TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Vergleich der Simulationsrechnung gemäß EN 14363 und der Auswertung ortsfester Messstellen zur Quantifizierung von Schienenoberflächenschäden, die bei Überfahrten von Schnellzügen verursacht werden

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing)
Eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Andreas Uhl

Mat. Nr. 01325488

Lemböckgasse 20/3/6

1230 Wien

Österreich

unter Anleitung von
Dipl.-Ing. Dr. Karl-Otto Endlicher
Institut für Mechanik und Mechatronik, E325

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

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, am 31.03.2018

Unterschrift des Verfassers

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich im Rahmen dieser Diplomarbeit begleitet und unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Roman Schmid von der ÖBB Infrastruktur AG bedanken, der dieses Thema initiiert und meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei der Siemens AG und deren Mitarbeitern bedanken, die die benötigten Simulationsmodelle zu Verfügung gestellt haben. Hier gilt vor allem Herrn Dipl.-Ing Andreas Kienberger mein Dank, der seine Erfahrung und Kenntnisse im Bereich der numerischen Simulation eingebracht hat.

Seitens des Instituts für Mechanik und Mechatronik der TU Wien bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Karl-Otto Endlicher, Herrn Dipl.-Ing. Dr. Johannes Edelmann und Dipl.-Ing. Dr. Manfred Plöchl, die stets rasch auf jegliche Anfragen reagiert und durch ihre ambitionierte Vortragsweise in diversen Lehrveranstaltungen mein Interesse am Thema Fahrzeugdynamik geweckt haben.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben.

Zu guter Letzt danke ich vor allem meiner Frau Katharina, die oft auf gemeinsame Zeit verzichten musste und mich das ganze Studium hindurch motivierend begleitete.

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

Kurzfassung

Die Schädigung von Schienen im Bereich der konventionellen Eisenbahn ist eine von einer großen Anzahl von Parametern abhängige Größe. Um optimale Wartungsintervalle vorausschauend planen zu können, ist es unter anderem notwendig, die Belastung auf die Schiene und somit auch auf den gesamten Oberbau zu kennen. Derzeitige Ansätze schätzen die Schienenoberflächenschädigung meist über die eingebrachte Reibleistung in dem Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene ab. Für die eingebrachte Reibleistung in die Schienen wird allerdings die Relativgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene benötigt. Die Relativgeschwindigkeit im Kontaktpunkt Rad/Schiene bzw. der Schlupf wird bei konventionellen Messfahrten nicht ermittelt. Eine entsprechende Bestimmung der Reibleistung ist mit Messdaten daher nicht direkt möglich. Im Vergleich dazu lassen sich durch numerische Simulation beliebige Größen aus einem Mehrkörpersystem (MKS) herauslesen. Die meistverwendete und akzeptierte Größe zur Bestimmung der Schienenoberflächenschädigung ist T_γ. T_γ, auch Verschleißziffer genannt, ist ein Maß für die eingebrachte Reibungsenergie im Rad-Schiene-Kontakt.

Im informativen Anhang K der Norm EN 14363 wird die quasistatische Größe T_{qst} vorgestellt, die eine Regression aus T_γ darstellt. T_{qst} ist daher eine vereinfachte Approximation, alleine abhängig von den Kräften im Kontaktpunkt. Für die Approximation wurden gemäß Norm eine Parameterstudie und eine anschließende Regression an einem generischen Fahrzeugmodell durchgeführt. Diese Größe bietet den Vorteil, dass alleine durch Kenntnis der Kräfte eine Abschätzung zur Schädigung der Schienen durchgeführt werden kann. Die Kräfte, die auf den Gleiskörper wirken, können einerseits mit Messradsätzen oder andererseits mit ortsfesten Messstellen ermittelt werden.

Ziel der Arbeit ist es daher, die Aussagekraft der Größe T_{qst} im Vergleich zur Verschleißziffer T_γ anhand repräsentativer Fahrzeugmodelle zu analysieren, um in weiterer Folge aus Messungen der Rad-Schiene-Kräfte eine Abschätzung der Schienenoberflächenschädigung auf Basis der Verschleißziffer erhalten zu können. Mithilfe des MKS Programms „Simpack“ und einem von der Siemens AG zur Verfügung gestellten „Railjet“-MKS-Modell (Lokomotive und Reisezugwagen) wird eine numerische Simulationen anhand realer Gleislagedaten durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit Messdaten von ortsfesten Messstellen der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) verglichen, wobei hier ebenfalls ausschließlich „Railjet“-Garnituren betrachtet werden. Um ein breites Spektrum der Betriebsbedingungen erfassen zu können, werden insgesamt vier Messstellen betrachtet, die nach EN 14363 einem entsprechenden Prüfbereich zugeordnet werden können. Der Auswertungszeitraum erstreckt sich über mehrere Wochen des dritten Quartals des Jahres 2017, um für die statistische Auswertung der Messdaten eine ausreichend große Datenmenge bzw. Anzahl an Überfahrten zu erhalten. Die erhaltenen Ergebnisse werden anschließend miteinander verglichen und kritisch betrachtet.

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

Abstract

The damage of rails in the field of conventional railway systems depends on a big amount of several parameters. For optimal planning of maintenance actions it is necessary to know the loads on the rails and on the whole track-system. Nowadays there are approaches which estimate the Rail-Surface-Damage (RSD) with frictional power which is transferred to the rail. To determine the actual frictional power the relative velocity between the wheel and the rail has to be measured. The relative velocity in the contact point (contact patch) or the creep can´t be measured with conventional measurement systems. So the determination of the current frictional power is not possible with these measurement data. Compared to this, numeric simulations allow to determine any figure in a Multi-Body-System (MBS). The most common and accepted quantity for estimating the rail surface damage is the so called Wear-Number T_γ. T_γ is a size for the transferred frictional energy into the rail in the rail-wheel contact patch.

The informative appendix K in the standard EN 14363 presents the quasi static size T_{qst} which is a regression of T_γ. T_{qst} is a simple approximation, which is only influenced by the forces in the contact patch. For the approximation a parameter study was used with a following regression on a generic vehicle multi-body model. The quantity has the main advantage that only the forces have to be measured. The measurement of the forces can be achieved on one side with special measuring wheelsets or on the other side with stationary measurement sites.

The purpose of this work is to analyse the quality of T_{qst} in comparison to the wear-number T_γ using representative multi-body vehicle models to ensure an accurate estimation of the rail surface damage with measuring methods. For the multi-body simulation the software “Simpack” is used. The vehicle models (locomotive and passenger vehicle) are provided by Siemens AG. To ensure realistic conditions the actual track characteristics are implemented in the software. The results will be compared to actual measurement data of stationary measurement sites of the Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) exclusively regarding “Railjet” vehicles. To cover a wide spectrum of operational conditions four different measurement sites are considered which can be related to corresponding test sections of EN 14363. The evaluation span of the measurement data is several weeks in the third quarter of the year 2017. The results finally are compared to each other and critically analysed.

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

Inhalt

1 Ziel der Arbeit ... 1
2 Einleitende Worte und allgemeine Informationen ... 2
2.1 Rad-Schiene-Kontakt ... 2
2.1.1 Kinematische Beziehungen zwischen Rad und Schiene ... 2
2.1.2 Kräfte im Kontaktpunkt ... 4
2.2 Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften nach EN 14363 ... 6
2.2.1 Anwendungsbereich der Norm ... 6
2.2.2 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens ... 7
2.2.3 Messgrößen ... 7
2.2.4 Prüfbereiche ... 8
2.2.5 Verwendung von numerischer Simulation ... 8
2.2.6 T_{qst} als Größe zur Approximation der Verschleißziffer ... 9
2.3 Anwendbarkeit von ortsfesten Messstellen ... 10
2.4 Gleislage nach EN 13848-1 ... 11
2.4.1 Maßgebende Parameter der Gleisgeometrie ... 11
2.4.2 Verwendung von Gleislagedaten in der numerischen Simulation ... 13
2.5 Rollkontaktermüdung, Verschleiß ... 14
2.6 Betrachtete Schienenfahrzeuge ... 16
2.6.1 „Railjet“-Wagenzug ... 16
2.6.2 „Taurus“-Lokomotive ... 18
3 Messung ... 19
3.1 Möglichkeiten zur Kräftemessung ... 19
3.2 Betrachtete Messstellen ... 20
3.2.1 Lage der Messstellen ... 20
3.2.2 Aufbau der ortsfesten Messstellen und Funktionsprinzip ... 23
3.2.3 Einflüsse auf die Messergebnisse ... 25
3.3 Methodik und verwendete Programme ... 26
3.4 Statistische Auswertung der Messdaten ... 29
3.4.1 Betrachtete Zeiträume ... 29
3.4.2 Geschwindigkeitsniveau an den Messstellen ... 29
3.4.3 Wetterdaten und Abschätzung des Reibwerts ... 32
3.4.4 Auswertung der Kräfte ... 34
3.4.5 Summe aller *Y*-Kräfte ... 44

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

4 Simulation ... 46
4.1 Mehrkörpersysteme ... 46
4.2 Modellbildung ... 47
4.2.1 Simples mechanisches Modell ... 47
4.2.2 Aufbau des MKS-Modells ... 47
4.2.3 Rad-Schiene-Kontakt und Geometrien ... 51
4.2.4 Bettung ... 57
4.2.5 Track – Definition und Gleislage ... 58
4.2.6 Fahrwiderstände ... 64
4.2.7 Geschwindigkeitsregelung der Lokomotive ... 65
4.3 Durchführung der numerischen Simulation und Solver Settings ... 65
4.4 Betrachtung des Regressionsmodells nach EN 14363 Anhang K ... 66
4.5 Einfluss der Wellenlängenbereiche ... 70
4.6 Einfluss der Messstellenlage ... 73
4.7 Simulationsergebnisse ... 74
4.7.1 Allgemeine Anmerkungen ... 74
4.7.2 Kraftverläufe ... 75
5 Vergleich Simulation und Messdatenauswertung ... 79
5.1 Grundsätzliches zu den Vergleichen ... 79
5.2 Ergebnisse von den Messstellen ... 79
5.2.1 AS07 ... 79
5.2.2 VE10 ... 83
5.2.3 GA19 ... 86
5.2.4 BS ... 89
6 Schlussfolgerung ... 93
7 Abbildungen ... 96
8 Tabellen ... 98
9 Literatur ... 99
10 Anhang ... 102

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

Formelzeichen lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s²	Beschleunigung
a_q	m/s²	Freie Seitenbeschleunigung
b	m	Mitte rechte Schiene zu Mitte linke Schiene
f	-	Regressionsfaktor
f_r	-	Freiheitsgrade der Lage
g	m	Spurerweiterung
Δh	m	Höhenabweichung
h	m	Pfeilhöhe
h_0	%	50 % Wert
h_1	%	0,15 % Wert
h_2	%	99,85 % Wert
h_l	m	Höhenabweichung linke Schiene
h_r	m	Höhenabweichung rechte Schiene
m	kg	Wagenmasse
m_a	kg	Zusatzmasse
M_z	Nm	Bohrmoment
N	N	Normalkraft
p	-	Anzahl Körper
Q	N	vertikale Kraft
Q_i	N	vertikale Kraft Innenschiene
Q_a	N	vertikale Kraft Außenschiene
Q_{qst}	N	Mittelwert Vertikalkraft
Δr	m	Rollradiendifferenz
r	m	allgemeiner Radius
r_H	-	Anzahl holonome Bindungen
r_Z	-	Anzahl nicht holonome Bindungen
r_L	m	Rollradius links
r_R	m	Rollradius rechts
R	m	Bogenradius
s	- bzw. m	Schlupf allgemein bzw. Wegkoordinate
s_l	m	Sehnenlänge
s_{sat}	-	Sättigungsschlupf
T_x	N	Längskraft in x-Richtung
T_{ges}	N	Resultierende Tangentialkraft
T_{qst}	J/m	Approximation der Verschleißziffer
T_{xqst}	N	Mittelwert Längskraft

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

T_y	N	Tangentialkraft in y-Richtung
T_γ	J/m	Verschleißziffer
u	m	Überhöhung
u_y	m	laterale Verschiebung
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{ref}	m/s	Referenzgeschwindigkeit
v_x	m/s	Geschwindigkeit in x-Richtung
v_y	m/s	Geschwindigkeit in y-Richtung
Δy	m	Richtungsfehler
y_l	m	Richtungsabweichung linke Schiene
y_r	m	Richtungsabweichung rechte Schiene
Y	N	Querkraft in y-Richtung
Y_{qst}	N	Mittelwert Querkraft

Formelzeichen griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	rad	Rollwinkel
α_t	rad	Steigungswinkel
γ	rad	Kegelneigung
γ_S	rad	Nickwinkel
$\dot{\gamma}_S$	rad/s	Nickwinkelgeschwindigkeit
λ	m	Wellenlänge
λ_{max}	m	Maximale Wellenlänge
λ_{min}	m	Minimale Wellenlänge
λ_{sin}	m	Wellenlänge Sinuslauf
φ_S	rad	Rollwinkel
$\dot{\varphi}_S$	rad/s	Rollwinkelgeschwindigkeit
φ_z	-	Bohrschlupf um die z-Achse
ψ	rad	Neigung der Schienenebene gegen die Horizontalebene
ψ_S	rad	Gierwinkel
$\dot{\psi}_S$	rad/s	Gierwinkelgeschwindigkeit
μ	-	Reibwert
$\mu_{Schätz}$	-	Geschätzter Reibwert
v_x	-	Schlupf in x-Richtung
v_y	-	Schlupf in y-Richtung
ϑ	rad	Einbauneigung
ω	1/s	Radsatzwinkelgeschwindigkeit
ω_z	1/s	Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse

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

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
49E1	Genormtes Schienenprofil mit 49 kg/m gemäß EN 13674
60E1	Genormtes Schienenprofil mit 60 kg/m gemäß EN 13674
60E2	Genormtes Schienenprofil mit 60 kg/m gemäß EN 13674
AG	Aktiengesellschaft
AS07	Messstelle Asten
BS	Messstelle Breitenstein
bzw.	beziehungsweise
DMS	Dehnmessstreifen
DOF	Freiheitsgrade (EN: Degrees of Freedom)
etc.	et cetera
FEM	Finite Elemente
GA19	Messstelle Gastein
Glg.	Gleichung
inkl.	inklusive
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
MKS/MBS	Mehrkörpersystem
PSD	Leistungsdichtespektrum (EN: Power Spectral Density)
RJ	Railjet
RSD	Rail Surface Damage
RFID	Radio Frequency Identification
S1002	Genormtes Radprofil gemäß EN 13715
S49	Genormtes Schienenprofil (neu 49E1) gemäß EN 13674
SFM	Schienenfußmitte
STL	Steg Längskraft
SFR	Schienenfußrand
STS	Steg Vertikalkraft
UIC60	Genormtes Schienenprofil (neu 60E1) gemäß EN 13674
VE10	Messstelle Velden
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

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

1 Ziel der Arbeit

Die in der Norm EN 14363 [1] vorgestellte Größe zur Charakterisierung von Schienenoberflächenschäden T_{qst} stellt eine Regression und somit eine Approximation von T_γ dar. Die Bestimmung von T_γ, auch Verschleißziffer genannt, kann ausschließlich mittels numerischer Simulation erfolgen. Möchte man die Größe T_γ messtechnisch erfassen, so ist es einerseits nötig, die gemessenen Kräfte im Kontaktgebiet auf Normal- und Tangentialkräfte umzurechnen, und weiters ist die Kenntnis der Relativgeschwindigkeit bzw. des Schlupfs notwendig. Da heute übliche Messverfahren nicht in der Lage sind, die exakte Relativgeschwindigkeit zu bestimmen, kann auch keine Aussage über die Schienenoberflächenschädigung durch die Größe T_γ gemacht werden. Um allerdings optimale Wartungsintervalle vorausschauend planen zu können, ist es unter anderem notwendig, die Verschleißziffer als Einflussgröße zu kennen.

Das Ziel der Arbeit ist daher, zu analysieren, wie gut sich die Größe zur Charakterisierung der Schienenoberflächenschädigung T_{qst} als Ersatz für die Verschleißziffer eignet. Zu diesem Zweck wird das Regressionsmodell nach EN 14363 verwendet. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten, werden im Zuge der Diplomarbeit Messdaten von vier verschiedenen ortsfesten Messstellen der Österreichischen Bundesbahnen Infrastruktur AG (ÖBB) für einen konkreten Fernverkehrszug ausgewertet. Die Messstellen sind in unterschiedlichen Trassierungsgeometrien angeordnet, wobei ein gerader Streckenabschnitt und Bögen mit den Radien 750 m, 596 m und 183 m ausgewählt wurden. Der gewählte Zug ist der als „Railjet“ (RJ) bezeichnete Fernverkehrswendezug der ÖBB. Dieser ist ein lokbespannter Zug, der bei Verwendung der kürzesten betrieblichen Einheit aus der Lokomotive und sieben Reisezugwagen besteht. Die Auswertung der Messstellen erfolgt im Sinne der Ermittlung der Kräfte im Kontaktpunkt Rad-Schiene. Daher werden die vertikalen Kräfte Q, die lateralen Kräfte Y und die Längskräfte T_x bestimmt. Mithilfe des MKS-Programms „Simpack“ und einem von Siemens zur Verfügung gestellten „Railjet“-MKS-Modell (für eine Lokomotive und einen Reisezugwagen), werden numerische Simulationen anhand realer Gleislagedaten durchgeführt. Im Zuge der Simulation können die Kräfte in Bezug auf die Position der Messstelle in den Gleislagedaten bestimmt werden. Weiters ist die Ermittlung der Verschleißziffer einfach möglich. Die Werte dienen in weiterer Folge als Vergleichsbasis für die approximierte Größe der Schienenoberflächenschädigung. Da die Messdaten aus dem täglichen Schienenverkehr auf dem österreichischen Bahnnetz stammen, sind keine einheitlichen Bedingungen vorhanden (unterschiedliche Radprofile, Wetter etc.). Daher ist das Ziel für die numerische Simulation, die realen Bedingungen so weit wie möglich abzubilden, um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten.

Die Ergebnisse aus der numerischen Simulation und der Messdatenauswertung werden abschließend direkt miteinander verglichen. Der Vergleich soll dann zeigen, ob eine genaue Abschätzung der Schienenoberflächenschädigung durch die Größe T_{qst} anhand eines konkreten Fahrzeugmodells überhaupt möglich ist oder ob hier noch weitere Forschungsarbeit geleistet werden muss.

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

2 Einleitende Worte und allgemeine Informationen

2.1 Rad-Schiene-Kontakt

Sieht man von Sondereinrichtungen wie Schienenbremsen und dergleichen ab, so kommen Schienenfahrzeuge mit der Fahrbahn - dem Gleis - durch Rad und Schiene in Kontakt. In den Kontaktpunkten von Rad und Schiene müssen Stützkräfte, Vortriebskräfte und Seitenkräfte übertragen werden. Der Rad-Schiene-Kontakt ist, wie die Literatur zeigt, seit Ende des 19. Jahrhunderts Gegenstand intensiver Forschung, wobei es bis heute ungeklärte Effekte gibt [2], und er ist weiters eine wesentliche Einflussgröße auf die Beanspruchung und die Dynamik des Systems Fahrzeug und Gleis. Kinematik, Normalkontaktmechanik und Tangentialkontaktmechanik können in der Regel getrennt voneinander betrachtet werden. Da es zu diesen Themen zahlreiche Literaturquellen gibt (z.B. [3], [4]), werden im Folgenden nur die wichtigsten Begriffe angeführt.

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Koordinatensystemen, die im Schienenverkehr verwendet werden können, soll - wenn nicht anders angeführt - das in Abbildung 1 gezeigte Koordinatensystem verwendet werden, welches in der Gleisebene liegt. Nach den verschiedensten Normen (z. B. EN 14363) zeigt daher die x-Achse in Fahrtrichtung, die y-Achse nach rechts und die z-Achse stets nach unten.

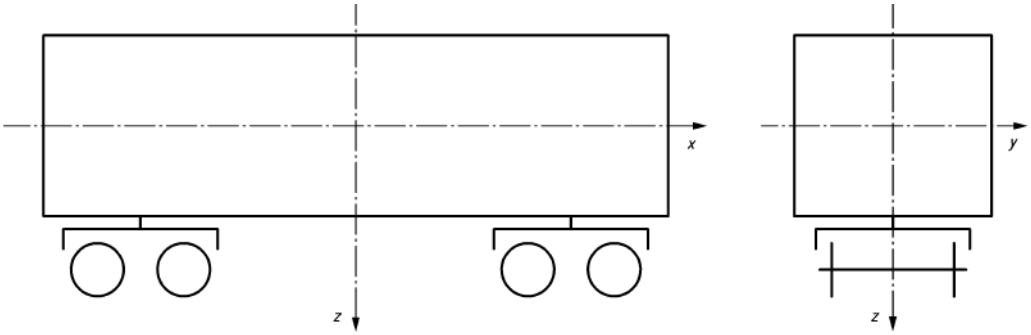


Abbildung 1: Koordinatensystem [1]

2.1.1 Kinematische Beziehungen zwischen Rad und Schiene

Für eine konsistente Modellbildung ist es notwendig, die kinematischen Zusammenhänge zwischen Relativverschiebungen eines Radsatzes und der Position der Kontaktpunkte (in der Realität gemäß der Hertz‘schen Pressung eine Kontaktfläche) von Rad und Schiene zu kennen. In der Regel werden im Vollbahnbereich starre Radsätze verwendet. Bei idealisiert starren Radsätzen haben das linke und rechte Rad dieselbe Winkelgeschwindigkeit. Die Lage der Kontaktpunkte hängt in weiterer Folge stark von den verwendeten Schienen- und Radprofilen ab und natürlich von der Gleislage inklusive Gleislagefehler. Die Geometrien von Schiene und Rad sind im Neuzustand weitgehend genormt. Während für konische Profile und Zylinderprofile eine analytische Beschreibung der Kinematik möglich ist, wird diese bei allgemeinen Profilen numerisch beschrieben. Zur Analyse der Rad-Schiene-Paare werden unterschiedliche Kenngrößen definiert [3]. Zum Beispiel für einen Radsatz:

- Rollradiendifferenz Δr zwischen linkem r_L und rechtem Rad r_R in Abhängigkeit einer lateralen Verschiebung u_y in y-Richtung
- Tangentenneigung im rechten und linken Kontaktpunkt

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

- Schwerpunktanhebung aufgrund einer Verschiebung in y-Richtung und Drehung um die z-Richtung
- Äquivalente Konizität

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Rollradiendifferenz Δr als Funktion der Querverschiebung, wobei das Radprofil S1002 verwendet wurde. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass sich sowohl das Schienen- als auch das Radprofil mit der Zeit aufgrund von Verschleiß verändern. In der Folge verändert sich die Kinematik entsprechend.

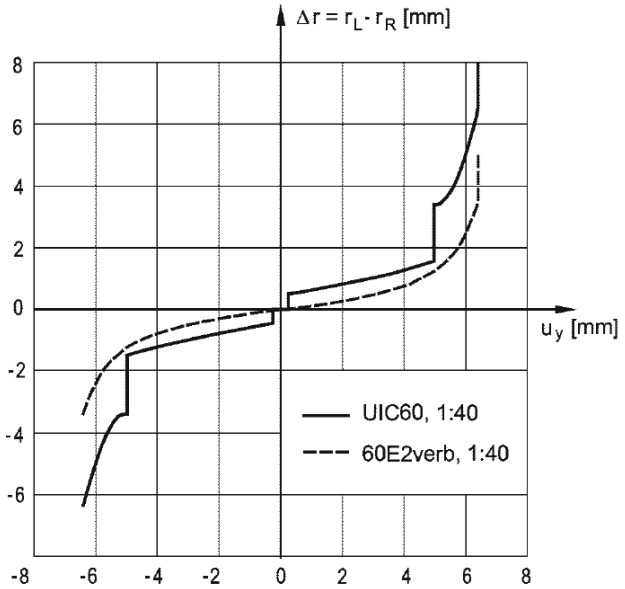


Abbildung 2: Rollradiendifferenz Δr [6]

Ebenfalls zu den kinematischen Beziehungen gehört auch die Ermittlung der Schlüpfe. Exakte Herleitungen für einen einzelnen Radsatz sind der Literatur zu entnehmen (z. B. [5]). Für den Rad-Schiene-Kontakt gibt es allgemein einen transversalen Schlupf in x-Richtung v_x, in y-Richtung v_y und den sogenannten Bohr-Schlupf um die z-Achse φ_z. Das hier verwendete Koordinatensystem ist jenes im Kontaktpunkt (x- und y-Achse spannen die Normalebene im Kontaktpunkt auf, siehe Abbildung 3). Die in Abbildung 3 dargestellten Größen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Größe	Beschreibung
ω_z	Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse
M_z	Bohrmoment
N	Normalkraft
T_x	Tangentialkraft in x-Richtung
T_y	Tangentialkraft in y-Richtung
v_0	Geschwindigkeit des Radsatzmittelpunkts
v_x	Geschwindigkeit im Kontaktpunkt in x-Richtung
v_y	Geschwindigkeit im Kontaktpunkt in y-Richtung

Tabelle 1: Größenbezeichnung

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

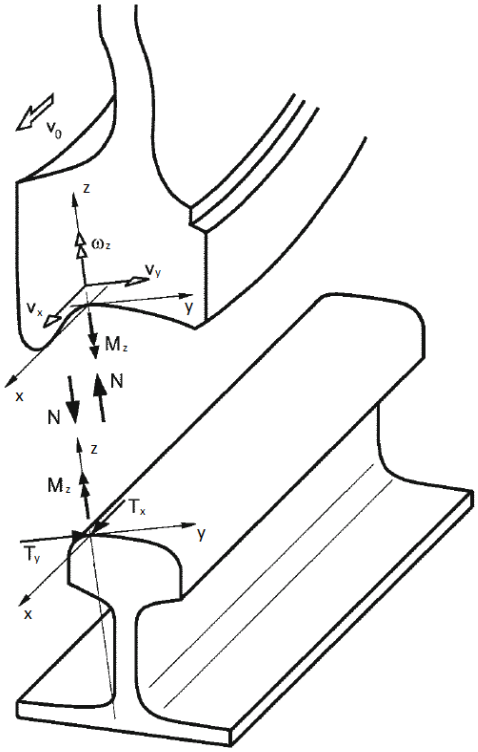


Abbildung 3: Kräfte und Geschwindigkeiten im Kontaktpunkt (bearbeitet aus [3])

2.1.2 Kräfte im Kontaktpunkt

Unter Einwirkung der in Abbildung 3 dargestellten Kräfte kommt es zur Ausbildung einer Kontaktfläche (ca. 1.5 cm² [3]). Die tangentialen Kräfte T_x und T_y treten bei Vorhandensein einer Relativgeschwindigkeit in der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene auf. Die Bestimmung der Kontaktfläche stellt einen Teil der Normalkontaktmechanik dar und ist auf Hertz zurückzuführen [6]. Aufgrund der komplexen Berührgeometrie von Rad und Schiene, die durch die entsprechenden Profile zustande kommt, ergeben sich allerdings nicht immer rein elliptische Kontaktflächen (Profile weisen sprunghafte Änderungen der Krümmungen auf), womit eine Voraussetzung der Hertz'schen Theorie verletzt ist. Weitergehende Theorien, wie z. B. jene von Kalker [7] [8], berücksichtigen diese Gegebenheit.

Die Bestimmung der tangentialen Kräfte und des Bohrmoments, ausgehend von der Normalkraft (bzw. Spannung) und dem Schlupf, stellt das Problem der Tangentialkontaktmechanik dar. Erste Untersuchungen zur Rollkontaktmechanik führte Reynolds [9] gegen Ende des 19. Jahrhunderts durch. Er erkannte, dass beim Abrollen zweier Gummiwalzen aneinander im Kontaktgebiet sowohl haftende als auch gleitende Bereiche auftreten. Für das Abrollen eines Rades auf der Schiene gab es im Laufe des 20. Jahrhunderts stets verbesserte Betrachtungen, bis Kalker 1967 eine sehr allgemeine Lösung für das Problem entwickelt hat [8]. Zur detaillierten Untersuchung von dreidimensionalen reibungsbehafteten Kontaktproblemen wird heutzutage meist das von Kalker entwickelte Programm „Contact" verwendet [7][10].

Die Beschreibung der Reibungsverhältnisse in der Kontaktfläche ist äußerst komplex, und bis heute gibt es auch keine vollständige mathematische Beschreibung dieses

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

Sachverhalts. Die Reibungsverhältnisse sind unter anderem von folgenden Faktoren abhängig [3]:

- Elastische und plastische Deformation der Kontaktpartner und die damit veränderten Werkstoffeigenschaften
- Oxidationsschichten
- Schmutzschichten wie z. B. Laub oder andere viskose Zwischenschichten (Öl, Fett, Wasser)

Unter vereinfachten Annahmen nach Carter [11] kann für den Walzenkontakt eine analytische Lösung angegeben werden. Abbildung 4 zeigt den idealisierten Verlauf des Kraftschlusses μ abhängig vom Schlupf s bei reinem Längsschlupf einer Walze, die auf einer Ebene abrollt, wobei der Kraftschluss definiert ist als der Quotient von T_{ges}/N mit T_{ges} als gesamte Tangentialkraft. Den Schlupf erhält man aus Gleichung (2.1)[1]. v ist die Geschwindigkeit des Radmittelpunktes und $r\omega$ das Produkt aus Walzenradius und Winkelgeschwindigkeit. Die Definition der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} kann unterschiedlich gewählt werden. (z. B. $v_{ref} = v$).

$$s = \frac{v - r\omega}{v_{ref}} \tag{2.1}$$

Im Vergleich zur rein linearen Theorie, bei der der Kraftschluss linear mit dem Schlupf zunimmt, wird bei der idealisierten Kurve bei einem gewissen Sättigungsschlupf s_{sat} der maximale Kraftschluss erreicht. Ab hier gibt es in der Kontaktfläche kein Haftgebiet mehr, und es tritt reine Gleitreibung auf. Falls sich der Schlupf auf kleine Werte begrenzen lässt, kann die lineare Theorie als Näherung verwendet werden. Da aber auch der hier gezeigte idealisierte Verlauf nur unter gewissen Annahmen gültig ist, stellt er logischerweise auch nur eine Näherung dar. Für reale Kraftschlusskurven ergibt sich meist ein Maximum bei einem gewissen Wert für den Schlupf (siehe z. B. [12][13]), wobei hier noch Haft- und Gleitgebiete vorhanden sind. Bei weiterer Belastung nimmt der Schlupf zu und der Kraftschluss sinkt, bis wieder reine Gleitreibung erreicht wird. Der Sättigungsschlupf im Rad-Schiene-Kontakt wird bei einem betragsmäßigen Schlupf von < 1 % erreicht [3][14]. Wie bereits erwähnt, kommt es beim Rad-Schiene-Kontakt nicht nur zu einem Längsschlupf, sondern auch zu einem lateralen Schlupf und dem Bohrschlupf.

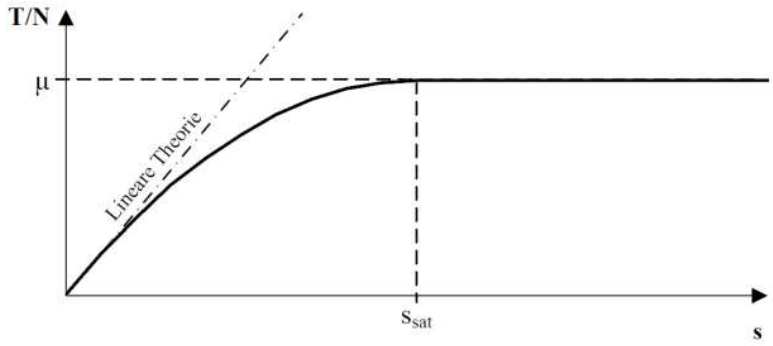


Abbildung 4: Idealisierte Kraftschluss-Schlupf Kurve [18]

[1] Die erste Ziffer vor den folgenden Gleichungen repräsentiert jeweils das Kapitel in dem die Gleichung angeführt wird.

