

Simulation Einfluss Zuglängsdynamik auf den Rad-Schiene-Kontakt SimZLD

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
(VIF 2018)

Oktober 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

PJ Messtechnik GmbH
Waagner-Biro-Straße 125
8020 Graz

 **PJM**

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Simulation Einfluss Zuglängsdynamik auf den Rad-Schiene-Kontakt SimZLD

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2018)

AutorInnen:

DI Lorenz Pietsch
Lina Popetschnigg, MSc

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz
ÖBB-Infrastruktur AG

Auftragnehmer:

PJ Messtechnik GmbH
ZT Jussel

Inhalt

1	Einleitung-Aufgabenstellung.....	7
2	Modellbeschreibung Simulation.....	8
2.1	Modelldaten Fahrzeug.....	8
2.2	Modelldaten-Trassierung, Gleislage.....	9
2.3	Modelldaten – Radprofile, Schienenprofile.....	13
2.4	Modelldaten-Geschwindigkeit.....	13
2.5	Modelldaten-Reibwert Rad-Schiene.....	14
2.6	Modelldaten-Schieneneinbauneigung	14
3	Ergebnisse Simulationen.....	15
3.1	Ablauf Simulationsrechnungen.....	15
3.2	Ergebnisse Variation Reibwert	15
3.3	Ergebnisse-Variation Schienenprofile	17
3.4	Ergebnisse-Einfluss Zugverband.....	18
3.5	Ergebnisse der aq und Längskräfte Variation.....	21
3.6	Zusammenfassung Simulationsergebnisse	25
4	Beschreibung der Versuche	27
4.1	Ablauf der Versuche.....	27
4.2	Anordnung Versuchsobjekt	29
4.3	Datenerfassungssystem.....	29
4.4	Liste der Messfahrten und Versuchsparameter.....	29
4.5	Messpositionen am untersuchten Fahrzeug.....	31
5	Ergebnisse Datenanalyse.....	32
5.1	Ablauf Datenanalyse	32
5.2	Vergleich Messradsätze-ortsfeste Messstelle-Simulation (Q-Kräfte).....	33
5.3	Fazit Auswertung.....	37
6	Zusammenfassung-Ausblick	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchtes Fzg.	9
Abbildung 2: Fahrzeugmodell.....	9
Abbildung 3: Messgleisbogen in Breitenstein [Quelle:Eisenbahnatlas Österreich] .	10
Abbildung 4: Krümmung und Überhöhung des Streckenabschnitts	11
Abbildung 5: Krümmung und Spurweite des Streckenabschnitts	11
Abbildung 6: Längshöhe des Streckenabschnitts.....	12
Abbildung 7: Richtungsfehler des Streckenabschnitts.....	12
Abbildung 8: Radprofil des Simulationsmodells.....	13
Abbildung 9: Schienenprofil (links innen, rechts außen, blau-nominal, rot- verschlissen)	13
Abbildung 10: Einfluss Reibwert, RS1	16
Abbildung 11: Einfluss Reibwert, RS2	16
Abbildung 12: Einfluss Schienenprofil, RS1 (links verschlissen, rechts nominal)	17
Abbildung 13: Einfluss Schienenprofil, RS2 (links verschlissen, rechts nominal)	17
Abbildung 14: Zugverband 2x 4ax 12.04m LÜP.....	18
Abbildung 15: Zugverband 2x 4ax 19.9m LÜP.....	18
Abbildung 16: Zugverband 1x 4ax 19.9m 1x 2ax 9.64m LÜP	18
Abbildung 17: Einfluss ZVB, RS1	19
Abbildung 18: Einfluss Längskräfte ZVB, Ya RS1	20
Abbildung 19: Einfluss Längskräfte ZVB, SumY RS1	20
Abbildung 20: Sum Y RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq	21
Abbildung 21: Sum Y RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq	22
Abbildung 22: Ya RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq	22
Abbildung 23: Ya RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq	23
Abbildung 24: Yi RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq.....	23
Abbildung 25: Yi RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq.....	24
Abbildung 26: Anlaufwinkel RS1 in Abhängigkeit der Längskräfte und aq	24
Abbildung 27: Zusammenstellung Versuchszug.....	29
Abbildung 28: Überblick Versuchsstrecke [Quelle: openrailwaymap.org]	30
Abbildung 29: Übersicht der Sensorpositionen am Kalibrierwagen	31
Abbildung 30: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch FL=0kN, Simulation FL=0kN.....	34
Abbildung 31: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch FL=-77 bis -150 kN Druck, Simulation FL=-100kN Druck.....	35
Abbildung 32: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch F=100 bis 200 kN Zug, Simulation FL=100kN Zug.....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten des untersuchten Fahrzeugs.....	8
Tabelle 2: Dokumentation der Versuchsparameter	30

1 EINLEITUNG-AUFGABENSTELLUNG

Der Einfluss der Zuglängsdynamik auf den Rad-Schiene-Kontakt ist bisher nicht gesondert Thema von neuerer Forschung bzw. wissenschaftlicher Untersuchung. Es existieren zwar sowohl Untersuchungen zu den Interaktionsgrößen im Rad-Schiene-Kontakt, als auch zur Zuglängsdynamik aber man verlässt sich immer noch auf traditionelle Erfahrungswerte, die aber zunehmend auf ihre Gültigkeit hin hinterfragt werden müssen, um die hohe Betriebssicherheit der modernen Eisenbahn weiterhin gewährleisten zu können. Nachdem die Verfügbarkeit von numerischen Simulationsmethoden es erlaubt viele Fragestellungen der Fahrtechnik neu zu betrachten und damit das Spurführungsprinzip Stahlrad-Stahlschiene wesentlich weiter zu entwickeln, bietet sich auch hier die Mehrkörpersimulation als bestens geeignete Methode zur Untersuchung dieser Thematik an.

Allerdings soll die Untersuchung nicht auf eine Methode beschränkt werden, stattdessen ist geplant sich mit den drei Ansätzen Simulation, Messung/Validierung und Analyse dem Thema zu widmen. Zu diesem Zweck sollen Simulationsmodelle eines Zugverbands bestehend aus mehreren Fahrzeugen erstellt werden und auf diese Weise der Einfluss der Zuglängsdynamik auf die Interaktionsgrößen im Rad-Schiene-Kontakt untersucht werden. Die Validierung der Simulationsmodelle soll durch die geplanten Messungen während der Streckenversuche sichergestellt werden. Bei den Messungen soll die Datenerfassung fahrzeugseitig durch Messradsätze und gleisseitig durch eine ortsfeste Infrastrukturmessstelle erfolgen. Eine abschließende Datenanalyse der kombinierten Daten aus Simulation und Versuch soll Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fahrzeug und Streckenparametern erkennbar machen und einen Überblick über die Gesamtheit der Ergebnisse ermöglichen.

2 MODELLBESCHREIBUNG SIMULATION

Die Berechnungen wurden mit dem Simpack Programmpaket durchgeführt. Diese Mehrkörpersimulationssoftware wird unter anderem zur fahrdynamischen Auslegung von Schienenfahrzeugen verwendet und eignet sich auch gut zur Untersuchung der Kräfte und Interaktionsgrößen im Rad-Schiene-Kontakt. Die Modelle enthalten die Parameter des untersuchten Streckenabschnitts und des Fahrzeugs. Bei den Berechnungen ergeben sich im Zuge der Zeitschritt-Integration, zeitbasierte Ergebnisschriebe der untersuchten Größen, die vergleichbar mit Messschrieben aus realen Messungen an Fahrzeug und Infrastruktur sind. Ein wesentlicher Vorteil der Simulationsmodelle ist, dass bei völlig konstanten Randbedingungen gezielt einzelne Modellparameter verändert werden können und somit Änderungen in den Ergebnissen direkt dem aktuell variierten Parameter zuzuordnen sind.

2.1 Modelldaten Fahrzeug

Bei dem untersuchten Fahrzeug handelt es sich um einen zweiachsigen Schiebewandwagen der Type Hbillns. Die Hauptabmessungen und Grunddaten des Fahrzeugs sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Daten des untersuchten Fahrzeugs

Merkmal	Wert, Einheit
Fahrzeugart	Zweiachsiger Schiebewandwagen
Bezeichnung	Hbillns
Radstand	9000 mm
Länge über Puffer	14220 mm
Laufkreisdurchmesser	920 mm
Spurweite	1435 mm
Radprofil	S1002 e31.5 h28
Max. Geschwindigkeit	100 km/h
Gewicht lt. Verwiegung	35.73 t
Radsätze	2

Eine Skizze des Fahrzeugs ist in Abbildung 1 dargestellt und Abbildung 2 zeigt eine grafische Darstellung des MKS-Modells.

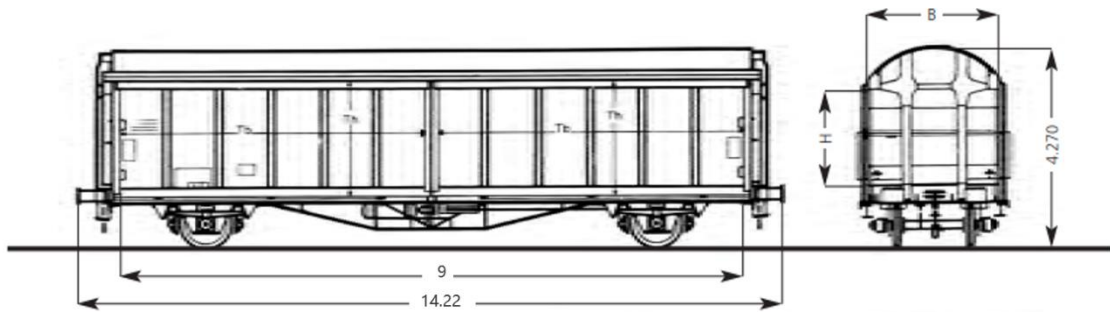


Abbildung 1: Untersuchtes Fzg.

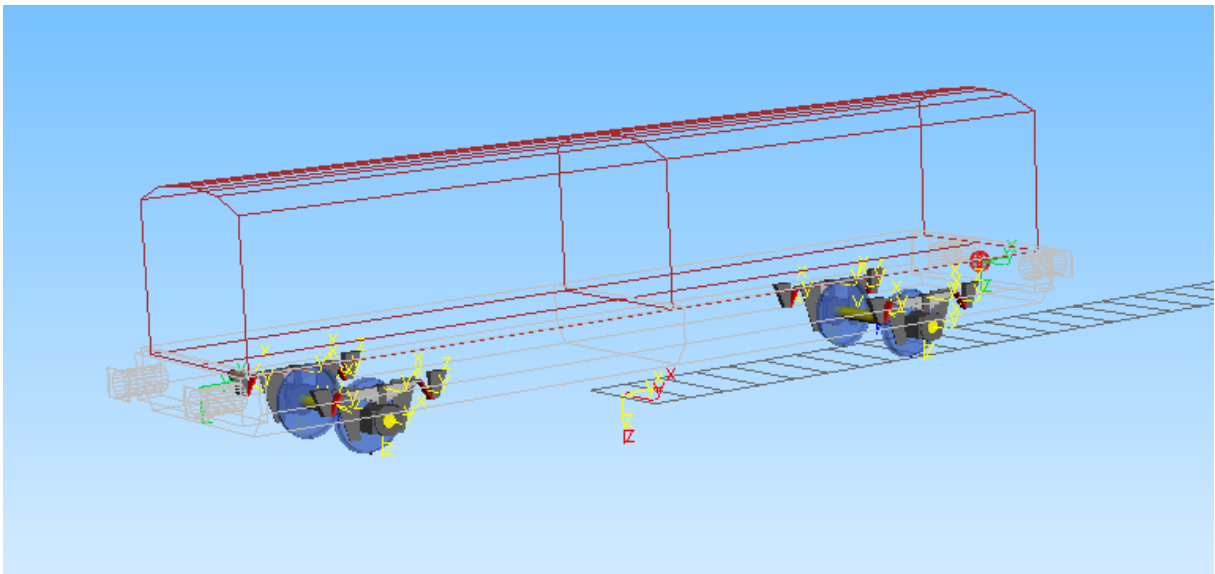


Abbildung 2: Fahrzeugmodell

2.2 Modelldaten-Trassierung, Gleislage

Als Strecke im Simulationsmodell wurde jener Abschnitt der Semmeringstrecke gewählt, auf dem sich die ortsfeste Infrastrukturmessstelle (Messgleisbogen) befindet. Die dort vorliegende Trassierung (Krümmung und Überhöhung) sowie die gemessene Gleislage (Richtung, Längshöhenfehler, Spurweite) wurden in das Modell übertragen.



Abbildung 3: Messgleisbogen in Breitenstein

[Quelle:Eisenbahnatlas Österreich]

In Abbildung 3 ist die Lage des untersuchten Streckenabschnitts zu erkennen und Abbildung 4 zeigt die Krümmung und Überhöhung. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Gleislagedaten finden sich in Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7.

