,26	-0,41	
	4	0,46	0,46	0,12	-	0,27	-0,41	
	5	0,44	0,33	-0,04	-	0,26	-0,38	
	6	0,37	0,43	0,15	-	0,28	-0,21	
Überfahrt NR. 1.4: 30 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	21,40	19,09	3,94	1,01	-14,69	-	11,19
	2	21,85	16,59	6,93	2,52	-15,24	-	5,08
	3	23,12	17,99	6,61	4,56	-13,18	-	1,34
	4	21,67	16,77	6,21	3,67	-13,00	-	2,59
	5	18,22	12,77	6,55	1,10	-15,60	-	4,60
	6	16,63	16,46	2,40	5,38	-2,56	-	2,61
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	23,98	13,69	14,75	0,57	-29,12	-	32,72
	2	19,51	9,05	7,84	-7,41	-25,60	-	55,54
	3	21,63	8,48	8,60	-10,12	-31,13	-	67,75
	4	21,81	8,10	7,33	-8,77	-28,02	-	71,91
	5	20,68	8,71	8,06	-8,25	-28,24	-	61,35
	6	20,66	7,99	7,49	-1,64	-18,72	-	47,92
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,41	0,39	0,03	-	0,28	-0,27	
	2	0,43	0,42	0,11	-	0,25	-0,40	
	3	0,43	0,48	0,19	-	0,25	-0,50	
	4	0,42	0,43	0,15	-	0,26	-0,53	
	5	0,39	0,32	-0,01	-	0,25	-0,47	
	6	0,29	0,42	0,20	-	0,29	-0,28	

2. Messquerschnitt								
Überfahrt NR. 2.1: 5 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	15,76	9,96	6,78	0,35	-14,72	18,92	26,16
	2	13,96	10,25	5,08	1,00	-12,23	17,06	25,60
	3	15,15	8,26	8,55	5,83	-12,89	2,41	13,62
	4	14,69	7,94	8,03	4,55	-14,07	5,73	16,05
	5	13,11	6,43	8,53	3,19	-16,42	6,25	13,38
	6	13,54	8,78	5,69	2,92	-11,14	10,83	20,98
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	16,35	14,01	11,55	7,60	-19,34	12,42	19,13
	2	13,69	11,07	7,71	6,67	-12,65	13,55	19,97
	3	14,55	11,47	7,81	6,17	-16,87	27,36	30,81
	4	14,61	10,34	6,90	4,15	-17,97	36,86	36,99
	5	12,99	11,09	7,49	3,33	-18,18	29,67	30,09
	6	13,06	9,71	5,93	3,36	-13,44	21,58	26,27
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,32	0,19	0,01	0,15	-	-0,17	
	2	0,28	0,17	-0,46	0,15	-	-0,15	
	3	0,28	0,26	-0,35	0,16	-	-0,27	
	4	0,27	0,24	-0,35	0,16	-	-0,34	
	5	0,29	0,20	-0,47	0,16	-	-0,36	
	6	0,28	0,20	-0,33	0,15	-	-0,28	
Überfahrt NR. 2.2: 15 km/h								
DMS - Spannungen	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	14,34	6,82	7,97	2,41	-16,73	10,77	19,38
	2	12,61	8,52	4,65	2,05	-10,04	11,43	20,62
	3	13,94	8,31	4,50	8,19	-5,32	-2,80	11,82
	4	13,58	7,50	6,57	5,81	-9,24	2,65	14,08
	5	11,84	5,16	7,71	3,61	-13,53	4,54	11,27
	6	12,71	7,87	5,05	4,21	-8,64	6,31	17,44
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	16,50	11,48	8,58	2,61	-27,10	55,21	49,78
	2	16,33	10,99	8,00	4,77	-14,52	17,50	22,83
	3	14,96	10,51	7,54	8,91	-14,24	22,79	29,44
	4	15,14	10,42	7,39	4,83	-18,23	38,71	39,29
	5	13,66	11,43	8,50	1,57	-21,50	38,47	36,81
	6	13,72	9,55	6,27	5,11	-15,35	25,04	29,29
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,28	0,21	-0,43	0,16	-	-0,50	
	2	0,24	0,18	-0,39	0,14	-	-0,20	
	3	0,24	0,28	-0,26	0,14	-	-0,25	
	4	0,24	0,25	-0,25	0,15	-	-0,36	
	5	0,25	0,19	-0,42	0,15	-	-0,41	
	6	0,23	0,22	-0,32	0,14	-	-0,26	