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

Besonders in Hinblick auf die numerische Simulation ist eine effiziente Modellbildung des Rad-Schiene-Kontakts notwendig. Grundsätzlich bietet das umfangreiche von Kalker erstellte Programm „Contact“ [10] eine sehr detaillierte Beschreibung. Beispielsweise können mit „Contact“ auch nichtelliptische Kontaktflächen berücksichtigt werden. Da bei der numerischen Simulation allerdings auch die Rechenzeit eine entscheidende Rolle spielt, hat Kalker mit der vereinfachten Theorie des Rollkontaktes und dem Programm „Fastsim“ [15] einen in der Praxis weit verbreiteten Algorithmus in der numerischen Simulation entwickelt. Diese vereinfachte Theorie gründet sich auf einigen Voraussetzungen, darunter jene für die Hertz‘sche Pressung (elliptische Kontaktfläche und eine entsprechende Spannungsverteilung) und weitere Annahmen wie die lokale Gültigkeit des Reibgesetzes nach Coulomb und das Fehlen jeglicher Verschmutzung bzw. Zwischenschichten im Kontaktgebiet.

Der Algorithmus „Fastsim“ ist in der für diese Diplomarbeit verwendeten Simulationssoftware zur Bestimmung der Tangentialkräfte implementiert [13]. Die als elliptisch angenommene Kontaktfläche wird in ein Gitter von einzelnen Flächenelementen aufgeteilt, und anschließend werden die ermittelten Spannungen integriert. Das Bohrmoment M_z wird nicht berechnet und vernachlässigt [13]. Da es sich bei „Fastsim“ um eine quasistatische Methode handelt, sind Anregungen über 20 Hz zu vermeiden. „Simpack“ bietet noch weitere Methoden zur Bestimmung der Tangentialkräfte an, wie z. B. die Methode nach Polach [16]. Diese Methode stellt eine Erweiterung von „Fastsim“ dar, die insbesondere bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen verwendet wird. Andere Erweiterungen von „Fastsim“ wie z. B. der nicht elliptische Kontakt oder ein schlupfabhängiger Reibwert in der Kontaktfläche sind ebenfalls Gegenstand der Forschung (siehe z. B. [17]). Die in dieser Diplomarbeit im Zuge der numerischen Simulation verwendete Methode wird in Kapitel 4.2.3 erläutert.

2.2 Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften nach EN 14363

2.2.1 Anwendungsbereich der Norm

Die aktuelle Fassung der Norm EN 14363 stammt vom Oktober 2016. Die Norm soll den sicheren und ökonomischen Betrieb eines Schienenfahrzeugs sicherstellen. Der Geltungsbereich der Norm beschränkt sich auf das europäische Streckennetz mit der nominalen Spurweite von 1435 mm (Normalspurweite). Durch die in der Norm vorgestellten Methoden kann das Verhalten eines Schienenfahrzeugs unter repräsentativen Bedingungen beurteilt werden. Von der Norm werden grundsätzlich folgende Bereiche behandelt [1]:

- Sicherheit gegen Entgleisen
- Fahrsicherheit in S-Bögen
- Bestimmung des Verwindungskoeffizienten und Verlagerungseigenschaften
- Beanspruchung von Weichenzungen
- Fahrsicherheit in Bogenkreuzungen
- Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und Schwingungsverhalten.

Das Verhalten wird in zwei Schritten beurteilt, wobei der erste Schritt die wesentlichen Eigenschaften des Fahrzeuges bei niedrigen Geschwindigkeiten untersucht (z. B. Sicherheit gegen Entgleisen bei Gleisverwindungen). Im zweiten Schritt wird erst das

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

eigentliche Fahrverhalten untersucht (Fahrdynamik). Die entsprechende Beurteilung in den oben angeführten Kategorien kann einerseits mit Messfahrten, also durch physisches Prüfen, durch numerische Simulation, Berechnung oder Vergleiche mit bereits vorhandenen Ergebnissen erreicht werden. Die Bewertung nach der Norm muss für Fahrzeuge, die neu entwickelt wurden, eine konstruktive Änderung besitzen oder eine Änderung der Betriebsbedingungen aufweisen, durchgeführt werden. Zwei wesentliche Parameter, die als Eingangsparameter für diese Norm dienen, sind die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der sogenannte Überhöhungsfehlbetrag. Der Überhöhungsfehlbetrag gibt an, welche zusätzliche Überhöhung nötig wäre, um eine ausgeglichene Bogenfahrt zu erreichen. Zusätzlich werden in der Norm entsprechende Prüfbereiche definiert, die unterschiedliche Bogenradien aufweisen, in denen das Fahrzeug entsprechend beurteilt wird. Weiters ist noch zu erwähnen, dass durch die Norm zwar Messgrößen ermittelt werden, die zur Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung dienen, aber eine Aussage über die Zustandsverschlechterung bzw. Ermüdung des Fahrwegs wird nicht getroffen. Um für einheitliche Betriebsbedingungen zu sorgen, werden in der Norm detaillierte Anforderungen gestellt [1]. Im Folgenden seien daher einige für diese Diplomarbeit wichtige Punkte aufgegriffen.

2.2.2 Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens

Nach der im ersten Schritt erfolgten grundlegenden Beurteilung folgt nach EN 14363 im zweiten Schritt die fahrdynamische Beurteilung des Fahrzeugs. Dazu werden nach Norm entsprechende Prüfgrößen definiert, die ermittelt werden müssen. Das Fahrverhalten wird in Bögen unterschiedlicher Radienklassen und geraden Gleisen untersucht. Durch eine anschließende ebenfalls vorgegebene statistische Auswertung der Daten kann dann die Aussage über die Zulassung des Fahrzeuges bzw. eines Fahrzeugtyps getroffen werden. Für die Beurteilung von neuen Fahrzeugen müssen normalerweise Streckenfahrversuche durchgeführt werden. Bei konstruktiven Änderungen oder anderen Bedingungen (siehe [1] Anhang T) kann eine Zulassung ausschließlich mittels numerischer Simulation erreicht werden.

2.2.3 Messgrößen

Die Norm EN 14363 stellt zwei unterschiedliche Messverfahren zur Auswahl, ein normales und ein vereinfachtes Messverfahren. Das normale Messverfahren ermöglicht die Beurteilung der Fahrsicherheit, der Fahrwegbeanspruchung und des Schwingungsverhaltens. Im Gegensatz dazu kann beim vereinfachten Messverfahren unter in der Norm angeführten Voraussetzungen auf die Fahrwegbeanspruchung verzichtet werden. Bei dem normalen Messverfahren müssen unter anderem die lateralen Y-Kräfte, die vertikalen Q-Kräfte, die Beschleunigungen in y- und z-Richtung des Fahrzeugkasten und der Drehgestellrahmen bestimmt werden. Je nachdem welche konkreten Beurteilungen ausgewertet werden müssen, sind entsprechende Perzentile[2] oder Mittelwerte aus den Daten zu erheben. Die Längskraft T_x muss nach dem derzeitigen Stand der Norm nicht ausgewertet werden. Für die Ermittlung der Fahrbahnbeanspruchung nach Anhang K wird diese allerdings benötigt.

[2] Im Sinne der Norm EN 14363 werden in der vorliegenden Arbeit die 50 % Werte (Mittelwerte) mit h_0, die 0,15 % Werte (untere Perzentile) mit h_1 und die 99,85 % Werte (obere Perzentile) mit h_2 bezeichnet.

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

Die drei Kräfte Q, Y und T_x im Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene sind unter anderem besonders für die Fahrbahnbeanspruchung relevant. Beim normalen Messverfahren werden die Kräfte für jedes Rad bestimmt. Die Orientierung der Kräfte erfolgt in einem zum Gleis ausgerichteten Koordinatensystem. Abbildung 5 zeigt die Orientierung der Kräfte für die linke Schiene. Die in Kapitel 2.1.2 gezeigten Kräfte im Kontaktpunkt lassen sich durch eine Transformation in das gleisorientierte Koordinatensystem transformieren.

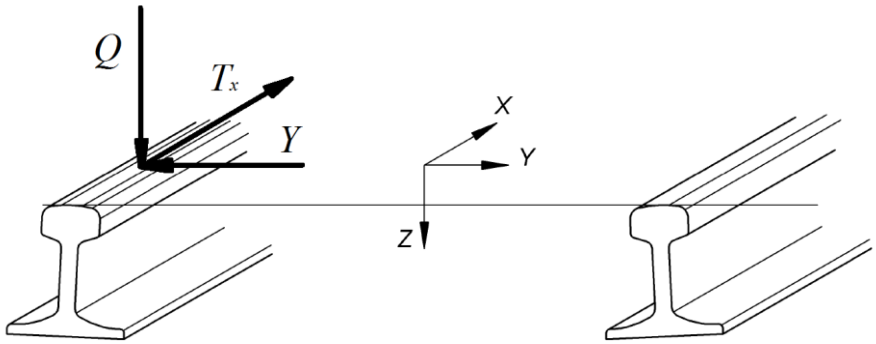


Abbildung 5: Orientierung der Kräfte im Kontaktpunkt (bearbeitet aus [3])

2.2.4 Prüfbereiche

Für die fahrdynamische Betrachtung werden in der Norm vier Prüfbereiche definiert, wobei die jeweiligen Abschnitte unterschiedliche Charakteristika des Fahrzeugs bestimmen sollen. So müssen im Prüfbereich 1 jeweils Geraden bzw. Bögen mit sehr großen Radien durchfahren werden. Das Augenmerk liegt hier besonders auf der Untersuchung hinsichtlich der Laufstabilität des Fahrzeugs. Die Führungskräfte sind hoch dynamisch und besitzen wenn überhaupt, dann nur geringe quasistatische Anteile (h_0). Hingegen müssen im Prüfbereich 4 Bögen mit Radien von 250 m bis 400 m ausgewertet werden. Aufgrund des kleinen Bogenradius sind die quasistatischen Anteile der Y und T_x-Kräfte im Vergleich zu den dynamischen Anteilen deutlich größer. Für alle Prüfbereiche gilt, dass jeweils eine gewisse Mindestanzahl von Auswerteabschnitten durchfahren werden müssen. Es sind auch die Mindestlängen für die Abschnitte definiert, die z. B. für den Prüfbereich 4 mindestens 70 m beträgt.

2.2.5 Verwendung von numerischer Simulation

Wie bereits erwähnt, ist unter entsprechenden Voraussetzungen der Einsatz von numerischer Simulation anstelle von Streckenversuchen zulässig. Unter anderem kann so die Zulassung von konstruktiv veränderten Fahrzeugen erreicht werden. Da numerische Simulationen im Vergleich zu physischen Messfahren heutzutage eine deutliche Kostenersparnis bieten, stellt diese Möglichkeit einen großen Vorteil dar. Im Anhang T der Norm finden sich die entsprechenden Anforderungen an das Modell. Unter anderem muss das verwendete Fahrzeugmodell mit bereits vorhandenen Prüfergebnissen validiert sein. Daher ist zumindest bei der Erstzulassung stets eine physische Beurteilung notwendig. Tabelle T.1 im Anhang von [1] zeigt die notwendigen Parameter für die Modellvalidierung. So dürfen beispielsweise die Querkräfte an den Innen- und Außenschienen in engen Bögen (ca. 150 m) eine maximale Abweichung von 8 % aufweisen. Weiters werden genaue Anforderungen an die Gleisdaten, den Zustand der Gleisober-

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

fläche und die Rad-Schiene-Berührgeometrie gestellt. Die Genauigkeit der Gleislagedaten zur Verwendung in der numerischen Simulation wird in der Norm EN 13848-1 geregelt. Für den Schienenzustand muss die Bedingung von trockenen Schienen wiedergegeben werden. Das ist gleichzusetzen mit einem Reibkoeffizienten zwischen Rad und Schiene von mindestens 0,36.

2.2.6 T_{qst} als Größe zur Approximation der Verschleißziffer

Der informative Anhang K der Norm EN 14363 stellt die quasistatische Größe T_{qst} vor. Die Schienenoberflächenschädigung (RSD: Rail surface damage) stellt eine Kombination aus Verschleiß und Rollkontaktermüdung dar. Eine weit verbreitete Größe zur Charakterisierung der Schienenoberflächenschädigung ist die Größe T_γ [1][13][18][19]. Die Berechnung von T_γ, auch Verschleißziffer genannt, erfolgt gemäß Gleichung 2.2. T_γ ist ein Maß für die eingebrachte Reibungsenergie im Rad-Schiene-Kontakt. Wird T_γ mit der Relativgeschwindigkeit im Kontaktgebiet multipliziert, erhält man die eingebrachte Energie (üblicherweise wird M_z vernachlässigt [13][37]).

$$T_\gamma = |T_x \nu_x| + |T_y \nu_y| + |M_z \varphi_z| \tag{2.2}$$

Für die Berechnung von T_γ wird der Schlupf zwischen Rad und Schiene benötigt. Der Schlupf, insbesondere der tangentiale Schlupf, wird im Allgemeinen bei Messungen nicht bestimmt. Für die Bestimmung des Schlupfs ist die genaue Kenntnis der Fahrzeuggeschwindigkeit notwendig [3]. Somit kann diese Größe grundsätzlich nur in der Simulation bestimmt werden. Mit der Größe zur Charakterisierung von Schienenoberflächenschäden T_{qst} wird in Anhang K eine Approximation von T_γ eingeführt, um bei Messfahrten eine Abschätzung von T_γ zu erhalten. Für die Approximation wurden gemäß Norm eine Parameterstudie und eine anschließende Regression an einem generischen Fahrzeugmodell durchgeführt. Die Größe wird über die Gleichungen 2.3 und 2.4 ermittelt.

$$T_{qst} = \frac{Q_{qst}}{10000}(330 \cdot f^2 - 62 \cdot f + 4) \tag{2.3}$$

$$f = \frac{Y_{qst}}{Q_{qst}} + 0{,}62 \cdot \frac{|T_{xqst}|}{Q_{qst}} \tag{2.4}$$

Die Größen T_{xqst}, Q_{qst} und Y_{qst} stellen die quasistatischen Kräfte im Kontaktgebiet dar. Die benötigten Signale für die Auswertung ist einerseits Q_{qst} (h_0), weiters wird laut Norm verlangt, dass die Mittelwerte aus den Signalen Y/Q und T_x/Q bestimmt werden. Somit muss der Mittelwert des Quotienten bestimmt werden. Bei den ortsfesten Messstellen der ÖBB erhält man T_{xqst} und Q_{qst} allerdings getrennt und bildet den Quotienten aus den bereits vorhandenen Mittelwerten. Der Fehler, den man dadurch erhält, kann nach [20] abgeschätzt werden. Grundsätzlich gilt:

$$M\left(\frac{X}{Y}\right) > \frac{M(X)}{M(Y)} \tag{2.5}$$

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

$$M\left(\frac{1}{Y}\right) - \frac{1}{M(Y)} = \frac{\sum q_\alpha q_\beta (y_\alpha - y_\beta)^2 y_\gamma \cdots y_\nu}{y_1 y_2 \cdots y_n \cdot M(Y)} \tag{2.6}$$

mit *M()* als mittelwertbildende Funktion, *X*, *Y* als beliebige Größen, q_i als Wahrscheinlichkeit und x_i und y_i als zugehörige Werte der Summe über alle Wertepaare α und β mit den restlichen Elementen der Reihe γ bis ν (. Für große Werte, die nicht weit auseinanderliegen - was für *Q* erfüllt ist - ist der Fehler also entsprechend vernachlässigbar.

T_{qst} ist jeweils für das führende äußere Rad eines Drehgestells zu bestimmen. Weiters wird in Anhang K empfohlen, dass die Regression mit einer validierten Simulation abgesichert werden sollte. Gegebenenfalls ist die Regression anzupassen. Kapitel 4.4 zeigt, wie gut das in der Norm angewandte Regressionsmodell z. B. mit dem zur Verfügung gestellten Simulationsmodell des „Railjet"-Reisezugwagen korreliert.

2.3 Anwendbarkeit von ortsfesten Messstellen

Bei dieser Diplomarbeit wurden Messdaten von ortsfesten Messstellen ausgewertet, die im laufenden Betrieb des Streckennetzes der Österreichischen Bundesbahnen erzeugt wurden. Durch die Vielzahl von unterschiedlichen Fahrzeugen, die die Messstellen im Laufe der Auswertezeiträume passierten, ergeben sich nur schwer vergleichbare Ergebnisse. Die Norm EN 14363 fordert hingegen Ergebnisse, die einheitlichen und genau definierten Bedingungen zu Grunde liegen. Bei der Bestimmung der Sicherheit gegen Entgleisen ist zu erwähnen, dass zwar Messeinrichtungen an den Schienen verwendet werden dürfen, bei der fahrdynamischen Untersuchung sind laut Norm allerdings Messradsätze zu verwenden, da der zeitliche Ablauf über eine definierte Strecke bestimmt werden muss. Nichtsdestotrotz müssen auch bei der Bestimmung der Sicherheit gegen Entgleisen entsprechende Rahmenbedingungen wie z. B. ein trockener Schienenzustand ohne Rückstände von Schmierstoffen an Rad oder Schiene eingehalten werden. Weiters muss der Messgleisbogen eine definierte Gleislage wie z. B einen Nennbogenradius von 150 m aufweisen. Details können [1] entnommen werden. Da die ortsfesten Messstellen der ÖBB im österreichischen Streckennetz nicht nach den Erfordernissen der EN 14363 verteilt sind, können in der Regel nicht die aus der Norm benötigten Randbedingungen erreicht werden. Auch können nicht alle notwendigen Größen, die für die Beurteilung nach Norm benötigt werden, mit den Messstellen ermittelt werden.

Die fahrdynamische Untersuchung stellt umfangreichere Anforderungen an das Messsystem, die nur durch Messradsätze und zusätzliche Ausrüstung erreicht werden können. Beispielsweise muss die vertikale und laterale Beschleunigung bestimmt werden. Zusätzlich wird auch der Verlauf von dynamischen Kräften benötigt, die nur bei entsprechender Ausrüstung und repräsentativer Länge (siehe Kapitel 4.6) der Messstelle gemessen werden können [21]. Weiters sind laut Norm mehrere Auswerteabschnitte mit Mindestlängen zu durchfahren, die eine entsprechende Gleislage und Gleisqualität aufweisen. Die Länge der Auswertabschnitte liegt bei mindestens 70 m und übersteigt den Wert einer durchschnittlichen ortsfesten Messstelle der ÖBB mit ca. 9,6 m bei weitem. Die statistische Auswertung der benötigten Größen geschieht bei der Messstelle dann nicht als Mittelung gegenüber der Zeit, sondern über die Messstellenlänge.

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

Allerdings ist das Ziel der ortsfesten Messstellen, Basisdaten für technische Fragestellungen zu liefern bzw. Fahrzeugmonitoring zu betreiben, um so beispielsweise frühzeitig Schäden zu erkennen und auf diese entsprechend reagieren zu können. Da es bei entsprechender Ausrüstung der Messstelle möglich ist, die quasistatischen Kräfte T_{xqst}, Q_{qst} und Y_{qst} zu bestimmen, kann dadurch die gesuchte Größe T_{qst} ermittelt werden. Ziel der Diplomarbeit ist daher, mit der numerischen Simulation die Betriebsbedingungen möglichst nahe an die realen Bedingungen anzupassen, um so einen aussagekräftigen Vergleich ziehen zu können.

2.4 Gleislage nach EN 13848-1

Die Europäische Norm EN 13848-1 in der aktuellen Version von 2016 gibt die Parameter zur Beschreibung der Gleisgeometrie an. Weiters werden in dieser Norm die Voraussetzungen am Messsystem (z. B. Auflösung und Messunsicherheit bei Bestimmung der Gleislage) und der folgenden Messdatenaufbereitung postuliert. Eine ausreichend genaue Gleislage ist besonders in Hinblick auf die numerische Simulation relevant, da sie einen wesentlichen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Fahrzeuges hat. Daher gibt Anhang F der Norm informative Hinweise über die Gleisgeometriedaten, die als Input für Simulationszwecke verwendet werden.

2.4.1 Maßgebende Parameter der Gleisgeometrie

Im Folgenden seien daher die wichtigsten Gleisparameter, die auch für die Simulation verwendet werden, kurz erläutert, für genaue Definitionen siehe [22].

- Spurweite: Die Spurweite stellt das kleinste Maß zwischen zwei Schienenprofilen dar, wobei der Messpunkt jeweils an der Innenseite der Schienen mit einem vertikalen Abstand von der Laufoberfläche von 0-14 mm liegt. Die Nennspurweite beträgt 1435 mm.
- Überhöhung: Die Überhöhung stellt den vertikalen Höhenunterschied der beiden Fahrflächen zueinander dar und wird zwischen den Schienenkopfmitten gemessen.
- Horizontale Krümmung (1/m), wobei deren Kehrwert dem Bogenradius entspricht
- Steigung (‰), wobei die Steigung auch über die vertikale Krümmung ausgedrückt werden kann.

Die oben angeführten Parameter der Gleislage sind grundsätzlich in einem Trassierungsplan aufgelistet. Die tatsächliche Gleislage wird sich allerdings aufgrund der auf das Gleis wirkenden Belastungen mit der Zeit stets verändern [3]. Zwei weitere wichtige Größen, die sich als Gleislagefehler charakterisieren lassen, sind die Längshöhe und die Richtung.

- Längshöhe: Abbildung 6 zeigt die Definition der Längshöhe. Die Längshöhe stellt die vertikale Abweichung der Schienenlauffläche von einer Bezugslinie dar.

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

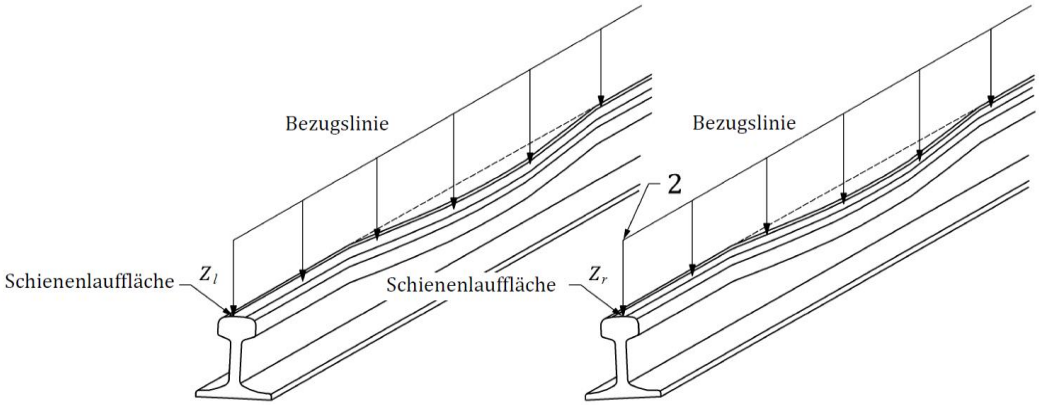


Abbildung 6: Definition der Längshöhe [22]

– Richtung: Die Richtung stellt eine horizontale Abweichung in y-Richtung zu einer entsprechenden Bezugslinie dar (siehe Abbildung 7)

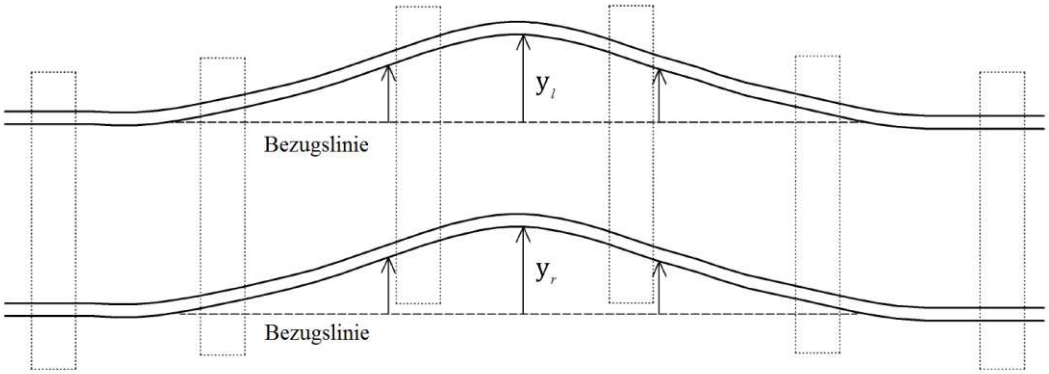


Abbildung 7: Definition der Richtung [22]

Die Längshöhe und die Richtung können für die linke und für die rechte Schiene getrennt ermittelt werden. Beide Größen werden bei der Messung mit Filtern in definierte Wellenlängenbereiche aufgetrennt (siehe Tabelle 2). Zu beachten ist, dass es je nach Filtertyp zu einer wellenlängenabhängigen Abschwächung bzw. Verstärkung und zu einer Phasenverschiebung des Signals kommen kann. Die Wellenlängenbereiche D0 bis D3 sind je nach betrachtetem Geschwindigkeitsbereich ausschlaggebend. So ist bei Geschwindigkeiten größer als 250 km/h auch der langwellige Bereich D3 zu betrachten. Der Bereich D0 ist zur Erkennung von sehr kurzwelligen Fehlern relevant, wird aber aufgrund mangelnder Erfahrung [22] keinen besonderen Anforderungen unterworfen.

	D0	**D1**	**D2**	**D3**
λ_{min} **in m**	1	3	25	70
λ_{max} **in m**	5	25	70	150

Tabelle 2: Wellenlängenbereiche nach EN 13848-1 [22]

Prinzipiell stehen zwei Messmethoden zur Verfügung: die sogenannte Inertialsystem-Messung und die Sehnenmessung [23][24], wobei das Sehnenmessverfahren eine Verzerrung der gemessenen Größen wie Krümmung, Längshöhe und Richtung bewirkt. Bei Verwendung dieses Systems müssen die Signale daher noch entsprechend entzerrt

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

werden. Der ÖBB Oberbaumesswagen EM 250 (ausgestattet mit Messsystemen der Firma Plassen & Theurer) verwendet das genauere Inertialmesssystem, und die Messdaten benötigen keine Entzerrung.

2.4.2 Verwendung von Gleislagedaten in der numerischen Simulation

In Anhang F von EN 13848-1 (Normentwurf aus 2016) werden Hinweise gegeben, in welcher Form und Umfang Gleislagedaten vorhanden sein müssen, um eine erfolgreiche und realitätsnahe Simulation durchführen zu können. Grundsätzlich lässt sich zwischen der eigentlichen Trassierung und den Gleislagefehlern unterscheiden, wobei zur Trassierung die Informationen über horizontale und vertikale Krümmung, Überhöhung und langwellige Spurerweiterung (z. B. in Kurven) gehören. Zu den Gleislagefehlern gehören die Längshöhe, Richtung und kurzwelligen Abweichungen in der Spurweite. Sofern gemessene Trassierungsdaten vorliegen, sind diese gegenüber den Daten aus vorhandenen Trassierungsplänen zu bevorzugen. Da es, wie bereits erwähnt, bei einer Filterung zu einer Phasenverschiebung kommen kann, sollten die Daten aufeinander abgeglichen sein. Der in EN 14363 definierte Frequenzbereich der Anregung von 0,4 Hz bis 20 Hz sollte von den Gleislagedaten erfasst werden. Die Anregung ist geschwindigkeitsabhängig. Für ausgewählte Geschwindigkeitsbereiche, die auch bei dieser Diplomarbeit relevant sind, sind in Tabelle 3 die benötigten Wellenlängenbereiche angeführt. Zu erkennen ist, dass für Geschwindigkeiten unter 220 km/h bereits der Wellenlängenbereich von D0 benötigt wird. Insbesondere für die Untersuchung des hochdynamischen Verhaltens des Fahrzeuges werden also kurze Wellenlängen benötigt. Ebenso wichtig ist eine ausreichende Auflösung der Messdaten. Die Messdaten sollten keinesfalls stufenförmig sein, da das zu unrealistischen Sprüngen in den Simulationsergebnissen führen kann.

	Wellenlänge in m	
v in km/h	**20 Hz**	**0,4 Hz**
60	1	42
80	1	56
120	2	83
160	2	111
220	3	153

Tabelle 3: Wellenlängenbereiche abhängig von der Geschwindigkeit [22]

In der Regel ist eine entsprechende Vorverarbeitung der Daten für die Verwendung im jeweiligen Simulationsprogramm erforderlich. Wichtig ist, dass es zu keinen Überschneidungen und/-oder Lücken des Wellenlängeninhalts von Signalen kommt. Ist beispielsweise das Richtungssignal in die Wellenlängenbereiche D1 und D2 aufgeteilt, sind die verwendeten Filtercharakteristika zu prüfen, bevor die Signale einfach addiert werden können. Zusätzlich ist zu prüfen, ob Signale redundante Informationen beinhalten, z. B. das Richtungs- und das Krümmungssignal. Weiters wird vorgeschlagen, die Gleislagefehler von den einzelnen Schienensträngen in ein Signal in der Gleismitte umzurechnen. Die Gleichungen 2.7 bis 2.10 geben die nötigen Formeln zur Umrechnung an, wobei die Orientierung gemäß dem Gleiskoordinatensystem erfolgt.

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

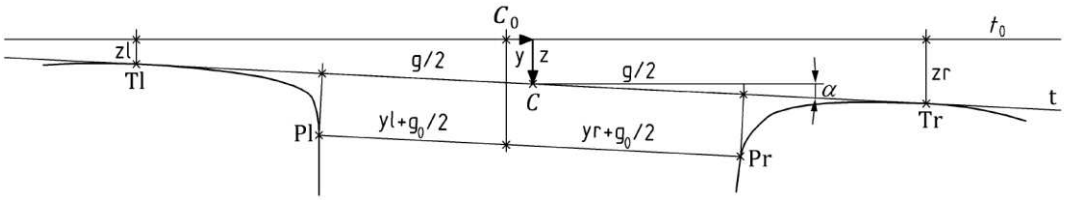


Abbildung 8: Umrechnung der Gleislagefehler [22]

$$\Delta y = (y_l + y_r) \cdot 0.5 \tag{2.7}$$

$$\Delta z = (z_l + z_r) \cdot 0.5 \tag{2.8}$$

$$\alpha = (z_r - z_{rl}) \cdot 0.5 \tag{2.9}$$

$$g = (y_r - y_l) \cdot 0.5 \tag{2.10}$$

mit Δy als Richtungsfehler, Δz als Höhenfehler, α als Rollwinkel, g als Spurerweiterung. In Kapitel 4.2.5 wird gezeigt, wie die zur Verfügung gestellten Gleislagedaten nach den oben genannten Hinweisen, soweit möglich, vorverarbeitet und in „Simpack“ implementiert wurden.

2.5 Rollkontaktermüdung, Verschleiß

In Kapitel 2.2.1 wurde bereits erwähnt, dass in der Norm EN 14363 Größen vorgestellt werden, die in Verbindung mit der Schienenoberflächenschädigung stehen. Eine konkrete Aussage über den Verschleiß und die Rollkontaktermüdung wird allerdings nicht getroffen. Da es nicht Teil dieser Diplomarbeit ist, eine konkrete Bewertung der Schienenschädigung zu treffen, seien daher in diesem Abschnitt ein paar Details zu diesem Thema aufgegriffen und auf entsprechende Literatur verwiesen.

Der wesentliche Vorteil des Eisenbahnverkehrs ist der niedrige Rollwiderstand, der durch den Einsatz von Werkstoffen mit großen Elastizitätsmodulen erreicht wird. Durch die kleine Kontaktfläche und die im Eisenbahnverkehr wirkenden hohen Kräfte werden Spannungen von weit über 1000 N/mm² erreicht [25]. Die hohen Belastungen können zur Rissbildung und plastischen Deformation in den Schienen führen. Hierbei steigt die Belastung, wenn zusätzlich zu den im Kontaktgebiet vorhandenen Normalkräften noch Tangentialkräfte hinzukommen, also in Bögen oder bei Traktion- bzw. Bremsvorgängen. Je nach Höhe der auftretenden Kräfte können unterschiedliche Schädigungen in der Schiene entstehen. Sind die Kräfte so klein, dass die Streck- bzw. Dehngrenze des Materials nicht überschritten wird, tritt keine Schädigung auf. Kommt es zum Überschreiten der Dehngrenze wird das Material im ersten Schritt plastisch verformt und es kommt zur aus den Materialwissenschaften bekannten Kaltverfestigung. Bleiben die Spannungen in einem solchen Bereich, dass nach der Verfestigung die Belastung wieder im elastischen Bereich liegt, spricht man vom elastischen Shakedown. Überschreiten die Spannungen die durch Verfestigung erhöhte Dehngrenze, kommt es zu einer weiteren plastischen Verformung, die als plastischer Shakedown bezeichnet wird [3][26][27]. Bei noch größeren Belastungen kommt es dann zur Rissbildung, die auch als „ratchetting“ bezeichnet wird. Nach [27] kann man sich die Schiene als eine Folge von Schichten vorstellen, die bei entsprechend hoher Belastung gegeneinander verschoben werden. Bei einer ausreichenden Anzahl an Überfahrten werden die Verformungen so groß, dass Risse auftreten. Abbildung 9 zeigt den Vorgang des „ratchetting“. Die grüne Ellipse kennzeichnet das Kontaktgebiet, und die Pfeile repräsentieren Kräfte.