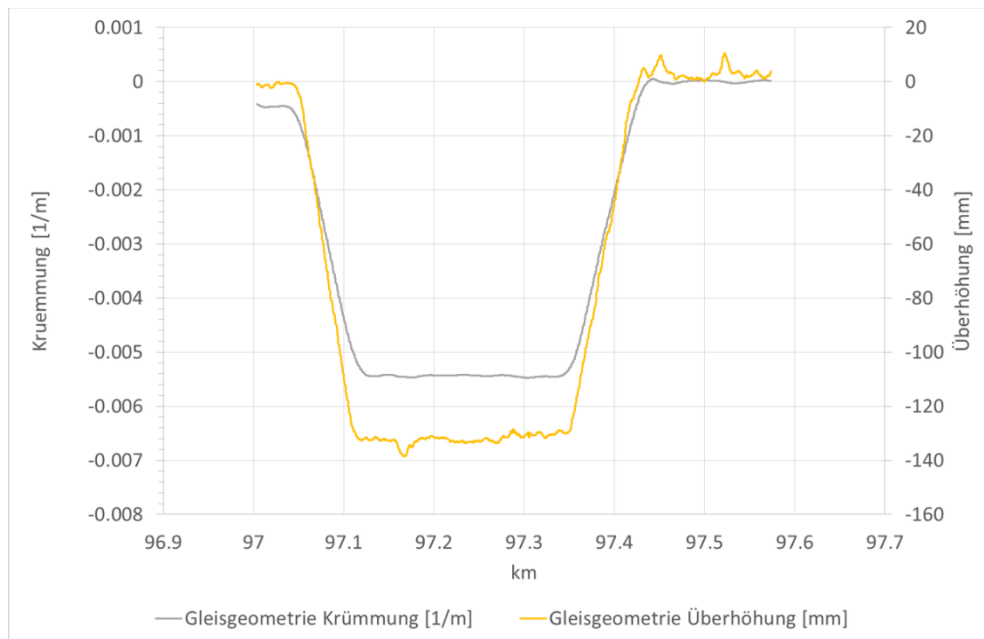


Abbildung 4: Krümmung und Überhöhung des Streckenabschnitts

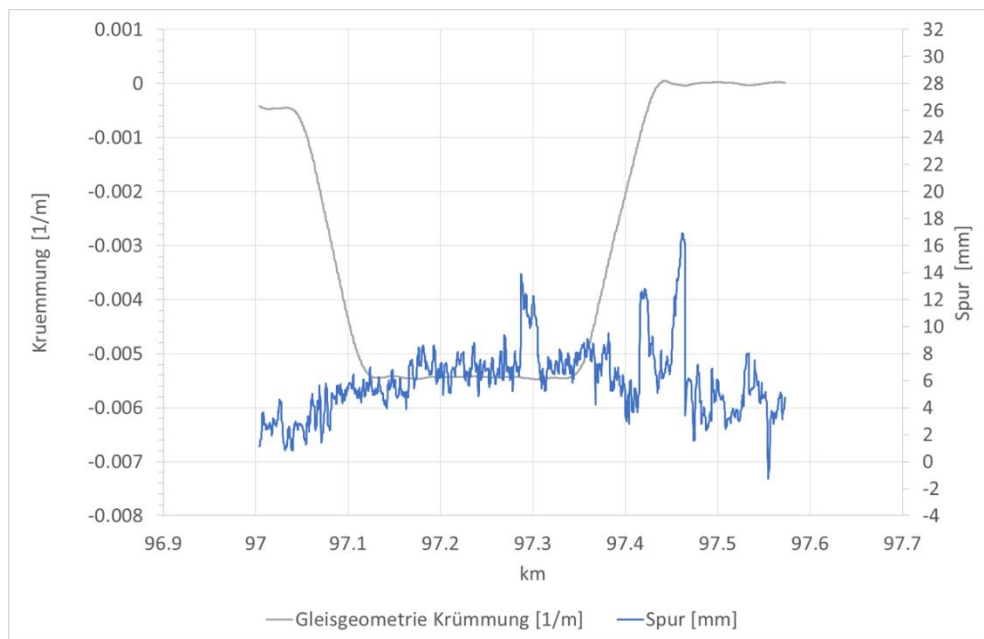


Abbildung 5: Krümmung und Spurweite des Streckenabschnitts

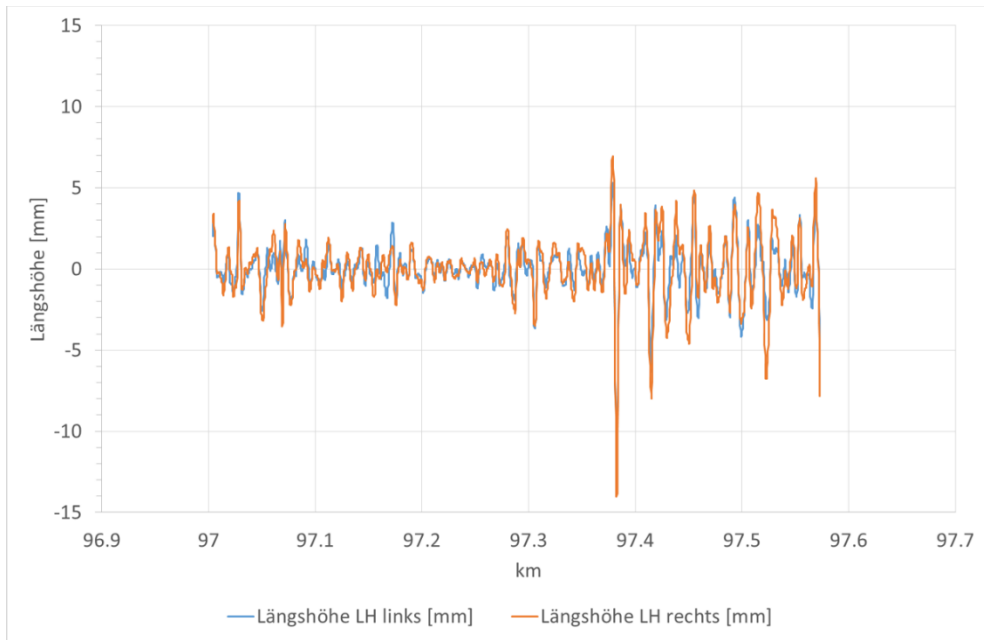


Abbildung 6: Längshöhe des Streckenabschnitts

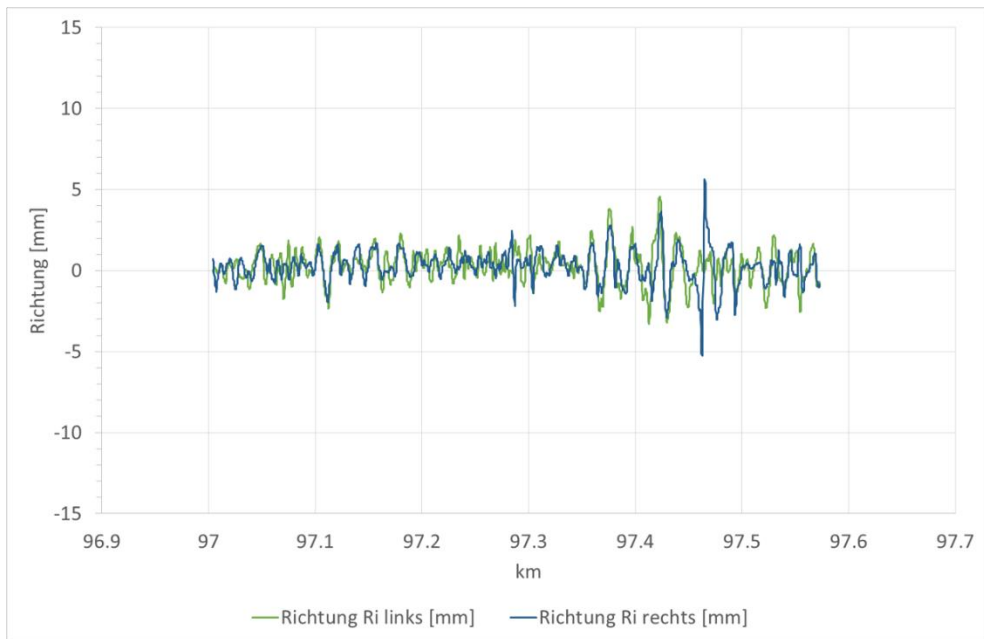


Abbildung 7: Richtungsfehler des Streckenabschnitts

2.3 Modelldaten – Radprofile, Schienenprofile

Die Radprofile wurden am modellierten Fahrzeug optisch erfasst und in das Simulationsmodell übernommen. Abbildung 8 zeigt das verwendete Radprofil. Nachdem das untersuchte Fahrzeug seit der letzten Reprofilierung der Räder nur wenig gefahren war, entspricht das erfasste Profil bis auf minimale Abweichungen dem Nominalprofil S1002 e31.5 h28.

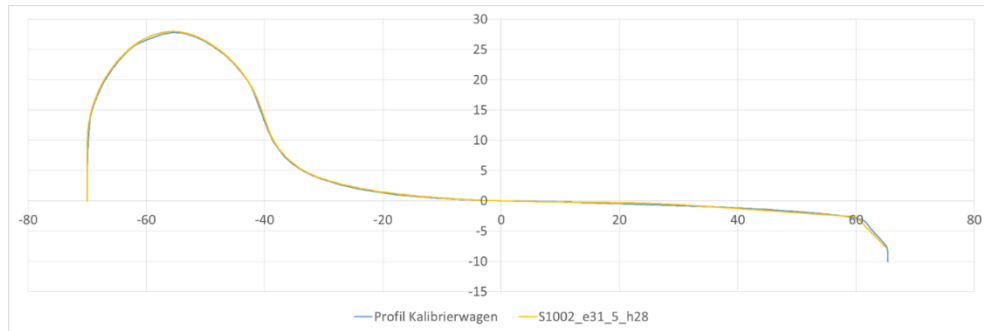


Abbildung 8: Radprofil des Simulationsmodells

Als Schienenprofile wurden ebenfalls gemessene Profile verwendet, die in dem Bereich des untersuchten Streckenabschnitts erfasst wurden. Dabei sind die Profile im geraden Streckenbereich kaum verschlissen während die Profile im Bogenbereich bereits deutlichen Verschleiß zeigen. In Abbildung 9 sind die Profile der Innen- und Außenschiene (nominal in blau /verschlissen rot) gemeinsam dargestellt.

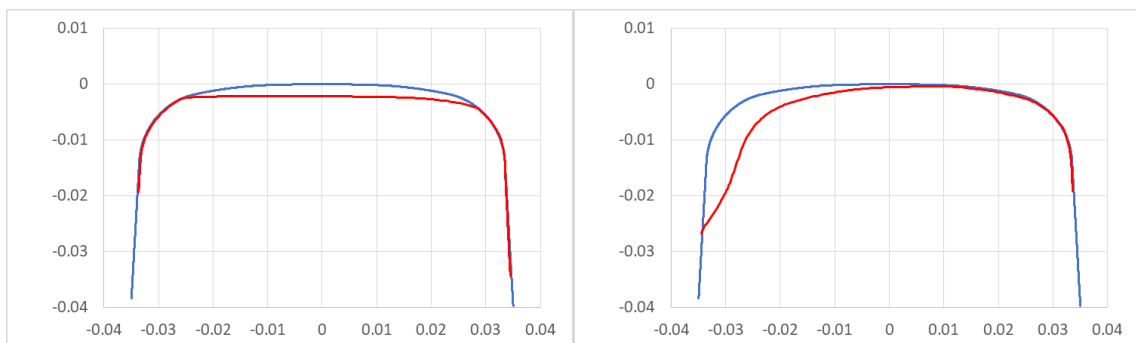


Abbildung 9: Schienenprofil (links innen, rechts außen, blau-nominal, rot-verschlissen)

2.4 Modelldaten-Geschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit wurde aus dem VZG für den gewählten Streckenabschnitt entnommen und mit 60 km/h ($a_q=0.65 \text{ m/s}^2$) für diesen Abschnitt als konstant angenommen.

In einer Variation wurde die Fahrgeschwindigkeit einmal mit 8 km/h (negatives $a_q = -0.83 \text{ m/s}^2$) und einmal mit 45 km/h (ausgeglichene Fahrt, $a_q = 0 \text{ m/s}^2$) angenommen.

2.5 Modelldaten-Reibwert Rad-Schiene

Für die Simulationsläufe ohne Variation des Reibwerts, wurde ein konstanter Reibwert von $\mu = 0.4$ angenommen. In einer Simulationsvariante wurde der Reibwert (μ) zwischen Rad und Schiene im Bereich von $\mu = 0.2$ - 0.5 variiert. Ein Reibwert von 0.2 entspricht nassen Schienen (Regen, bzw. Herbstwetter), 0.5 entspricht sehr trockenen Schienen (z.B. an einem heißen Sommertag).

2.6 Modelldaten-Schieneneinbauneigung

Die nominelle Schieneneinbauneigung wurde mit $1/40$ angenommen. Es ergibt sich jedoch durch die gemessene Gleislage eine Änderung entlang der Strecke. Der Wert $1/40$ ist als Startwert zu sehen.

3 ERGEBNISSE SIMULATIONEN

3.1 Ablauf Simulationsrechnungen

In den folgenden Abbildungen und Diagrammen sind die Ergebnisse der Variation der Simulationsparameter dargestellt. Bei den variierten Einflussgrößen handelt es sich um die folgenden Parameter:

- Reibwert (Rad-Schiene)
- verschlissene Schienenprofile
- Zusammenstellung des Zugverbands (LüP, DG-Abstand, etc.)
- Längskräfte im Zugverband
- Reibkräfte durch Puffer

Anhand der Ergebnisse der Simulationsrechnungen soll analysiert werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Änderung der einzelnen Parameter und dem resultierenden Systemverhalten besteht. Diese Informationen werden bei der Planung der Versuche berücksichtigt. In Abschnitt 3.6 sind die Simulationsergebnisse zusammengefasst.

3.2 Ergebnisse Variation Reibwert

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Ergebnisse bei Variation des Reibwerts dargestellt. Die Grafiken enthalten die Ergebnisgrößen Y_a (Führungskraft am bogenäußeren Rad), Y_i^1 (Führungskraft am bogeninneren Rad) und $SumY$ (Summe der Führungskräfte je Radsatz) für beide Radsätze RS1 und RS2 des zweiachsigen Fahrzeugs (siehe Modellbeschreibung Abbildung 1, Abbildung 2). Die Werte wurden immer im Bereich des Bogens mit konstantem Radius abgelesen. Die Bezeichnung „Einzelwagen“ bedeutet, dass das Fahrzeug nicht im Zugverband betrachtet wurde, sondern als einzelnes Fahrzeug. In den Simulationsrechnungen ist RS1 immer der vorlaufende/führende Radsatz.