Überfahrt NR. 2.3: 25 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	11,49	5,43	4,93	3,71	-8,35	4,66	14,03
	2	11,04	6,87	4,33	2,30	-8,01	9,19	17,32
	3	12,69	7,81	4,08	10,43	3,94	-11,03	7,70
	4	10,71	6,20	3,53	9,52	3,09	-11,66	4,44
	5	10,37	4,35	5,28	5,60	-6,47	0,21	8,56
	6	10,63	5,73	3,90	5,86	-3,41	-1,88	9,22
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	19,04	11,76	10,08	-2,90	-31,58	69,03	61,18
	2	15,29	12,35	10,03	3,01	-19,52	25,39	28,82
	3	16,55	11,06	11,05	4,00	-16,26	29,12	35,03
	4	16,90	10,98	10,14	4,12	-17,15	29,34	35,34
	5	15,17	12,31	11,94	-1,24	-23,34	45,55	43,48
	6	15,64	10,18	8,92	0,91	-19,67	37,96	39,03
Lasersensoren	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,20	0,20	-0,27	0,16	-	-0,63	
	2	0,20	0,17	-0,34	0,15	-	-0,27	
	3	0,18	0,30	-0,18	0,15	-	-0,29	
	4	0,15	0,28	-0,17	0,15	-	-0,32	
	5	0,17	0,20	-0,22	0,15	-	-0,43	
	6	0,17	0,22	-0,20	0,15	-	-0,38	
Überfahrt NR. 2.4: 30 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	9,68	4,28	3,25	4,64	4,39	-0,27	8,57
	2	10,14	5,70	2,78	0,52	5,67	12,37	17,94
	3	12,09	7,37	3,24	9,24	2,36	-8,25	8,37
	4	9,54	5,04	1,83	7,68	17,85	-6,46	5,05
	5	9,21	4,47	3,27	7,19	6,97	-5,46	4,41
	6	8,89	3,91	3,19	6,48	0,50	-5,53	4,85
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	20,27	13,46	13,03	-0,16	-34,08	57,71	54,40
	2	15,88	13,37	12,20	2,16	-26,46	31,21	31,75
	3	16,87	10,91	11,74	2,55	-20,40	34,98	38,46
	4	18,34	12,41	13,28	2,94	-23,79	38,54	41,83
	5	17,04	13,03	13,48	0,71	-22,18	45,84	45,99
	6	16,92	10,68	10,99	-0,67	-24,93	50,70	48,55
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,16	0,19	-0,18	0,16	-	-0,59	
	2	0,19	0,13	-0,28	0,16	-	-0,37	
	3	0,17	0,29	-0,16	0,16	-	-0,38	
	4	0,13	0,24	-0,14	0,16	-	-0,41	
	5	0,12	0,21	-0,14	0,16	-	-0,43	
	6	0,13	0,21	-0,14	0,17	-	-0,49	

3. Messquerschnitt

Überfahrt NR. 3.1: 5 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	24,56	19,99	8,32	-2,69	-23,90	-	26,40
	2	21,02	16,71	6,73	-8,36	-27,42	-	35,18
	3	23,21	22,42	6,61	4,77	-11,64	-	14,39
	4	21,80	21,78	5,76	5,50	-9,09	-	12,23
	5	20,13	19,01	5,71	2,89	-11,86	-	14,32
	6	21,25	16,64	8,15	0,45	-19,76	-	13,81
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	26,84	18,05	6,90	-7,70	-24,51	32,25	40,05
	2	23,15	20,47	10,39	-4,49	-25,43	10,82	15,27
	3	23,90	14,76	5,70	0,46	-13,87	6,47	19,84
	4	23,76	14,06	5,52	1,36	-12,57	6,52	20,49
	5	21,58	13,74	5,65	0,12	-13,47	5,38	16,32
	6	22,90	15,01	5,32	-7,06	-21,66	28,56	33,23
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,44	0,31	-0,38	0,16	0,31	-0,37	
	2	0,44	0,17	-0,57	0,23	0,31	-0,30	
	3	0,39	0,38	-0,18	0,11	0,30	-0,24	
	4	0,35	0,38	-0,12	0,11	0,30	-0,23	
	5	0,32	0,32	-0,14	0,11	0,29	-0,22	
	6	0,38	0,30	-0,27	0,11	0,29	-0,36	
Überfahrt NR. 3.2: 15 km/h								
DMS - Spannungen	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	22,68	18,64	7,76	-2,85	-22,59	-	25,51
	2	18,89	15,59	6,37	-5,54	-23,55	-	29,16
	3	21,43	21,56	5,76	6,81	-7,51	-	10,34
	4	20,04	20,65	5,19	6,73	-6,29	-	9,11
	5	18,82	17,82	5,17	4,09	-9,36	-	11,61
	6	19,46	14,92	7,69	0,96	-17,20	-	10,89
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	28,02	18,76	7,05	-10,75	-27,74	46,80	51,74
	2	23,74	21,06	10,52	-5,58	-27,45	13,94	17,49
	3	24,54	14,85	5,84	-0,01	-14,45	9,17	22,59
	4	24,22	14,33	5,33	-0,03	-13,65	9,39	23,30
	5	22,82	14,46	5,54	-0,97	-14,93	7,30	18,96
	6	24,03	15,99	5,98	-8,97	-25,81	34,11	38,60
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,40	0,25	-0,36	0,17	0,30	-0,49	
	2	0,38	0,15	-0,49	0,28	0,32	-0,35	
	3	0,33	0,34	-0,10	0,11	0,30	-0,24	
	4	0,31	0,34	-0,02	0,12	0,31	-0,24	
	5	0,28	0,29	-0,08	0,13	0,30	-0,24	
	6	0,34	0,27	-0,18	0,15	0,30	-0,42	