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

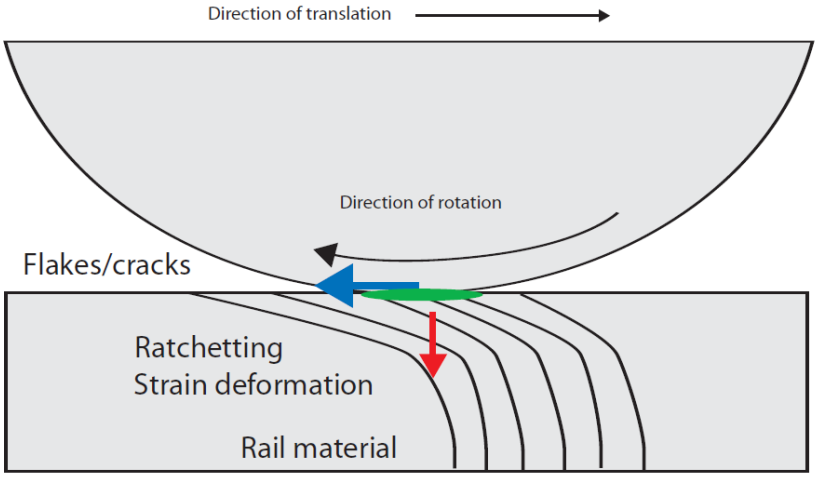


Abbildung 9: „Ratchetting“ [43]

Die wesentlichen Einflussgrößen, die schneller zu einem Materialfluss in der Schiene führen, sind unter anderem hohe Achslasten, kleine Räder, verschlissene Rad- und Schienenprofile. Ein Treiber für die Rissbildung sind hohe Reibwerte bei gleichzeitig hoher Traktion [25]. Durch den Einsatz von Spurkranzschmiersystemen kann es zur Reduktion der Reaktionskräfte im Bogen aufgrund des verringerten Reibwerts kommen, wodurch die Schiene weniger stark belastet wird. Auch steife Radsatzlagerungen können zum vermehrten Auftreten von Rissbildung führen [26]. Im Gegensatz dazu steht der klassische Verschleiß, der durch fortlaufenden Materialverlust an der Oberfläche zwischen Rad und Schiene charakterisiert ist. Verschleiß tritt zwischen zwei Kontaktpartnern praktisch immer auf und kann auf unterschiedliche Mechanismen zurückgeführt werden [28].

Ein Modell, das die in Kapitel 2.2.6 vorgestellte Verschleißziffer (engl. wear number) T_γ verwendet, ist in [29] angeführt. In dem entsprechenden Modell wird ein Zusammenhang zwischen der Verschleißziffer und dem Auftreten von Verschleiß und Rollkontaktermüdung (RCF) hergestellt. Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang zwischen der Verschleißziffer und der Schienenoberflächenschädigung. Die blaue Linie gibt die Abhängigkeit zwischen T_γ und der Schädigung durch Rollkontaktermüdung an. Im Gegensatz dazu steht der Verschleiß durch Materialabtrag. Dieser wird durch die rote Linie dargestellt. Während die Schädigung durch RCF bereits bei einem Energieeintrag von 15 J/m beginnt, setzt die Schädigung durch Verschleiß erst bei einem Wert von 65 J/m ein. Die grüne Kurve stellt die gesamte Schädigung dar. Da durch den Verschleiß Risse teilweise wieder entfernt werden, beginnt die gesamte Schädigung beim Einsetzen des Verschleißes zu sinken. Bei ca. 175 J/m tritt dann nur mehr reiner Verschleiß auf, da der Abtrag schneller stattfindet als eine Rissbildung möglich wäre. Das Modell erlaubt sehr gute Vorhersagen über den Zeitpunkt der Rissentstehung, und es lassen sich Vorhersagen über das Eintreten von Verschleiß und RCF machen [25][3]. In Abhängigkeit vom Bogenradius tritt RCF meistens zwischen 1200 und 2000 m auf, da es in diesen Bereichen zur 2 Punkt-Berührung kommen kann [30]. Die Betriebsbedin-

[3] Es sollten aber stets die in den Quellen angegebenen Einschränkungen berücksichtigt werden.

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

gungen und die Gleislage entscheiden daher, ob es eher zum Verschleiß oder zur Rollkontaktermüdung kommt.

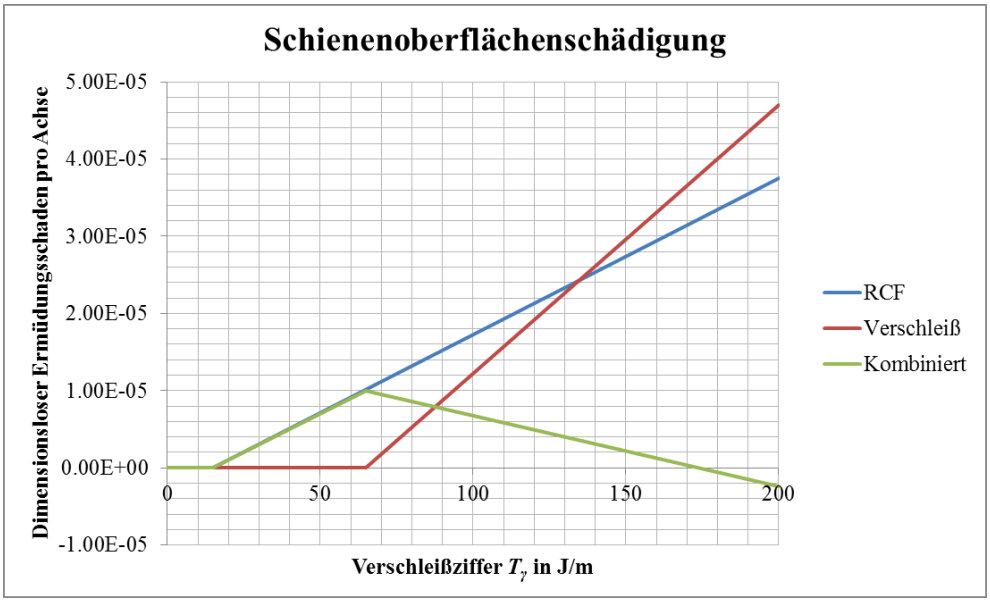


Abbildung 10: Schienenoberflächenschädigung abhängig von T_γ [29]

Für die Prognose von Verschleiß über das Rad- bzw. Schienenprofil gibt es beispielsweise die Modelle von Archard [18] oder Krause/Poll [19]. Weitere Modelle bzw. Adaptionen sind in [31][32][33] zu finden. Insbesondere die Implementierung solcher Modelle in Programmpakete zur numerischen Simulation ermöglicht die Optimierung von Rad- und Schienengeometrien zur Verschleißreduzierung.

2.6 Betrachtete Schienenfahrzeuge

2.6.1 „Railjet“-Wagenzug

Für die in dieser Diplomarbeit vorgestellten Betrachtungen wurde der Fernverkehrswende-Reisezug „Railjet“ der ÖBB gewählt (siehe Abbildung 11). Insgesamt sind bei den ÖBB 60 eigene „Railjet“-Garnituren sowie sieben weitere Garnituren der Tschechischen Staatsbahn in Betrieb.

Abbildung 11: „Railjet“ [35]

Die Garnituren bestehen aus kurzgekuppelten Wagen vom Typ Siemens „Viaggio Comfort“ und Lokomotiven des Typs Siemens ES64U2 (ÖBB „Taurus“ 1116) oder Siemens ES64U4 (ÖBB „Taurus“ 1216). Der „Railjet“ befährt einen großen Teil des

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

österreichischen Streckennetzes und passiert unter anderem auch jede der betrachteten Messstellen. Dabei ist mit einer hohen Anzahl an fahrplanmäßigen Überfahrten zu rechnen. Der „Railjet“ zählt zu den schnellsten lokbespannten Zügen der Welt [34], wobei die Lok sowohl ziehend als auch schiebend eingesetzt wird.

Eine „Railjet“-Garnitur besteht im Regelfall aus sieben Reisezugwagen und einer Lok. Bei besonders stark frequentierten Zügen werden zwei „Railjet“-Garnituren aneinander gehängt (z. B. täglich auf der österreichischen Weststrecke zwischen Wien und Salzburg). Die sieben Reisezugwagen einer Garnitur unterscheiden sich voneinander insbesondere in der Masseverteilung. So sind der Steuerwagen Afmpz und der Speisewagen ARmpz deutlich schwerer und haben eine andere Schwerpunktslage. Ampz und Bmpz unterscheiden sich in der Innenausstattung (Ampz: erste Klasse, Bmpz: zweite Klasse). Abbildung 12 zeigt die Standardkonfiguration eines „Railjet“.

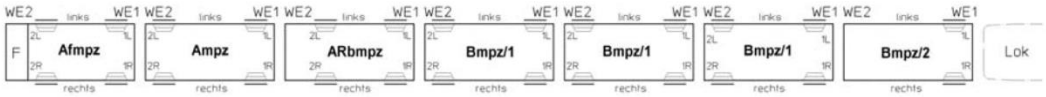


Abbildung 12: „Railjet“ Standardkonfiguration [36]

Besonders in Hinblick auf die numerische Simulation ist eine zur Fragestellung passen detaillierte Modellierung der Fahrwerke wichtig. Die Eigenschaften und der Aufbau der Fahrwerke beeinflussen maßgeblich die Fahrdynamik. Die „Railjet“-Reisezugwagen besitzen luftgefederte Drehgestelle des Typs SF400. Sie sind besonders für den Einsatz von lokbespannten Reisezügen entwickelt worden [36]. Die einzelnen Wagen sind typischerweise mit pneumatischen Bremsen ausgestattet, wobei pro Radsatz drei Scheibenbremsen eingesetzt werden. Um das Blockieren der Radsätze zu vermeiden, sind die Wagen mit Gleitschutzsystemen ausgestattet. Die verwendeten Kurzkupplungen zwischen den einzelnen Wagen dienen zur semipermanenten mechanischen Verbindung der Wagen. Grundsätzlich sind Kupplungen so ausgelegt, dass diese die Kräfte (fast) nur in Längsrichtung (x-Richtung) übertragen können, um so eine starke Wechselwirkung der einzelnen Wagen zu vermeiden [37].

Tabelle 4 zeigt einige Daten zum „Railjet“. Weitere technische Details können aus [36] entnommen werden.

Hersteller	Siemens
Baujahr	2008–2012
	2015–2016
Gattung	Wendezug
Spurweite	1435 mm
Länge ohne Lok	185,8 m
Länge mit Lok	205,38 m
Höhe	4050 mm
Breite	2825 mm
Drehzapfenabstand	19 m
Drehgestellachsstand	2500 mm
Höchstgeschwindigkeit	230 km/h
Anfahrzugkraft	300 kN
Sitzplätze ÖBB-Version	408

Tabelle 4: Technische Daten „Railjet“ [36]

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

2.6.2 „Taurus“-Lokomotive

Wie bereits erwähnt, werden Wagensätze des Railjets mit zwei unterschiedlichen Loktypen betrieben. Die Reihe 1216 stellt die neuere Variante dar. Die Loks der Reihe 1216 unterscheiden sich von der Reihe 1116 unter anderem durch die Eignung für Gleichstrombetrieb (Mehrsystemfähigkeit) [38][39]. Die Baureihe 1216 hält den aktuellen Geschwindigkeitsweltrekord für Lokomotiven mit 357,7 km/h. Die verwendeten Drehgestelle sind vom Typ SF1, wobei diese besonders für den Einsatz von elektrischen Hochleistungslokomotiven bis 230 km/h entwickelt wurden. Die Lagerung der Radsätze erfolgt im Drehgestellrahmen jeweils mit Dreieckslenkern und Fensterbuchsen. Dadurch erhofft sich der Hersteller eine günstige Radialstellung der Radsätze, besonders auf bogenreichen Strecken. Pro Radsatz wird ein Asynchronmotor mit einer Dauerleistung von 1,6 MW eingesetzt. Weiters sind pro Radsatz zwei Bremsscheiben auf einer separaten Bremswelle vorhanden. Die Übertragung der Zugkraft vom Drehgestell zum Wagenkasten erfolgt über ein tiefliegendes Drehzapfenlager. Für weitere technische Details sei auf [38][39] [40] verwiesen. Eine kurze Zusammenfassung technischer Daten ist in Tabelle 5 zu finden.

	ES64U4 (1216)	ES64U2 (1116)
Hersteller	Siemens	Siemens
Baujahr	2005–2011	1999–2006
Achsformel	Bo'Bo'	Bo'Bo'
Spurweite	1435 mm	1435 mm
Länge über Puffer	19.580 mm	19.280 mm
Drehzapfenabstand	9.900 mm	9.900 mm
Drehgestellachsstand	3.000 mm	3.000 mm
Raddurchmesser	1150/1070 mm	1150/1070 mm
Leermasse	87 t	86 t
Radsatzfahrmasse	21,8 t	21,25 t
Zugelassene Höchstgeschwindigkeit	230 km/h	230 km/h
Anfahrzugkraft	300 kN	300 kN
Stromsystem	15 kV, 16,7 Hz	15 kV, 16,7 Hz
	25 kV, 50 Hz	25 kV, 50 Hz
	DC 1500 V	
	DC 3000 V	

Tabelle 5: Technische Daten „Taurus“ [38][39]

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

3 Messung

3.1 Möglichkeiten zur Kräftemessung

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, stehen grundsätzlich zwei Messmethoden zur Wahl. Messradsätze bieten die Möglichkeit, gezielt die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeuges zu untersuchen, was dieses Verfahren unabdingbar für die Zulassung von Schienenfahrzeugen macht. Messradsätze arbeiten auf Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf die Stirnseite der Radsätze und die Radsatzwelle appliziert werden, wobei bis zu 96 DMS auf einem Radsatz montiert werden [41]. Durch die gezielte Anordnung der DMS lassen sich durch Auswertung der örtlichen Dehnungen des Radsatzes im Betrieb die drei benötigten Kraftkomponenten Q, Y und T_x ermitteln, und zusätzlich kann die Lage des Kontaktpunktes bestimmt werden. Bei Messradsätzen werden die Ausgangsgrößen als Funktion der Zeit bestimmt, wobei die Zeiträume, in denen die Daten ausgewertet werden, prinzipiell beliebig groß sein können. Stattet man beispielsweise einen 4-achsigen Reisezugwagen mit vier Messradsätzen aus, so können zu jedem Zeitpunkt die momentanen Werte der Kraftkomponenten ermittelt werden.

Die zweite Möglichkeit stellt der Einsatz von ortsfesten Messstellen dar. Ein wesentliches Einsatzgebiet ortsfester Messstellen ist die permanente Überwachung des Zugverkehrs durch gezielt im Netz verteilte Messstellen. Dabei können unter anderem Radsatzlasten, Fahrverhalten und Unrundheit von Laufrädern gemessen werden. Während bei Messradsätzen die Größen als Funktion der Zeit ermittelt werden, wird bei ortsfesten Messstellen der Kraftverlauf über den Weg bestimmt, wobei der Weg, in dem die Daten ausgewertet werden, stets durch die Länge der Messstelle begrenzt ist. Je nachdem welche Größen die Messstelle ermitteln soll, muss die Länge der Messstelle daran angepasst sein, wobei auch das Geschwindigkeitsniveau berücksichtigt werden muss. Möchte man z. B. dynamische Kräfte bei Geschwindigkeiten von mehr als 200 km/h ermitteln, wäre nach Tabelle 3 eine Messstellenlänge von ca. 150 m notwendig, um den in EN 14363 angeführten Wellenlängenbereich erfassen zu können. Wird die Messstelle kürzer gewählt, kann es passieren, dass man selbst für quasistatische Werte keine korrekten Ergebnisse erhält (Siehe dazu Kapitel 4.6). Bei kurzen Messstellen, bei denen die Länge der Messstelle kürzer ist als der Achsabstand zwischen erstem und letztem Radsatz eines passierenden Fahrzeuges, kann daher für das Fahrzeug kein momentaner Wert der Kräfte auf allen Radsätzen bestimmt werden. Weiters können ortsfeste Messstellen zur Bestimmung der Sicherheit gegen Entgleisen verwendet werden. Als Maß für die Sicherheit gegen Entgleisen dient das Verhältnis Y/Q (vgl. EN 15654-1).

Der wesentliche Vorteil der ortsfesten Messstellen liegt hingegen darin, dass diese, einmal installiert, automatisiert Messdaten liefern, und das für alle Züge die die Messstelle passieren. Ortsfeste Messstellen können zusätzlich zur reinen Messung der Kräfte noch weitere Funktionen bieten [21]. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, Radformfehler oder entgleiste Radsätze zu detektieren. Zusammenfassend ist daher ein Vergleich zwischen den beiden Messsystemen nur schwer möglich, da diese unterschiedliche Ziele verfolgen.

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

3.2 Betrachtete Messstellen

3.2.1 Lage der Messstellen

Um auf eine möglichst hohe Aussagekraft der Ergebnisse dieser Diplomarbeit zu kommen (Vergleich von Messung und Simulation), sind insgesamt vier Messstellen ausgewählt worden, die sich in ihrer Trassierung entsprechend unterscheiden. So wurde das Augenmerk darauf gelegt, dass Messstellen in unterschiedlichen Bogenradien zur Verfügung stehen, die in etwa auch den Prüfbereichen der Norm EN 14363 zugeordnet werden können. Abbildung 13 zeigt die Lage der Messstellen in Österreich, wobei die Karte das Streckennetz der österreichischen Bundesbahnen abbildet (AS07…Asten, BS…Breitenstein, GA19…Bad Gastein, VE10…Velden). Die Zahlen bei der Abkürzung der Messstellen dienen der internen Zuordnung der Messstellen innerhalb der ÖBB.

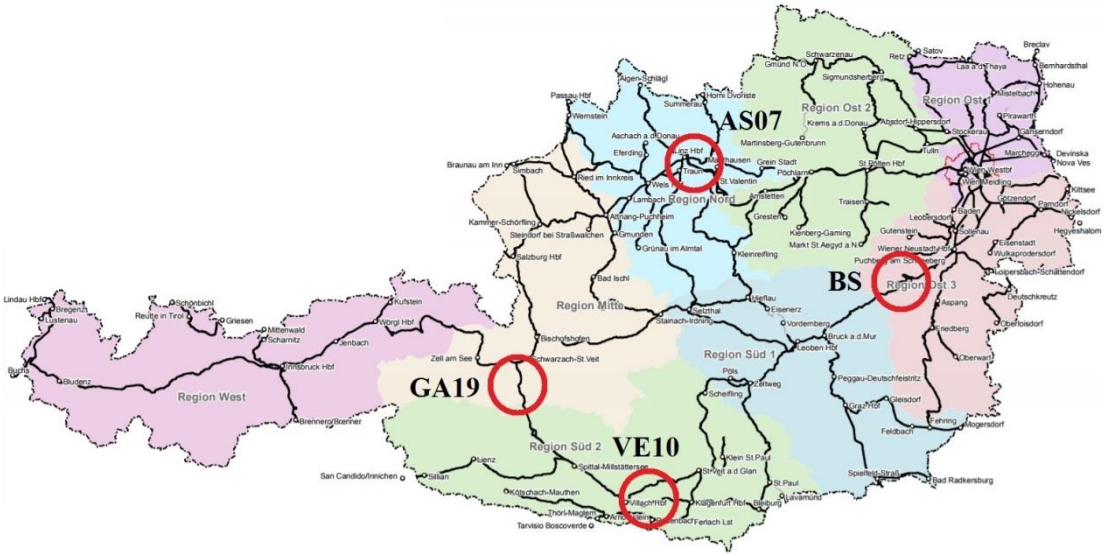


Abbildung 13: Kartografische Lage der in dieser Arbeit betrachteten Messstellen [42]

- Die Messstelle AS07 liegt in einer Geraden ohne Steigung. Die Strecke ist hier zweigleisig ausgeführt, wodurch die Messstelle in der Regel nur in eine Richtung passiert wird. Die Messstelle befindet sich auf der österreichischen Weststrecke östlich von Linz. Die Gerade ist ca. 800 m lang, wobei die Messstelle mittig in der Geraden positioniert ist. Vor der Geraden liegt ein Linksbogen mit fast 3000 m Radius, der mit einem 300 m langen Übergangsbogen in die Gerade übergeht (Details siehe Tabelle 6).
- In Velden ist die Strecke zweigleisig ausgeführt und befindet sich in der Regelfahrtrichtung gesehen in einem 250 m langen Linksbogen mit Steigung. Der Linksbogen wird von einem 126 m langen Übergangsbogen eingeleitet, der von einem geraden Streckenabschnitt ausgeht. Die Messstelle befindet sich ca. 80 m nach Beginn des konstanten Linksbogens (Details siehe Tabelle 6).
- Die Messstelle in Gastein befindet sich auf einer eingleisig ausgeführten Strecke. Das bedeutet, dass Messdaten von Fahrzeugen in beide Richtungen aufgenommen werden. In Regelfahrtrichtung liegt die Messstelle in einem ansteigenden 207 m langen Rechtsbogen, wobei die Messstelle in der Mitte

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

dieser Strecke liegt. Vor und nach der Messstelle finden sich Übergangsbögen zu Abschnitten mit Radien größer als 4000 m (Details siehe Tabelle 6).

– Die Strecke in Breitenstein ist dreigleisig ausgeführt. Die Messstelle wird in Regelfahrtrichtung in einem engen Linksbogen mit einer Länge von 55 m passiert, wobei es auch hier bergauf geht. Dem eigentlich relevanten Linksbogen geht ein ebenfalls enger Linksbogen voraus. Die Bogenradien zwischen diesen Linksbögen unterscheiden sich lediglich um 1 m (Details siehe Tabelle 6).

Abbildung 14 zeigt die Positionen der Messstellen auf Satellitenaufnahmen mit eingetragenen Fahrtrichtungen. Die Karten sind stets genordet. Die roten Pfeile zeigen die Fahrtrichtung 1 (Regelfahrtrichtung) an.

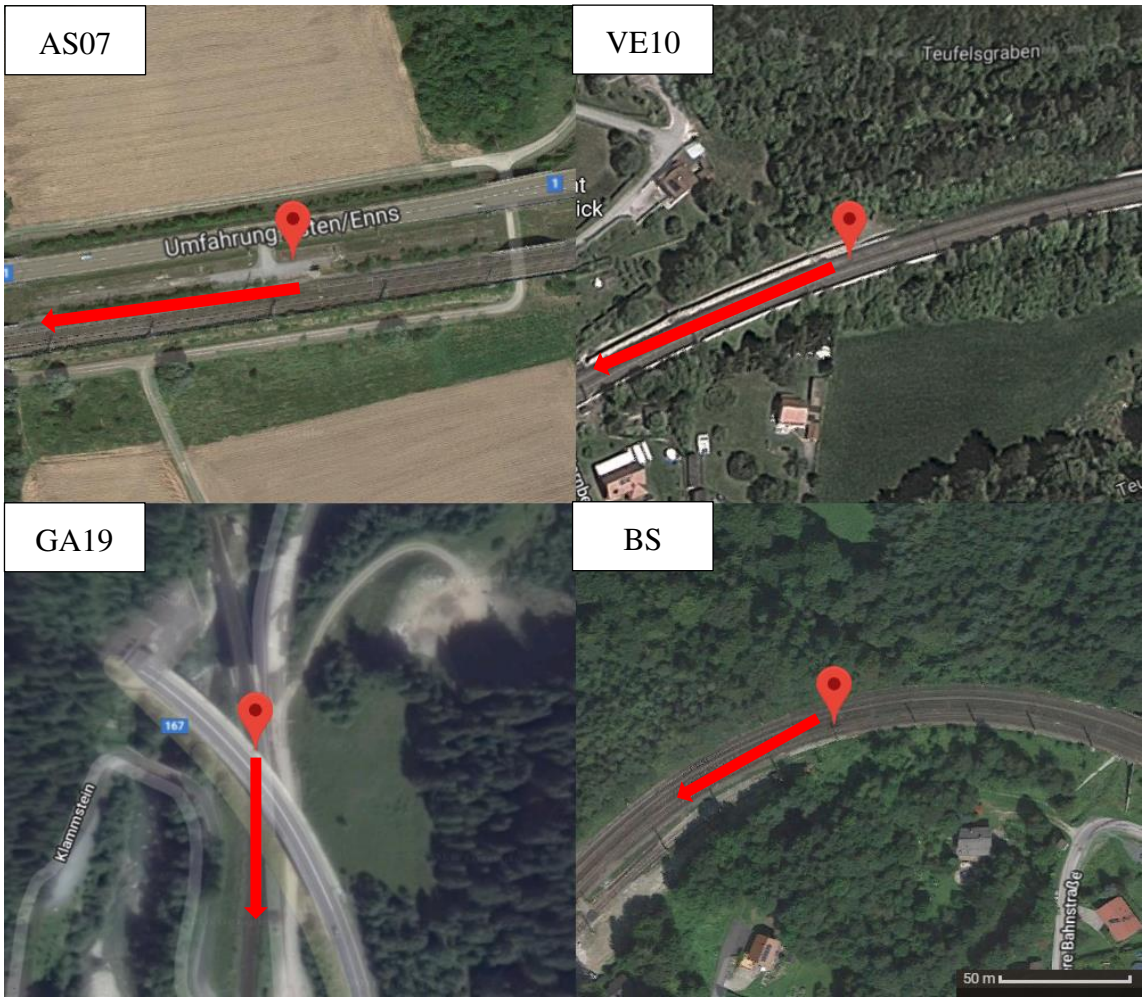


Abbildung 14: Satellitenaufnahmen der Messstellen [43]

Die in Bögen liegenden Messstellen sind jeweils in reinen Kreisbögen und nicht in Übergangsbögen situiert. Tabelle 6 gibt die wichtigsten Gleislageinformationen im Bereich der Messstellen an, die dem Trassierungsplan der ÖBB entnommen wurden [44]. Eine genauere Analyse der erhaltenen Gleislagedaten ist in Kapitel 4.2.5 zu finden. Abweichungen sind darin begründet, dass die Daten aus dem Trassierungsplan den Soll-Werten entsprechen. Werden die Ist-Gleislagedaten durch Messfahrten bestimmt, können so bei zu großen Abweichungen oder kritischen Gleislagefehlern Maßnahmen zur Korrektur der Gleislage getroffen werden. Die Veränderung der Gleislage findet auf-

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

grund der durch Zugüberfahrten auftretenden Belastungen Schritt für Schritt statt und ist unter anderem abhängig von den Bettungsparametern und der gesamten Konfiguration des Oberbaus.

Messstelle	AS07	VE10	GA19	BS
Bogenradius in m	Gerade	750	596.6	183
Überhöhung in mm	0	130	60	135
Steigung in ‰	0	12	16	4.44
Länge des Abschnitts in m	822	254,35	55	207,00
Spurerweiterung in mm	0	6	11	20
Schienentyp	60E1	60E1	60E1	49E1
Theoretische Einbauneigung	1:40	1:40	1:40	1:40
Zulässige Geschwindigkeit in m/s	230	120	80	60
Typische freie Seitenbeschleunigung in m/s²	0	0,63	0,45	0,65
Zuordnung Prüfbereiche EN 14363	1	2	3	5 (4)

Tabelle 6: Trassierungsdaten im Bereich der Messstellen

Weiters sind in Tabelle 6 Informationen über das typische Geschwindigkeitsniveau, freie Seitenbeschleunigung und die Zuordnung zu den Prüfbereichen nach EN 14363 enthalten. Die freie Seitenbeschleunigung entspricht der Beschleunigung in y-Richtung, die durch die Überhöhung und Geschwindigkeit beeinflusst werden kann. Sie wird auch oft als Überhöhungsfehlbetrag ausgedrückt, wobei der Überhöhungsfehlbetrag jener zusätzlichen Überhöhung entspricht, die nötig wäre, um eine freie Seitenbeschleunigung von 0 m/s² zu erreichen (ausgeglichene Bogenfahrt). Die sich aus den Gleislagedaten und der Geschwindigkeit ergebende freie Seitenbeschleunigung lässt sich nach Gleichung 3.1 und 3.2 [45] berechnen (vereinfachte und für die Vollbahn ausreichend genaue Gleichungen).

$$a_q = \frac{v^2}{R}\cos(\psi) - g\,\sin(\psi)\cos(\alpha_t) \tag{3.1}$$

$$\psi = \operatorname{atan}\left(\frac{u}{b}\right) \tag{3.2}$$

mit a_q als freie Seitenbeschleunigung, g als Fallbeschleunigung, u als Überhöhung und b als Abstand von der Mitte der rechten zu der Mitte der linken Schiene.

Bei der Zuordnung der Messstelle BS zu einem Prüfbereich ist zu erwähnen, dass Prüfbereich 4 nach EN 14363 Bogenradien zwischen 250 m und 400 m beinhaltet. Da der Bogen bei der Messstelle Breitenstein mit 183 m sehr eng ausfällt, kann er nicht direkt dem Prüfbereich 4 zugeordnet werden. Der enge Bogen wäre daher einem weiteren Prüfbereich zuzuordnen (Prüfbereich 5). Nach Kapitel 2.5 ist bei den Messstellen im Bogen nicht mit RCF zu rechnen, sondern ausschließlich mit klassischem Verschleiß.

Besonders das Schienenprofil 60E1 gilt als sehr formtreu [44]. Da das Schienenprofil einen großen Einfluss auf die Berührgeometrie besitzt, wird in Kapitel 4.2.3 gezeigt, wie die tatsächlichen Schienenprofile für die numerische Simulation in das Simulationsprogramm eingearbeitet werden. Vorausgreifend sei angemerkt, dass sich die Schienenprofile aller Messstellen im betrachteten Zeitraum noch nahezu im Neuzustand befinden.

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

3.2.2 Aufbau der ortsfesten Messstellen und Funktionsprinzip

Die im Zuge dieser Diplomarbeit betrachteten Messstellen unterscheiden sich teilweise im Aufbau und den zur Verfügung stehenden Messgrößen. Alle Messstellen bieten die Möglichkeit der Auswertung aller benötigten Kräfte. Die Messstellen sind sogenannte ARGOS Wayside Train Monitoring Systeme der Firma HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik). Die Kraftmessung erfolgt über eine Dehnungsmessung durch an die Schiene aufgebrachte Dehnmessstreifen (DMS). Die Dehnmessstreifen werden zu Modulen zusammengefasst, die pro Schwellenfach angebracht werden können. Der Abstand der Schwellenfächer beträgt ca. 0,6 m. Die Dehnmessstreifen können entweder direkt auf der Schiene verklebt sein oder durch schraubbare Module an die Schiene angebracht werden, wobei verklebte, also dauerhaft montierte Sensoren eine höhere Genauigkeit bieten. (quasistatische Q-Kraft < 3% bei Geschwindigkeiten bis 120 km/h sonst 5%, quasistatische Y-Kraft 4%, quasistatische Längskräfte 3% jeweils gemäß [21]). Es sind jeweils sowohl die innere als auch die äußere Schiene mit Sensormodulen versehen.

Tabelle 7 gibt die Anzahl an Sensoren an, die bei den jeweiligen Messstellen appliziert sind (SFR...Schienenfußrand, STL…Steg Längskräfte, STS…Steg vertikale Kräfte, SFM…Schienenfußmitte). Die eingeklammerten Werte geben die Anzahl von fehlerhaften Sensoren an. Besonders auffällig sind die Werte für die Messstelle VE10. Diese Messstelle steht im März 2018 kurz vor Instandhaltungsarbeiten. Aufgrund der bereits hohen Anzahl von defekten Sensoren wird bei der Messdatenauswertung ein besonders strenger Maßstab an die Plausibilität angelegt. Defekte Sensoren werden zwar nicht in der Auswertung berücksichtigt, sind aber ein Indiz für den Zustand der Messstelle.