¹ Anmerkung: Y_i für RS1 und für RS2 für den Fall $\mu=0.2$ hat ein negatives Vorzeichen und ist nur aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Diagrammen durchwegs positiv dargestellt.

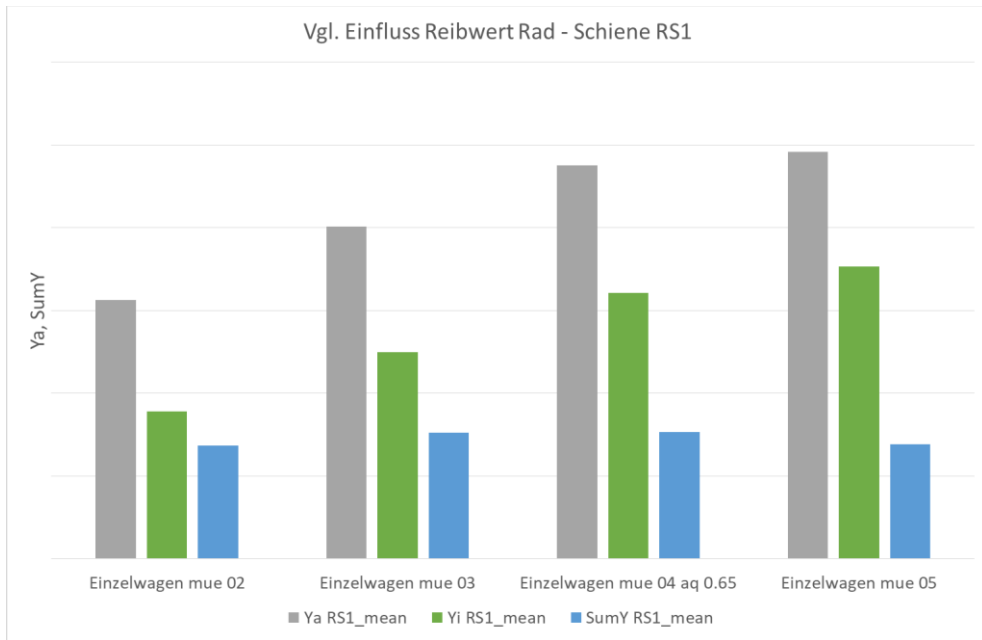


Abbildung 10: Einfluss Reibwert, RS1

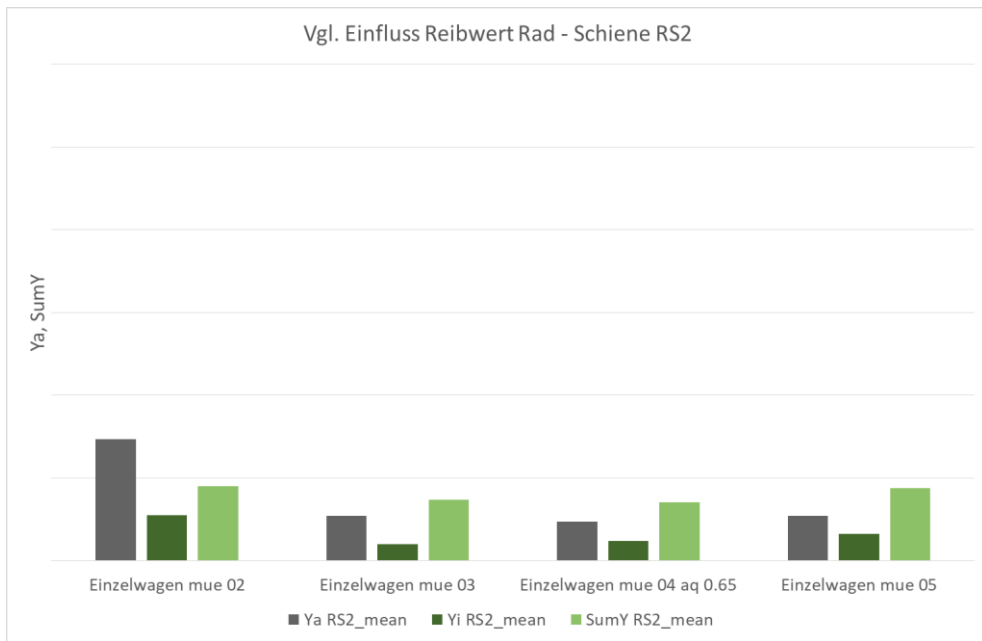


Abbildung 11: Einfluss Reibwert, RS2

3.3 Ergebnisse-Variation Schienenprofile

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die Ergebnisse (Y_a , Y_i^2 und SumY für beide Radsätze) der Variation der Schienenprofile dargestellt. Die Werte wurden immer im Bereich des Bogens mit konstantem Radius abgelesen.

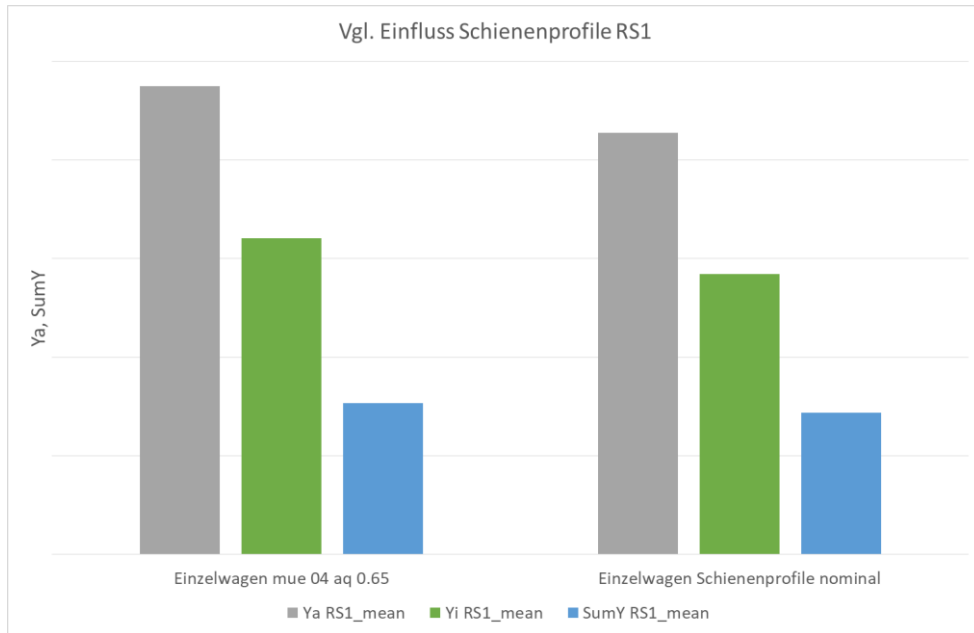


Abbildung 12: Einfluss Schienenprofil, RS1 (links verschlissen, rechts nominal)

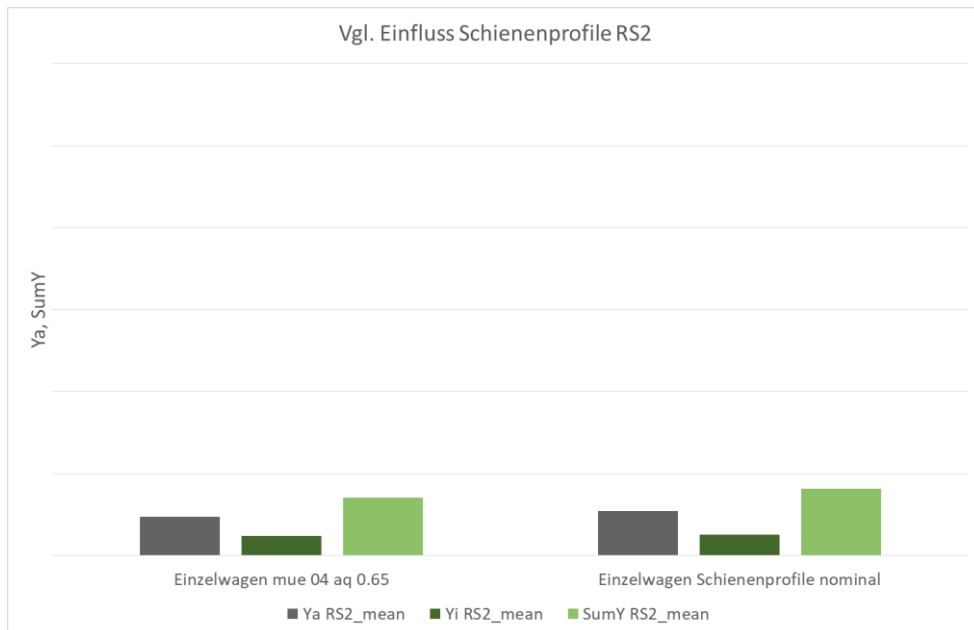


Abbildung 13: Einfluss Schienenprofil, RS2 (links verschlissen, rechts nominal)

² Anmerkung: Y_i für RS1 hat ein negatives Vorzeichen und ist nur aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Diagrammen durchwegs positiv dargestellt

3.4 Ergebnisse-Einfluss Zugverband

Um zu bestimmen wie die Rad-Schiene Kräfte durch die Zusammensetzung des Zugverbands aus verschiedenen Wagentypen beeinflusst werden, wurden die folgenden Varianten des Zugverbands untersucht:

- Zugverband 2x 4ax 12.04m LüP (siehe Abbildung 14)
- Zugverband 2x 4ax 19.9m LüP (siehe Abbildung 15)
- Zugverband 1x 4ax 19.9m 1x 2ax 9.64m LüP (siehe Abbildung 16)

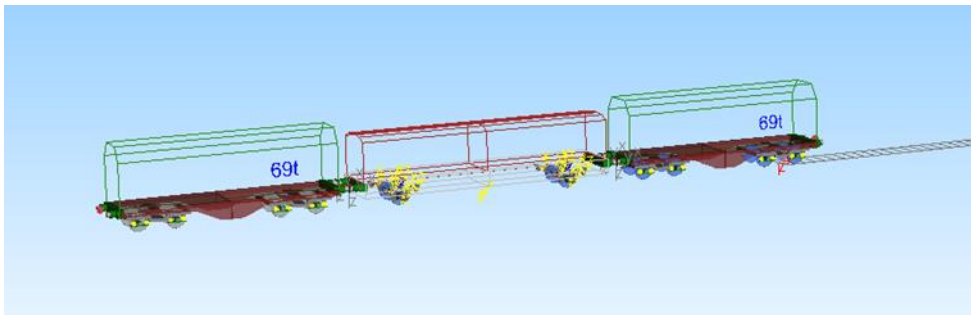


Abbildung 14: Zugverband 2x 4ax 12.04m LüP

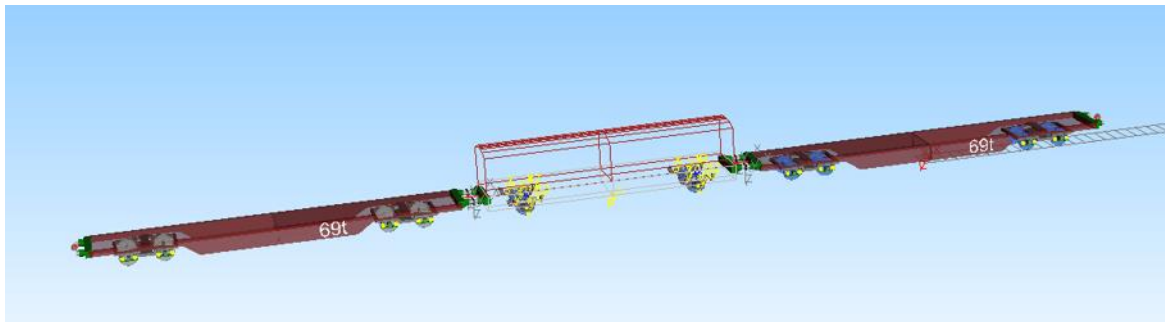


Abbildung 15: Zugverband 2x 4ax 19.9m LüP

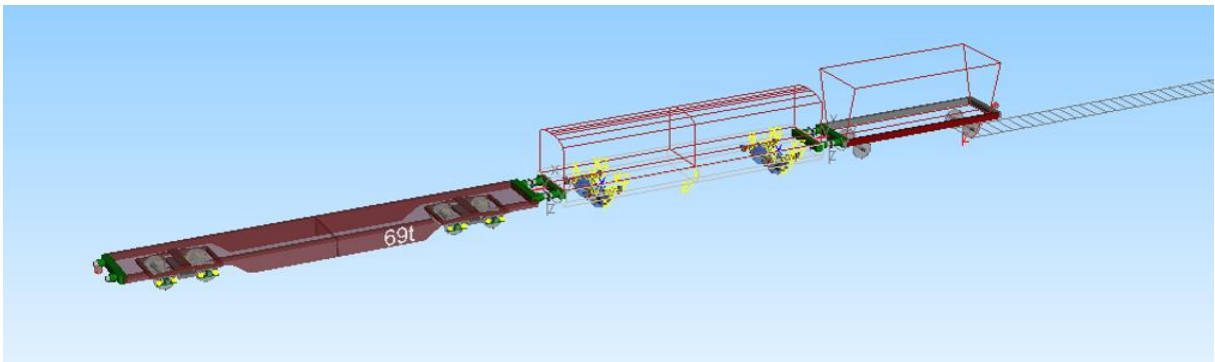


Abbildung 16: Zugverband 1x 4ax 19.9m 1x 2ax 9.64m LüP

In Abbildung 17 ist der Einfluss der Pufferkräfte bei Einreihung des Fahrzeugs in den Zugverband dargestellt, auch hier ist Y_i wieder negativ und nur aus Gründen der Übersichtlichkeit im Diagramm positiv dargestellt. Dabei wirken keine nennenswerten Längskräfte von außen auf den Zugverband ein. Die Werte wurden immer im Bereich des Bogens mit konstantem Radius abgelesen.