Überfahrt NR. 3.3: 25 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	17,88	15,15	5,71	2,12	-11,65	-	13,27
	2	16,21	12,93	4,66	-4,21	-7,60	-	23,53
	3	19,56	21,26	4,01	7,75	-2,72	-	9,95
	4	16,18	15,22	2,53	3,26	15,83	-	11,36
	5	15,19	14,89	3,96	5,87	-3,93	-	5,04
	6	15,95	12,12	6,48	3,16	-12,02	-	6,02
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	30,77	21,88	8,03	-14,75	-33,69	63,92	67,34
	2	26,24	23,63	11,97	-9,57	-33,31	24,62	27,57
	3	26,41	15,98	6,70	-1,78	-17,50	16,20	28,94
	4	27,68	21,47	10,51	-5,02	-26,76	18,41	28,34
	5	24,63	15,39	6,08	-3,64	-18,72	17,81	28,72
	6	26,85	18,89	7,11	-13,26	-31,14	48,28	51,38
Lasersensoren	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,26	0,23	-	0,25	0,33	-0,66	
	2	0,26	0,14	-	0,37	0,33	-0,47	
	3	0,30	0,33	-	0,25	0,33	-0,35	
	4	0,22	0,28	-	0,33	0,34	-0,39	
	5	0,19	0,27	-	0,20	0,33	-0,31	
	6	0,23	0,23	-	0,25	0,33	-0,58	
Überfahrt NR. 3.4: 30 km/h								
DMS - Spannungen [MPa]	Achse	SFU_1i	SFS_2i	SSS_3i	SKU_4i	SKS_5i	SKS_6i	SKU_7i
	1	13,50	11,82	3,33	5,02	6,10	-	4,61
	2	14,02	11,71	3,50	-1,22	1,90	-	16,97
	3	17,10	18,98	0,91	6,30	32,29	-	12,24
	4	14,65	13,92	1,83	4,87	20,85	-	7,69
	5	14,30	14,00	3,80	6,68	-1,26	-	3,17
	6	13,78	12,19	4,37	6,40	-1,08	-	1,48
	Achse	SFU_1a	SFS_2a	SSS_3a	SKU_4a	SKS_5a	SKS_6a	SKU_7a
	1	32,82	26,15	13,17	-10,07	-35,32	42,32	49,40
	2	27,74	24,73	12,52	-12,23	-36,58	33,76	36,23
	3	28,55	20,90	10,35	-4,18	-24,64	19,29	29,70
	4	28,87	21,66	10,38	-6,91	-28,31	25,91	36,17
	5	26,22	16,50	6,78	-4,92	-20,84	23,83	33,75
	6	27,05	19,89	7,10	-13,61	-33,10	49,68	51,96
Lasersensoren [mm]	Achse	SFO_FSi	SFO_RSi	SKS_i	SFO_FSa	SFO_RSa	SKS_a	
	1	0,15	0,21	-	0,39	0,35	-0,48	
	2	0,21	0,16	-	0,42	0,36	-0,56	
	3	0,23	0,31	-	0,32	0,35	-0,39	
	4	0,17	0,27	-	0,35	0,35	-0,45	
	5	0,14	0,26	-	0,27	0,35	-0,28	
	6	0,18	0,22	-	0,30	0,34	-0,64	