		AS07		VE10		GA19		BS	
Montageart		dauerhaft		dauerhaft		dauerhaft		dauerhaft	
Schiene		innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen
Sensoranzahl	SFR	0	0	38 (4)	38 (11)	16	16	16	16 (2)
	STL	8	16	6	6	3	3	7	7
	STS	16 (1)	16	24 (1)	24	16	16	16	16 (2)
	SFM	16	16	16 (3)	16 (2)	16	16	16	16 (2)
Messstellenlänge in m		9.6		15.6		9.6		9.6	

Tabelle 7: Anzahl an Sensoren je Messstelle

Alle Messstellen mit Ausnahme von GA19 besitzen RFID-Antennen (Radio Frequency Identification), die bei Vorhandensein von RFID Tags die Fahrzeuginformationen auslesen können und diese mit den Messdaten verknüpfen. Durch die Auslesung kann auch die Orientierung des passierenden Fahrzeugs bestimmt werden. Bei fehlenden RFID Tags kann zumindest die Radsatzfolge und die Lage der Radsätze im Drehgestell (Radsatzabstand) je Wagen ermittelt werden. Auch das ermöglicht in gewissen Grenzen eine Zuordnung des Wagentyps. Findet eine Überfahrt statt, dann wird die Messung automatisch aktiviert, wobei die Daten an einem in der Nähe der Messstelle befindlichen Rechner ausgewertet werden. Für genauere Angaben zum Aufbau der Messstellen siehe [46]. Zu der Messstelle BS sei noch erwähnt, dass in Regelfahrtrichtung vor der Messstelle

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

eine Schienenkonditionieranlage vorhanden ist, die einen konstanten Reibwert und damit gleichbleibende Verhältnisse sicherstellen soll. Nach Informationen des Betreibers war diese allerdings für den Zeitraum der Messdatenerhebung nicht in Betrieb.

Abbildung 15 zeigt die möglichen Positionen der Dehnmessstreifen (pro Modul) auf der Schiene. Die roten Felder markieren DMS-Positionen und die Benennung der zugehörigen Kräfte, die mit den Signalen bestimmt werden. Die Position in z-Richtung der Sensoren im Schienensteg entspricht der neutralen Faser bei reiner vertikaler Belastung der Schiene.

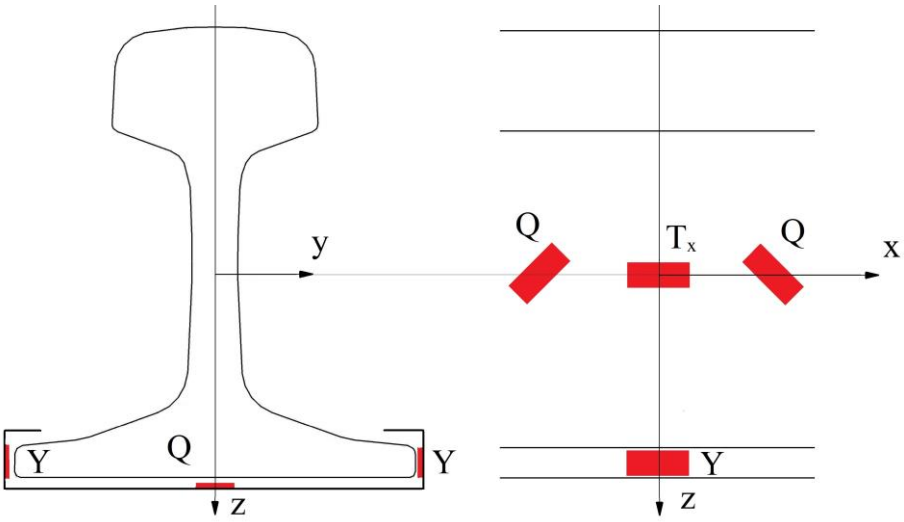


Abbildung 15: Sensorpositionen [21]

Je nach Position des Kontaktgebiets (Abstand *e* zur z-Achse) auf der Schiene (exemplarisch in der y-z-Ebene einer Schiene nach Abbildung 16), können gemäß [47] die einwirkenden Kräfte in die x-z-Ebene reduziert werden. Dadurch kann das Problem in drei Lastfälle aufgetrennt werden, eine durch die zentrisch angreifende vertikale Kraft erzeugte Biegung und eine durch *Y* hervorgerufene horizontale Biegung. Das Reduktionsmoment im Abstand *h* erzeugt eine Wölbkrafttorsion. Tritt zusätzlich eine Kraft in x-Richtung auf, muss das System als räumliches Problem behandelt werden, und es treten weitere Lastfälle auf.

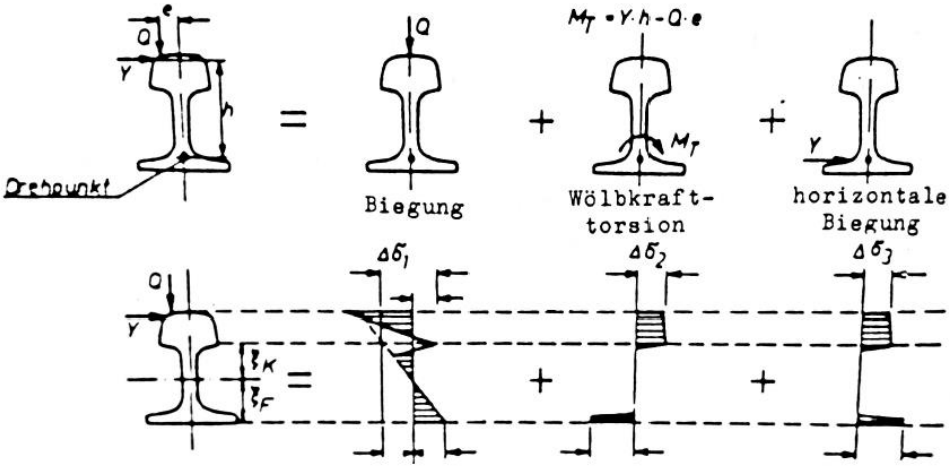


Abbildung 16: Belastungen auf Schiene in der y-z-Ebene [47]

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

Da bei der Überfahrt eines Schienenfahrzeuges mehrere Räder auf einmal Kräfte in die jeweiligen Kontaktpunkte der Schiene einbringen, wird nach *Zimmermann* und *Timoschenko* die Schiene als elastisch gebetteter Balken betrachtet, der in mehreren Punkten mit Kräften belastet wird. Abbildung 17 zeigt beispielsweise den Einfluss eines dreiachsigen Drehgestells (Abstände x_i, Einflusszahlen μ_i) auf das Biegemoment in einem Balken bei reiner vertikaler Belastung. Deutlich zu erkennen ist, dass das Biegemoment in den Positionen der Radsätze jeweils ein Maximum annimmt, das gleichzeitig eine nicht stetig differenzierbare Stelle im Biegemomentenverlauf darstellt. Passiert ein Fahrzeug die Messstelle, kann der Verlauf des Biegemoments durch Messen der Dehnung bestimmt und auf die vertikale Last geschlossen werden. Da die Maxima einfach zu identifizieren sind und die Lage der vertikalen Kräfte repräsentieren, kann somit auch einfach der Abstand der Radsätze zueinander bestimmt werden (bei Kenntnis der Geschwindigkeit des Fahrzeugs). Durch eine gezielte Positionierung der Sensoren auf der Schiene können somit auch die Y- und T_x-Kräfte gemessen werden.

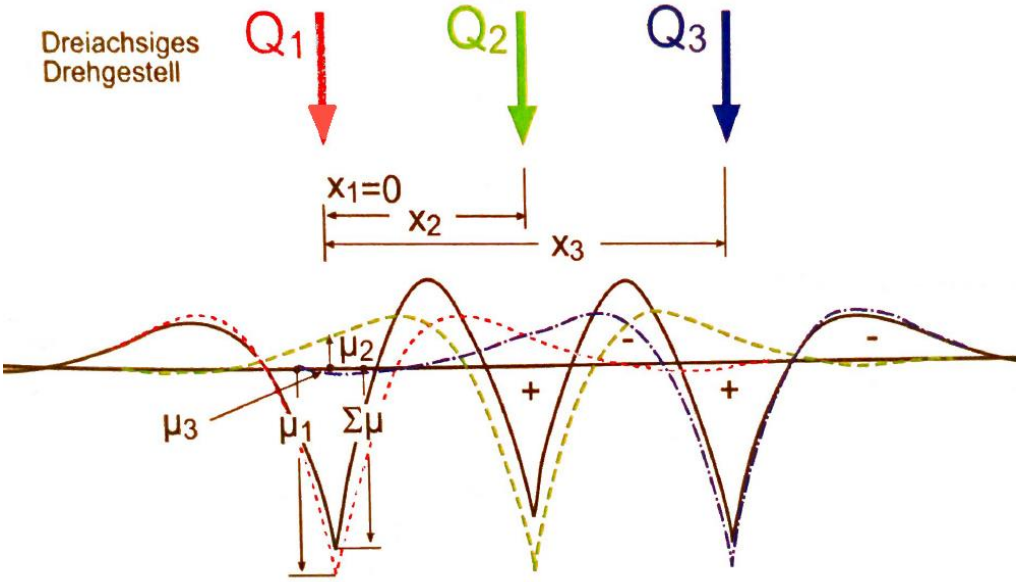


Abbildung 17: Einflusszahlen auf das Biegemoment bei vertikaler Last [25]

Die Kalibrierung der Messstellen erfolgt über einen eigenen Kalibrierwagen, der in horizontaler und vertikaler Richtung eine definierte Kraft aufbringt. Hierbei ist zu beachten, dass sich mit längerer Einsatzdauer der Messstelle die Gleislage soweit verändert, dass die Genauigkeit der Messstelle abnehmen kann bzw. eine Neukalibrierung erforderlich wird [44].

3.2.3 Einflüsse auf die Messergebnisse

In [46] werden einige Einflussfaktoren auf die Messergebnisse angeführt, die zu entsprechenden Fehlern in den Ergebnissen führen können.

- Wie bereits in den einleitenden Kapiteln erwähnt, ist der Kontakt zwischen Rad und Schiene ein wesentlicher Einflussparameter auf die Fahrdynamik von Schienenfahrzeugen. Einerseits verändert sich die Schiene mit der Zeit, sodass es zu einer veränderten Kontakt-Kinematik kommt. Der veränderte Kontaktpunkt und die somit in unterschiedliche Positionen der Schiene

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

einbrachten Kräfte können - wie im vorigen Kapitel gezeigt - herausgerechnet werden. Andererseits können zwei baugleiche Fahrzeuge stark unterschiedliche Messergebnisse hervorrufen, da die Radprofile und deren Verschleiß für jedes Fahrzeug einzigartig sind.

- Gleislage: Das Geschwindigkeitsniveau und die Gleislage vor der Messstelle können zu dynamischen Anteilen in den Kräften führen (z. B. Anregung durch die Fahrbahn)
- Reibungsverhältnisse: Die Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene können die Ergebnisse stark beeinflussen. So können z. B. bei geringen Reibwerten (nasse Fahrbahnbedingungen) nur geringere Längskräfte übertragen werden als bei entsprechend höheren Reibwerten (trockene Bedingungen).
- Wetterbedingte Abhängigkeit: Aufgrund von Temperatur, Niederschlagsmenge und Veränderung des Grundwasserspiegels kann es zur Veränderung der Eigenschaften des Unter- und Oberbaus kommen.
- Zufällige und systematische Fehler im System: Systematische Fehler können grundsätzlich herausgerechnet werden. Zufällige Fehler entstehen z. B. durch fehlerhafte Sensoren. Zu den systematischen Fehlern gehören auch Fehler, die aufgrund von geschätzten oder gemittelten Parametern in der Auswertung entstehen (z. B. eine über das Jahr gemittelte Bettungssteifigkeit).

Selbst bei ein und demselben Fahrzeug, das eine Messstelle passiert, kann die Wiederholgenauigkeit stark variieren. In [46] wird auf eine Messkampagne eingegangen, bei der die Messstelle BS unter denselben Bedingungen mehrfach vom selben Fahrzeug befahren wird. Während die Q-Kräfte bei den unterschiedlichen Fahrten nur geringe Abweichungen aufzeigten (< 2,7 %), so sind bei den Y-Kräften trotz gleicher Voraussetzungen starke Schwankungen zu bemerken. Die großen Schwankungen sind allerdings nicht unbedingt auf Fehler im Messsystem zurückzuführen, sondern insbesondere die Kräfte in lateraler Richtung können von nicht direkt erfassbaren Faktoren stark abhängig sein (Anteil an einer stochastischen Komponente für die einzelnen Fahrten). Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich von Einzelfahrten und Simulation nur schwer möglich, da nicht alle Faktoren bekannt sind, vor allem weil die ausgewerteten Daten keinen Messkampagnen entspringen, sondern aus dem täglichen Betrieb des Schienenverkehrs stammen. Daher werden die Vergleiche mit statistischen Methoden aus einer Vielzahl von Überfahrten über die Messstellen durchgeführt. Da für einen spezifischen Wagen die gemessenen Radprofile zur Verfügung gestellt wurden, wird trotzdem versucht, einen Vergleich mit einer einzigen Messfahrt zu erreichen.

3.3 Methodik und verwendete Programme

Die Messdaten der Messstellen stehen direkt an der Messstelle zur Verfügung. Über den Zentralserver der ÖBB können die Daten auch per Fernzugriff aufgerufen werden. Mit dem Programm AdStat der Firma ADES können die benötigten Daten ausgelesen werden (Details dazu siehe [46]). Grundsätzlich können sogenannte Sammelaufträge erstellt werden, bei denen die gewünschten Messstellen und die gesuchten Größen ausgelesen werden. Weiters können Filter gesetzt werden, die z. B. einen bestimmten Typ von Zug aus den Daten filtern. Da die UIC (International Union of Railways) Fahrzeugnummern der „Railjet“ Steuerwagen bekannt sind [34][44], konnte bei der Messdatenauswertung nach diesen gefiltert werden. Die Daten wurden auf Zugebene ausgegeben,

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

damit auch die Lokomotive und die weiteren Reisezugwagen in den Messdaten enthalten sind. Tabelle 8 zeigt die ausgewerteten Größen, wobei die Größen 37 bis 40 nachträglich berechnet wurden.

Die Daten werden als CSV-Daten (Comma separated values) ausgegeben. Die in Tabelle 8 angeführten Werte in der ersten Spalte entsprechen den Indizes der Spalten in der CSV-Datei. Die Daten wurden in weiterer Folge größtenteils mit „Matlab“ ausgewertet und teilweise mit „Microsoft Excel“ nochmals kontrolliert. Da bei dieser Diplomarbeit mehrere Messstellen betrachtet werden, werden die Vorteile von „Matlab“ für eine automatisierte Datenauswertung genutzt. Im Zuge derer wurden die Daten noch nach diversen Gesichtspunkten gefiltert (z. B. Geschwindigkeitsniveau, Beschleunigung), etwaige Größen berechnet und anschließend die interessanten Daten in Form von Diagrammen ausgegeben.

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

Spalte	Bez.	Beschreibung	Perzentile
1	LNr	Laufnummer	
2	B	Nummer zur Grafikauswertung (nicht relevant)	
3	Datum	x	
4	Uhrzeit	x	
5	ZugNr	Zugnummer	
6	Richt	Richtung 1 Regelfahrtrichtung	
7	ifzg	Fahrzeug	
8	iax	Achsen	
9	AQ	Freie Seitenbeschleunigung	
10	Vmean	Mittlere Geschwindigkeit über die Messstelle	
11	UIC_Nr	UIC Fahrzeugnummer	
12	FQZ	Fahrzeugmasse in Tonnen gesamt	50
13	APZ	Achslast in Tonnen gesamt	50
14	FQZ	Radlastkraft Q gesamt in kN	50
15	FQZ_RD2	Radlastkraft Q innen in kN	50
16	FQZ_RD1	Radlastkraft Q außen in kN	50
17	FYY	Radquerkraft Y gesamt in kN	50
18	FYY_RD2	Radquerkraft Y innen in kN	50
19	FYY_RD1	Radquerkraft Y außen in kN	50
20	STL	Längskraft T_x gesamt in kN	50
21	STL_RD2	Längskraft T_x innen in kN	50
22	STL_RD1	Längskraft T_x außen in kN	50
23	YQ_RD2	Y/Q Entgleisungskoeffizient innen	50
24	YQ_RD1	Y/Q Entgleisungskoeffizient außen	50
25	FQZ_RD2	Radlastkraft Q innen in kN	0.15
26	FQZ_RD1	Radlastkraft Q außen in kN	0.15
27	FQZ_RD2	Radlastkraft Q innen in kN	99.85
28	FQZ_RD1	Radlastkraft Q außen in kN	99.85
29	FYY_RD2	Radquerkraft Y innen in kN	0.15
30	FYY_RD1	Radquerkraft Y außen in kN	0.15
31	FYY_RD2	Radquerkraft Y innen in kN	99.85
32	FYY_RD1	Radquerkraft Y außen in kN	99.85
33	YQ_RD2	Y/Q Entgleisungskoeffizient innen	99.85
34	YQ_RD1	Y/Q Entgleisungskoeffizient außen	99.85
35	YQ_RD2	Y/Q Entgleisungskoeffizient innen	0.15
36	YQ_RD1	Y/Q Entgleisungskoeffizient außen	0.15
37	vMittelZug	Mittlere Geschwindigkeit für den ganzen Zug	50
38	STD Zug	Standardabweichung aus 37	
39	aMittelZug	Mittlere Beschleunigung bei Zuglänge 200m	
40	Reibwert	Geschätzter Reibwert	50

Tabelle 8: Ausgewertete Größen

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

3.4 Statistische Auswertung der Messdaten

3.4.1 Betrachtete Zeiträume

Die Zugfrequenz an den jeweiligen Messstellen ist sehr unterschiedlich. So sind z. B. bei der verkehrsreichen Weststrecke (Messstelle AS07) deutlich mehr Überfahrten über die Messstelle zu erwarten, als bei der Messstelle GA19. Weiters wurde nicht die Gesamtheit aller Überfahrten ausgewertet, sondern ausschließlich „Railjet"-Garnituren. Aus diesem Grund wurden die betrachteten Zeiträume entsprechend der Anzahl der Überfahrten angepasst. Die betrachteten Zeiträume wurden jeweils in die Monate September bis November des Jahres 2017 gelegt, um ähnliche Wetter- und Temperaturbedingungen zu erhalten.

Tabelle 9 zeigt für die ausgewählten Messstellen die entsprechenden Auswertezeiträume. Mit Ausnahme von GA19 werden die Messstellen praktisch nur in eine Richtung befahren. Der Auswertezeitraum von AS07 beträgt lediglich acht Tage. Da sich die Messstelle AS07 auf einem geraden Streckenabschnitt befindet und keine *Y*-Kräfte gemessen werden, ist keine Abschätzung des Reibwerts möglich. Daher wird auf die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Verfügung gestellten Niederschlagsdaten zurückgegriffen. Um in der Simulation für einheitliche Bedingungen zu sorgen, werden nur Tage herausgegriffen, an denen kein Niederschlag zu verzeichnen war (siehe Kapitel 3.4.3). Die in Tabelle 9 dargestellten Werte für die Zugüberfahrt gliedern sich in einfache und doppelte „Railjet"-Garnituren (einfach + doppelt). Doppelt geführte Garnituren bestehen aus jeweils zwei aneinandergekuppelten 32-achsigen „Railjet"-Garnituren (inklusive Lok). Daher ergeben sich 64 Radsätze. Der Auswertezeitraum in Velden erstreckt sich auch in den November, da in den Daten zum Zeitpunkt der Auswertung vor dem 25. Oktober keine UIC Fahrzeug-Nummern zur Verfügung stehen.

	AS07	**VE10**	**GA19**		**BS**
Richtung	1	1	1	2	1
Auswertezeitraum	12. Okt. bis 19. Okt.	25. Okt bis 20. Nov.	6. Sept. bis 31. Okt.		1. Okt. bis 31. Okt.
Anzahl Zugüberfahrten	136 + 101	230 + 0	201 + 0	207 + 0	344 + 0
Lokomotive Anfang	136 + 101	230 + 0	1 + 0	0 + 0	343 + 0
Lokomotive Ende	0	0	0	0	1
Lokomotive 1216	0	22	31	30	100

Tabelle 9: Zusammenfassung der Messdaten

3.4.2 Geschwindigkeitsniveau an den Messstellen

3.4.2.1 Messstelle AS07

In Tabelle 6 wurden bereits die typischen Geschwindigkeiten im Bereich der Messstellen angegeben. Aus den Messdaten können die über die Messstelle gemittelten Geschwindigkeiten der einzelnen Radsätze der „Railjet"-Garnituren ausgelesen werden. Abbildung 18 zeigt die mittlere Achsgeschwindigkeit für den gesamten Zugverband (grüne Balken) mit zugehöriger Standardabweichung (schwarze Error Bars). Die einfa-

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

che Standardabweichung wurde mit dem Faktor drei skaliert, um die Lesbarkeit zu verbessern. Da eine Darstellung aller Überfahrten sehr unübersichtlich wäre, wurde dieser repräsentative Bereich gewählt. Zu erkennen sind zwei Geschwindigkeitsbereiche. Einerseits gibt es einen Bereich, bei dem die Mittelwerte über 200 km/h liegen, wobei die Mittelwerte stark variieren und die Standardabweichungen relativ groß ausfallen. Das bedeutet, dass der Zug in diesem Bereich beschleunigt bzw. bremst (Beschleunigung a bezogen auf die Geschwindigkeitsänderung des ersten und letzten Radsatzes des gesamten Zugverbands). Unter Berücksichtigung der Traktionskräfte kommt es im Allgemeinen zur Beschleunigung. Da die Streuung sehr groß ist, ist mit unterschiedlichen Traktionskräften der Lokomotive und damit uneinheitlichen Bedingungen zu rechnen. Ein zweiter Geschwindigkeitsbereich liegt etwa bei 160 km/h, wobei hier deutlich gleichmäßigere Geschwindigkeiten über die Zuglänge zu vermerken sind. Betrachtet man alle Überfahrten unter Einbeziehung der 64-achsigen Züge, erhält man über 52 Überfahrten mit konstanter Geschwindigkeit. Für die Simulation können daher drei Bereiche definiert werden:

Bereich 1: 160 ± 2 km/h (52 Überfahrten, $0 < a < 0{,}02$ m/s²)

Bereich 2: 220 ± 5 km/h (5 Überfahrten, $0 < a < 0{,}05$ m/s²)

Bereich 3: 220 ± 5 km/h (105 Überfahrten, $0{,}1 < a < 0{,}15$ m/s²)

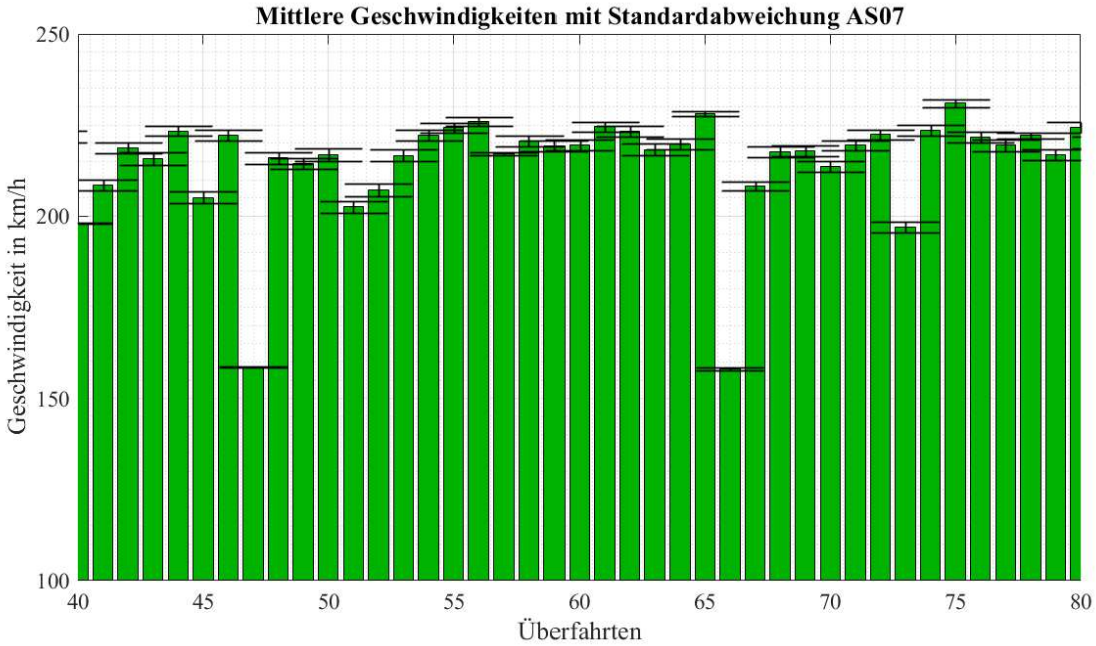


Abbildung 18: AS07 Ausschnitt aus der Geschwindigkeitsverteilung

3.4.2.2 Messstelle VE10

Abbildung 19 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung über alle Überfahrten bei VE10. Da die Überfahrten chronologisch angeordnet sind, sind bis zur Hälfte des Zeitraums sehr unregelmäßige Geschwindigkeiten mit Brems- und Beschleunigungsvorgängen zu erkennen. Erst ab der ca. 100. Überfahrt ergibt sich ein Bereich mit konstanten Geschwindigkeiten und geringer Streuung (einfache Standardabweichung, nicht skaliert). Als Ursache kommen z. B. Bauarbeiten oder sonstige Behinderungen in Betracht. Für die Simulation wurde daher gewählt:

118 ± 2 km/h (25 Überfahrten, $0 < a < 0{,}05$ m/s²)

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

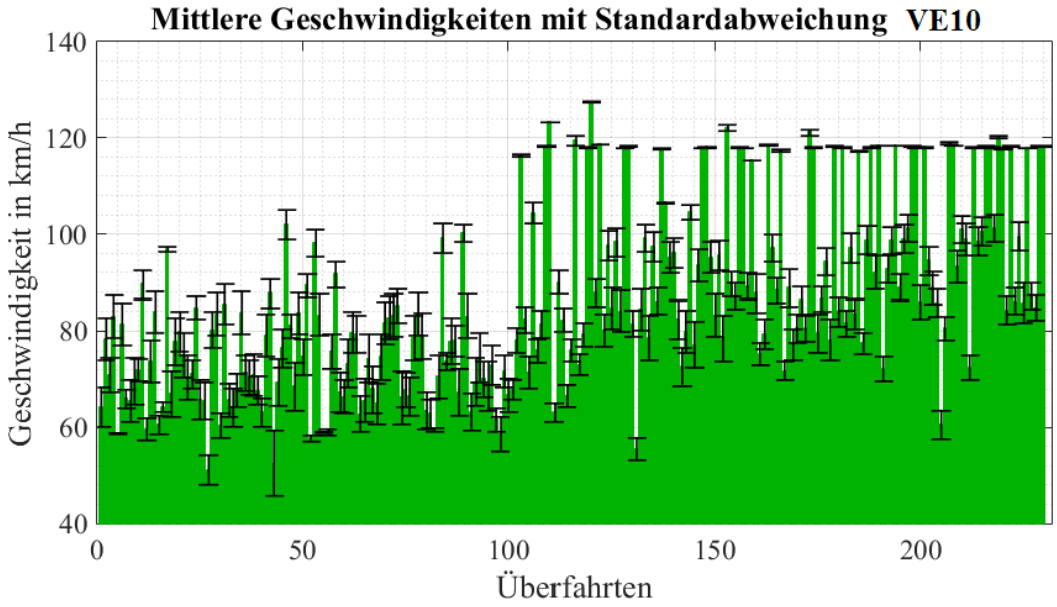


Abbildung 19: VE 10 gesamte Geschwindigkeitsverteilung

3.4.2.3 Messstelle GA19

Bei GA19 fällt es deutlich leichter, einen konkreten Geschwindigkeitsbereich zu definieren. Abbildung 20 zeigt wieder einen Ausschnitt der Geschwindigkeitsverteilung in Richtung 1 der Messstelle (bergauf). Der Großteil der Züge passieren die Messstelle mit ca. 80,5 km/h und das mit sehr gleichmäßiger Geschwindigkeit. Der gewählte Geschwindigkeitsbereich liegt daher bei:

80,5 ± 0,5 km/h (133 Überfahrten, $0 < a < 0{,}05$ m/s²)

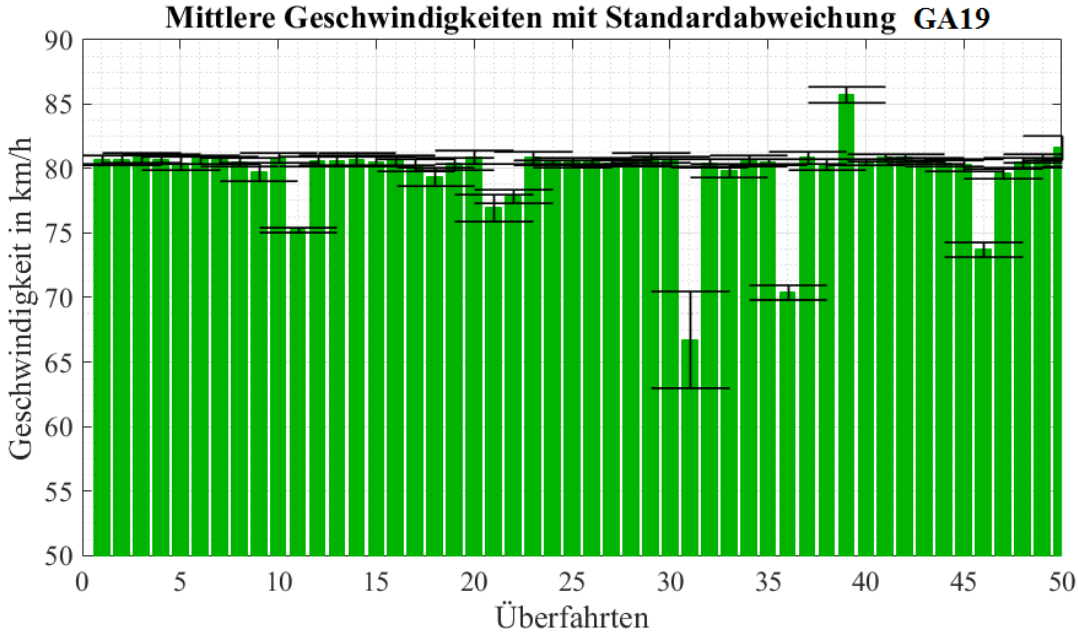


Abbildung 20: GA19 Ausschnitt aus der Geschwindigkeitsverteilung

3.4.2.4 Messstelle BS

Zuletzt wird in Abbildung 21 der gesamte Geschwindigkeitsbereich von Breitenstein abgebildet. Bis Mitte Oktober gab es im Bereich der Messstelle Bauarbeiten, die offen-

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

bar dazu geführt haben, dass ähnlich wie in VE10, erst ab der ca. 150. Überfahrt ein gleichmäßiger Bereich zu erkennen ist. Daher wurde gewählt:

61,25 ± 0,5 km/h (146 Überfahrten, 0 < a < 0,05 m/s²)

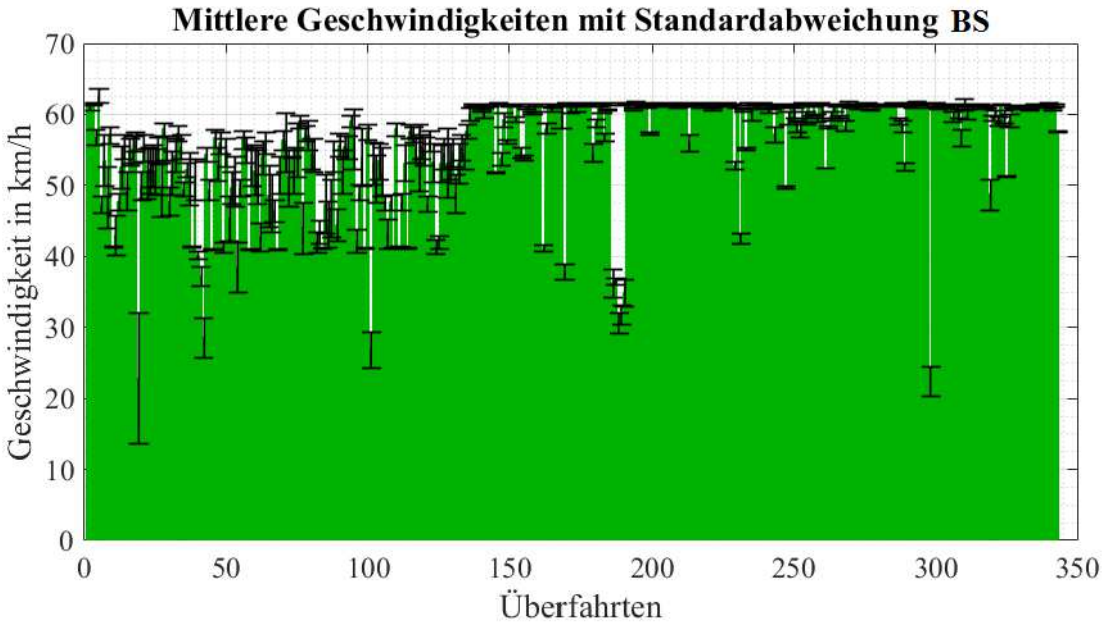


Abbildung 21: BS gesamte Geschwindigkeitsverteilung

3.4.3 Wetterdaten und Abschätzung des Reibwerts

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Reaktionskräfte zwischen Rad und Schiene stellt - wie bereits erwähnt - der Reibwert dar. Da der momentane Reibwert bei einer entsprechenden Überfahrt nicht bekannt ist, kann dieser nur abgeschätzt werden. In der Bogenfahrt kann der Reibwert über das Verhältnis Y/Q an der Innenschiene abgeschätzt werden. Da sich jeweils der Spurkranz des bogenäußeren Rades des führenden Radsatzes eines Drehgestells mit sinkendem Bogenradius der Außenschiene annähert, läuft das bogeninnere Rad im Bereich der Schienenkopfmitte. Die Q-Kraft nähert sich dann (aufgrund der Lage der Berührebene) der Normalkraft an. Somit besitzt die Y-Kraft keinen Anteil der Normalkraft mehr, sondern nur noch den Anteil der reibungsbehafteten Kraft. Kennt man zusätzlich die Tangentialkraft T_x, die ebenfalls durch Reibung erzeugt wird, lässt sich der Reibwert mit Gleichung 3.3 abschätzen (vgl. EN 14363 Anhang A.3).

$$\mu_{schätz} = \frac{\sqrt{Y^2 + T_x{}^2}}{Q} \tag{3.3}$$

Je näher man sich an der Sättigung der maximal übertragbaren Reibkraft befindet, desto besser fällt die Abschätzung aus, was bei engeren Bögen zu erwarten ist. Auf der Geraden ist eine Abschätzung daher nicht möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass mit der Messstelle AS07 keine Y-Kräfte gemessen werden. Auf der Geraden können geringe Reibwerte durch Niederschlag daher nur durch Informationen über die Niederschlagsmenge identifiziert werden. Daher wurden Wetterdaten von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik verwendet. Zusätzlich dienen diese Daten als Vergleich zur Abschätzung nach Gleichung 3.3. Zu beachten ist, dass die Messstellen und die Wetterstationen der ZAMG nicht unmittelbar geografisch an derselben Stelle sind (Distanz

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

Luftlinie AS07 und BS < 2 km, GA19 und VE10 < 5 km). Aufgrund lokaler Unterschiede in Temperatur und Niederschlagsmenge ist daher die Verwendung der Daten nicht vollständig aussagekräftig. Abbildung 22 zeigt die Regenmenge in Enns (nahe der Messstelle AS07) in einer Auflösung von 10 Minuten-Schritten. Von 12. Okt. bis 19. Okt. ist ein mehrtägiger Bereich zu erkennen, an dem kein Niederschlag verzeichnet wurde. Daher wird hier von einem trockenen Schienenzustand ausgegangen. Weitere Einflüsse auf den Reibwert durch das Wetter stellen die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit dar. Während bei allen Messstellen die Temperatur im betrachteten Zeitraum stets größer 0 °C war, kam es aufgrund der herbstlichen Bedingungen fast täglich zu Nebelbildung. Da ein direkter Einfluss von Temperatur und Nebel auf den Reibwert nicht einfach möglich ist, bleibt der Schwerpunkt auf der Niederschlagsmenge. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass es in den betrachteten Zeiträumen zu keinem Schneefall im Bereich der Messstellen gekommen ist.