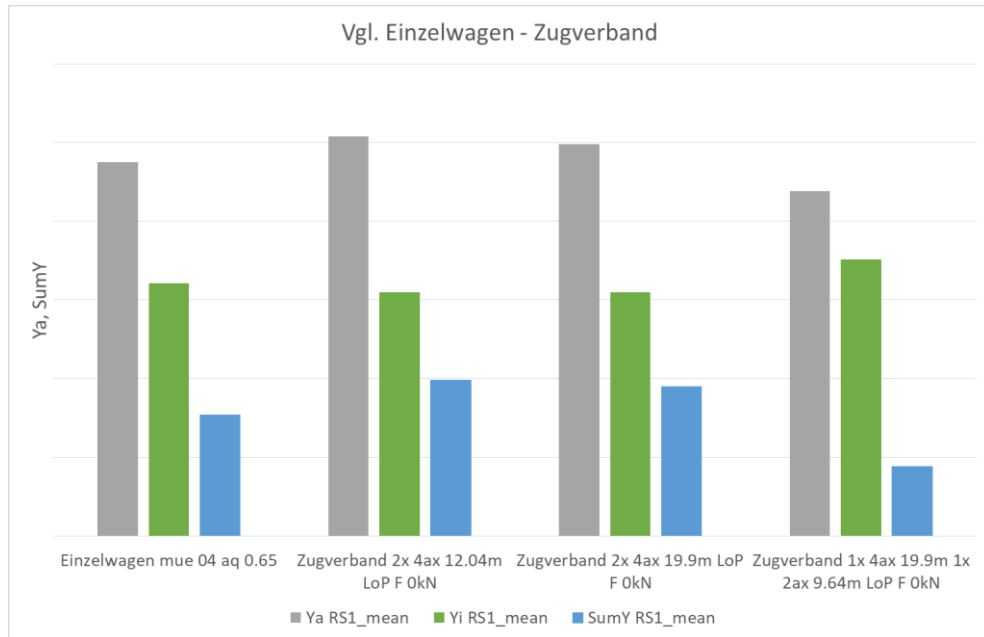


Abbildung 17: Einfluss ZVB, RS1

In einer weiteren Variation wurden Längskräfte im Bereich von -300 kN (Druckkraft) bis 300 kN (Zugkraft) auf die drei unterschiedlichen Zugverbands-Varianten aufgebracht. Der Einfluss auf die Ergebnisse ist Abbildung 18 und Abbildung 19 zu entnehmen.

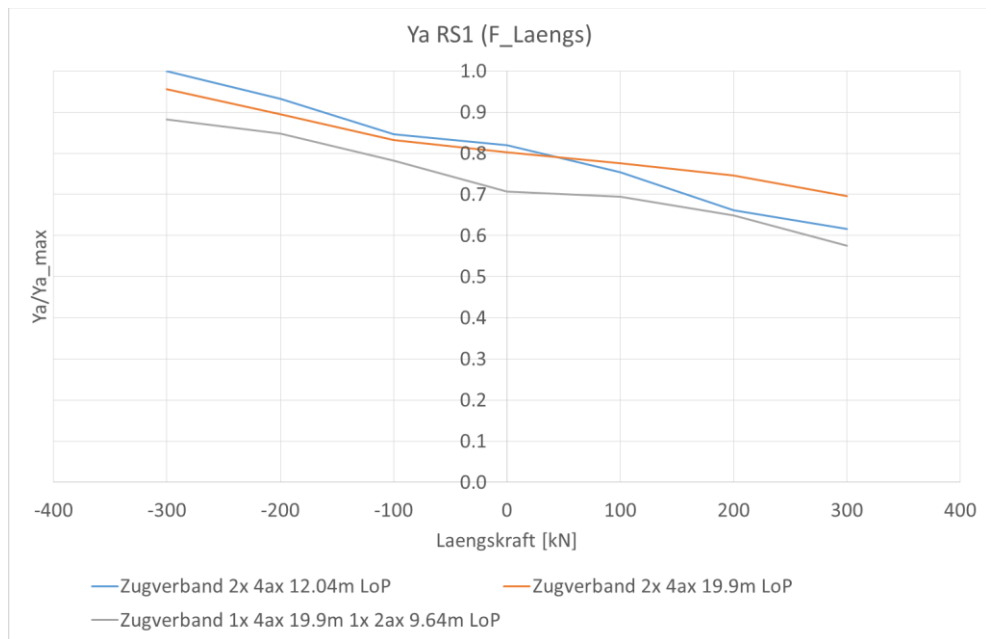


Abbildung 18: Einfluss Längskräfte ZVB, Ya RS1

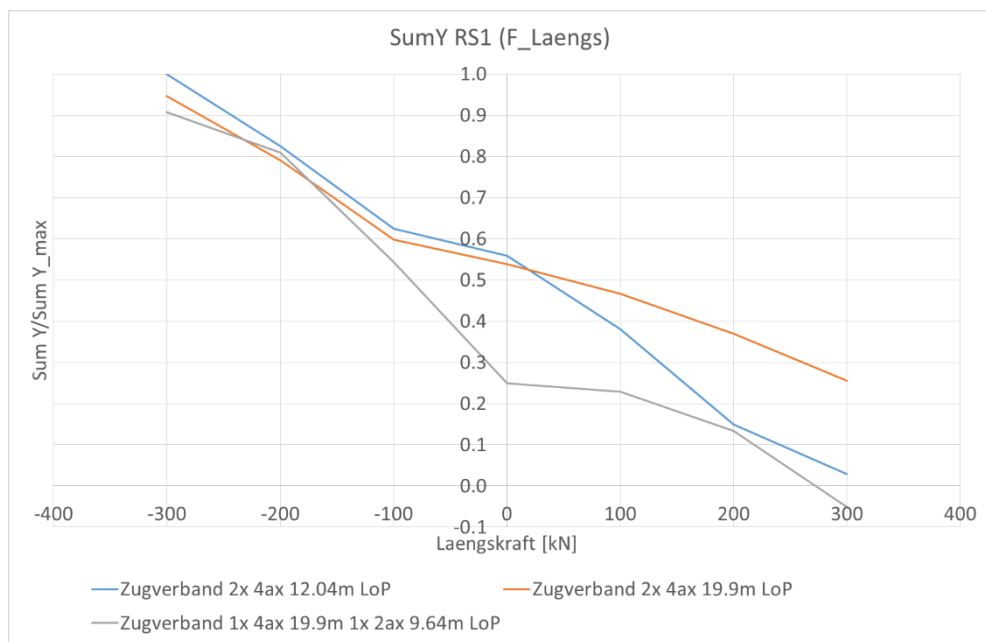


Abbildung 19: Einfluss Längskräfte ZVB, SumY RS1

Nachdem die Variante Zugverband 2x 4ax 12.04m LÜP (siehe Abbildung 14) die höchsten Werte (für Längsdruckkräfte) bei den relevanten Beurteilungsgrößen Ya und SumY zeigte, wurde für die weiteren Untersuchungen diese Variante ausgewählt.

3.5 Ergebnisse der aq und Längskräfte Variation

Um zu bestimmen wie sich die Rad-Schiene Kräfte unter Längskrafteinfluss und gleichzeitig wirkender freier Seitenbeschleunigung (aq) verhalten, wurden auch diese Varianten untersucht. Dabei wurden wiederum Längskräfte im Bereich von -300 kN (Druckkraft) bis 300 kN (Zugkraft) aufgebracht und drei unterschiedliche Werte für aq untersucht. Der erste Wert für aq von 0.65 m/s² entspricht dem Regel-aq und der laut VZG auf dem Streckenabschnitt zulässigen Geschwindigkeit von 60 km/h. Weiter wurde ein aq von 0 m/s² (entspricht einer Geschwindigkeit von 45 km/h) sowie ein negatives aq von -0.83 m/s² (entspricht einer Geschwindigkeit von 8 km/h) untersucht.

Abbildung 20 bis Abbildung 25 zeigen den Verlauf der einzelnen Beurteilungsgrößen über der Längskraft aufgetragen. Die Werte wurden immer im Bereich des Bogens mit konstantem Radius abgelesen.