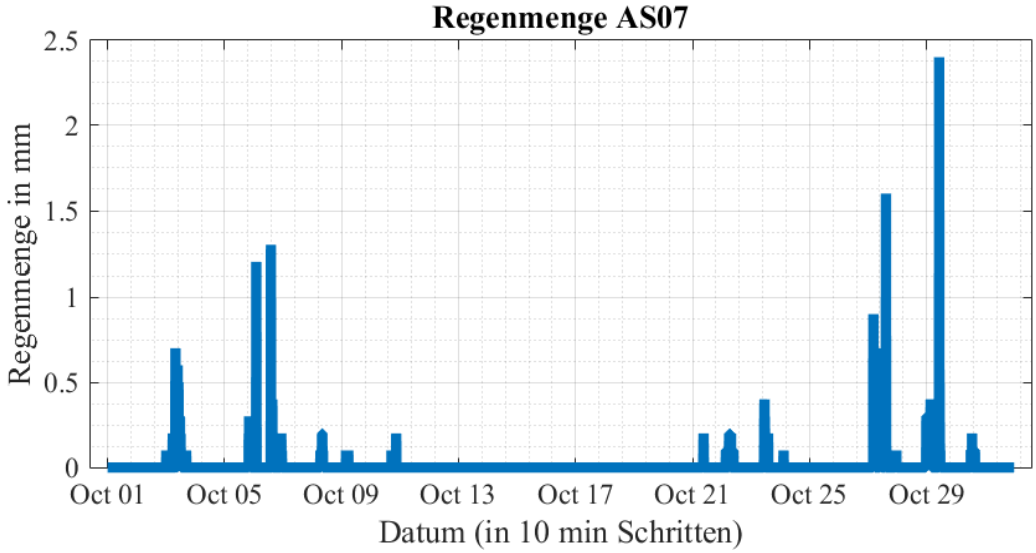


Abbildung 22: Regenmenge bei AS07

Exemplarisch wird in weitere Folge die Messstelle GA19 betrachtet. In der Bogenmessstelle in Gastein werden alle Kontaktkräfte gemessen. Daraus lässt sich der Reibwert abschätzen. Die blauen Punkte in Abbildung 23 stellen das Mittel aller geschätzten Reibwerte pro Achse und Überfahrt dar. Daher entspricht jeder Punkt einer gesamten Zugüberfahrt. Der geschätzte Reibwert erreicht Werte bis zu 0,33. Typische Reibwerte für den trockenen Fahrbahnzustand liegen im Bereich von 0,4 (siehe Kapitel 4.2.3). Das Diagramm zeigt zusätzlich die Niederschlagsmenge in mm mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten und die mittlere Tagestemperatur. Zwischen der Niederschlagsmenge (rot) und dem Reibwert ist ein deutlicher Zusammenhang zu erkennen. Bei Bereichen, in denen es zu starkem Niederschlag kommt, sind auch die geschätzten Reibwerte deutlich geringer. Man sieht, dass die Reibwertabschätzung plausible Werte liefert. Bei einem Bogenradius von knapp 600 m (GA19) ist noch nicht mit einer Sättigung zu rechnen (siehe Kapitel 5.1). Der tatsächliche maximale Reibwert bei trockenem Fahrbahnzustand wird daher voraussichtlich größer als 0,33 sein. Weiters ist zu erkennen, dass die geschätzten Reibwerte ab ca. dem 13. Oktober tendenziell sinken. Gleiches gilt für die Temperatur. Hierfür kann ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Reibwert vorliegen, oder die Temperatur beeinflusst die Messung. Die Sensorik kann zwar Temperaturänderungen kompensieren, aber gewisse von der Temperatur

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

abhängige Parameter können nicht erfasst werden (z. B. Verhalten der Bettung). Die Luftfeuchtigkeit ist in den betrachteten Zeiträumen im Tagesmittel nahezu konstant.

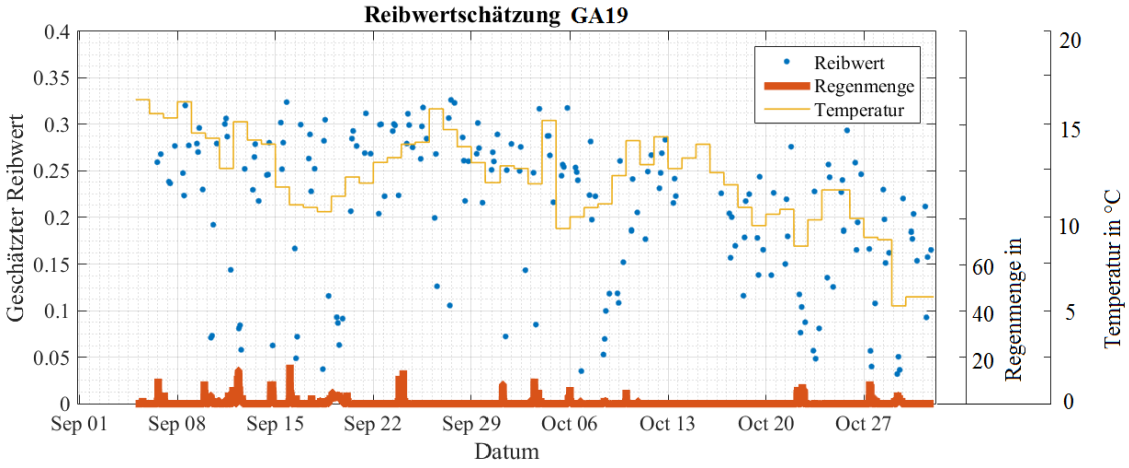
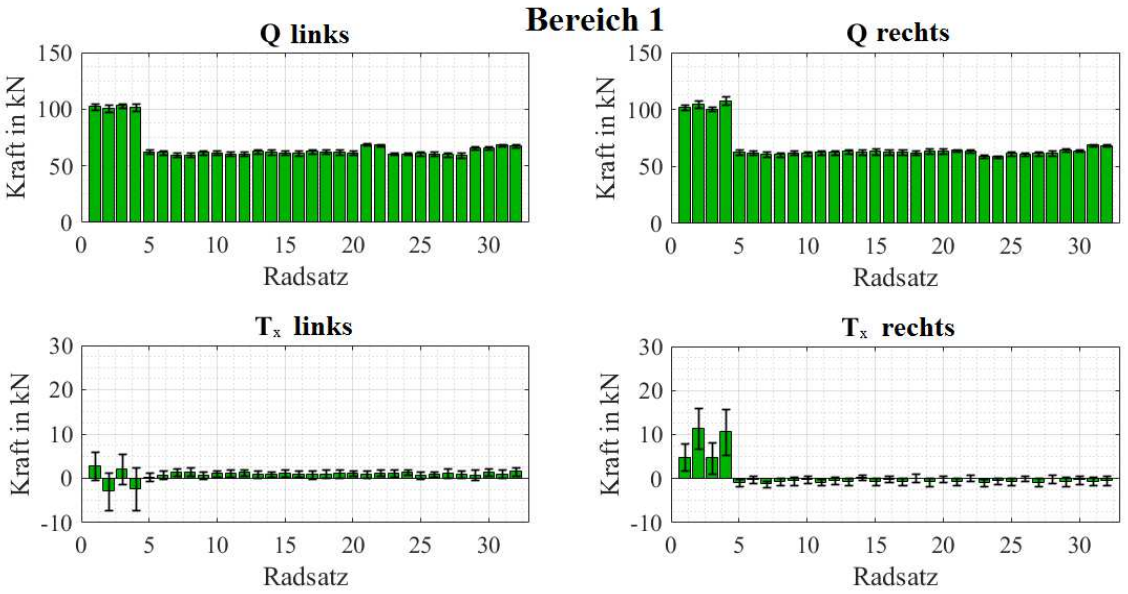


Abbildung 23: Abschätzung des Reibwerts GA19

3.4.4 Auswertung der Kräfte

3.4.4.1 AS07

Abbildung 24 zeigt die über alle Überfahrten gemittelten Kräfte, wobei nach Kapitel 3.4.2 in drei Geschwindigkeitsbereiche unterteilt wurde. Die Mittelung erfolgt über die entsprechende Achsnummer im Zugverband (außen entspricht hier der rechten Schiene).



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

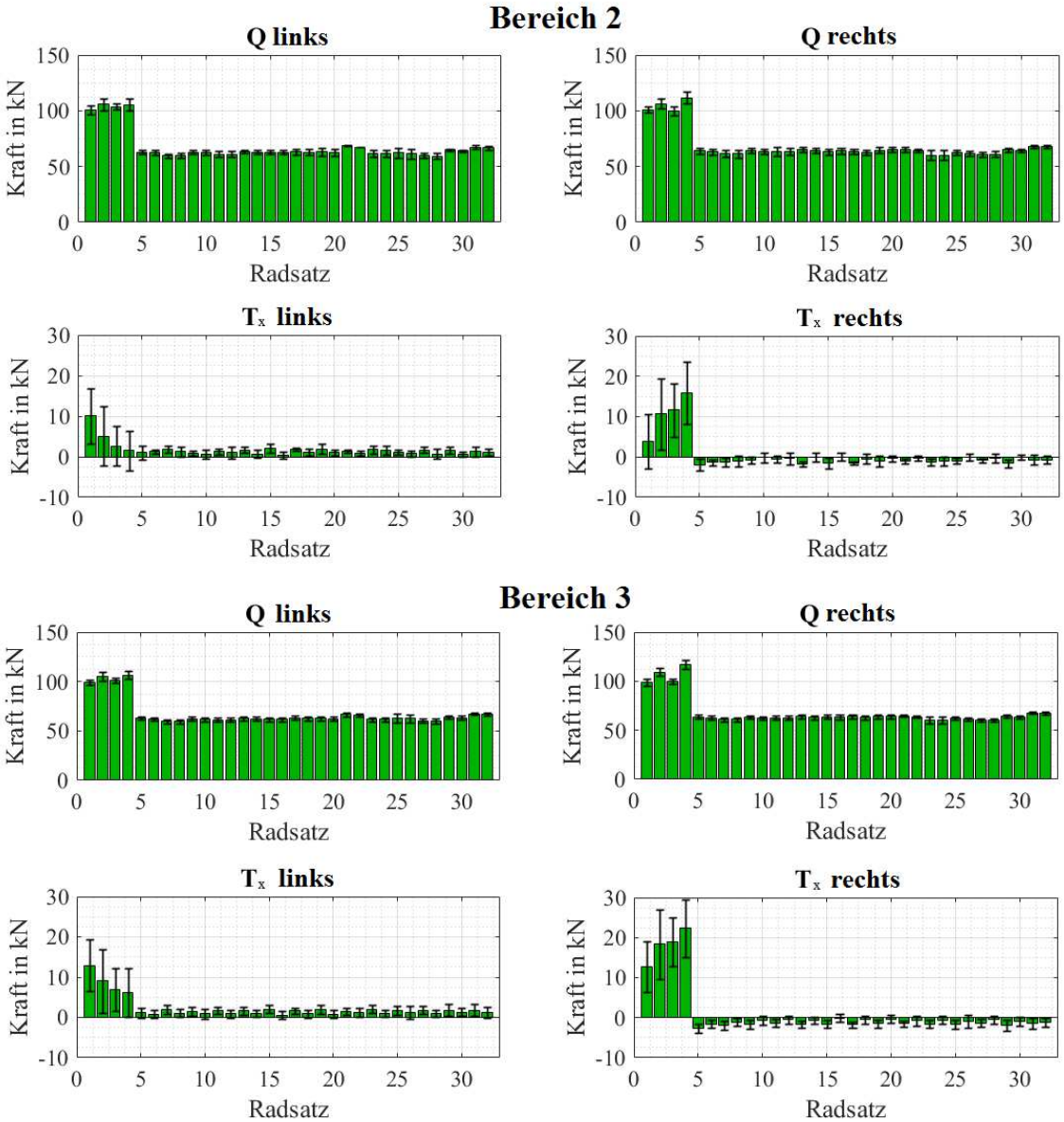


Abbildung 24: Kräfte AS07 auf 32 Achsen gemittelt

Die grünen Balken stellen jeweils die Mittelwerte pro Rad dar. Durch die schwarzen Error Bars wird die einfache Standardabweichung angezeigt. Bei der in Abbildung 24 dargestellten Mittelung wurden die 64-achsigen Züge als 32-achsige Züge aufgetrennt und in die Mittelung einbezogen (Anzahl der Überfahrten siehe Kapitel 3.4.2). Bei den drei Bereichen ist deutlich zu erkennen, dass die Q-Kräfte (h_0, wenn nicht weiter angeführt wird stets h_0 verwendet) eine relativ geringe Streuung aufweisen. Eine Streuung lässt sich unter anderem schon alleine aus den unterschiedlichen Beladungszuständen der Reisezugwagen und den Charakteristika der einzelnen Fahrzeuge erklären. In Kombination mit Abbildung 25 ist zu erkennen, dass die einzelnen Reisezugwagen (Lokomotive Achse 1 bis 4, Reisezugwagen Achsen 5 bis 32) eine sehr ähnliche Masseverteilung aufweisen. Die Achslasten ergeben sich aus der Summe der Q-Kräfte, die durch die Fallbeschleunigung dividiert werden. Die Ausnahmen bilden Wagen 5 (Achse 21 bis 24) und 7 (Achse 29 bis 32). Wagen 5 ist stets der Speisewagen und Wagen 7 ist der Steuerwagen. Dies weisen aufgrund der zusätzlichen Ausrüstung eine andere Massen-

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

verteilung und Gesamtmasse (Speisewagen etwa 4 % höher und Steuerwagen etwa 8 % höher als ein gewöhnlicher Reisezugwagen) auf. Bei der Mittelung der Kräfte aller Reisezugwagen auf vier Radsätze (siehe Abbildung 28), um die Messdaten mit der Simulation vergleichen zu können, werden daher die Steuerwagen und die Speisewagen stets ausgeschlossen.

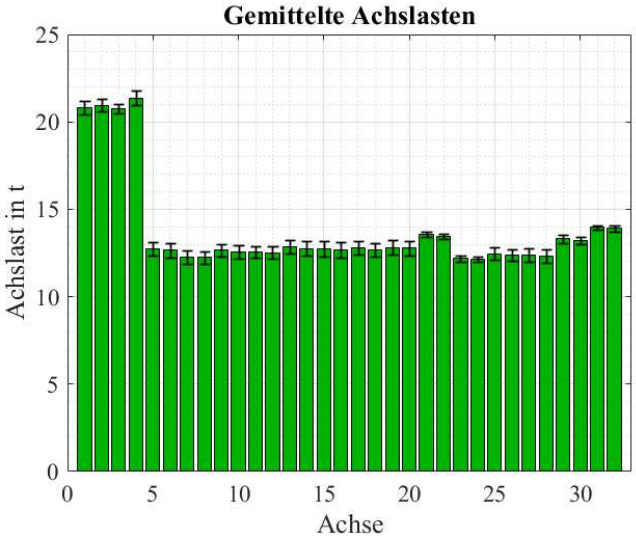


Abbildung 25: Gemittelte Achslasten AS07 Bereich 3

Die in Abbildung 24 dargestellten Kräfte T_x weisen im Vergleich zu den Q-Kräften relativ gesehen eine deutlich höhere Streuung auf. Bei den Längskräften gilt stets, dass positive Kräfte zu einer Krafteinleitung in die Schiene im Sinne einer Traktion führen (in der Simulation weist eine Traktionskraft gegen die x-Achse und ist somit negativ). Da die T_x-Kräfte bei den Reisezugwagen keinen Anteil an quasistatischen Kräften besitzen (Bremsvorgänge kommen bei den gewählten Bereichen nicht vor), sollten die quasistatischen Längskräfte bei Mittelung über eine längere gerade Strecke null ergeben. Das gilt auch für die Führungskräfte in y-Richtung, da auf einer idealen Geraden keine Führungskräfte notwendig sind, um den Zug in der Spur zu halten. Kapitel 4.5 zeigt, wieso bei idealen Geraden trotzdem Kräfte in Längs- und Querrichtung zu erwarten sind. Da die Messstelle nur 9,6 m lang ist, werden die dynamischen Kräfte (unterschiedliche Wellenlängenbereiche) in der Mittelung über die Messstelle erfasst (siehe dazu Kapitel 4.6). Die große Streuung ergibt sich wieder durch die Charakteristika der Fahrzeuge. Insbesondere die individuellen Ist-Zustände der Radprofile der Wagen können zu stark variierenden Kräften führen. Weiters sind gewisse Einflüsse des gesamten Zugverbands auf die Kräfte der einzelnen Wagen zu erwarten. Aufgrund der geringen Anzahl an Überfahrten in Bereich 2 sind die gemittelten Werte besonders kritisch zu betrachten. Die Bereiche 1 bis 3 unterscheiden sich weiters im Wesentlichen in den T_x-Kräften der Lokomotiven. So wird bei Variante 1 (konstante Geschwindigkeit mit 160 km/h) eine Traktionskraft von ca. 31 kN erreicht. Zur Bestimmung der Traktionskraft werden alle Längskräfte der Lokomotive addiert. Variante 2 (konstante Geschwindigkeit mit 220 km/h bzw. geringe Beschleunigung) benötigt eine Traktionskraft von ca. 51 kN und Variante 3 (beschleunigte Fahrt mit 220 km/h) 107 kN. Die Streuungen der Längskräfte bei den Lokomotiven fallen ebenso sehr groß aus, da die konkrete aufgebrachte Traktionskraft abhängig vom Regelsystem der Lokomotive ist. Da es sich um keine Messkampagne handelt, ist nicht davon auszugehen, dass jede Lokomotive im

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

entsprechenden Bereich mit gleicher Traktionskraft fährt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auf einem geraden Gleisabschnitt besonders die dynamischen Kräfte relevant sind. Aufgrund der relativ gesehen großen Streuungen der Werte wird es schwer, eine aussagekräftige numerische Simulation durchzuführen. Auffallend ist, dass die Traktionskräfte auf der rechten Schiene bei allen Bereichen größer als jene auf der linken Schiene sind. Das liegt an der Überlagerung von dynamischen Kraftanteilen, hervorgerufen durch die Gleislage und quasistatischen Anteile durch die Traktion. Dieses Verhalten lässt sich auch in der numerischen Simulation beobachten.

Abbildung 25 zeigt weiters bei der Lokomotive (Radsätze 1 bis 4) den typischen Entlastungseffekt. Dadurch, dass die Zugkraft am Ende der Lokomotive über die Kupplung an die Wagen übertragen wird, entsteht ein positives Moment um die y-Achse des gleisgebundenen Koordinatensystems. Dieses positive Moment bewirkt eine Entlastung der Radsätze, die vor allem beim ersten und dritten Radsatz zu erkennen ist.

Da in den vorherigen Grafiken die 64-achsigen Züge einfach in zwei 32-achsige Züge aufgetrennt wurden, dient Abbildung 26 der Rechtfertigung dieser Vorgehensweise. Es ist zu erkennen, dass sich die Werte von Achse 1 bis 32 (erste Garnitur) und Achse 33-64 (zweite Garnitur) in den *Q*-Kräften kaum voneinander unterscheiden. Auch die Kräfte in x-Richtung weisen nur geringe Unterschiede auf, die aufgrund der großen Streuung kaum ins Gewicht fallen.

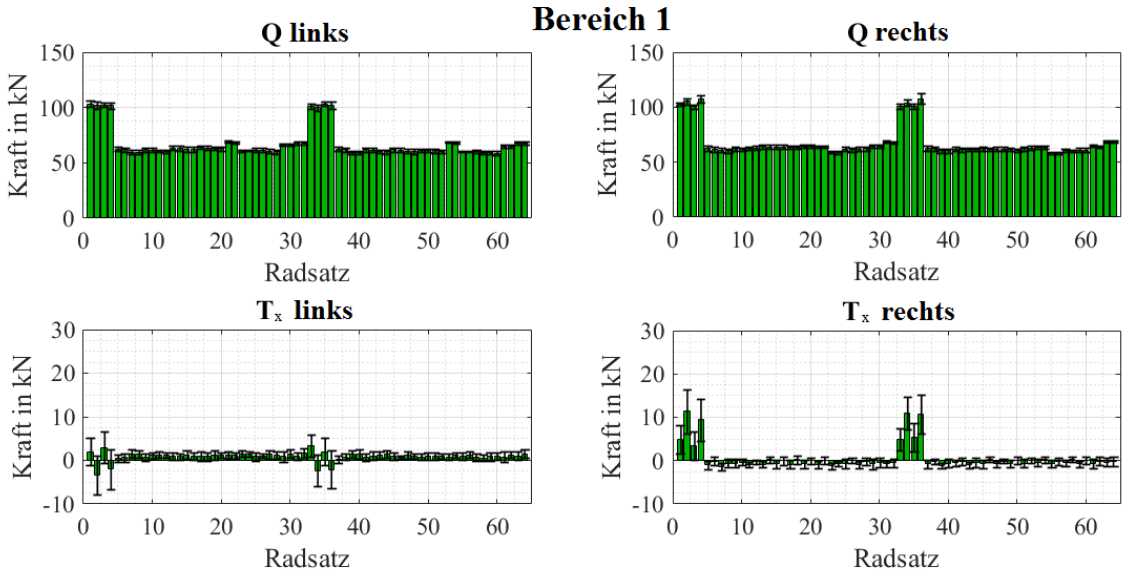


Abbildung 26: Kräfte AS07 auf 64 Achsen gemittelt

Ein denkbares Szenario bei dem sich die Traktionskräfte der Lokomotive deutlich voneinander unterscheiden wäre, wenn die erste Lok die Messstelle passiert hat und anschließend z. B. die Traktion gestoppt wird. Die zweite Lokomotive würde dann, unter der Voraussetzung, dass die Traktionssteuerung der Lokomotiven synchron erfolgt, deutlich geringere Traktionskräfte aufweisen. Die Frage, ob die Traktion der Lokomotiven synchron erfolgt, konnte im Zuge der Arbeit nicht eindeutig geklärt werden. Bei einer Geschwindigkeit von ca. 220 km/h und einer Zuglänge (eine Garnitur) von ca. 200 m ergibt sich ein dafür möglicher Zeitversatz von etwa 3 Sekunden. Je geringer die Geschwindigkeit des Zugverbandes ist, desto größer wird dieser Zeitversatz. Um solche

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

Szenarien vollständig ausschließen zu können, werden in der Simulation bei der Traktion der Lokomotive im Folgenden keine doppelten „Railjet“-Garnituren betrachtet.

Eine konkrete Ausgabe des gesamten Kräfteverlaufs über die Messstelle ist nur bedingt möglich und würde einen zusätzlichen Programmieraufwand in der Auswertung an der Messstelle erfordern. Um einen groben Überblick über den Verlauf zu erhalten, können aus den Messdaten h_1 und h_2 ausgelesen werden (jeweils für Q und Y). So können die Minimal- (0,15 %) bzw. Maximalwerte (99,85 %) über die Messstelle abgeschätzt werden. Abbildung 27 zeigt exemplarisch diese Werte für die einzelnen Radsätze eines Reisezugwagens im Bereich 3 (höhere dynamische Kräfte aufgrund hoher Geschwindigkeiten als im Bereich 1). Die Mittelung erfolgt aus allen Reisezugwagen, exklusive Speise- und Steuerwagen. Zusätzlich ist wieder die Streuung aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist die große Spannweite zwischen den Maximal- und den Minimalwerten, die z. B. bei Radsatz 2 links 21,5 kN beträgt. Somit ist auch hier zu erkennen, dass bei der vertikalen Kraft große dynamische Anteile vorhanden sind, die stark von den tatsächlichen Radformen abhängen. Der Einfluss von Flachstellen oder Polygonisierungen ist daher getrennt zu untersuchen. Die Streuungen für Minimal- und Maximalwerte sind ca. doppelt so groß wie die Streuungen der Mittelwerte (50 %), die bei ca. 2,5 kN liegen. Im Bereich 1 (nicht abgebildet) sind aufgrund der geringeren Geschwindigkeit kleinere dynamische Anteile vorhanden (Spreizung um ca. 5 kN geringer).

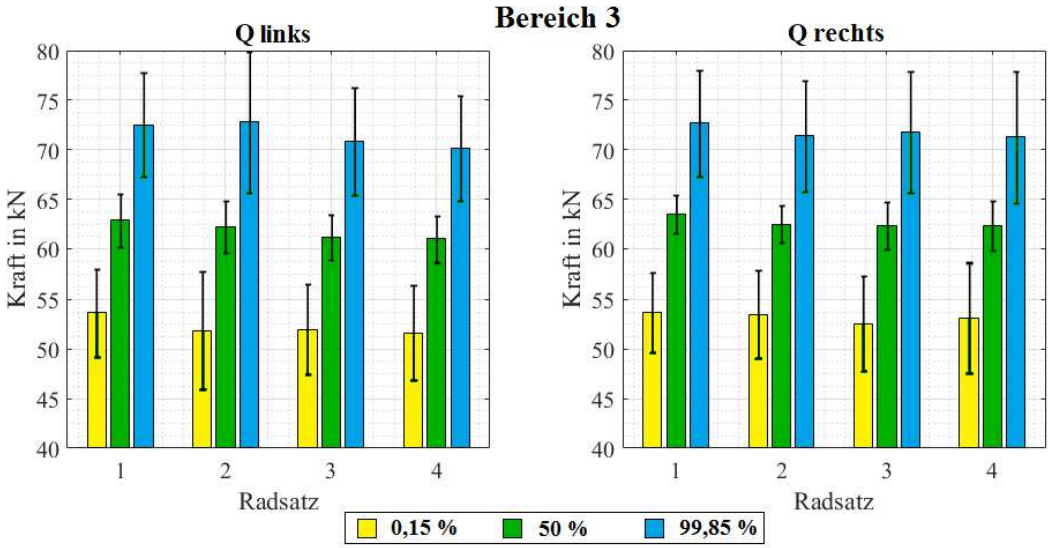


Abbildung 27: AS07 Perzentile der Q-Kräfte am Reisezugwagen

Abbildung 28 zeigt nun jene Daten, die für die Simulation als Vergleich verwendet werden (exemplarisch Bereich 3). Hierbei handelt es sich wieder um die gemittelten Werte der Reisezugwagen (h_0). Auf die gleiche Darstellung der Lokomotive wird verzichtet, da die Daten ident zu Abbildung 24 sind (nur eine Lok pro 32-achsiger Garnitur). Hier ist wieder die hohe Streuung der T_x-Kräfte hervorzuheben. Radsatz 1 entspricht stets dem führenden Radsatz. Zu beachten ist, dass hier keine Y-Kräfte gemessen werden. Eine Bestimmung von T_{qst} ist daher nicht möglich, wobei diese auf geraden Streckenabschnitten laut EN 14363 auch nicht durchgeführt werden muss.

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

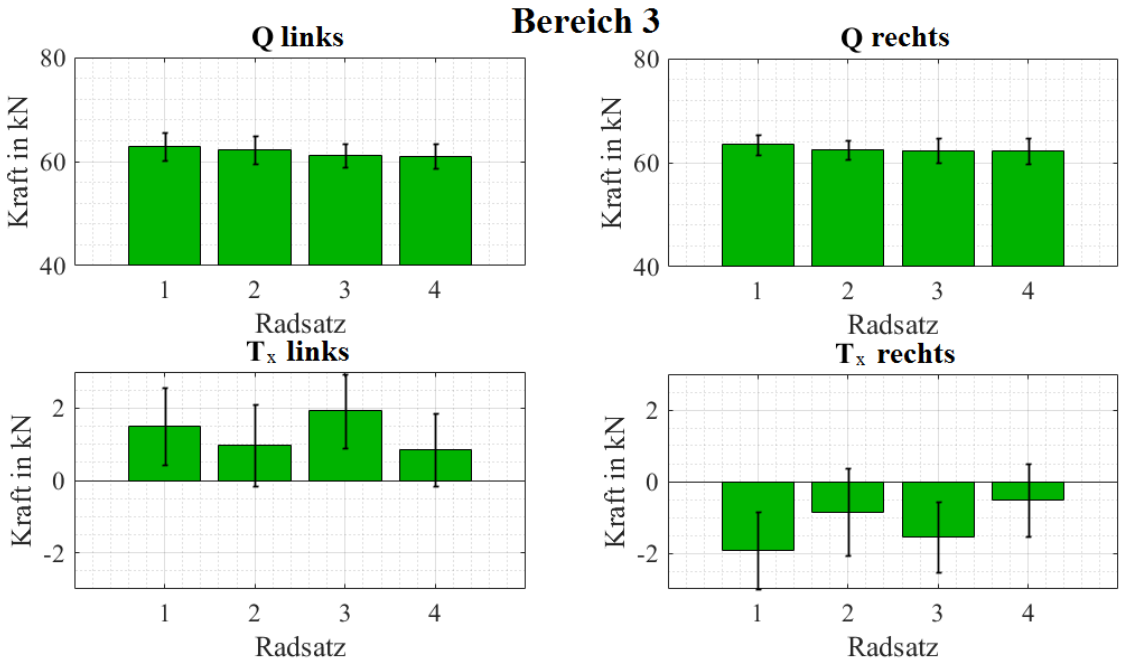


Abbildung 28: AS07 Kräfte über 4 Achsen gemittelt am Reisezugwagen

3.4.4.2 GA19

Die Messstelle GA19 befindet sich in einem Bogen mit 596 m Radius. Wie auch in dem der Norm EN 14363 zugrunde gelegten Prüfbereich ist hier bei den Führungs- und Längskräften mit hohen quasistatischen Werten zu rechnen. Die dynamischen Anteile werden dazu vergleichsweise kleiner und treten eher in den Hintergrund. Abbildung 29 zeigt die ausgewerteten Messdaten für den aus Kapitel 3.4.2 gewählten Geschwindigkeitsbereich. Hier werden alle Überfahrten für die Mittelung auf 32 Achsen in Richtung 1 betrachtet, ohne Rücksicht auf die Wetterlage zu nehmen. Daher gibt es keine Einschränkung bezüglich des geschätzten Reibwerts. Richtung 1 entspricht einem Rechtsbogen, wobei die Außenschiene mit „außen“ in den folgenden Diagrammen gekennzeichnet ist. Die Darstellung erfolgt in gleicher Weise wie bei der Messstelle AS07.

Im betrachteten Zeitraum passierten die Messstelle ausschließlich einfach geführte „Railjet“-Garnituren (32 Achsen). Aus der Mittelung über 133 Züge erkennt man wieder für die *Q*-Kräfte, dass die Streuung relativ gesehen gering ausfällt. Aufgrund der Bogenfahrt und der daraus resultierenden freien Seitenbeschleunigung von etwa 0,45 m/s² ergibt sich eine Verlagerung der *Q*-Kräfte zur Außenschiene hin. Die *Q*-Kräfte zeigen je Wagen, mit Ausnahme von Speisewagen und Steuerwagen, gleiche Verläufe. Zu erkennen sind auch die höheren *Q*-Kräfte der Lokomotive, die sich diesmal am Ende des Zugverbands befindet und somit den Zugverband schiebt (Steuerwagen voraus).

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

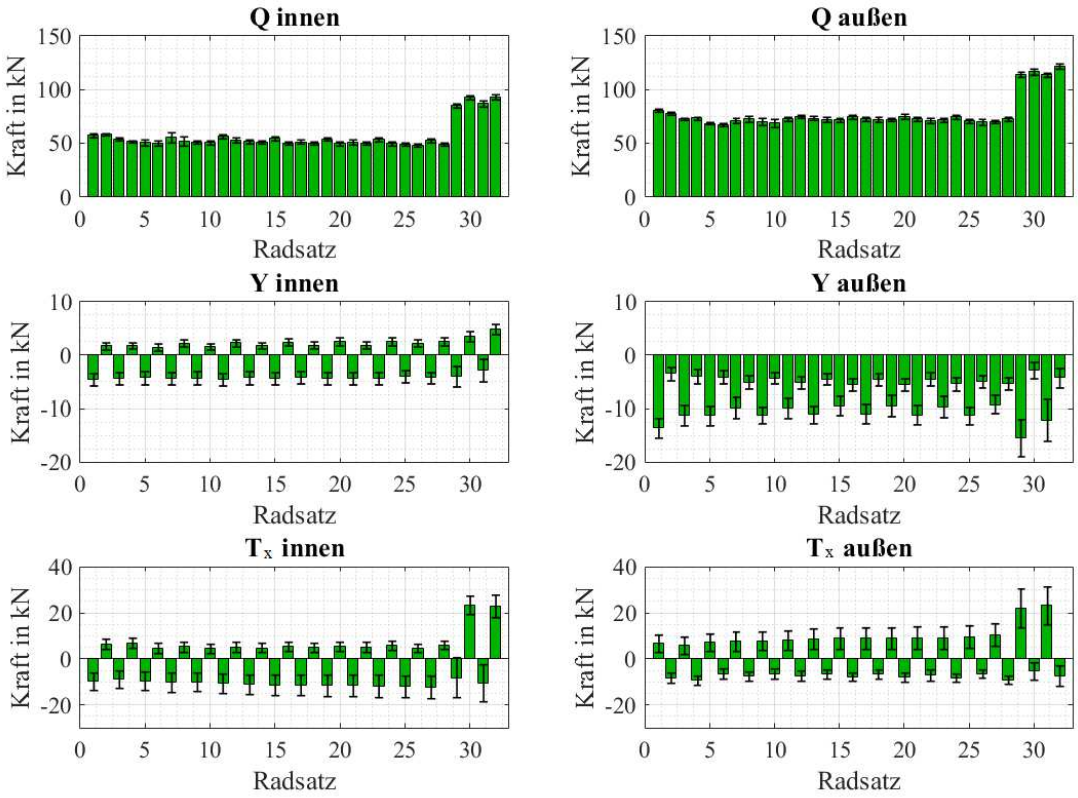


Abbildung 29: GA19 Kräfte über 32 Achsen gemittelt

Analoges gilt im Wesentlichen auch für die *Y*-Kräfte. Hier sind bei den gleichwertigen Wagen nur sehr geringe Schwankungen über die Länge des Zugverbands zu vermerken. Zu beachten ist, dass die Vorzeichen der *Y*-Kräfte in GA19 aus der Messdatenauswertung je Schiene unterschiedlich sind. Während die Außenschiene mit dem in EN 14363 verwendeten Koordinatensystem konform ist, zeigt die y-Achse der Innenschiene in die entgegengesetzte Richtung, also in Fahrtrichtung nach links. Beim Vergleich mit der numerischen Simulation werden die Vorzeichen an der Innenschiene später angepasst. Bei den Längskräften ist ausgehend von der Lokomotive tendenziell eine geringe Abnahme der Mittelwerte je Wagen über die Länge zu beobachten (Vorzeichen gleich wie AS07). Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei Betrachtung der Richtung 2 (siehe Anhang A), wobei hier die Lokomotive an der Zugspitze gereiht ist und die Kräfte in Längsrichtung zum Zugende hin zunehmen. Zusätzlich kommen bei Richtung 2 noch Bremskräfte der Lok ins Spiel.

Während die Längs- und Lateralkräfte in Abbildung 29 noch eine relativ große Streuung aufweisen, kann durch Einschränken des geschätzten Reibwertes auf $\mu > 0{,}25$ (Ausscheiden aller Messfahrten mit kleinerem μ) eine deutlich geringere Streuung in den gemittelten Messdaten erreicht werden (siehe Abbildung 30). Dadurch sind einheitliche Bedingungen zu erreichen (trockener Fahrbahnzustand). Durch die Einschränkung auf geringere Reibwerte verringert sich die Anzahl der ausgewerteten Zugüberfahrten auf 56. Die Kräfte in z-Richtung sind im Vergleich von Abbildung 29 zu Abbildung 30 nahezu gleich, während sich die Längs- und Lateralkräfte deutlich verändern. Besonders auffällig ist, dass die T_x-Kräfte der führenden Radsätze (innen und außen) um ca. 2,5 kN ansteigen (bei $\mu > 0{,}25$). Der Anstieg ist durch den Wegfall des statistischen Einflusses

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

der Fahrten mit geringen Reibwerten zu erklären, die somit nicht mehr in der Mittelung aufscheinen. Höhere Reibwerte ermöglichen höhere Tangentialkräfte, und die Sättigung tritt nicht so bald ein. Bei den *Y*-Kräften kommt es zu einer leichten Reduzierung der Kräfte an den äußeren führenden Radsätzen, die durch größere Kräfte an der Innenschiene der nachfolgenden Radsätzen kompensiert wird. Dadurch bleibt die Summe der *Y*-Kräfte pro Wagen praktisch gleich (zu beachten sind die Vorzeichen an der Innenschiene). Für eine genauere Betrachtung der Summe der *Y*-Kräfte siehe Kapitel 3.4.5.

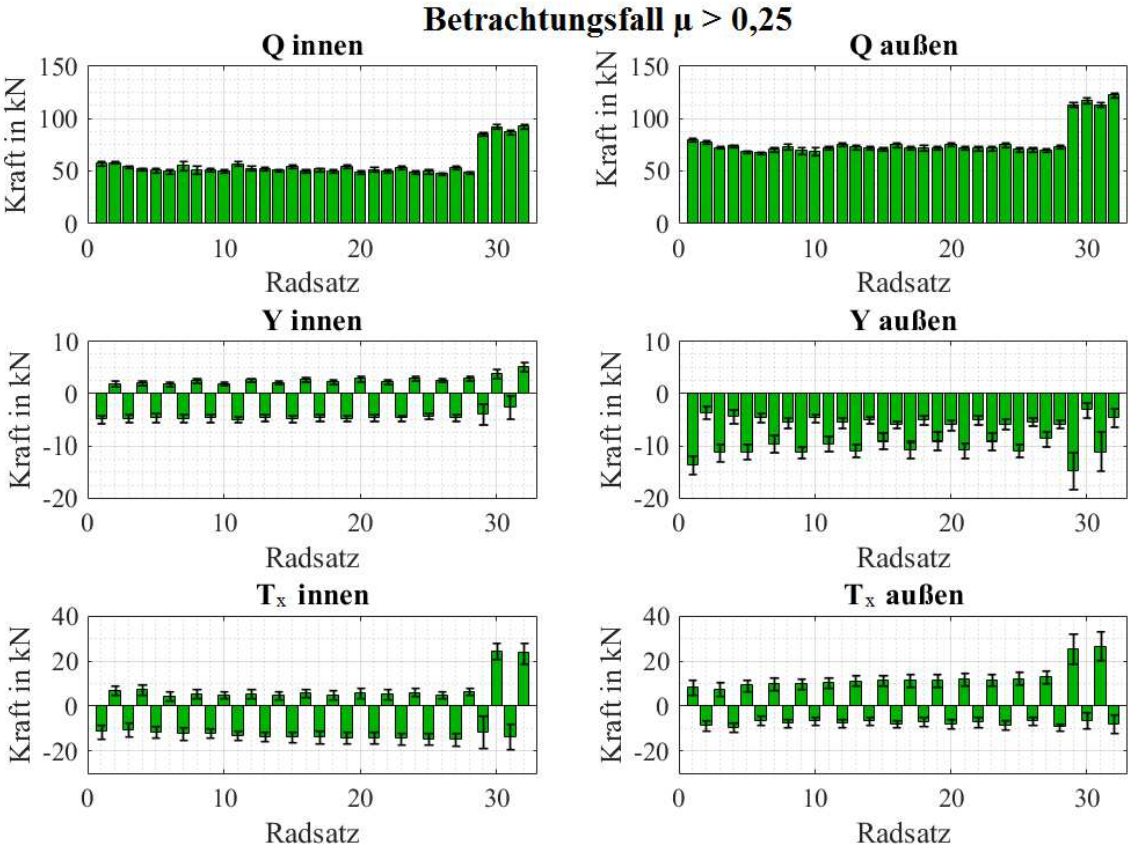


Abbildung 30: GA19 Kräfte über 32 Achsen gemittelt Betrachtungsfall μ > 0,25

Auch in diesem Betrachtungsfall tritt bei den T_x-Kräften eine gewisse Abhängigkeit über den Zugverband auf. Da diese aber vergleichsweise gering ist, wird eine Mittelung über vier Achsen der jeweiligen Reisezugwagen für den Vergleich mit der numerischen Simulation durchgeführt (siehe Abbildung 33). Anhang A zeigt die Kräfteverteilung in Richtung 2 bei insgesamt 54 gemittelten Überfahrten. Für die gemessene Traktionskraft der Lokomotive ergeben sich 61 kN in Fahrtrichtung 1 und -22,5 kN in Fahrtrichtung 2 (Bremsvorgang)

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der Achslasten über den Zugverband, wobei für die folgenden Grafiken jeweils Richtung 1 mit μ > 0,25 herangezogen wird. Zu berücksichtigen ist, dass die Achslasten bei der Datenauswertung an der Messstelle auch im Bogen durch einfaches Summieren der *Q*-Kräfte innen und außen ermittelt werden. Aufgrund der Überhöhung von ca. 60 mm im Bereich der Messstelle kommt es durch die Bogenfahrt allerdings zu einem zusätzlichen quasistatischen Anteil in den vertikalen Radkräften. Nach [45] lassen sich die *Q*-Kräfte im Bogen vereinfacht nach Gleichung 3.4 bestimmen, wobei die Gleichung im Sinne der Berücksichtigung der Streckenlängs-

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

neigung erweitert wurde. Nach Umformung erhält man mit Gleichung 3.5 die Achslast m_A in der Dimension Masse (Formelzeichen gleich wie bei Gleichung 3.1 und 3.2, siehe Seite 22).

$$Q_{innen} + Q_{außen} = \left(\frac{v^2}{R}\sin(\psi) - g\cos(\psi)\cos(\alpha)\right) m_A \tag{3.4}$$

$$m_A = \frac{(Q_{innen}+Q_{außen})}{\left(\frac{v^2}{R}\sin(\psi)-g\cos(\psi)\cos(\alpha)\right)} \tag{3.5}$$

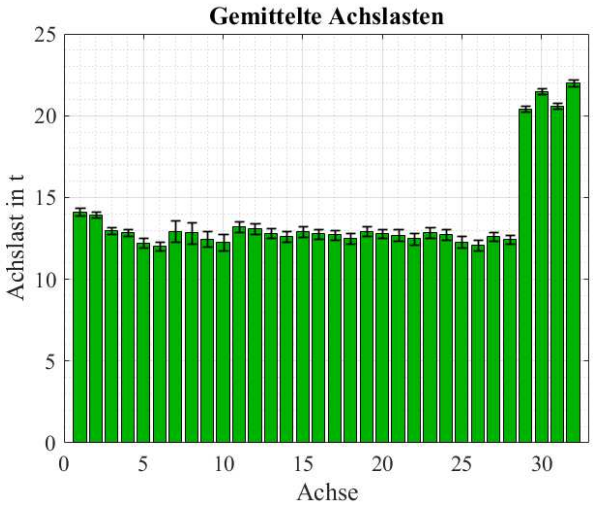


Abbildung 31: Gemittelte Achslasten GA19

Die 0,15 % und 99,85 % Werte, dargestellt in Abbildung 32, geben wie bei der Messstelle AS07 wieder einen Hinweis auf den Anteil der dynamischen Kräfte über die Messstelle, wobei diese Werte im Bogen auch für die *Y*-Kräfte vorhanden sind.

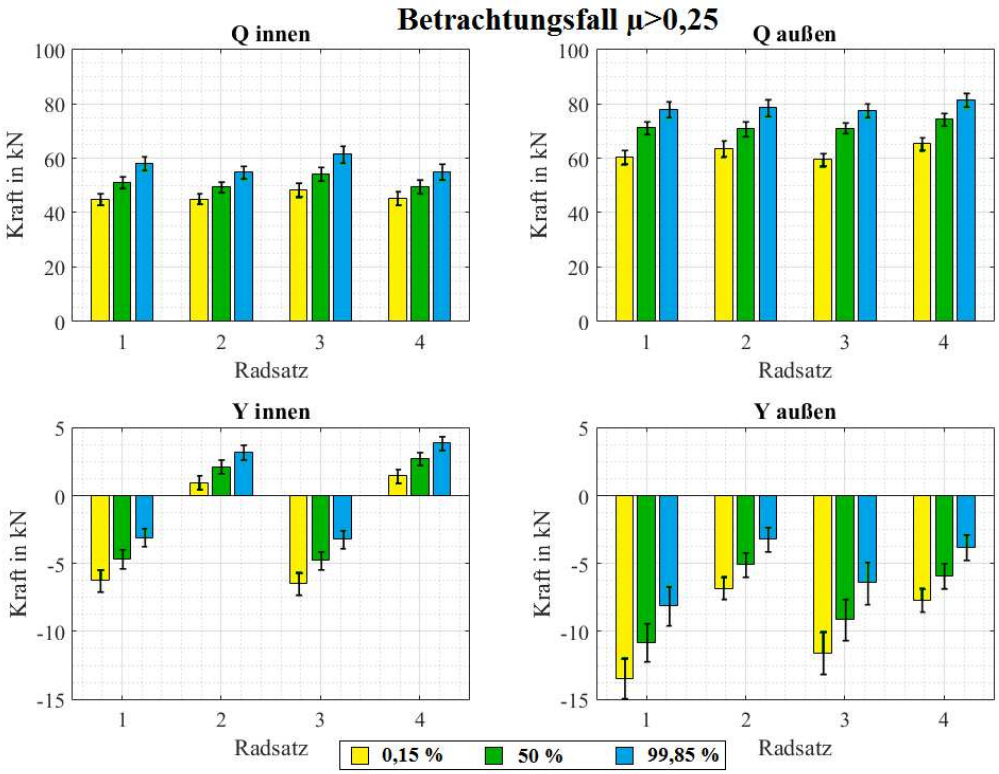


Abbildung 32: GA19 Perzentile am Reisezugwagen

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

Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwerten liegt bei den *Q*-Kräften diesmal unter 20 kN an der Außenschiene. Weiters sind die Streuungen der einzelnen Werte deutlich geringer als jene bei AS07. Auch bei den *Y*-Kräften fallen dynamische Anteile mit einer Spreizung von bis zu 10 kN des führenden Radsatzes an der Außenschiene auf. Als Erklärung wären hier entsprechende Gleislagefehler denkbar, die z. B. zu kurzzeitigem Anlaufen des Spurkranzes an der Außenschiene führen, was auf die dynamischen Anteile hindeutet. Die Streuung der Maximal- und Minimalwerte können auch hier wieder sehr stark von den tatsächlichen Radprofilformen und Radunrundheiten beeinflusst werden.

Abbildung 33 zeigt nun die Daten für den Vergleich mit der Simulation. Hierbei handelt es sich wieder um die gemittelten Werte der Reisezugwagen (h_0). Zu erkennen ist, dass sich die Streuungen für alle Kräfte in Grenzen halten. Radsatz 1 entspricht stets dem führenden Radsatz. Bei den *Y*-Kräften gilt es wieder, auf die Vorzeichen zu achten. Eine Bestimmung von T_{qst} laut Norm ist mit den Daten bereits möglich und wird in Kapitel 5.2.3 im direkten Vergleich mit den simulierten Ergebnissen angeführt.

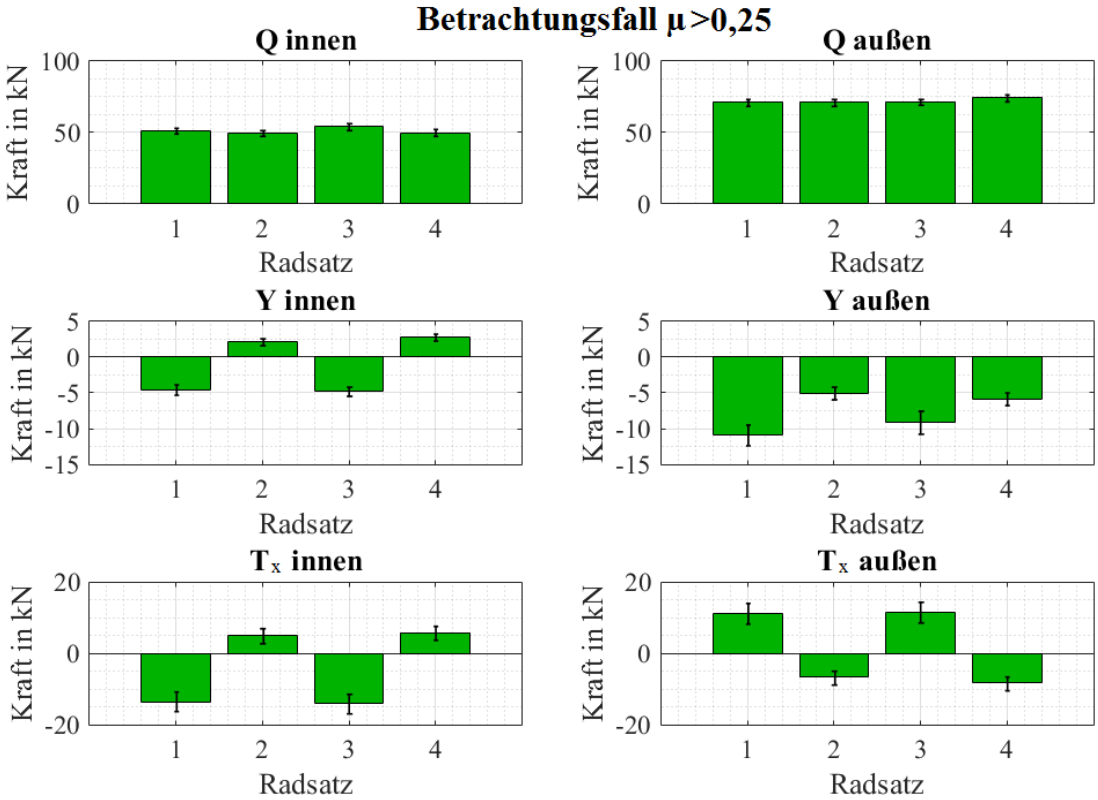


Abbildung 33: GA19 Kräfte über 4 Achsen gemittelt am Reisezugwagen

Abbildung 34 zeigt schließlich die aus fahrdynamischer Sicht wichtigen Größen *Y*/*Q* an der Außen- und Innenschiene. Der Wert an der Innenschiene dient unter anderem zur Bestimmung des Reibwertes (falls T_x nicht zur Verfügung steht), wobei aufgrund der Lage der Kontaktpunkte jeweils der führende Radsatz des Drehgestells relevant ist (1 und 3). Hier wird h_0 (50 % Wert) verwendet, da der Mittelwert für die Abschätzung des Reibwerts relevant ist. Bei der Außenschiene hingegen sind die Maximalwerte (h_2) interessant und können auch für die Betrachtung der Sicherheit gegen Entgleisen herangezogen werden, wobei diese Größe nicht ident mit dem für die EN 14363 benötigten

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

Wert ist. Erwartungsgemäß ist zu erkennen, dass der führende Radsatz den größten Wert aufweist. Das weist auf eine Tendenz eines anlaufenden Spurkranzes an die Außenschiene hin.

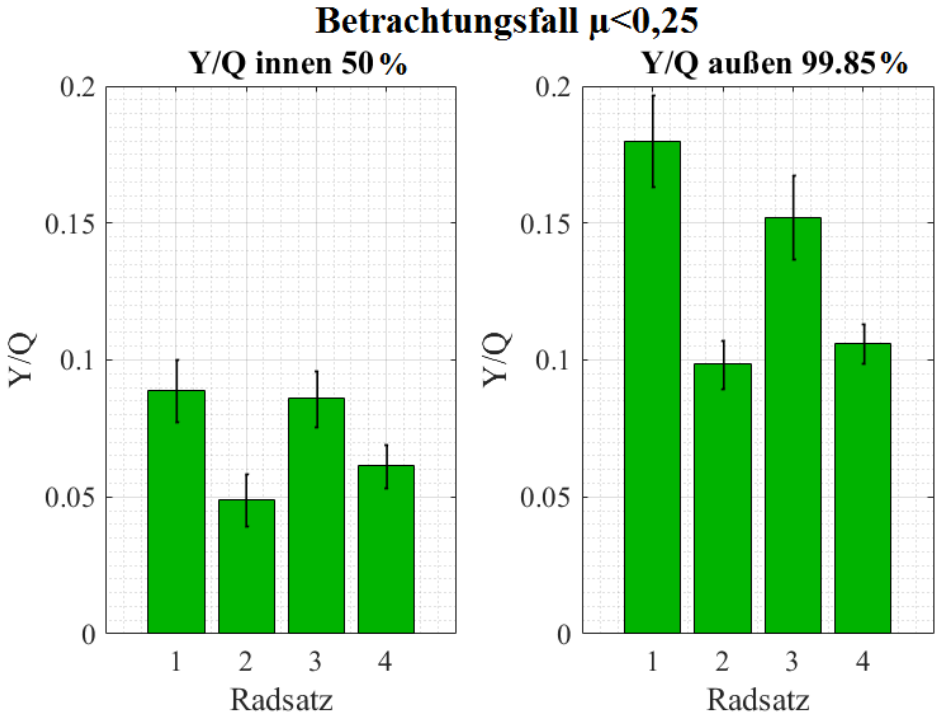


Abbildung 34: GA19 *Y/Q* am Reisezugwagen

3.4.4.3 Weitere Messstellen

Da die weiteren Messstellen keine wesentlich anderen Informationen liefern als jene bei Gastein werden die Grafiken ausschließlich in Anhang B wiedergegeben. Beim Vergleich der Messdaten mit jenen der Simulation in Kapitel 5.2 sind die Messdaten dann ohne Error-Bars für die Streuung angeführt. Die Streuungen können dann dem Anhang entnommen werden. Anzumerken ist, dass besonders die Messdaten der Messstelle Breitenstein sehr hohe Schwankungen der Kräfte wiedergeben (h_1 und h_2), was auf einen ausgeprägten lokalen Gleislagefehler zurückzuführen ist.

3.4.5 Summe aller *Y*-Kräfte

Für eine grobe Plausibilitätsuntersuchung an den Messstellen im Bogen können die *Y*-Kräfte herangezogen werden. Betrachtet man einen Wagen, der mit konstanter Geschwindigkeit einen Bogen durchfährt, so muss die Summe aller *Y*-Kräfte in etwa das Produkt aus der Masse des Fahrzeugs und der freien Seitenbeschleunigung entsprechen (Punktmassemodell). Aufgrund der im Zugverband vorhandenen Wechselwirkungen und der Tatsache, dass die Messstellen keinen momentanen Wert aufzeichnen, sondern die Mittelung über eine gewisse Wegstrecke für jeden einzelnen Radsatz, darf keine perfekte Übereinstimmung erwartet werden. Weiters wird die theoretische freie Seitenbeschleunigung aus den Gleislagedaten und der mittleren Fahrgeschwindigkeit der Wagen bestimmt. Diese entspricht daher nicht exakt dem tatsächlichen Wert. Als Abschätzung gilt daher mit *m* als Wagenmasse:

$$\sum_{i=1}^{Radsätze} Y_{innen,i} + Y_{außen,i} \approx m a_q \tag{3.6}$$

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

Für eine durchschnittliche Masse der „Railjet“-Reisezugwagen von ca. 50 t und einer freien Seitenbeschleunigung von ca. 0,5 m/s² ergeben sich bei GA19 pro Wagen etwa 25 kN. Wird die Summe aller *Y*-Kräfte aus den Messdaten gebildet, so werden im Schnitt in Fahrtrichtung 1 (ohne Einschränkungen des Reibwerts im definierten Geschwindigkeitsbereich) ca. 26 kN erreicht. In der Gegenrichtung werden bei der Messung ca. 20,5 kN erreicht, wobei der theoretische Wert bei ca. 22 kN und jener der Simulation bei ca. 23 kN liegt. Hierzu sei angemerkt, dass durch diese Plausibilitätsüberprüfung ein Fehler bei der Berechnung der Messdaten an der Messstelle GA19 entdeckt werden konnte (Details zu den einzelnen Messstellen siehe Kapitel 5.2). Anhang C zeigt zusätzlich Diagramme, die die Differenz aus dem theoretischen und dem gemessenen Wert abbilden.

Eine interessante Beobachtung konnte bei Darstellung der Summe der *Y*-Kräfte aller „Railjet“-Reisezugwagen gemacht werden (siehe Abbildung 35). Hier ist die Summe aller *Y*-Kräfte über die einzelnen Wagen angeführt. Jeder blaue Punkt entspricht einem Wagen. Die rot markierten Werte stammen jeweils vom Wagen mit der UIC Nummer 73 81 85-90 654-7. Da es sich hier um die Summe aller *Y*-Kräfte handelt, ist es überraschend, dass trotz ähnlicher Wagenmasse und Geschwindigkeit deutlich geringere Werte erzielt werden als bei den anderen Wagen. Als Erklärung kommt in Betracht, dass z. B. die Berührgeometrie einen Einfluss auf die Messung der Messstelle hat und so die Genauigkeit der Messung abweichen kann.

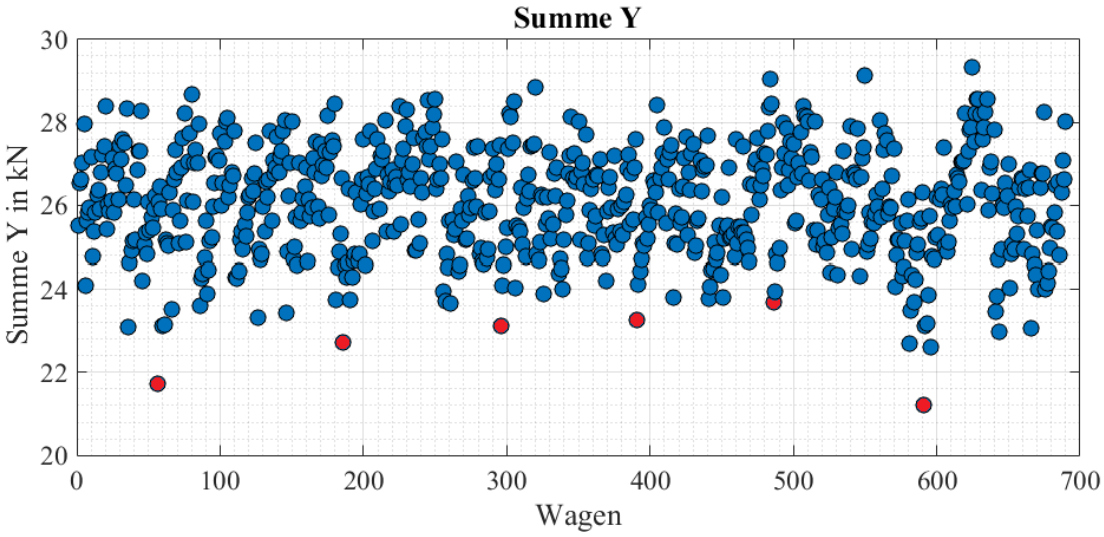


Abbildung 35: Summe Y GA19 Reisezugwagen

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

4 Simulation

4.1 Mehrkörpersysteme

„Der Begriff des Mehrköpersystems (MKS) - im Englischen Multi-Body-System - bezeichnet ein System bestehend aus mehreren Körpern, die miteinander durch Koppelelemente verbunden und damit in ihrer Bewegungsvielfalt eingeschränkt sind.“ [48]. Reale mechanische Problemstellungen bestehen aus einer Vielzahl von elastischen, massebehafteten Körpern, auf die Kräfte und Momente wirken. Zusätzlich können Elemente wie Federn oder Dämpfer (mit linearer oder nichtlinearer Charakteristik) zwischen Körpern wirken. Um solche mechanischen Probleme ingenieurmäßig lösen zu können, ist eine Vereinfachung des Systems notwendig, wobei diese nur so weit gehen darf, dass das gesuchte Verhalten noch abgebildet werden kann. Z. B. können die unterschiedlichen deformierbaren Körper eines Systems als starre Körper abgebildet werden, sofern die Deformationen das Systemverhalten nicht stark beeinflussen. Je detaillierter die Modellbildung erfolgt, desto höher wird die Anzahl von Parameter, die benötigt werden, um das Modell zu beschreiben. Ziel ist es daher, stets einen Mittelweg im Detaillierungsgrad des Modells zu finden, der einerseits das Verhalten des Systems wiedergibt und andererseits eine sinnvolle Wahl von Parametern ermöglicht [14]. Mit einer entsprechenden Modellbildung kann mithilfe der Methoden der MKS beispielsweise im Schienenfahrzeugbereich eine Auslegung von Fahrwerken behandelt werden. Mit den aus der MKS Simulation erhaltenen Kräften und Lasten ist es möglich, Bauteile mit den Methoden der Finite Elemente (FEM) zu dimensionieren. Zwar können FEM auch zur Analyse des dynamischen Verhaltens verwendet werden, allerdings haben FEM Modelle meist weit über eine Million Freiheitsgrade. Das erhöht die Rechenzeit und damit die Kosten [48].

Für ein System mit p Körpern ergibt sich mit einer bestimmten Anzahl an holonomen Bindungen r_H die Anzahl der verallgemeinerten Koordinaten der Lage f_r eines Systems nach Gleichung 4.1. Die Anzahl der Freiheitsgrade der Geschwindigkeit g kann durch zusätzliche nicht holonome Bindungen r_Z nach Gleichung 4.2 bestimmt werden [48].

$$f_r = 6p - r_H \tag{4.1}$$

$$g = f_r - r_Z \tag{4.2}$$

Die Bewegungsgleichungen werden gemäß der Newton´schen Mechanik unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Methoden (siehe z. B. [48]) aufgestellt. Für jeden Freiheitsgrad muss eine im Allgemeinen gekoppelte Differentialgleichung zweiter Ordnung gelöst werden. Bei Vorhandensein von Schleifenstrukturen im mechanischen Modell werden zusätzlich algebraische Gleichungen hinzugefügt. Im Ganzen muss daher ein Differential-Algebraisches-System von Gleichungen gelöst werden. Die Aufbereitung der Gleichungen übernehmen heutzutage MKS Softwarepakte, die auch eine anschließende numerische Lösung des Gleichungssystems ermöglichen, wobei die Integration der Differentialgleichungen über die Zeit erfolgt.