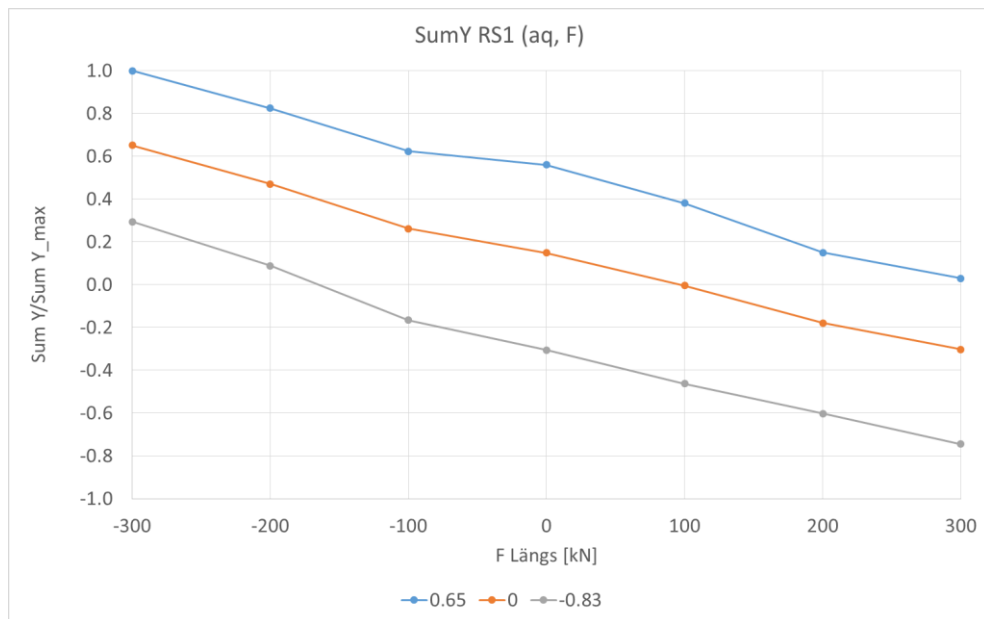


Abbildung 20: Sum Y RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

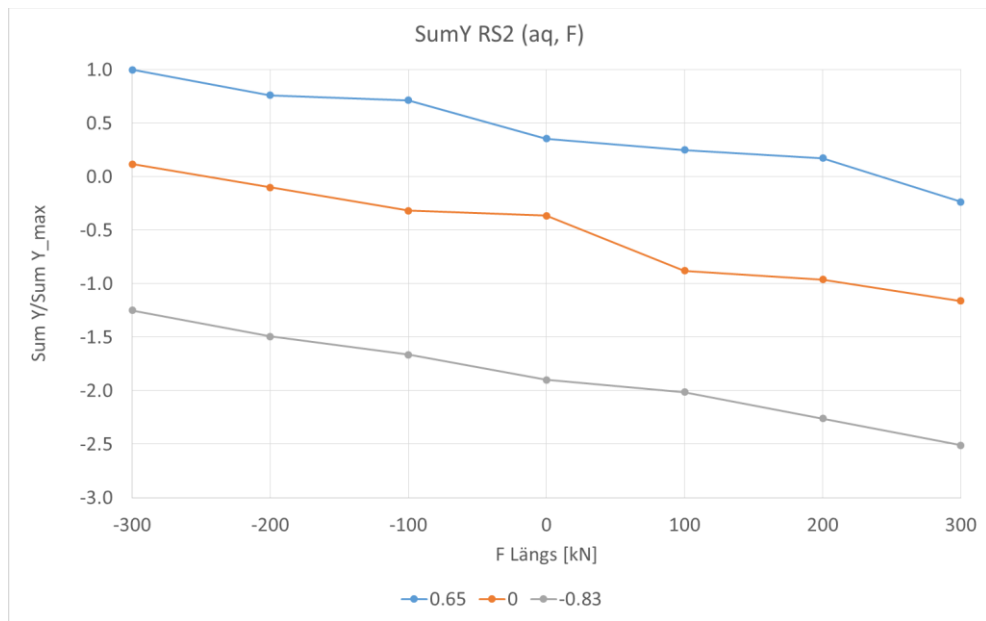


Abbildung 21: Sum Y RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

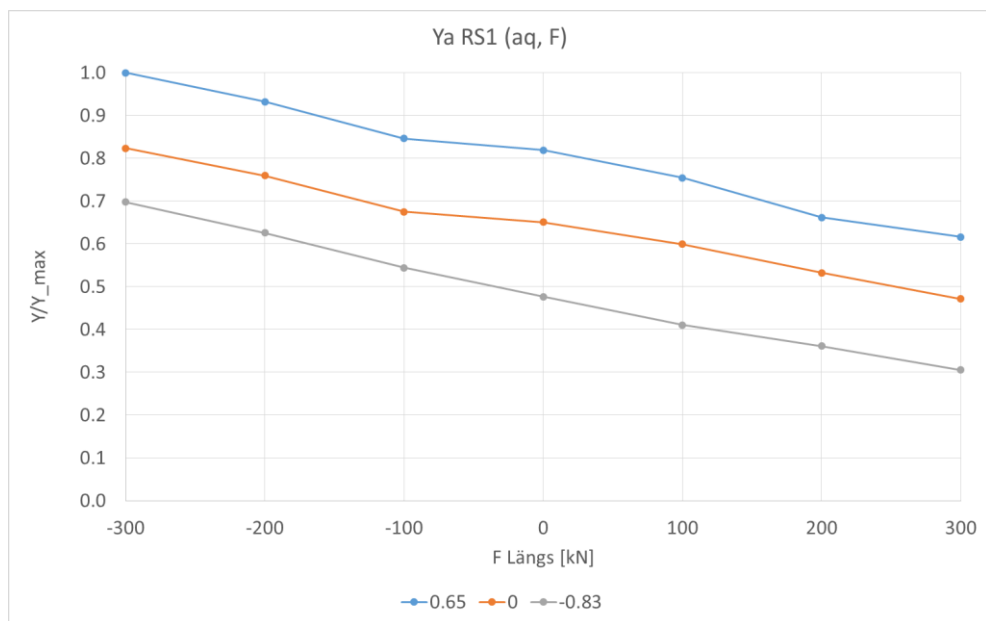


Abbildung 22: Ya RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

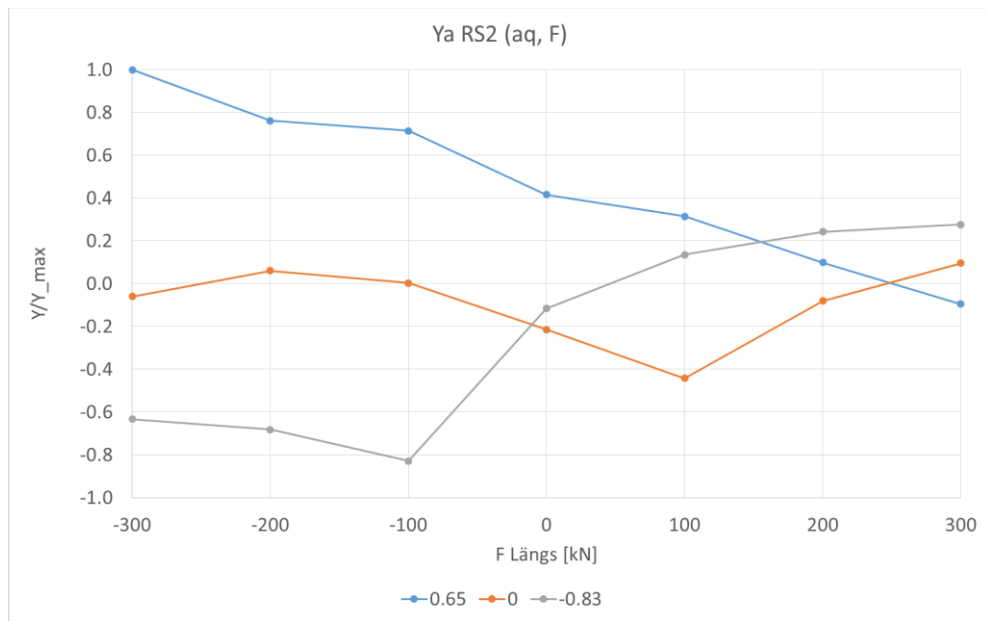


Abbildung 23: Ya RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

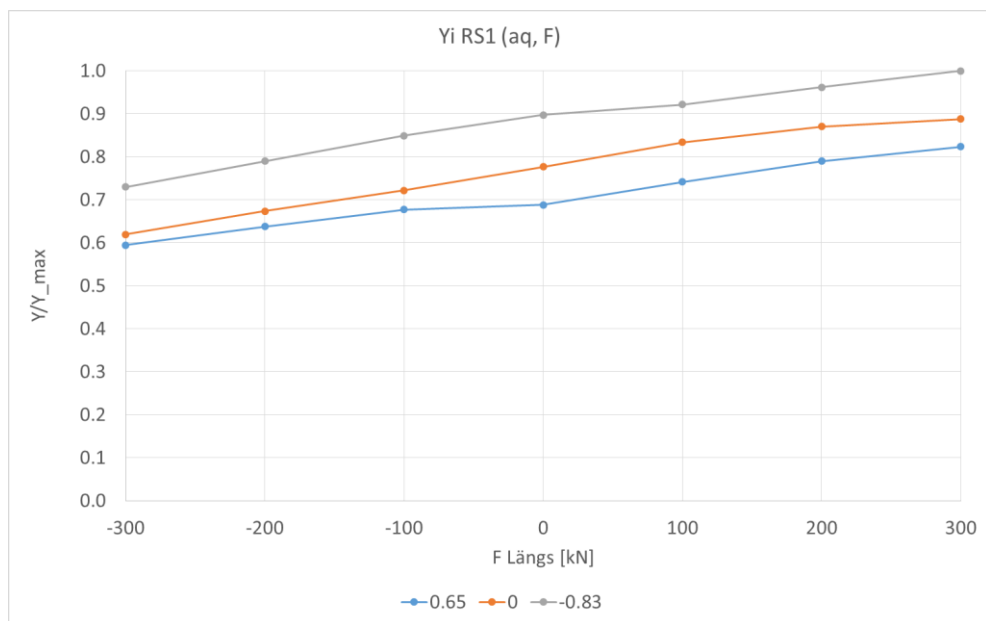


Abbildung 24: Yi RS1 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

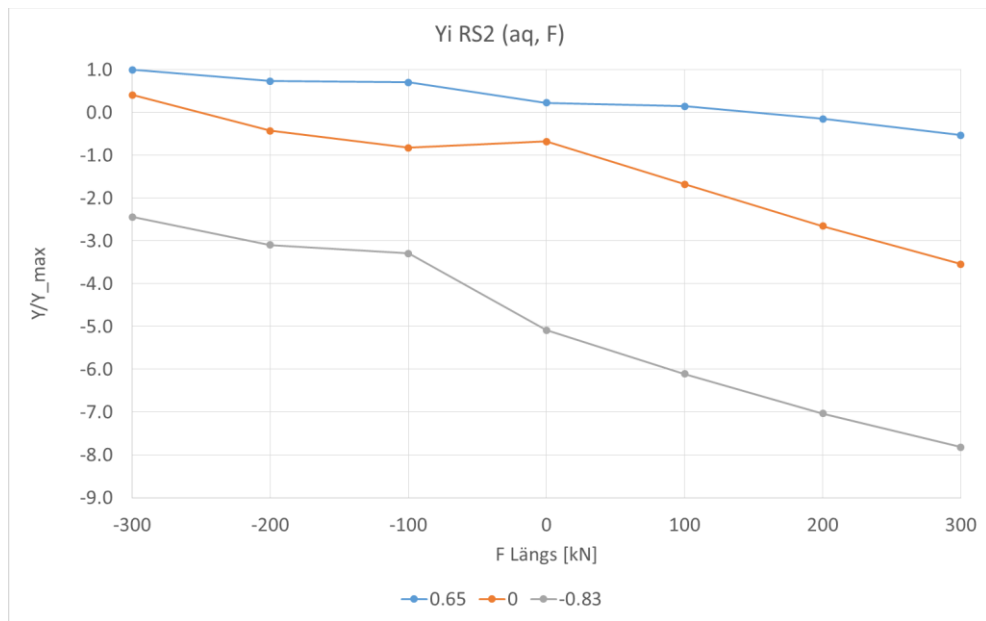


Abbildung 25: Yi RS2 in Abhängigkeit von Längskraft und aq

Abbildung 26 zeigt das Verhalten der Anlaufwinkel für RS1 in Abhängigkeit der Längskräfte für verschieden Werte der freien Seitenbeschleunigung (aq). Die Anlaufwinkel für RS2 sind durchwegs vernachlässigbar klein (<1mrad).

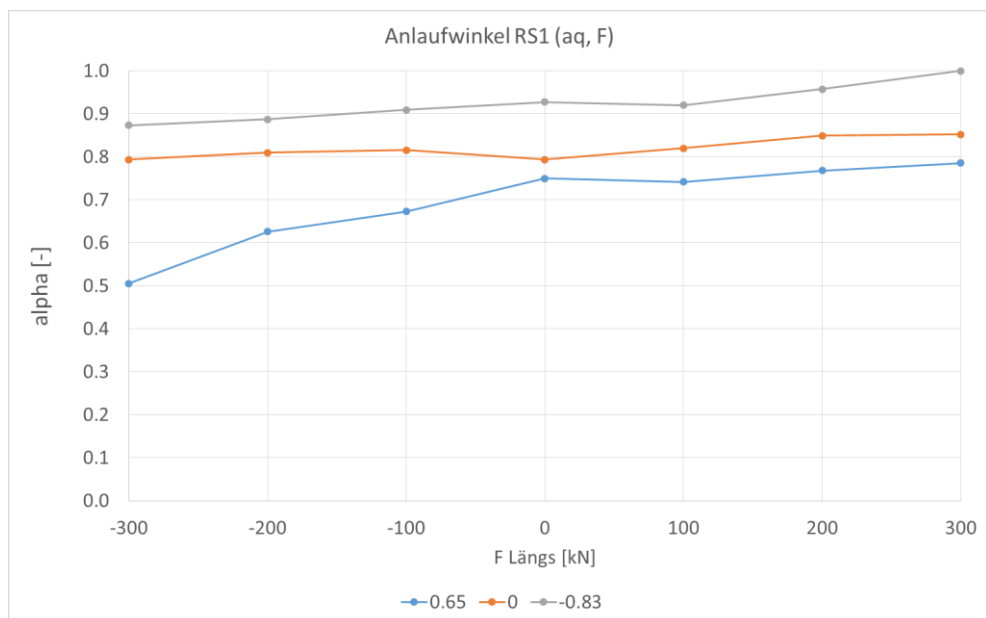


Abbildung 26: Anlaufwinkel RS1 in Abhängigkeit der Längskräfte und aq

3.6 Zusammenfassung Simulationsergebnisse

Die in Abschnitt 3.2 untersuchte Änderung des Reibwerts führte am führenden Radsatz zu einem Anstieg der Führungskräfte am bogenäußeren und bogeninneren Rad. Nachdem diese Größen jedoch unterschiedliche Vorzeichen besitzen bleibt die Summe der Führungskräfte über den Radsatz relativ konstant (siehe Abbildung 10). Am Radsatz 2 (nachlaufend) ist das Niveau der Führungskräfte wie erwartet deutlich geringer als am Radsatz 1 (vorlaufend). Der Anstieg des Reibwerts führt hier (RS2) zu einer etwas besseren Einstellung des Radsatzes im Bogen, was sich in der Änderung des Vorzeichens der bogeninneren Führungskraft (Y_i) ab einem Reibwert von $\mu=0.3$ zeigt und damit eine Reduktion der Führungskräfte bewirkt (siehe Abbildung 11). Für die Simulationsläufe ohne Variation des Reibwerts, wurde ein konstanter Reibwert von $\mu=0.4$ angenommen.

Eine Annäherung an die Bedingungen der Realität durch die Anwendung von verschlissenen Schienenprofilen im Bogen führt an Radsatz 1 zu einer Erhöhung der Führungskräfte am bogenäußeren und bogeninneren Rad, wie schon bei der Variation des Reibwerts erhöht sich die Summe der Führungskräfte über den Radsatz nur wenig und bleibt annähernd konstant. Bei Radsatz 2 ergibt sich bei verschlissener Schiene eine geringfügige Reduktion der Führungskräfte je Rad und somit reduziert auch die Summe der Führungskräfte $\text{Sum}Y$. Die Ergebnisse dazu finden sich in Abschnitt 3.3.

Abschnitt 3.4 widmet sich der Untersuchung des Einflusses des Zugverbands ohne nennenswerte Längskräfte. Dabei ergab sich die Variante mit relativ kurzen vierachsigen Wagen (12.04m LüP, 7m Drehgestellmittenabstand) als Variante mit den höchsten Führungskräften (siehe Abbildung 17). Allerdings ist der Unterschied zu längeren Wagen (19m LüP) nicht sonderlich groß (2% bei Y_a und $\text{Sum}Y$, keine Änderung bei Y_i). Wie bei der Kombination von zweiachsigen und vierachsigen Wagen als Rahmenwagen³ zu beobachten ist, kann die Einreihung in den Zugverband die Führungskräfte im Vergleich zum Einzelfahrzeug jedoch auch verringern. Dies ist auf die Stellung des vorderen Rahmenwagens zurückzuführen, der dabei über die Puffer eine zusätzliche Führungskraft auf den mittleren Wagen ausübt.

Auch bei der weiteren Untersuchung der verschiedenen Varianten des Zugverbands unter Einfluss von Längskräften traten bei der Variante *2x 4ax 12.04m LüP* (siehe Abbildung 14) die höchsten Werte bei den Beurteilungsgrößen Y_a und $\text{Sum}Y$ auf (siehe Abbildung 18 und

³ Wagen die vor und hinter dem Versuchsobjekt angeordnet sind.

Abbildung 19). Daher wurde für die weiteren Untersuchungen und auch in weiterer Folge für die Versuche diese Fahrzeuganordnung ausgewählt.

In Abschnitt 3.5 ist die für die nunmehr festgelegte Variante *2x 4ax 12.04m LüP* (siehe Abbildung 14) durchgeführte Variation der freien Seitenbeschleunigung (a_q) und der Längskräfte dokumentiert. Generell lässt sich ausgehend von der Bogenfahrt ohne Längskräfte sagen, dass Längsdruckkräfte eine Erhöhung bzw. umgekehrt Zugkräfte eine Reduktion der Summe der Führungskräfte ($\text{Sum}Y$) und auch der Führungskraft des im Bogen außen fahrenden Rades (Y_a) am vorlaufenden Radsatz (RS1) bewirken. Eine Reduktion der freien Seitenbeschleunigung (a_q) von 0.65m/s^2 (Regel- a_q) auf 0m/s^2 bzw. -0.83m/s^2 lässt auch die Summe der Führungskräfte ($\text{Sum}Y$) und die bogenäußere Führungskraft (Y_a) sinken (siehe Abbildung 20 und Abbildung 22). Das gleiche Verhalten lässt sich für die genannten Größen auch am zweiten Radsatz beobachten, dabei ist das Niveau der Führungskräfte jedoch deutlich niedriger. Die Führungskräfte am bogeninneren Rad (Y_i) zeigen im Vergleich zu jenen am bogenäußeren Rad ein umgekehrtes Verhalten. D.h. sie steigen bei Zugkraft an und sinken bei Druckkräften und liegen auch bei reduziertem a_q auf höherem Niveau als bei Regel- a_q .