Für diese Diplomarbeit wurde die MKS Software „Simpack“ verwendet, die je nach Anwendungsgebiet (z. B. Automobilbereich, Schienenfahrzeugsektor) spezielle Module und Elementbibliotheken für eine möglichst realitätsnahe Simulation bietet [13]. Die Software konnte in Form einer akademischen Lizenz kostenfrei genutzt werden.

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

4.2 Modellbildung

4.2.1 Simples mechanisches Modell

Aus [3] (siehe Abbildung 36) kann das simpelste Modell entnommen werden, das zur Beschreibung eines vierachsigen Reisezugwagens mit zwei Drehgestellen dient. Die Verbindung zwischen den Radsätzen und dem Drehgestellrahmen wird Primärfesselung genannt. Die Sekundärfesselung erfolgt zwischen dem Drehgestellrahmen und dem Wagenkasten. Die Fesselungselemente werden durch Feder- und Dämpferelemente ausgeführt, wobei die entsprechenden Elemente die Charakteristika der realen Elemente abbilden können (z. B. Luftfederung). Im Zuge der Diplomarbeit wurde ein solches simples Modell mit aus [13] gegebenen Parametern aufgebaut, um die Modellbildung und den Umgang mit „Simpack“ zu vertiefen. Weiters ist noch zu erwähnen, dass für Komfortbetrachtungen auch das elastische Verhalten des Wagenkastens berücksichtigt werden sollte. Da bei dieser Diplomarbeit die quasistatischen Kräfte im Vordergrund stehen, werden die Eigenformen des Wagenkastens hier nicht berücksichtigt.

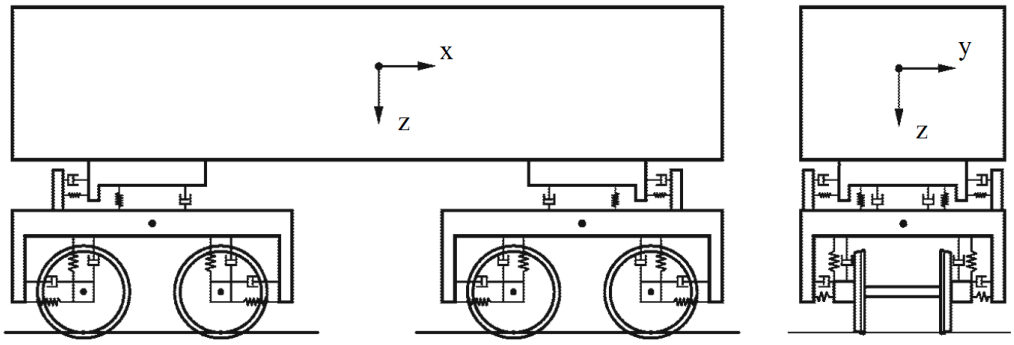


Abbildung 36: Einfache Modellbildung [3]

4.2.2 Aufbau des MKS-Modells

Einige technische Spezifikationen zu den betrachteten Schienenfahrzeugen wurden bereits in Kapitel 2.6 angeführt. Die Fahrzeugmodelle des Reisezugwagens und der Lokomotive wurden von der Firma Siemens zur Verfügung gestellt, die diese zur Auslegung von Fahrzeugen verwendet. Aufgrund der umfangreichen Erfahrungs- und Vergleichswerte im Bereich der Modellbildung der Firma Siemens können die Modelle als validiert angesehen werden. Kennlinien der Fesselungselemente (z. B. Steifigkeiten), die in den Modellen verwendet werden, wurden durch Messungen an realen Bauteilen ermittelt.

Die in Kapitel 3.4.4 gezeigten Messergebnisse erlauben, dass nicht der gesamte Zugverband simuliert wird, sondern jeweils ein einzelner Reisezugwagen und eine einzelne Lokomotive. Etwaige Wechselwirkungen fallen nur gering aus, und somit lohnt es sich nicht, die deutlich höhere Rechenzeit für die Simulation des ganzen Zugverbandes in Kauf zu nehmen. Im Folgenden werden die Modelle grob beschrieben. Eine detailliertere Darstellung und Angabe von Parametern ist aufgrund von Datenschutzvereinbarungen nicht möglich. Geometrien und die Masseverteilung entsprechen selbstverständlich den realen Bedingungen.

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

4.2.2.1 „Railjet“-Reisezugwagen

Das „Simpack“ Modell des „Railjet“-Reisezugwagens weist insgesamt 64 Freiheitsgrade (DOF) auf und besteht aus einem starren Massekörper für den Wagenkasten, der auf zwei Fahrwerken ruht. Die Fahrwerke inklusive der Modellierung der Bettung bestehen aus jeweils 14 Körpern. Gesamt besteht das Modell also aus 29 Körpern, wobei ein 30. Körper für die Vorgabe der Bewegung eingefügt wird. Abbildung 37 zeigt die graphische Darstellung des Modells in „Simpack“.

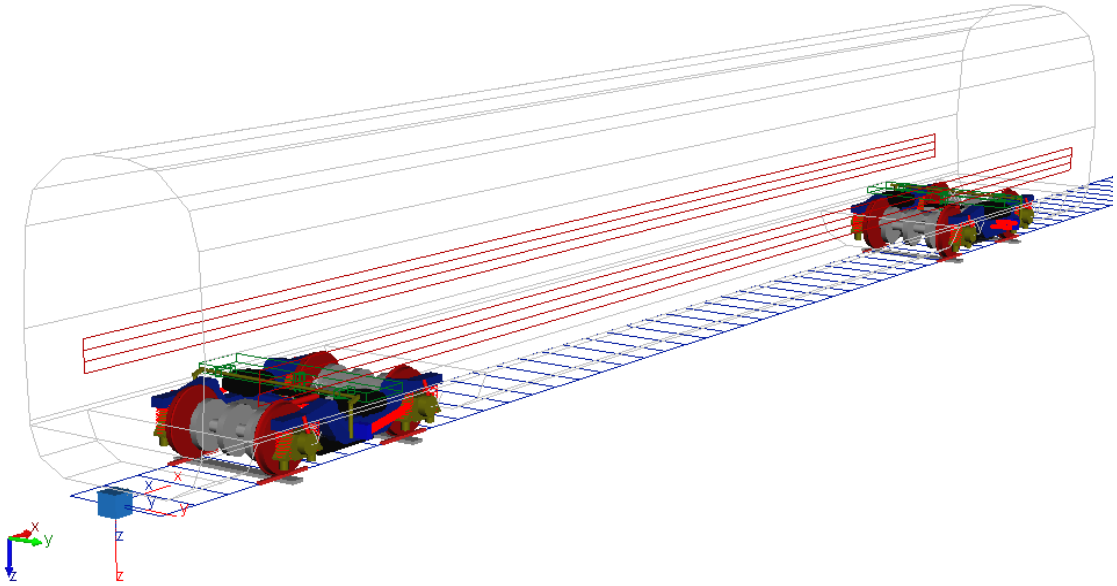


Abbildung 37: MKS-Modell „Railjet“-Reisezugwagen [37]

Jedes der beiden Drehgestelle bildet unter anderem folgende Komponenten ab:

- Drehgestellrahmen, Traverse
- Radsätze (inklusive Bremsscheiben), Radsatzlager, Beschreibung der Schienenbettung
- Magnetschienenbremse
- Wankstabilisator
- Primär- und Sekundärfesselung
- Querfederung, Drehdämpfer
- Längsmitnahme, Querspielbegrenzung, Drehzapfen

In Abbildung 38 ist die vereinfachte Topografie des „Railjet“-Reisezugwagen-Modells angeführt. Zu erkennen sind die 29 Körper des gesamten Systems. Die beiden Drehgestelle sind ident und um die Wagenkastenlängsmittelebene symmetrisch angeordnet. Jeder Kasten entspricht einem massebehafteten Körper. Rote Elemente entsprechen sogenannten Force-Elements wie Federn und Dämpfern, blaue Elemente sind Gelenke (Joints) und grüne Elemente repräsentieren Zwangsbedingungen (Constraints). Die Nummern bei den jeweiligen Elementen entsprechen der „Simpack“ internen Bezeichnung von Elementen. Zur besseren Übersicht und aus Datenschutzgründen wurden mehrere Force-Elemente aus der Topografie entfernt. So wird die primäre und sekundäre Fesselung im konkreten Modell durch mehrere Feder- und Dämpferelemente abgebildet. Die Abkürzungen stehen für: RSL1L/RSL1R…Radsatzlager Achse 1 links/rechts, MSB…Magnetschienenbremse, WS1L/WS1R…Wankstabilisatoren Drehgestell 1 links/rechts, JO…Joch/Drehzapfen.

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

Zu beachten ist, dass jeder Körper genau ein Gelenk (Joint) zugewiesen bekommt. Die Joints können entweder zwischen den Körpern untereinander definiert werden oder sie beziehen sich auf das Inertialsystem. Der Bezug zum Inertialsystem wird über einen sogenannten „General Rail Track Joint“ hergestellt. Dieser definiert die Lage des Körpers in Bezug zum Gleis (Track) und besitzt sechs Joint States (DOF). Die durch den „General Rail Track Joint“ verwendeten States (siehe [13]) sind jeweils im gleisbezogenen Koordinatensystem dargestellt:

- s…Position entlang der Strecke (in x-Richtung des gleisbezogenen Koordinatensystems)
- y…Laterale Position in y-Richtung
- z…Vertikale Position
- φ_S…Rollwinkel
- ψ_S…Gierwinkel
- γ_S…Nickwinkel

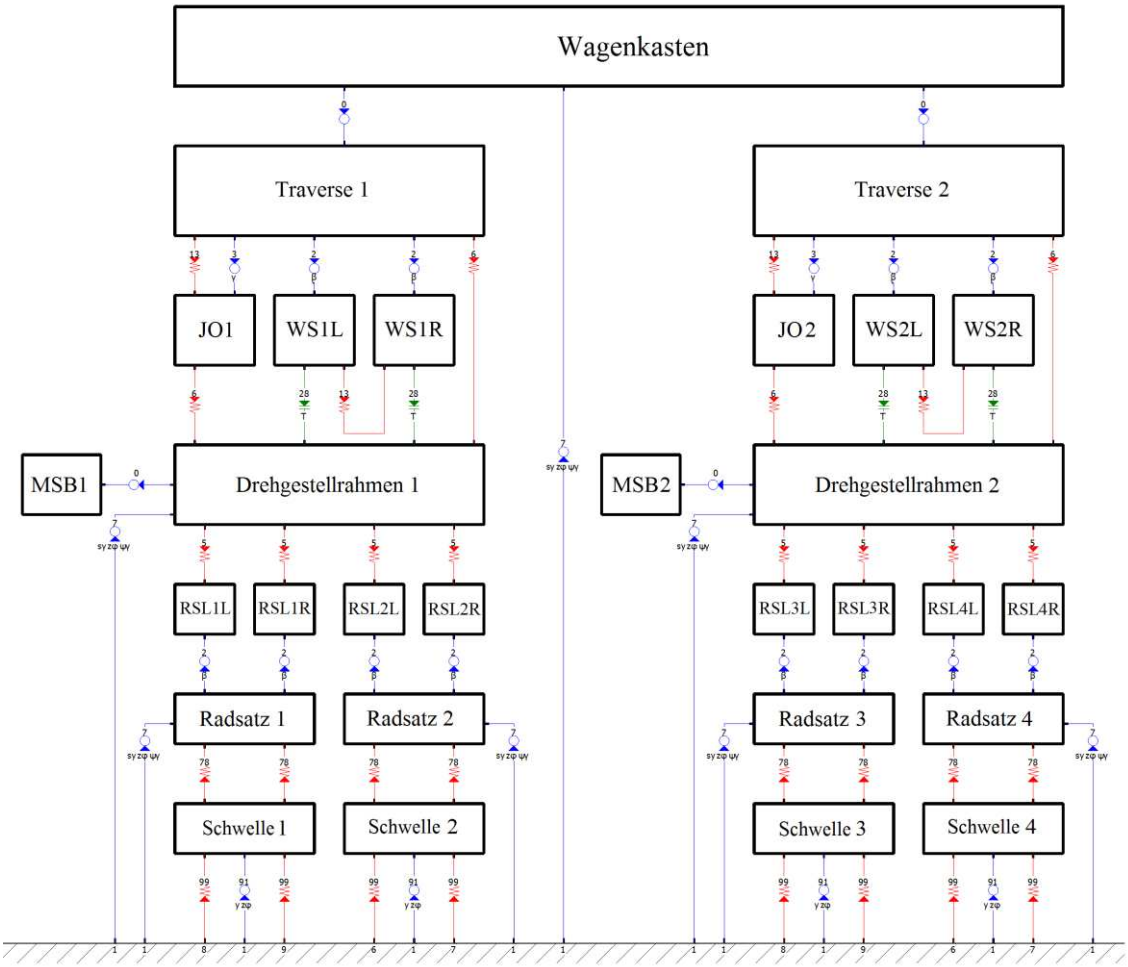


Abbildung 38: Vereinfachte Topografie „Railjet“-Modell

Die Körper „Schwelle“ werden in Bezug auf das Inertialsystem elastisch gebettet, um ein elastisches Gleis zu simulieren. Die Traverse bzw. Magnetschienenbremse ist an den Wagenkasten bzw. Drehgestellrahmen mit einem Joint von 0 Freiheitsgraden verbunden, was einer starren Verbindung entspricht. Weiters wird unter anderem ein Queranschlag modelliert, der durch eine steile Federkennlinie und ein Force-Element abgebildet wird. Durch entsprechende Wahl der Federkennlinie setzt eine Kraft im Force-

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

Element erst ein, wenn das maximale Querspiel erreicht wurde. Die Primärfesselung wird über Force-Elemente zwischen Drehgestellrahmen und den einzelnen Radsatzlagern abgebildet. Die Sekundärfesselung erfolgt ebenfalls über Force-Elemente zwischen dem Drehgestellrahmen und der Traverse, wobei, wie erwähnt, die tatsächliche Anzahl an verwendeten Force-Elementen nicht abgebildet ist.

Da in der numerischen Simulation, wie weiter oben erwähnt, nicht der ganze Zugverband simuliert wird (sondern nur jeweils ein Wagen) und der Reisezugwagen keinen Antrieb besitzt, wird ein spezielles Modellierungselement verwendet, um den Wagen auf konstanter Geschwindigkeit halten zu können. Dafür wird ein Dummy Körper in das Modell eingefügt. Der sogenannte Rheonomic-Rail-Track-Joint wird auf den Dummy Körper angewendet und kann entweder mit einer konstanten Geschwindigkeit oder einem definierten Geschwindigkeitsprofil beaufschlagt werden. Die Verbindung mit dem Fahrzeug erfolgt an der Stelle der Kupplung des Wagenkasten über ein Force-Element (Feder und Dämpfer Element), welches nur axial (in x-Richtung) eine hohe Steifigkeit und Dämpfung aufweist [37]. Je nachdem ob das Fahrzeug im Zug- oder Schiebebetrieb simuliert wird, kann die vordere oder hintere Kupplung verwendet werden. Für Details bezüglich der Simulation von Kupplungselementen siehe z. B. [49], insbesondere in Hinblick auf Simulationen von Zugverbänden bei Anfahr- und Bremsvorgängen, da dort mit hohen Wechselwirkungen zu rechnen ist.

4.2.2.2 „Taurus“-Lokomotive

Das „Simpack“ Modell der Lokomotive entspricht dem „Taurus“-Modell ES64U4 (ÖBB „Taurus“ 1216). Es besitzt insgesamt 125 Freiheitsgrade (DOF) und besteht aus einem starren Massekörper für den Lokkasten, auf dem zwei Fahrwerke angebracht sind. Die Fahrwerke inklusive der Modellierung der Bettung bestehen aus jeweils 15 Körpern. Gesamt besteht das Modell also aus 31 Körpern. Abbildung 39 zeigt die graphische Darstellung des Modells in „Simpack“.

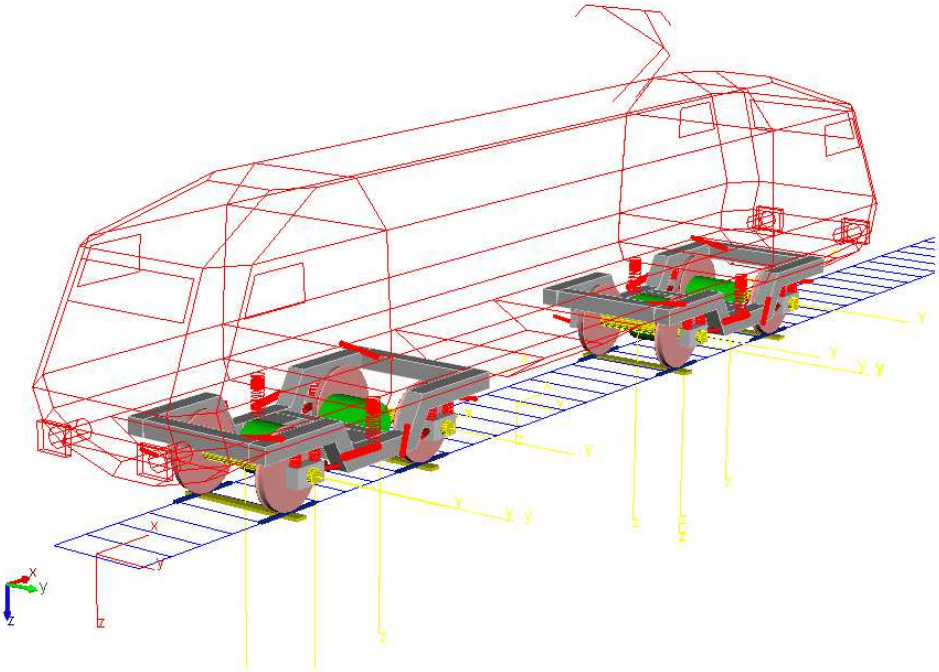


Abbildung 39: MKS - Modell „Taurus“-Lokomotive [37]

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

Da bereits beim Reisezugwagen die wesentlichen Modellierungselemente beschrieben wurden, seien hier nur noch die Unterschiede zwischen den beiden Modellen angeführt. Abbildung 40 zeigt die Topografie des MKS-Modells, wobei zur besseren Übersicht im Gegensatz zu Abbildung 38 nur ein Fahrwerk abgebildet ist („halbe Lokomotive“). Deutlich zu erkennen ist wieder die Primärfesselung zwischen dem Radsatz und dem Drehgestellrahmen und die Sekundärfesselung zwischen Drehgestellrahmen und Lokkasten. Auch hier sind nicht alle tatsächlich verwendeten Force-Elemente wiedergegeben. Die Radsatzführung erfolgt über Dreieckslenker (DLL/DLR) am linken und rechten Radsatzlager. Weiters besitzt das Modell pro Radsatz einen Antriebsmotor (M). Der Antrieb ist über Feder- und Dämpferelemente mit dem Drehgestellrahmen gekoppelt. Um das Antriebsmoment auf die Radsätze übertragen zu können, ist ein Force-Element zwischen jedem Antriebsmotor und dem entsprechenden Radsatz modelliert. Feder- und Dämpfercharakteristika, sowie die Massen und Massenverteilungen der einzelnen Körper entstammen wieder realen bzw. gemessenen Werten am realen Fahrzeug.

Anzumerken ist, dass bei manchen Streckenabschnitten ausschließlich Lokomotiven der Reihe 1116 erfasst wurden. Da die Lokomotiven der Baureihe ÖBB 1116 und 1216 die gleichen Fahrwerke besitzen, sind keine großen Unterschiede bezüglich ihrer Fahrdynamik zu erwarten (siehe Kapitel 2.6.2). Eine veränderte Massenverteilung kann im Modell berücksichtigt werden.

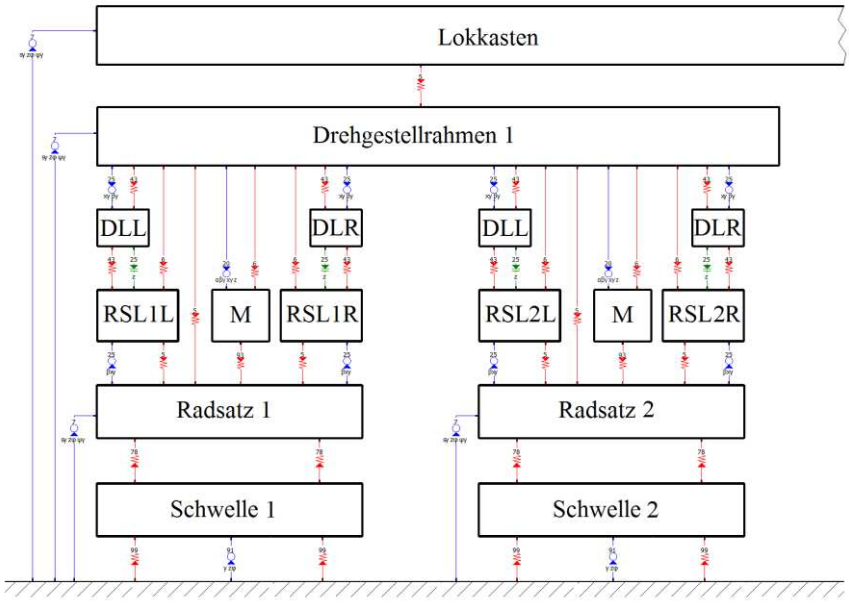


Abbildung 40: Vereinfachte Topografie Lok Modell

4.2.3 Rad-Schiene-Kontakt und Geometrien

4.2.3.1 Reibwert

In Kapitel 2.1.2 wurde bereits die Methodik gezeigt, mit der die Normal- und Tangentialkräfte im Rad-Schiene-Kontakt bestimmt werden. Die für die Kontaktmechanik benötigten Parameter werden in sogenannten Rail-Wheel-Pairs definiert. Laut der „Simpack“ Dokumentation [13] wird die Normalkontaktmechanik durch einen Algorithmus behandelt, der nach einer geometrischen Durchdringung zwischen Rad- und Schienenprofil sucht. Die erhaltenen Berührflächen (Anzahl und Form) werden im Wei-

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

teren durch Ellipsen angenähert, die die gleiche Belastung erzeugen wie die tatsächlichen Berührflächen. Mithilfe der Ellipsen wird in weiterer Folge die Normalkraft nach Hertz bestimmt. Dazu werden der E-Modul und die Poisson Zahl benötigt. Weiters wird ein Dämpfungsfaktor verwendet, der das Auftreten von typischen Schwingungen zwischen 250 und 350 Hz verhindern soll [13].

Für die Bestimmung der Tangentialkräfte in „Simpack“ stehen mehrere Algorithmen zur Verfügung. Darunter „Fastsim“ [15] und ein Algorithmus nach Polach [16]. Für allgemeine fahrtechnische Untersuchungen ist „Fastsim“ ein gut akzeptierter Algorithmus. Die Methode nach Polach wird besonders für Simulationen von Traktions- und Bremsvorgängen verwendet, die im Bereich des Kraftschlussmaximums stattfinden. Dort werden vor allem kombinierte Simulationen z. B. mit „Matlab“ durchgeführt, die eine Regelung der Traktion und Bremsvorgänge im Bereich des Kraftschlussmaximums ermöglichen. Da es sich bei dieser Diplomarbeit um eine fahrtechnische Untersuchung bei meist konstanten Geschwindigkeiten handelt, wird der Algorithmus „Fastsim“ gewählt. Das elliptische Kontaktgebiet wird mit „Fastsim“ in diskrete Elemente aufgeteilt, in denen die Tangentialspannungen aufintegriert werden.

Abbildung 41 zeigt den typischen Verlauf einer Kraftschlusskurve (vergleiche Kapitel 2.1.2) über den Schlupf (dunkelblau). Zu erkennen ist, dass mit „Fastsim“ (hellblau) bei Erreichen der Sättigung mit einem konstanten Kraftschluss gerechnet wird. Durch schlupfabhängige Funktionen kann eine reale Kraftschlusskurve modelliert werden. Im Bereich unterhalb des Kraftschlussmaximums tritt nur ein kleiner Schlupf auf (Mikro-Schlupf). Ist der Schlupf so groß, dass das Maximum überschritten wurde, spricht man von Makro-Schlupf. In der Bogenfahrt mit größeren Radien ist nur mit Mikro-Schlupf zu rechnen, wie in der Grafik angedeutet. Der Bogenradius, bei dem Mikro- in Makro-Schlupf übergeht, ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig (z. B. Berührgeometrie). Bei der Betrachtung der Traktionskräfte der Lokomotive ist ebenfalls nicht mit Makro-Schlupf zu rechnen, da die Traktionskräfte im Bereich konstanter Geschwindigkeiten gering sind. Z. B. beträgt die Anfahrzugkraft einer „Taurus“-Lokomotive auf trockener Schiene etwa 300 kN. Die in Kapitel 3.4.4 angeführten Triebkräfte erreichen maximale Werte von 61 kN bei konstanter Geschwindigkeit im Bogen und 107 kN bei beschleunigter Fahrt auf der Geraden. Da der konkrete Verlauf der Kraftschlusskurve unbekannt ist, wird, wie in der Fahrtechnik üblich, mit der idealisierten Kraftschlusskurve simuliert. Ein optionaler Gewichtungsfaktor (Kalker weighting factor) kann z. B. bei nassem Schienenzustand verwendet werden, um die Steigung der Kraftschlusskurve anzupassen. Bei trockenen Bedingungen kann dieser Wert in guter Näherung mit eins angenommen werden [13][50].

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

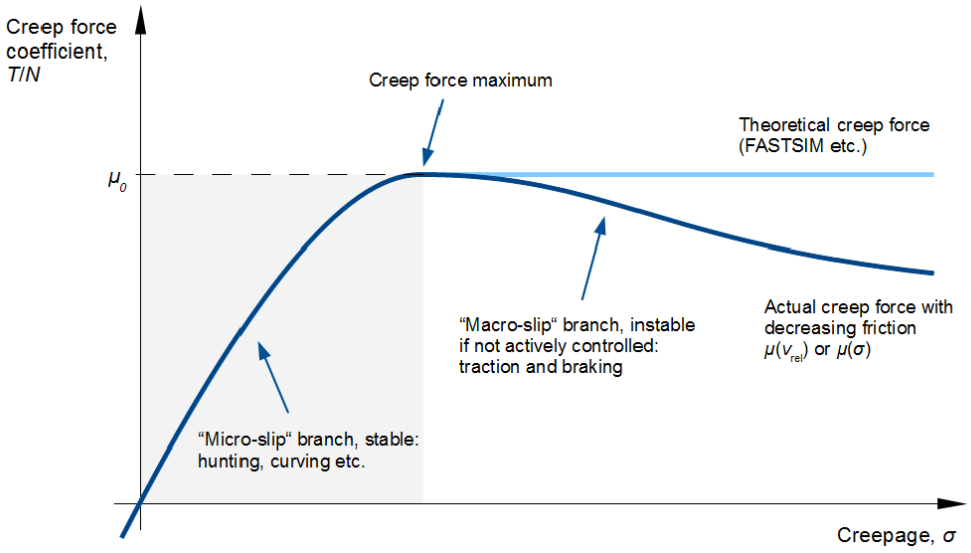


Abbildung 41: Kraftschlusskurve [13]

Für die Wahl des Reibwertes wird von trockenem Schienenzustand ausgegangen. Laut EN 14363 soll bei der numerischen Simulation ein trockener Schienenzustand simuliert werden. Da dieser Zustand aus den Messdaten gut abgeschätzt werden kann (siehe Kapitel 3.4.3), werden in der Simulation Reibwerte verwendet, die einen trockenen Schienenzustand repräsentieren. Tabelle 10 zeigt mögliche Reibwerte für den nassen und trockenen Zustand. Somit wird für den trockenen Zustand mit einem Reibwert von 0,4 gerechnet. Da vor allem in der Bogenfahrt auch mit einem Schmierfilm am Spurkranz bzw. an der Schiene zufolge Spurkranzschmiereinrichtungen zu rechnen ist, lässt sich eine sinnvolle Abschätzung nur schwer realisieren. Daher wird mittels „Simpack“ eine Parametervariation durchgeführt, die die Reibwerte in der Lauffläche und im Spurkranz in definierten Bereichen variiert. Beim Vergleich mit den Messdaten kann dann die realitätsnächste Variante gewählt werden. Der Reibwert kann auch zwischen Innen- und Außenschiene variieren [37]. Tabelle 10 liefert einen Überblick über die in der Literatur zu Grunde gelegten Reibwertannahmen.

Quelle	Reibwert
EN 14363 mindestens [1]	0.36
Interne Informationen nass [37]	0.2
Interne Informationen trocken [37]	0.4
ORE B 176 [51]	0.4
Polach nass [50]	0.2 - 0.3
Polach trocken [50]	0.4 - 0.5

Tabelle 10: Reibwertannahmen

Wie oben erwähnt, ist im Betrieb mit geschmierten Spurkränzen zu rechnen, weshalb diese auch in der Modellbildung berücksichtigt wird. „Simpack“ erlaubt, den Reibwert abhängig von festgelegten Größen zu variieren. Für den Reibwert im Spurkranz wird daher eine Abhängigkeit von der lateralen Verschiebung des Radsatzes gewählt (Berührkoordinate des Rades). Abbildung 42 zeigt die Modellbildung des Reibwerts im Spurkranz, indem ein Verlauf des Reibwertes über das Radsatzprofil erzeugt wird.

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

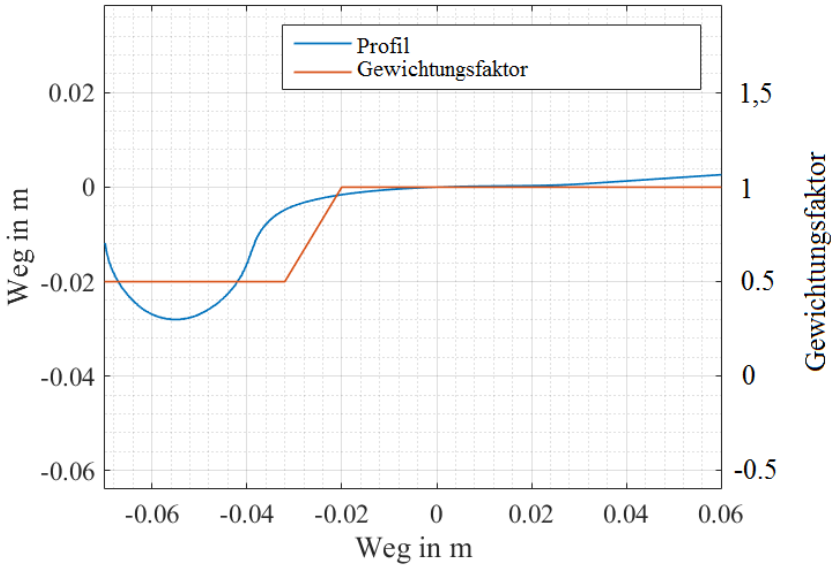


Abbildung 42: Modellierung der Reibwertabhängigkeit im Spurkranz [37]

Die Grafik zeigt die Gewichtungsfunktion (rot), mit der der Reibwert multipliziert wird. Auf der Lauffläche hat die Funktion den Wert 1, und somit ist hier der allgemeine Reibwert vorhanden. Ab einem Abstand von -0,02 von der Radmittellinie beginnt eine lineare Abnahme der Gewichtungsfunktion bis zu einem Abstand von -0,032. Ab dann ist die Gewichtungsfunktion wieder konstant. In der Grafik erreicht die Gewichtungsfunktion im Bereich des Spurkranzens den Wert 0,5, also die Hälfte des Reibwerts von der Lauffläche. Der Wert der Gewichtungsfunktion kann über Parameter in „Simpack“ angepasst werden. Typische Reibwerte bei Berücksichtigung von Spurkranzschmiersystemen können Tabelle 11 entnommen werden, wobei die Literaturstellen teilweise aus [18] übernommen wurden. Die Reibwerte auf dem Spurkranz können durch die passende Wahl des Wertes in der Gewichtungsfunktion eingestellt werden.