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Längskräfte einen deutlichen Einfluss auf die Rad-Schiene-Kräfte, speziell auf die Führungskräfte (Y -Kräfte) und abgeleitete Größen haben und somit auch bei den Versuchen jedenfalls von Interesse sind. Die weiteren Einflussgrößen wie Reibwert und Profilpaarung (Radprofil/Schienenprofil) haben ebenfalls einen Einfluss auf die untersuchten Größen jedoch steht dieser hier nicht im Fokus der Studie. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Varianten des Zugverbands traten bei der Variante *2x 4ax 12.04m LüP*, bestehend aus dem untersuchten zweiachsigen Wagen eingereiht zwischen zwei vierachsigen kurzen Güterwagen (siehe Abbildung 14), die höchsten Werte bei den Beurteilungsgrößen Y_a und $\text{Sum}Y$ auf. Aus diesem Grund wurde diese Variante detaillierter untersucht und auch für die Versuche ausgewählt. Die Betrachtung des untersuchten Fahrzeugs als Einzelfahrzeug und im Zugverband mit dementsprechenden Pufferkräften zeigt, dass auch deren Einfluss relevant ist. Dies wird bei der Versuchsplanung ebenfalls berücksichtigt.

4 BESCHREIBUNG DER VERSUCHE

4.1 Ablauf der Versuche

Basierend auf den Ergebnissen der Simulationen und den Anforderungen des Projektpartners ÖBB-Infrastruktur wurde eine Spezifikation erstellt, in der die wesentlichen Informationen zur Planung, Vorbereitung und Durchführung der Versuche festgehalten wurden. Weiter enthält die Spezifikation auch die Angaben zu den geplanten Messpositionen und eingesetzten Sensortypen sowie die Verkabelung der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus. Die zu erfassenden Messgrößen und erwarteten Werte- bzw. Messbereiche sind ebenfalls in Tabellenform in der Spezifikation enthalten. Dieses Dokument wurde auch als Diskussionsgrundlage bei den wiederkehrenden Abstimmungen mit dem Projektpartner verwendet um alle etwaigen Anpassungen am Messaufbau und der Versuchsdurchführung darin festzuhalten.

Nachdem der Termin für die Versuche im September fixiert worden war, wurde die notwendige Ausrüstung vorbereitet, wobei teilweise Anpassungen vorgenommen werden mussten oder Adapter für die Befestigung am Fahrzeug zu konstruieren waren. Der größte Arbeitsaufwand fiel bei dem Umbau der Radsätze des Versuchsobjekts zu Messradsätzen an. Ein Messradsatz ist ein Kraftaufnehmer der auf einem Prüfstand kalibriert wird und anschließend in ein Schienenfahrzeug eingebaut werden kann und so die Erfassung der Kräfte zwischen Rad und Schiene ermöglicht. Dazu war es notwendig Dehnungsmessstreifen am Radsatz anzubringen. Die Positionen der Messstreifen wurden durch Kombination von FEM-Rechnung und Algorithmen, welche die Position der DMS basierend auf den FEM-Ergebnissen optimieren, bestimmt. Ziel der Auslegung war es die Positionen der Dehnungsmessstreifen so zu wählen, dass die zu messende Größe ein ausreichend gutes Signal erzeugt und gleichzeitig ein möglichst geringes Übersprechen der anderen auf den Radsatz wirkenden Messgrößen zu erhalten. Bei der anschließenden Instrumentierung der Radsätze galt es die Positionen der einzelnen Dehnungsmessstreifen genau einzuhalten, da davon die spätere Messgenauigkeit des Messradsatzes abhängt. Nach Verkabelung und Verschaltung der einzelnen DMS zu Wheatstoneschen Vollbrücken wurden die Messstellen abgedeckt um sie vor mechanischen und Witterungseinflüssen zu schützen. Danach war eine Kalibrierung der Radsätze am Prüfstand notwendig. Dabei werden definierte Kräfte in Vertikal- und Querrichtung auf den Radsatz aufgebracht und die Signale der zu Brücken verschalteten Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet. So lassen sich im späteren Messeinsatz über die Signale der Messbrücken die im Rad-Schiene Kontakt wirkenden Kräfte bestimmen.

Die Installation der messtechnischen Ausrüstung erfolgte am Standort Knittelfeld der ÖBB Technische Services. Neben den zu Kraftaufnehmern umgebauten Radsätzen wurde weitere Sensorik am Versuchsobjekt angebracht. Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren wurden die auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen erfasst und durch den Einsatz von Wegaufnehmern konnten die Bewegungen der Radsätze relativ zum Wagen ermittelt werden. Weiter war noch ein GPS zur Positionsbestimmung und ein Drehratensensor verbaut mit dessen Hilfe die Trassierung, speziell die horizontale Streckenkrümmung aufgezeichnet wurde. Nach Abschluss der Arbeiten am Messaufbau und den zu untersuchenden Fahrzeugen, konnte mit den Fahrversuchen begonnen werden.

Die Konfiguration des Zugverbands für die Versuche wurde aus den Simulationsergebnissen abgeleitet und die Messobjekte dementsprechend angeordnet. Wie auch in der Simulation bestand der Zugverband aus dem Versuchsobjekt, einem mit Messradsätzen ausgestatteten zweiachsigen Güterwagen, der zwischen zwei beladenen Schotterwagen eingereiht wurde. Weiter wurde der Messwagen der maschinentechnischen Messgruppe der ÖBB in den Zugverband integriert und jeweils ein Triebfahrzeug an den Enden des Zugverbands gekoppelt (siehe Abbildung 27). Die Schotterwagen vor und nach dem Versuchsobjekt waren für eine realistische Einbindung in den Zugverband im Hinblick auf die Krafteinleitung über Seitenpuffer und mittig angeordneter Schraubenkupplung nötig. Triebfahrzeuge an den Enden des Zugverbandes wurden für das Einbringen der Längskräfte in den Zugverband benötigt. Die Versuche wurden im Zeitraum vom 15.09.2020-25.09.2020 absolviert und umfassten Fahrten auf der Semmeringstrecke wobei der Fokus auf das Befahren der ortsfesten Messstelle in Breitenstein gelegt wurde. Hierbei wurden die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Versuchskonfigurationen im Rahmen der betrieblichen Möglichkeiten umgesetzt und untersucht. Wie schon in den Simulationsszenarien wurde der Einfluss der Seitenpuffer untersucht indem ein Tag mit Kupplungsstangen gefahren wurde. Diese erfüllen die Funktion der Seitenpuffer und der Schraubenkupplung in einem und somit konnte das Versuchsobjekt für diesen Zeitraum frei von Einflüssen der durch die Puffer übertragenen Reibkräfte untersucht werden. An den weiteren Versuchstagen wurden Versuchsvarianten mit verschiedenen Längskräften und unterschiedlicher Geschwindigkeit, ebenfalls auf der Semmeringstrecke, gefahren. Die dazu notwendigen Überstellungsfahrten wurden so geplant, dass dabei ein möglichst großer Teil des Hauptschienennetzes befahren wurde und somit auch Messdaten zur weiteren Untersuchung von Fahrzeugreaktionen zur Verfügung stehen.

Die zeitsynchrone Aufzeichnung der Messdaten der gesamten Sensorik wurde durch das Prüfinstitut (PJM) sichergestellt. Dabei wurden auch die Versuchsparameter, die Konfiguration der Fahrzeuge und die Bedingungen während der Versuche festgehalten. Nach erfolgreichem Abschluss der Versuche wurde die messtechnische Ausrüstung deinstalliert und der ursprüngliche Zustand der Versuchsobjekte wiederhergestellt.

4.2 Anordnung Versuchsobjekt

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung des Messzuges inklusive der Triebfahrzeuge, des Messwagens, des Kalibrierwagens (Versuchsobjekt) und der Schotterwagen. So bestand die Möglichkeit den Kalibrierwagen von den beiden Schotterwagen mittels Kuppelstangen zu entkoppeln, um so das Fahrverhalten frei von Reibkräften an den Puffern zu untersuchen.

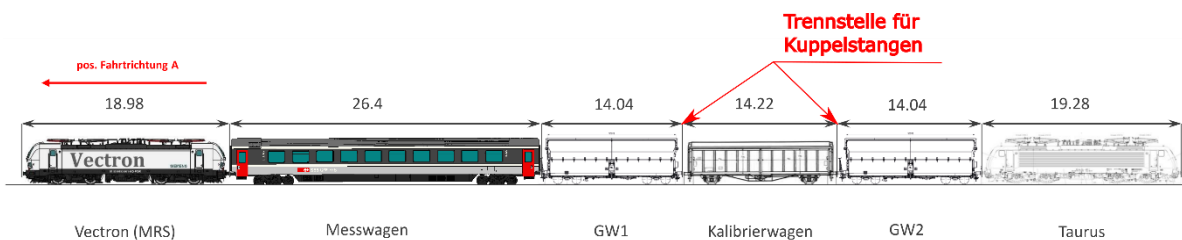


Abbildung 27: Zusammenstellung Versuchszug

4.3 Datenerfassungssystem

Die Datenerfassung wurde mit einem Messverstärker des Typs MGC+ CP52 (16 Einschubkarten) der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) realisiert. Dabei wurden die Messgrößen mit einer Abtastrate von 2400 Hz abgetastet und je nach Typ einer Tiefpassfilterung (Anti-Aliasing-Filter) mit 500 Hz bzw. 1000 Hz Grenzfrequenz unterzogen.

4.4 Liste der Messfahrten und Versuchsparameter

Im Rahmen der Versuche wurden unterschiedliche Konfigurationen betreffend die Versuchsparameter Längskräfte, Kopplung der Fahrzeuge, Geschwindigkeit untersucht. In Tabelle 2 sind die jeweiligen Versuchsparameter der einzelnen Versuchsfahrten im Detail aufgelistet, während in Abbildung 28 die Versuchsstrecke dargestellt ist.

Tabelle 2: Dokumentation der Versuchsparameter

Nr. No	Dateiname File Name	Startzeit Start Time	Endzeit End Time	V-geplant Speed planned in km/h	Fahrt-richtung Driving Direction	Beladung Loading Condition	Datum Date	Reibkräfte am Puffer	Längskräfte am Kalibrierwagen Zugkraft Vorzeichen + Druckkraft Vorzeichen -	Messstelle	Geschwindigkeit an Messstelle
1	M14-M17	09:47:03	10:06:35	VZG-5	A	Standard	20200915	nicht entkoppelt	Start der Messfahrten am Semmering		
2	M24-M28	10:49:17	11:13:13	Vmax 40	B	Standard	20200915	entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
3	M29-M33	11:18:24	11:41:45	Vmax 40	A	Standard	20200915	entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
4	M34-M38	11:58:18	12:23:11	Vmax 40	B	Standard	20200915	entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
5	M39-M44	13:12:50	13:38:13	Vmax 40	A	Standard	20200915	entkoppelt	100 kN	Semmering	40 km/h
6	M45-M49	13:59:36	14:22:32	Vmax 40	B	Standard	20200915	entkoppelt	-50 kN	Semmering	40 km/h
7	M50-M55	15:02:04	15:26:16	Vmax 40	A	Standard	20200915	entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
8	M56-M63	15:50:59	16:26:15	Vmax 40	B	Standard	20200915	entkoppelt	-75 kN	Semmering	10 km/h
9	M64-M68	10:03:30	10:26:29	VZG	A	Standard	20200916	nicht entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
10	M69-M72	10:57:00	11:14:07	VZG	B	Standard	20200916	nicht entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
11	M73-M76	11:22:14	11:39:07	VZG	A	Standard	20200916	nicht entkoppelt	0	Semmering	40 km/h
12	M77-M80	11:47:12	12:02:27	VZG	B	Standard	20200916	nicht entkoppelt	-77 kN	Semmering	38 km/h
13	M81-M84	13:03:39	13:19:18	VZG	A	Standard	20200916	nicht entkoppelt	200 kN	Semmering	60 km/h
14	M85-M88	13:38:24	13:53:26	VZG	B	Standard	20200916	nicht entkoppelt	-150 kN	Semmering	60 km/h
15	M89-M92	14:05:52	14:21:29	VZG	A	Standard	20200916	nicht entkoppelt	0	Semmering	60 km/h
16	M93-M97	14:39:26	15:00:49	VZG+5	B	Standard	20200916	nicht entkoppelt	-150 kN	Semmering	65 km/h
17	M98-M102	15:20:47	15:45:34	VZG+5	A	Standard	20200916	nicht entkoppelt	200 kN	Semmering	VZG+5
18	M103-M107	15:56:45	16:19:28	VZG	B	Standard	20200916	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	40 km/h
19	M108-M116	09:04:40	10:02:00	VZG-5	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	60 km/h
20	M117-118	11:07:35	11:16:40	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	10 km/h
21	M119-	11:33:29		Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	10 km/h
22				Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-75 kN	Semmering	10 km/h
23	bis M122		11:48:51	Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-75 kN	Semmering	10 km/h
24	M123-	12:08:31		Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	11 km/h
25	bis M124		12:14:09	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	12 km/h
26	M125-	12:14:42		Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	50 kN	Semmering	13 km/h
27	bis M126		12:20:07	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	50 kN	Semmering	14 km/h
28	M127-	12:43:48		Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
29				Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
30	bis M129		12:55:26	Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
31	M130-M131	12:56:18	13:05:15	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	10 km/h
32	M132-	13:14:06		Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
33	bis M133		13:19:18	Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	10 km/h
34	M134-	13:21:19		Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	20 km/h
35	bis M135		13:27:39	Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	20 km/h
36	bis M135		13:27:39	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	20 km/h
37	M136-	13:28:05		Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	20 km/h
38	bis M136		13:31:52	Vmax 10	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	20 km/h
39	M137-M137	13:32:20	13:33:48	Vmax 10	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	20 km/h
40	M138-M139	13:45:55	13:53:59	VZG	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	VZG
41	M140-M144	15:59:16	16:22:02	VZG+5	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	35 km/h
42	M145-151	16:57:11	17:41:36	VZG+5	A	Standard	20200917	nicht entkoppelt	100 kN	Semmering	35 km/h
43	M152-156	17:54:31	18:19:03	VZG-5	B	Standard	20200917	nicht entkoppelt	0	Semmering	35 km/h
44	M157-M161	08:57:38	09:20:25	VZG	A	Standard	20200918	nicht entkoppelt	150 kN	Semmering	45 km/h
45	M162-165	09:53:29	10:10:35	VZG	B	Standard	20200918	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	45 km/h
46	M166-M169	10:40:10	10:56:15	VZG	A	Standard	20200918	nicht entkoppelt	150 kN	Semmering	45 km/h
47	M170-M173	11:23:05	11:39:27	VZG	B	Standard	20200918	nicht entkoppelt	-100 kN	Semmering	55 km/h
48	M174-M177	12:16:00	12:32:05	VZG	A	Standard	20200918	nicht entkoppelt	0	Semmering	55 km/h
49	M178-M185	12:39:52	13:15:36	VZG	B	Standard	20200918	nicht entkoppelt	0	Semmering	45 km/h
50	M186-M189	13:37:36	13:53:57	VZG+5	A	Standard	20200918	nicht entkoppelt	150 kN	Semmering	65 km/h
51	M190-M195	14:00:05	14:27:16	VZG	B	Standard	20200918	nicht entkoppelt	Aufsameln Reflektorplatten für Lichtschranke am KW		

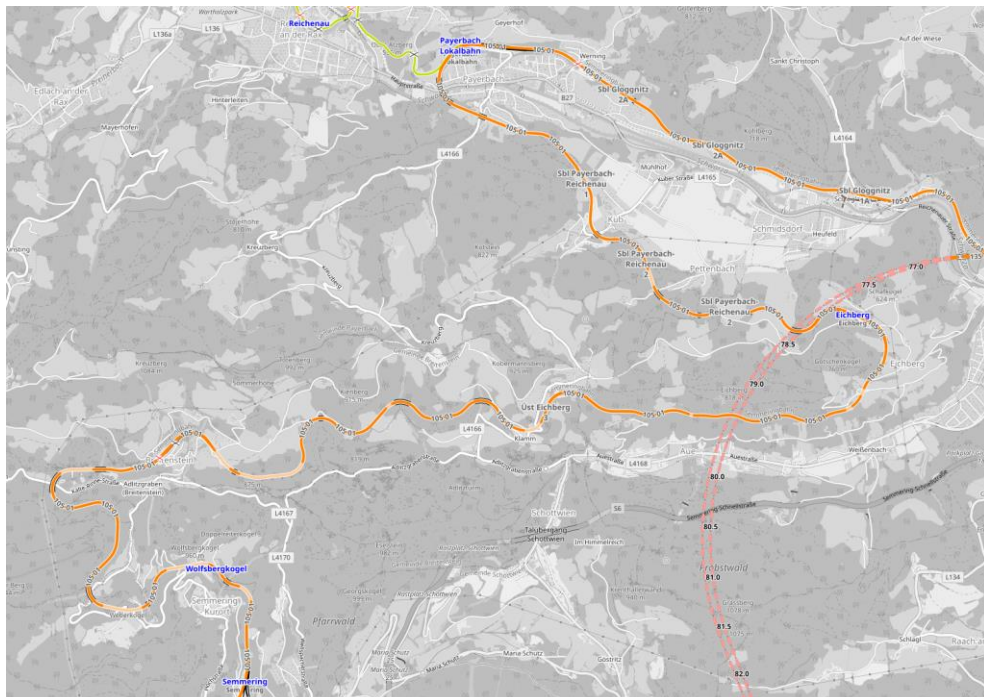


Abbildung 28: Überblick Versuchsstrecke [Quelle: openrailwaymap.org]

4.5 Messpositionen am untersuchten Fahrzeug

Wie in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, wurde das Fahrzeug mit Sensorik ausgestattet. In Abbildung 29 ist eine Skizze der Messpositionen am untersuchten Fahrzeug dargestellt.

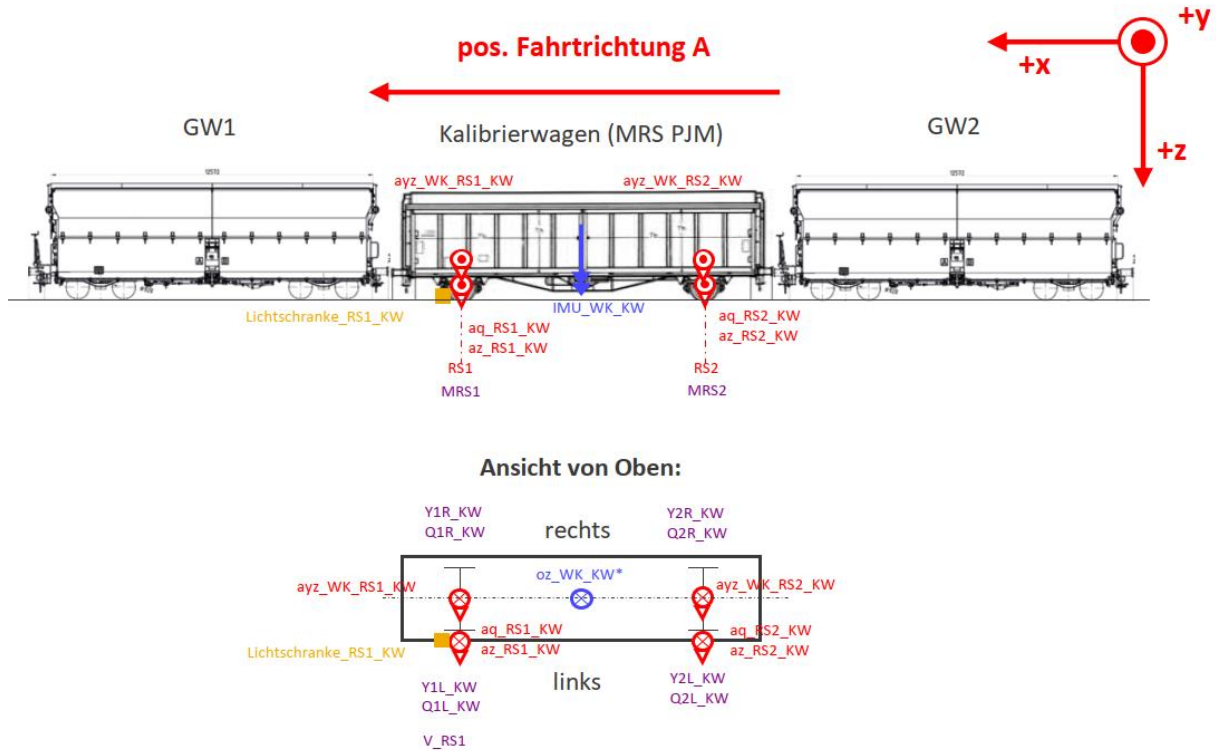


Abbildung 29: Übersicht der Sensorpositionen am Kalibrierwagen

5 ERGEBNISSE DATENANALYSE

5.1 Ablauf Datenanalyse

Im Zuge der Datenanalyse werden die Versuchsdaten auf Konsistenz geprüft und eventuelle Störungen bereinigt. Auch die Sortierung der Daten nach der jeweiligen Versuchskonfiguration ist wichtig, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. In einem weiteren Schritt die Daten aus den Simulationsrechnungen und die während der Versuche erfassten Daten zusammengeführt. Wie in Kapitel 4 (Versuche) beschrieben, geht es darum durch Befahren der ortsfesten Infrastrukturmesstelle in Breitenstein in unterschiedlichsten Versuchskonfigurationen einen möglichst umfangreichen und vollständigen Satz an Messdaten zu generieren. Wie ebenfalls erwähnt, werden Daten sowohl durch die Messtelle (gleisseitig) als auch durch Messradsätze am Fahrzeug (fahrzeugseitig) erfasst. Diese beiden Datensätze werden synchronisiert und schließlich mit dem dritten Datensatz, welcher mittels Berechnungen mit Mehrkörpersimulationsmodellen des Fahrzeugs und Fahrwegs erzeugt wird, verschnitten. Wichtig ist hierbei die Berücksichtigung der Versuchsparameter Längskräfte und freie Seitenbeschleunigung (a_q) der einzelnen Fahrten, um so den Effekt dieser Einflussgrößen auf die Ergebnisse möglichst exakt zu bestimmen.

So lassen sich Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Ergebnissen anstellen und eventuelle Abweichungen analysieren. Dazu werden die vertikalen Radkräfte (Q-Kräfte) betrachtet, welche sich gut über die, durch Verwiegung ermittelte, Fahrzeugmasse plausibilisieren lassen. Auf diese Art und Weise ist es möglich die Abweichungen der gemessenen Werte von den berechneten Werten, welche sich aus den Versuchsbedingungen ergeben, zu bestimmen. Damit kann aufgezeigt werden wo es bei den einzelnen Systemen Verbesserungspotenzial gibt und gleichzeitig stehen die durch Messdaten bestätigten Simulationsmodelle für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

5.2 Vergleich Messradsätze-ortsfeste Messstelle-Simulation (Q-Kräfte)

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Versuche, repräsentiert durch die Werte der Messradsätze und die Messwerte der ortsfesten Messstelle in Breitenstein, sowie die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die vertikalen Radkräfte (Q-Kräfte) dargestellt. Bei dieser Art der Darstellung werden die Ergebnisse jeweils eines Längskraftbereichs (Druck-neutral-Zug) in einem Diagramm zusammengefasst. Eine feinere Unterteilung im Druck-/Zugbereich hätte zur Reduktion der jeweils verfügbaren Datenpunkte in diesem Bereich geführt und in weiterer Folge wäre keine zuverlässige Bestimmung der Regressionsgeraden möglich gewesen. Die Datenpunkte sind über dem a_q -Wert (Querbeschleunigung am Achslager), welcher sich aus der Kombination der Trassierung (Bogenradius und Überhöhung) und Fahrgeschwindigkeit ergibt, aufgetragen. Diese Darstellungsweise hat sich bei fahrtechnischen Untersuchungen bewährt, weil sich auf diese Weise der Einfluss der Trassierung und der Fahrgeschwindigkeit mit einer Variable abbilden lässt.

Jeder Datenpunkt in den Grafiken steht für eine Überfahrt der ortsfesten Messstelle in Breitenstein. Dazu werden die Messwerte der Messradsätze über einen Bereich von 11m Länge der von der Messstelle erfasst wird arithmetisch gemittelt und bei den Simulationsergebnissen wird analog vorgegangen. Der Output der ortsfesten Messstelle besteht ebenfalls aus einem bereits arithmetisch gemittelten Wert.

Die in den Diagrammen gezeigten Ergebnisse gelten für den vorlaufenden Radsatz (jenen Radsatz der je nach Fahrtrichtung im Fahrzeug vorne befindet) des untersuchten Fahrzeugs. Es wird zwischen Q_a und Q_i unterschieden wobei der Index das im Bogen äußere/innere Rad bezeichnet. Die Bezeichnung *_KW* steht für Kalibrierwagen und bedeutet, dass hier die Ergebnisse der Messradsätze des Fahrzeugs dargestellt sind während *_MS* für Messstelle steht und die Ergebnisse der ortsfesten Messstelle ausweist. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen schließlich sind mit *_Sim* gekennzeichnet.

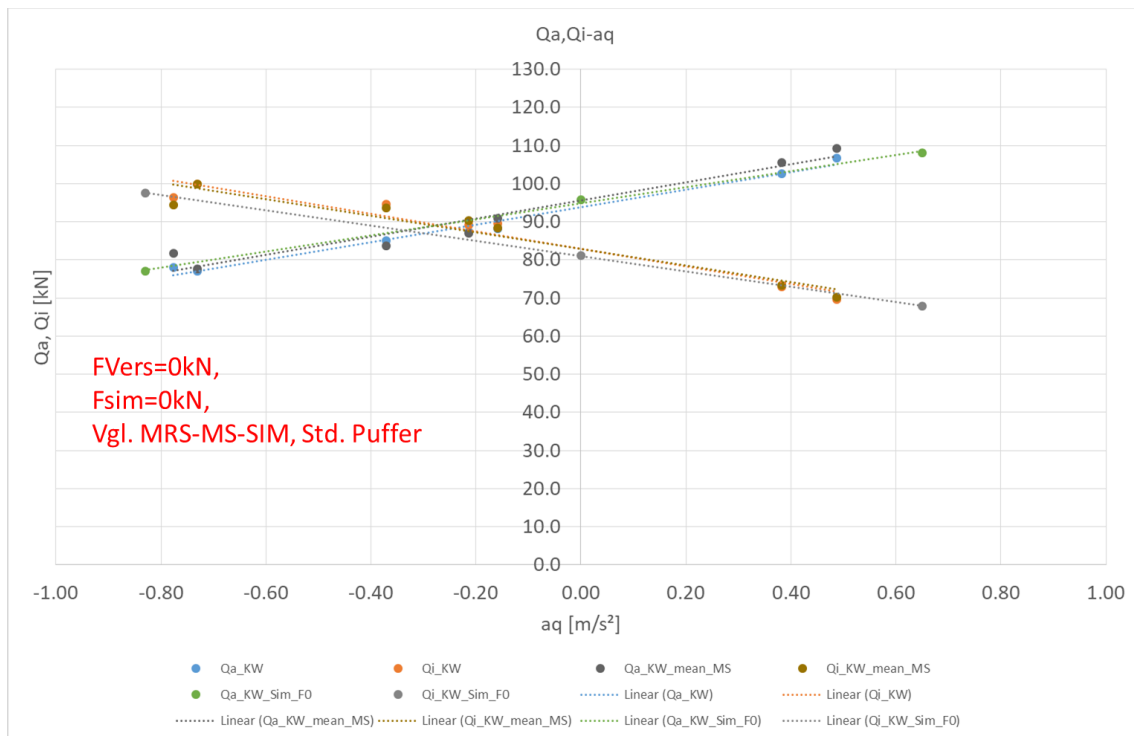


Abbildung 30: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch FL=0kN, Simulation FL=0kN

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Messgröße Q-Kräfte für den gesamten in den Versuchen und Simulationen abgedeckten aq -Bereich und für die Fahrten ohne Längskräfte im Zugverband. Dies gilt natürlich auch für die Simulationen.

Die Ergebnisse aus den Versuchen also die Messwerte der Messradsätze und der ortsfesten Messstelle stimmen sowohl qualitativ als auch quantitativ gut überein. Der Großteil der Werte stimmt bis auf etwa 1-2 kN überein, was bei einer mittleren Radlast von 90 kN einer relativen Abweichung von 1.1 % bis 2.2 % entspricht. Die größte Abweichung tritt bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten um die 10 km/h (aq Bereich von 0.8 m/s²) auf und liegt bei 4 kN, das entspricht einer relativen Abweichung von 4.4 %. Tendenziell lässt sich sagen, dass die Abweichung beim bogenäußeren Rad (Q_a) etwas größer ausfällt als beim bogeninneren Rad (Q_i).

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung der Regressionsgeraden und auch eine qualitative Übereinstimmung. Bei den absoluten Werten ergeben sich Abweichungen von bis zu 5-6 kN.

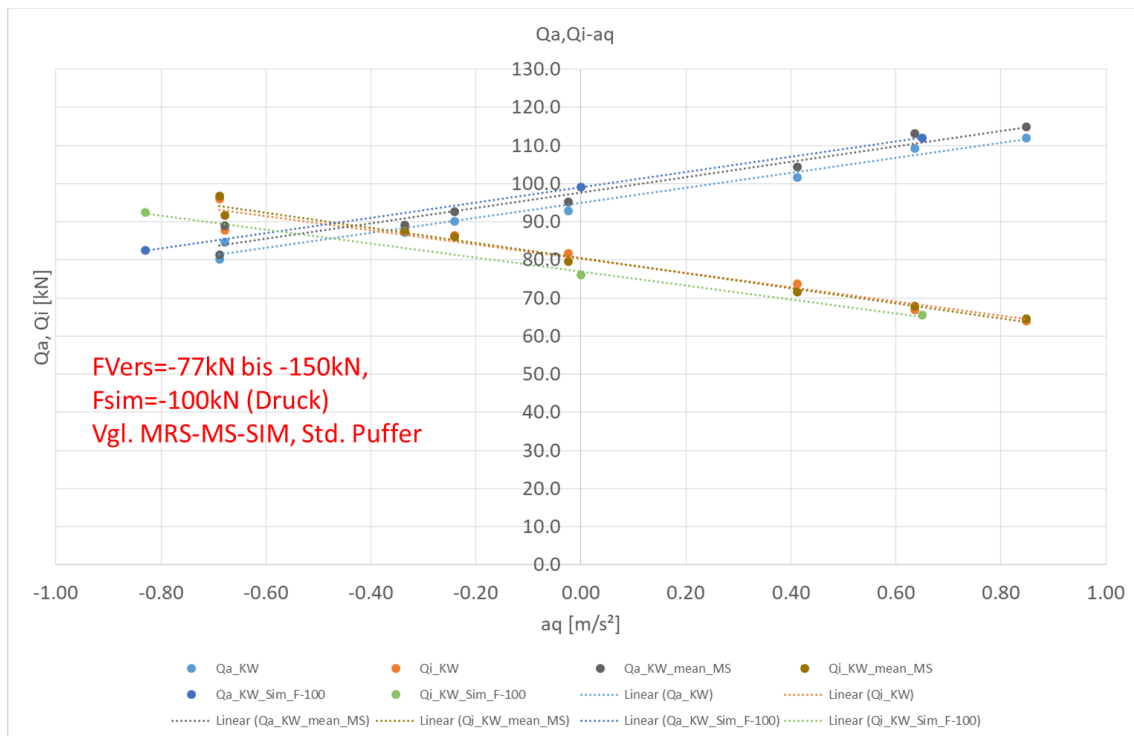


Abbildung 31: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch FL=-77 bis -150 kN Druck, Simulation FL=-100kN Druck

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der Messgröße Q-Kräfte für den gesamten in den Versuchen und Simulationen abgedeckten a_q -Bereich und für Fahrten mit im Zugverband wirkenden Längsdruckkräften im Bereich von 77 bis 150 kN. In der Simulationsrechnung wurde eine mittlere Längsdruckkraft von 100 kN angenommen.

Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Messratsatz und ortsfester Messstelle durchaus zufriedenstellend. Wie schon bei den Versuchen ohne Längskraft zeigt sich am bogenäußeren Rad (Q_a) eine etwas größere Abweichung als beim Vergleich der Werte für das bogeninnere Rad (Q_i).

Die Simulationsergebnisse zeigen im Schnitt eine ähnlich gute Übereinstimmung wie bei den Fahrten ohne Längskräfte, mit maximalen Abweichungen von bis zu 8 kN. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse fällt auf, dass hier am bogeninneren Rad vor allem im a_q -Bereich kleiner Null zu den größten Abweichungen (7-8 kN) kommt.

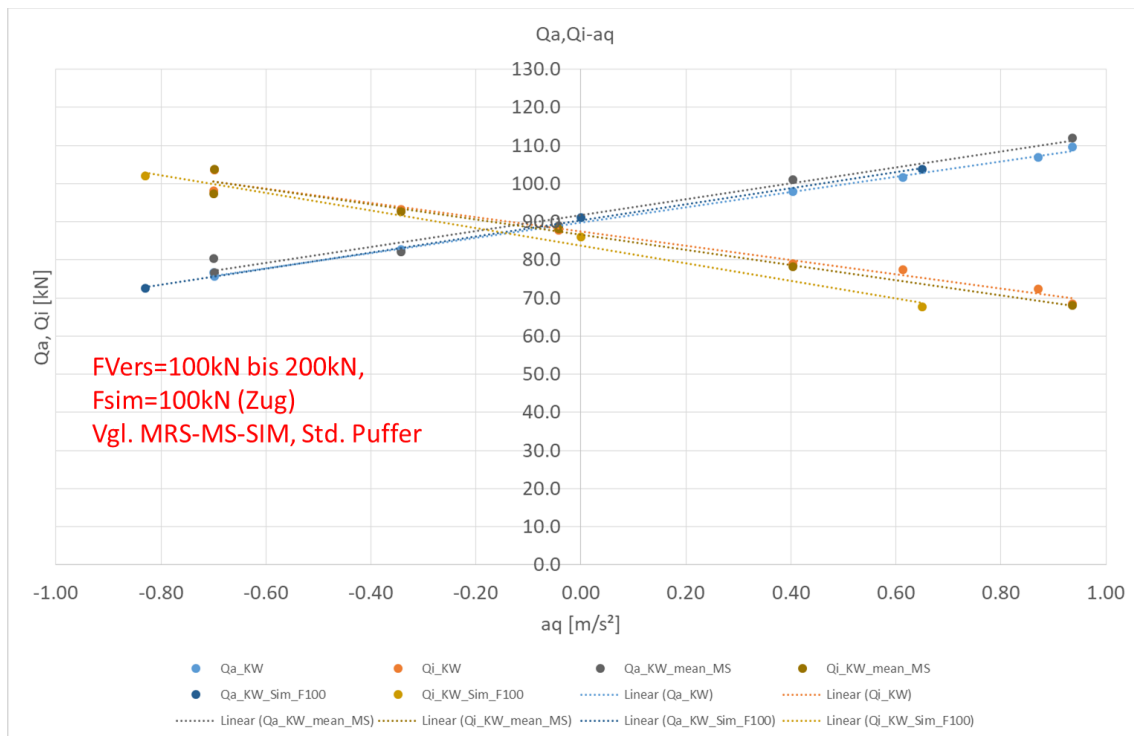


Abbildung 32: Vergleich Q-Kräfte MRS-MS-SIM, Versuch F=100 bis 200 kN Zug, Simulation FL=100kN Zug

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Messgröße Q-Kräfte für den gesamten in den Versuchen und Simulationen abgedeckten aq-Bereich und für Fahrten mit im Zugverband wirkenden Längszugkräften im Bereich von 100 bis 200 kN. In der Simulationsrechnung wurde eine mittlere Längszugkraft von 100 kN angenommen.

Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Messradsatz und ortsfester Messstelle durchaus zufriedenstellend. Der Unterschied zwischen der Abweichung am bogenäußeren Rad (Qa) und jener am bogeninneren Rad (Qi) ist hier nicht so ausgeprägt wie bei den anderen Fällen mit Druckkraft und neutraler Fahrt.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse fällt auf, dass hier am bogeninneren Rad vor allem im aq-Bereich größer Null zu den größten Abweichungen (7-8 kN) kommt. Ansonsten ist die Übereinstimmung von der gleichen Qualität wie zwischen Messradsatz und Messstelle.

5.3 Fazit Auswertung

Die Diagramme sprechen eine deutliche Sprache. Im Bereich der vertikalen Radkräfte (Q-Kräfte) ist eine sehr gute Übereinstimmung der Messsysteme Messradsatz und ortsfeste Messstelle in den Versuchen und auch mit den Simulationsergebnissen gegeben.

Es ist hier wichtig anzumerken, dass niedrige Geschwindigkeiten von unter 20 km/h die Einsatzgrenze des Messradsatzsystems darstellen, weil diese für fahrtechnische Versuche mit Mindestgeschwindigkeiten von 40 km/h konzipiert sind. Dies kann in diesem Bereich zu Abweichungen führen.

Auch der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen zeigt für die vertikalen Radkräfte (Q-Kräfte) eine gute Übereinstimmung. Abweichungen auf niedrigem Niveau sind der Tatsache geschuldet, dass für die Simulation nicht immer vollständige Informationen zu den Versuchsbedingungen vorliegen. Auch geringfügige Unterschiede z.B. in der Schwerpunkthöhe zwischen Modell und realem Fahrzeug können mit ein Grund für Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und Versuchsergebnissen sein. Großteils lässt sich jedoch eine gute Übereinstimmung beobachten.

Der Einfluss der Längskräfte zeigt sich bei den vertikalen Radkräften (Q-Kräfte) in einer vertikalen Parallelverschiebung der Regressionsgeraden der Ergebnisse. Das Vorzeichen der Längskräfte beeinflusst hier die Richtung, während die Größe der aufgebrauchten Längskraft das Niveau der Ergebnisse bzw. deren Regressionsgerade bestimmt.

Abschließend ist zu ergänzen, dass jede der angewandten Messmethoden als anerkannter Stand der Technik gilt, was die Untersuchung und Erfassung von Rad-Schiene Kräften betrifft. Es ist jedoch auch bekannt, dass diese Systeme ihre Grenzen haben und sich unter bestimmten Bedingungen bzw. der Kombination von ungünstigen Faktoren, Abweichungen in den Ergebnissen zeigen.

6 ZUSAMMENFASSUNG-AUSBLICK

Die Ergebnisse zeigen eine grundsätzlich gute Übereinstimmung sowohl der beiden Messsysteme Messradsatz und ortsfeste Messstelle als auch mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen, welche sich auf Grund der Bestätigung durch die Messergebnisse als wertvolles Werkzeug für Untersuchungen eisenbahntechnischer Fragestellungen bewährt haben. Auch der hier untersuchte Einfluss von Längskräften im Zugverband wird bei entsprechendem Detaillierungsgrad der Modelle gut abgebildet und erreicht bei Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche einen hohen Grad an Genauigkeit. Bereiche in denen es aktuell noch zu relevanten Abweichungen kommt, sind Bögen mit Radien von unter 250 m. Dieses Thema ist bekannt und daran wird auch gearbeitet, indem versucht wird die Einspannbedingungen und die Krafteinleitung am Kalibrierprüfstand entsprechend zu optimieren, damit bei der Kalibrierung noch realitätsnähere Bedingungen herrschen. Die Messradsatztechnik funktioniert in den Bereichen (Kräfteniveau und Krafteinleitungspunkte) in welchen ausreichend Kalibrierdaten vorliegen sehr gut, jedoch stößt der Algorithmus zur Bestimmung der Kräfte aus den Rohsignalen, in den Randbereichen wo es derzeit mit der bestehenden Kalibriermethode nicht möglich ist Kalibrierdaten zu generieren, an seine Grenzen, was auch die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigt. Je genauer diese Effekte untersucht sind, desto besser kann auch in Zukunft damit umgegangen werden. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Versuche. Prinzipiell ist auch die quantitative Übereinstimmung gegeben, jedoch besteht hier eine gewisse Unsicherheit bei den Randbedingungen der Versuche. Die Resultate der Untersuchungen deuten darauf hin, dass auch unter dem Einfluss von Längskräften die fahrtechnischen Beurteilungsgrößen nicht in einem Ausmaß beeinflusst werden welches zur Überschreitung von Grenzwerten der Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung führt. Diese Thematik ist Bestandteil weiterer Untersuchungen deren Grundlage die im Zuge des Projektes erstellten Modelle und erfassten Daten bilden. Aktuell werden die Ergebnisse und Erkenntnisse mit dem Projektpartner ÖBB-Infrastruktur diskutiert und dienen als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. Es wird an diesen Fragestellungen auch weiterhin aktiv gearbeitet und von Seiten des Projektpartners besteht Interesse, dieses Thema weiter zu untersuchen. Unter anderem gibt es die Idee den Einfluss von Gleislagestörungen auf das Fahrverhalten mit ähnlicher Methodik, nämlich dem Vergleich von Messdaten der Messradsätze mit den Messdaten des Gleismesswagens, zu untersuchen. Die detaillierte Umsetzung der weiterführenden Aktivitäten befindet sich jedoch noch in Planung.