Literaturstelle	Reibwert Lauffläche	Reibwert Spurkranz
[52]	0,40	0,15
[53]	0,30	0,15
[54]	0,50	0,10
[55]	0,35	0,10
[37]	0,40	0,10

Tabelle 11: Reibwerte für Lauffläche und Spurkranz

Die „Taurus“-Lokomotive ist mit einer Vorrichtung zur Spurkranzschmierung ausgestattet, wobei die lokseitige Schmiermittelaufbringung einem komplexen auf empirischen Grundlagen basierenden Algorithmus unterliegt [37]. Weiters kann die Schmierung der Spurkränze auch über gleisfeste Schmiereinrichtungen erfolgen. Daher ist in Bögen (besonders in engen Bögen wie bei der Messstelle BS) stets mit einem gewissen Schmierfilm zu rechnen. Ein konkreter und realitätsnaher Reibwert auf dem Spurkranz kann daher nur schwer festgelegt werden.

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

4.2.3.2 Schienenprofile

Für den Rad-Schiene-Kontakt sind besonders die realen Profile der Schienen wichtig. Weiters entspricht die normative Einbauneigung der Schienen nur selten den realen Werten unter der Radlast. Selbstverständlich sind auch konkrete Radprofile für den Kontakt von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der statistischen Auswertung über eine Vielzahl von unterschiedlichen Wagen ist es nicht möglich (bzw. vom Zeitaufwand nicht sinnvoll), alle theoretisch nötigen Radprofile zu verwenden. Aus diesem Grund werden für die Simulationen stets Profile vom Typ S1002 verwendet. Die Ausnahme bilden ein spezifischer Steuerwagen und eine Lok, deren Radprofile zur Verfügung gestellt werden konnten.

Die an den jeweiligen Messstellen verbauten Schienen-Profiltypen können Tabelle 6 entnommen werden. Die Schienenprofile und deren Einbauneigung werden bei der Überfahrt des Oberbaumesswagens EM 250 mit einer Abtastfrequenz bzw. in Abständen von ca. 1 m bestimmt, wobei die Profilform mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 mm erfasst werden kann. Die Querschnitte der jeweils gemessenen Schienenprofile werden jeweils über die Länge der entsprechenden Messstelle als konstant angenommen. Die Messung der Schienenprofile erfolgte für alle Messstellen Ende November 2017.

Unter anderem weil „Simpack“ die Schienenprofile in sogenannten Rail Profile Files (.prr) abspeichert, ist eine Vorverarbeitung der erhaltenen Daten notwendig. Die Daten müssen weiters gemäß dem in „Simpack“ befindlichen Koordinatensystem ausgerichtet sein, und die Reihenfolge der Datenpunkte ist vorgegeben. Zusätzlich wird empfohlen, die Schienenprofile ohne Einbauneigung in die Rail Profile Files einzutragen. Da die erhaltenen Messdaten sowohl die Einbauneigung beinhalten als auch die Reihenfolge der Datenpunkte und die Lage des Koordinatensystems mit „Simpack“ nicht konform sind, war es notwendig, die Daten mit „Matlab“ zu bearbeiten. Die aus den Messdaten ausgelesenen Einbauneigungen der Messstellen sind in Tabelle 12 angeführt (R…Rechts, L…Links für Richtung 1).

Messstelle	AS07		GA19		VE10		BS	
Profiltyp	60E1		60E1		60E1		S49	
Einbauneigung	L: 39.8	R: 35.4	L: 60.9	R: 41.5	L: 46.4	R: 33.6	L: 33.6	R: 40.6

Tabelle 12: Einbauneigungen nach Messstelle

Die Einbauneigung wird in den Messdaten über zwei Referenzpunkte angegeben. Die Verbindungsgerade zwischen diesen Referenzpunkten gibt die Neigung des Profils an. Die Einbauneigung kann mit „Matlab“ ausgelesen werden, und anschließend müssen die Referenzpunkte aus den Daten für „Simpack“ entfernt werden. Die Einbauneigung lässt sich durch Anwenden einer Rotationsmatrix auf die Datenpunkte ($\vec{P}$) entfernen (Gleichung 4.3), wobei die Transformationsmatrix R über Gleichung 4.4 definiert ist (Einbauneigung ϑ).

$$\overrightarrow{P'} = R \cdot \vec{P} \tag{4.3}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \sin(\vartheta) \\ -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Weiters wird der Koordinatenursprung angepasst und mittig auf die Profillauffläche

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

gelegt. Die Daten können dann in ein .prr File geschrieben werden, wobei dort zu berücksichtigen ist, dass Profile einer linken Schiene als Profile einer rechten Schiene definiert werden müssen. Aufgrund der geringen Datenpunkteanzahl (ca. 400) [13] und der begrenzten Auflösung wird in den Profile Files ein Smoothing Parameter von 1e-7 gewählt. Dieser erlaubt „Simpack“, die Datenpunkte über einen Spline zu approximieren, wobei der quadratische Abstand zwischen den Datenpunkten kleiner als der oben erwähnte Smoothing Parameter ist. Durch die Verwendung dieses Parameters wird verhindert, dass unrealistische Spitzen im Profil, besonders auf der Lauffläche, vorhanden sind. Diese Spitzen können zu Problemen bei der Bestimmung der Kontaktpunkte führen, und dann in weiterer Folge numerische Probleme verursachen. Abbildung 43 zeigt exemplarisch die gemessenen Schienenprofile im Vergleich zu einem neuen Profil bei der Messstelle GA19. Die Profile sind mit der entsprechenden Einbauneigung abgebildet. Grundsätzlich scheinen die Profile noch weitgehend in einem guten Zustand zu sein, wobei eine Abflachung an der Innenschiene auffällt. Das ist besonders ungewöhnlich, da es sich um die Außenseite der Innenschiene handelt, und diese Stelle nicht befahren wird. Es liegt nahe, dass die Abflachung durch das Schleifen der Schiene verursacht wird. Beim Schleifen wird das gewünschte Profil durch mehrere Geraden angenähert [44], wodurch sich ein stark polygonisiertes bzw. eckiges Profil ergibt. Die Ecken im Profil werden durch die Überfahrten im Berührgebiet rasch abgerundet, nicht aber auf den Außenseiten der Schienen.

Unter anderem wurden fehlerhafte Datenpunkte entfernt (wie z. B. nicht streng monoton wachsende Datenpunkte in x-Richtung). Weiters wurden im Bereich der Schienenkopfränder einige Sprungstellen entfernt, da „Simpack“ bei vertikalen Stellen (Neigungen größer als 40,9:1) die Profile in mehrere Sektionen aufteilt. Da die Schienenkopfränder nicht befahren werden, hat das Entfernen der Sprungstellen keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Anhang D zeigt einen durch Simulation erstellten Vergleich zwischen einem gemessenen Profil und einem ideal neuen Profil im Bereich der Messstelle GA19. Weitere Vergleiche mit Messdaten haben gezeigt, dass bei Verwendung der gemessenen Profile realitätsnähere Ergebnisse in der Simulation erreicht werden.

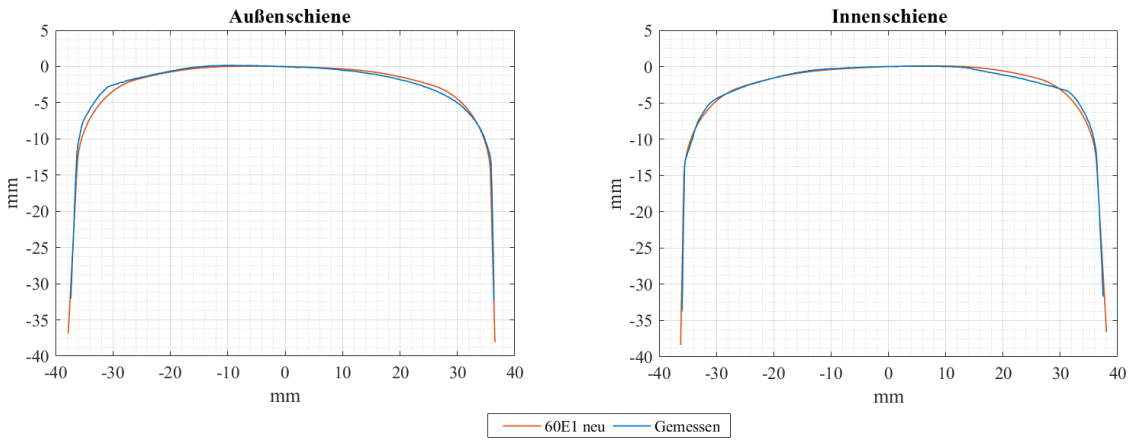


Abbildung 43: Schienenprofile im Gleis bei GA19

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

4.2.3.3 Radprofile

Wie bereits erwähnt, stehen Radprofil-Daten eines „Railjet“-Steuerwagens und einer „Taurus“-Lokomotive zur Verfügung. Die Profilmessung erfolgt durch ein Messsystem von Calipri mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 mm. Die Verarbeitung der Daten läuft gleich wie bei den Schienenprofilen ab, bevor diese in ein Wheel Profile File geschrieben werden können. Das Koordinatensystem wird in die Mitte des Radprofils gelegt. Die inneren Stirnseiten der Räder sind in den Messdaten vorhanden, wodurch eine einfache Bestimmung der Mitte möglich ist. Weiters wird in den Messdaten der Radrückenabstand für jeden Radsatz angeführt. Abbildung 44 zeigt exemplarisch das linke Radprofil des ersten Radsatzes des Steuerwagens 73 81 80-90 717-7 im Vergleich zu dem Profil S1002. Zu sehen ist einerseits, dass der Spurkranz um ca. 2 mm höher liegt, was darauf hinweist, dass das Rad bereits einen Reprofilierungsvorgang hinter sich hat. Konkrete Informationen über die Radien stehen nicht zur Verfügung, daher wird stets mit den Nennradien simuliert.

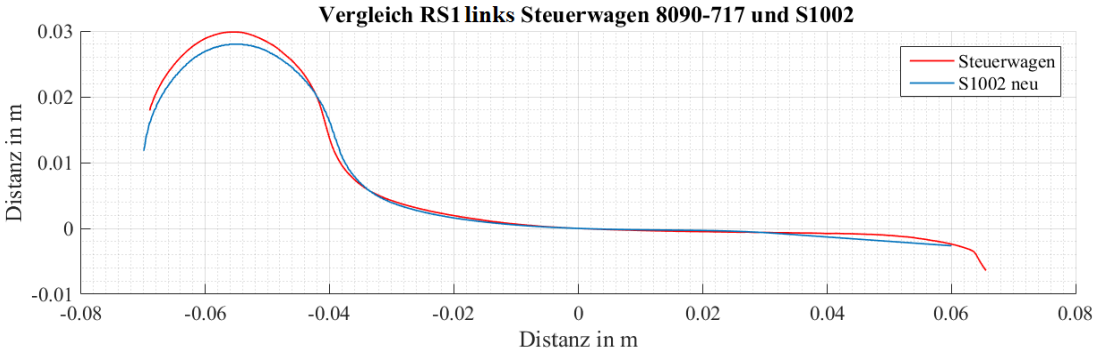


Abbildung 44: Radsatzprofil Steuerwagen

Sobald die Daten in „Simpack“ eingefügt wurden, kann „Simpack“ automatisch die Kontaktkinematik zwischen Rad und Schiene eines Radsatzes ermitteln. Dazu gehören unter anderem die Anzahl und Lage der Kontaktpunkte, Rollradiendifferenz bei lateraler Verschiebung des Radsatzes, Kontaktflächen und die äquivalente Konizität. Abbildung 45 zeigt beispielsweise die Lage der Kontaktpunkte durch Verbindungslinien zwischen den Laufrädern und den Schienen bei einer Spurweite von 1435 mm. Die verwendeten Profile sind das Schienenprofil 60E1 und das Radprofil S1002.

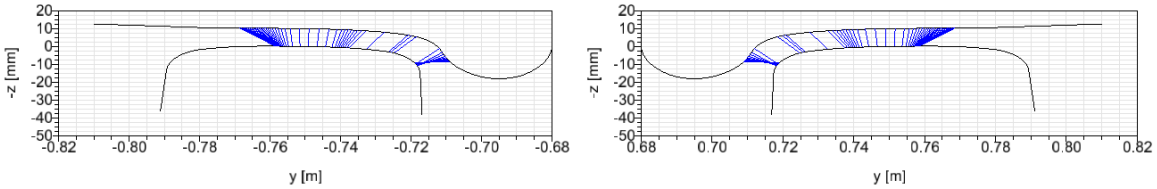


Abbildung 45: Lage der Kontaktpunkte bei Paarung von 60E1 mit S1002

4.2.4 Bettung

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Schienen nicht starr im Oberbau gelagert sind, kann in „Simpack“ ein elastisches Bettungsverhalten über lineare Steifigkeiten und Dämpfungen modelliert werden. Dadurch werden unrealistische Kraftspitzen in der numerischen Simulation verhindert. Da konkrete, an den Messstellen vorhandene Bettungssteifigkeiten und Dämpfungswerte nicht zur Verfügung stehen, werden die Werte aus [51] für die lauftechnische Auslegung für Schienenfahrzeuge verwendet. In

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

[51] werden Quer-, Vertikal-, und Drehsteifigkeiten angegeben, sowie jeweils entsprechende Lehr´sche Dämpfungsmaße. Tabelle 13 zeigt die verwendeten Werte.

Richtung	Steifigkeit in N/m bzw. Nm/rad	Lehr´sche Dämpfung
Lateral	2.00E+07	0.3
Vertikal	7.50E+07	0.3
Drehung um z	3.30E+07	0.1

Tabelle 13: Modellierung der Bettung [51]

4.2.5 Track – Definition und Gleislage

Besonders wichtig für eine aussagekräftige Simulation sind die Gleislagedaten. In Kapitel 2.4.2 wurden bereits einige Anforderungen erwähnt, die an die Daten gestellt werden, um sie in der Simulation verwenden zu können. Der ÖBB Oberbaumesswagen EM 250 tastet die Gleislage im Abstand von 0,25 m ab. Die erhaltenen Daten umfassen jeweils einen Streckenabschnitt mit einer Länge von ca. 500 m im Bereich der Messstelle. Damit ist die Auflösung in einem der Norm EN 13848-1 entsprechend zulässigen Bereich. Besonders wichtig ist, dass der Messwagen über eine Inertialsystem-Messung arbeitet. Damit sind die Daten verzerrungsfrei. Die vom Messwagen erfassten Daten, die für die Simulation relevant sind, werden folgend angeführt:

- Richtungsfehler der linken und rechten Schiene aufgeteilt in D1 und D2 in mm
- Höhenfehler der linken und rechten Schiene aufgeteilt in D1 und D2 in mm
- Querhöhe in mm
- Überhöhung in mm
- Krümmung in mm, wobei die mittige Pfeilhöhe einer Sehne angegeben wird. Die Sehnenlänge s beträgt 10 m.
- Steigung in Promille
- Spurerweiterung zur Nennspurweite in mm

Die Größen werden nicht in einem zur Norm EN 14363 konformen Koordinatensystem angegeben, sondern in einem Koordinatensystem, bei dem die z-Achse nach oben zeigt. Für die Verwendung der Daten in „Simpack“ müssen diese noch bearbeitet werden, bevor sie in sogenannte Meausured Track bzw. Track Exitation Files (.trm bzw. .tre) geschrieben werden können. Unter anderem fällt auf, dass die Richtungs- und Höhenfehler in zwei Wellenlängenbereiche aufgeteilt sind. Die Filterung der Daten erfolgt direkt im Messwagen. „Simpack“ benötigt den ganzen Wellenlängenbereich von Richtung und Höhe in einem Kanal. Das wird auch in der Norm EN 13848-1 erwähnt. Da die Richtungs- und Höheninformationen zur Trennung gefiltert wurden, muss bei der Addition der einzelnen Wellenlängenbereiche darauf geachtet werden, dass keine Lücken bzw. Überschneidungen der Daten entstehen. Hierfür wäre es notwendig, die konkreten Filtercharakteristika des Messwagens zu kennen. Da diese aus Datenschutzgründen nicht zur Verfügung gestellt werden konnten, ist ein einfaches Addieren der Daten mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Weiters kann es bei der Filterung zu möglichen Phasenverschiebungen kommen. Da die Kanäle Überhöhung, Krümmung, Steigung und Spurerweiterung ohne diese Filterung vorhanden sind, kann es sein, dass die

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

Kanäle der Richtungs- und Höhenfehler nicht genau zueinander abgeglichen sind. Im Folgenden wird daher gezeigt, warum die Verwendung der Daten für die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Simulationen trotzdem zulässig ist. Weiters wird in Kapitel 4.5 ein mittels numerischer Simulation erstellter Vergleich angeführt, der den Einfluss der Wellenlängenbereiche auf die quasistatischen Größen im Bereich der Messstellen aufzeigen soll.

Eine Möglichkeit zur Überprüfung auf Lücken oder Überschneidungen der Signale ist die Betrachtung der Leistungsdichtespektren (PSD) der Daten. In Abbildung 46 sind die auch für die weiteren Messstellen repräsentativen Leistungsdichtespektren bei GA19 angeführt, darunter die Höhenfehler und Richtungsfehler, die nach Kapitel 2.4.2 auf die Gleismitte umgerechnet wurden. Für die Höhen- und Richtungsfehler sind jeweils die beiden Wellenlängenbereiche D1 und D2 einzeln sowie in Summe dargestellt. Weiters sind zwei Referenzspektren nach [3][25][51] für die Fehler eingezeichnet. Die Referenzspektren liefern Informationen über die übliche Gleislagequalität. So entspricht ORE high einer typischen Gleislage für den Regionalverkehr, während ORE low Gleislagen von Hochgeschwindigkeitsstrecken entspricht. Zu erkennen ist, dass die Übergänge zwischen den Wellenlängenbereichen (die Wellenlänge entspricht dem Kehrwert der Wegfrequenz) keine besonderen Lücken oder Überschneidungen aufweisen, was für eine einfache Addition spricht. Auffällig ist, dass der Richtungsfehler im Bereich langer Wellenlängen eine hohe Leistungsdichte im Vergleich zu den Referenzspektren aufweist. Das könnte auf eine vom Filter bedingte Verstärkung zurückzuführen sein. Weiters ist aber zu beachten, dass die Datensätze der Gleislage etwa 500 m Gleis umfassen. Bei Wellenlängen im Bereich von D2 wären Gleislagedaten über längere Strecken nötig, um konkretere Aussagen mittels PSD machen zu können.

Bei den Leistungsdichtespektren der Krümmung und Überhöhung ist zu beachten, dass zur verbesserten Vergleichbarkeit Wellenlängen größer als 70 m mittels eines digitalen Butterworthfilter 4. Ordnung in „Matlab“ phasengleich herausgefiltert wurden. Das erfolgt vor allem deswegen, weil diese beiden Kanäle sehr lange Wellen beinhalten. Zwar sind für die Krümmung keine Referenzspektren vorhanden, trotzdem ist zu erkennen, dass vor allem Krümmungsänderungen mit einer Wellenlänge größer als 25 m erfasst werden. Das PSD der Überhöhung zeigt, dass hier alle Wellenlängenbereiche erfasst werden. Aus diesem Grund kann der Kanal Querhöhe der Messdaten vernachlässigt werden, da dieser nur redundante Informationen im Wellenlängenbereich D1 beinhaltet.

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

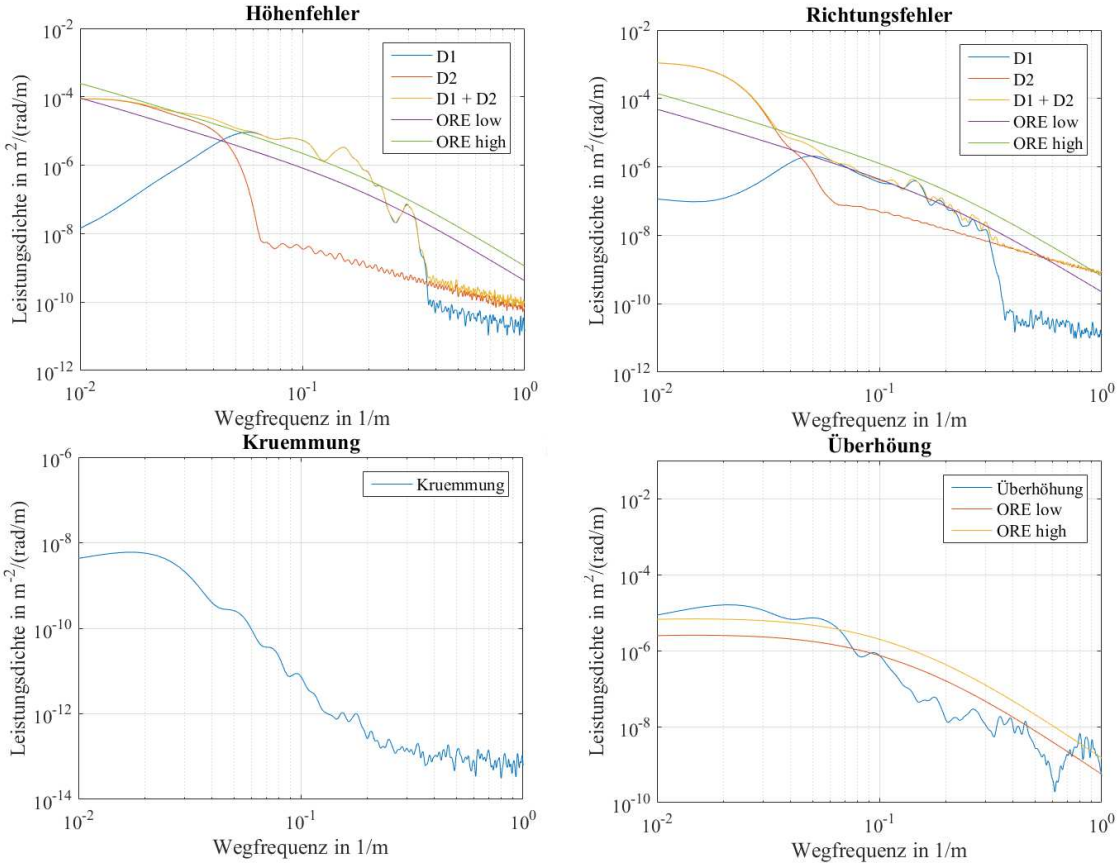


Abbildung 46: Leistungsdichtespektren der Gleislagedaten GA19

Abbildung 47 zeigt die exemplarischen Trassierungsdaten im Bereich der Messstelle GA19. Die Daten sind hier gemäß den vorhandenen Messungen ohne weitere Filterung geplottet. Die Krümmung beinhaltet den typischen Verlauf eines Übergangsbogens, der eine Gerade mit einem Bogen konstanter Krümmung von ca. 1,676e-3 1/m verbindet. Der Bogenradius beträgt daher ca. 596,7 m, was dem Bogenradius aus dem Trassierungsplan sehr nahe kommt (596,6 m). Die Messstelle liegt also in einem Bogen mit, im langwelligen Mittel gesehen, konstantem Bogenradius und konstanter Überhöhung. Die Information über die Gleiskrümmung wird als Pfeilhöhe angegeben. Die Umrechnung zwischen der in der Mitte der Sehne s_l befindlichen Pfeilhöhe h und Krümmung $1/R$ erfolgt mit Gleichung 4.5 ([25]).

$$\frac{1}{R} = \frac{8h}{s_l^2+4h^2} \tag{4.5}$$

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

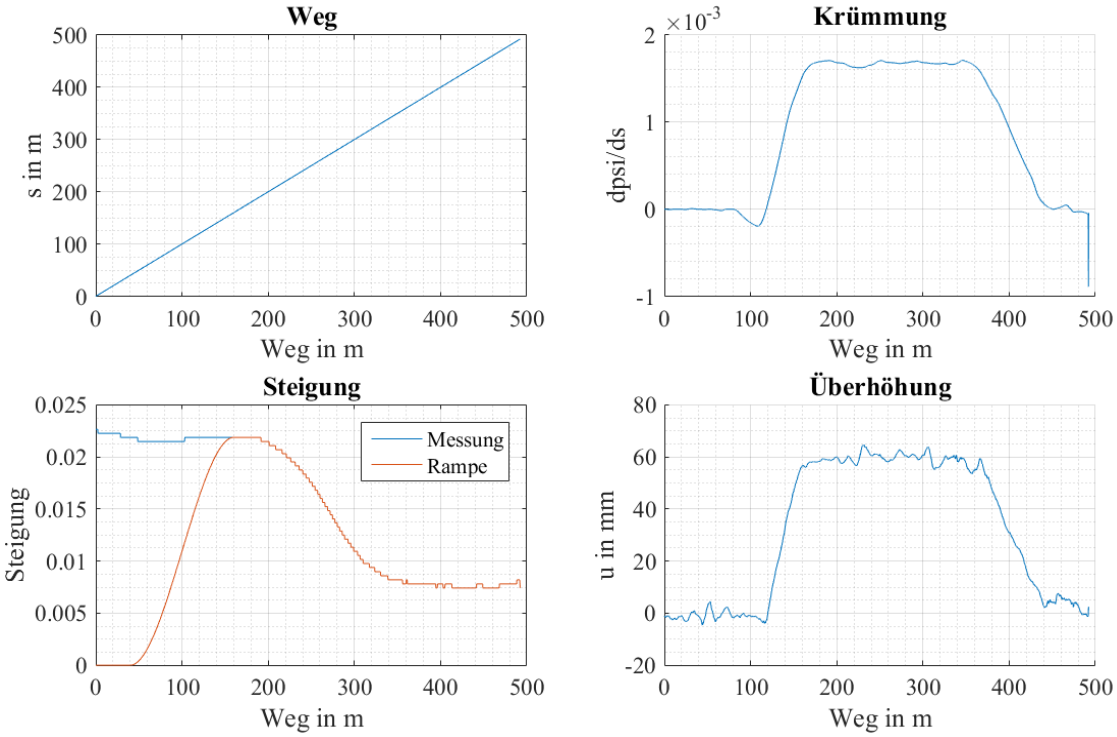


Abbildung 47: Trassierungsdaten GA19

Bei der Steigung ist zu beachten, dass in „Simpack“ als Eingangsgröße für die Steigung die Ableitung des Steigungswinkels benötigt wird. Bei Ableitung des Steigungswinkels (für kleine Winkel entspricht die Steigung dem Steigungswinkel: $\tan(\alpha) \cong \alpha$). verliert man die Informationen über den Startwert der Steigung. Damit „Simpack“ im Bereich der Messstelle die richtige Steigung ermittelt, wird mittels „Matlab“ ein kubisches Polynom bestimmt, welches mit einer Anfangssteigung von 0 beginnt und bei ca. 160 m die tatsächliche Steigung erreicht (Abbildung 47 rote Kurve). Um einen stoßhaften Übergang in der Simulation zu vermeiden, wird die erste Ableitung am Start zu 0 gesetzt, und die erste Ableitung bei 160 m entspricht der Ableitung der Steigung. Weiters startet das Polynom erst bei 40 m, da die Gleislagedaten von „Simpack“ mit einem gewählten Fade-In von 35 m eingeleitet werden. Die Berechnung des Steigungswinkels und dessen Ableitung aus der Steigung k für einen Datenpunkt i erfolgt über die Gleichungen 4.6 und 4.7.

$$\alpha(i) = atan\big(k(i)\big) \tag{4.6}$$

$$\frac{d\alpha(i)}{ds} \cong \frac{\alpha(i+1)-\alpha(i)}{0.25\,m} \tag{4.7}$$

Abbildung 48 zeigt die restlichen Eingangsgrößen für „Simpack“. Der Richtungsfehler und der Höhenfehler wurden aus den Wellenlängenbereichen D1 und D2 summiert. Der Rollwinkel ist stets 0, da der volle Wellenlängenbereich der Gleisneigung um die x-Achse bereits in der Überhöhung enthalten ist. Eine positive Spurerweiterung entspricht auch tatsächlich einer vergrößerten Spurweite. Für „Simpack“ ist das Vorzeichen allerdings zu invertieren [13].

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

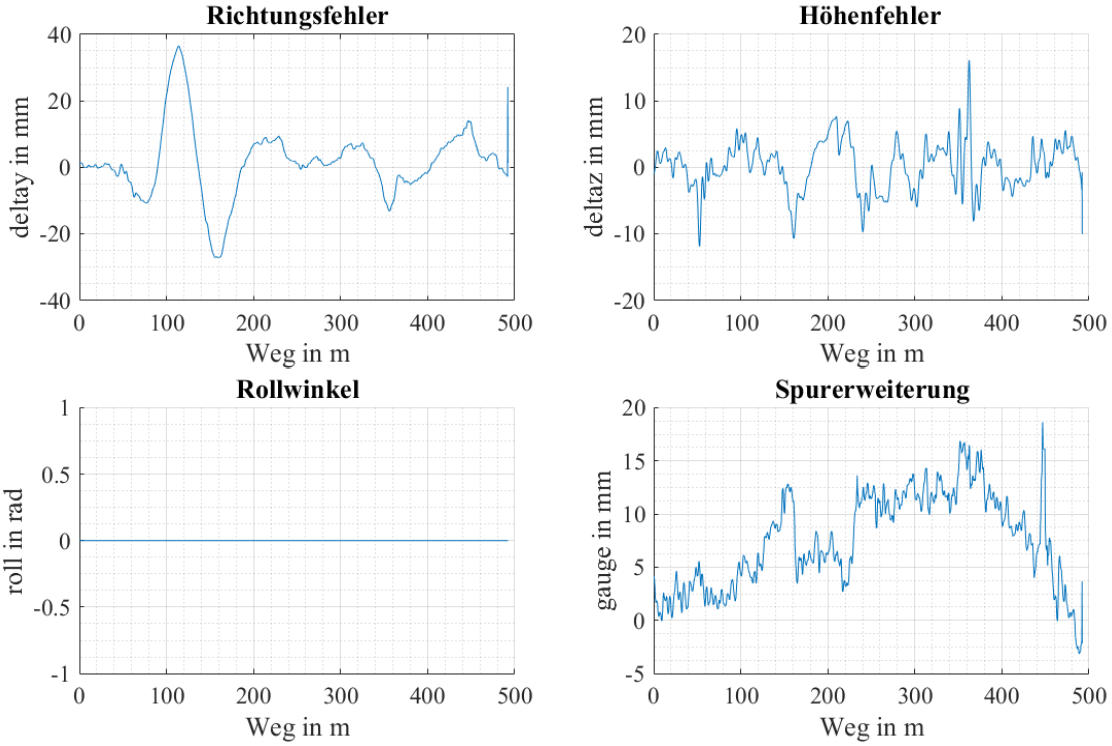


Abbildung 48: Gleislagefehler GA19

Weiters ist zu erwähnen, dass die Wegkoordinate s der Gleislagedaten in „Simpack“ als Projektion auf eine Grundebene zu verstehen ist. Die Wegkoordinate der gemessenen Kilometrierung bezieht sich stets auf das geneigte Gleiskoordinatensystem. Das ist besonders bei Steigungen zu beachten. Allerdings führt selbst eine Steigung von 20 ‰ auf einer Wegstrecke von 1000 m zu einer Wegdifferenz von lediglich 0,2 m (Längenunterschied der Hypotenuse im Vergleich zur Ankathete). Da die Position der Messstellen deutlich größere Unsicherheiten besitzt, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden. Genaue Informationen über das genaue Dateiformat der Gleislagedaten für die Simulation können der „Simpack“ Dokumentation [13] entnommen werden. Wird die Strecke z. B. bei GA19 auch in die Gegenrichtung befahren, müssen die Gleislagedaten entsprechend bearbeitet werden, sodass die Gleislage der Gegenrichtung entspricht. Hier ist auf die Lage des Koordinatensystems zu achten.

Wie bereits erwähnt, kann es aufgrund der Filterung im Messwagen zur Phasenverschiebung der Daten kommen. In Gleichung 2.10 wurde gezeigt, dass aus den Richtungsfehlern die Spurweitenänderung berechnet werden kann. Durch phasengleiches Filtern der Wellenlängen größer 70 m aus dem Kanal der Spurweite kann durch Vergleich festgestellt werden, ob eine Phasenverschiebung vorhanden ist. Abbildung 49 zeigt einen Ausschnitt der Strecke um GA19. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Signale über die ganze Strecke um ca. 1 m verschoben sind. Unter der Annahme, dass auch das Signal der Längshöhe um den gleichen Betrag verschoben ist, wird die Verschiebung in „Matlab“ automatisch bestimmt und aus dem Richtungssignal und Höhensignal herausgerechnet.

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

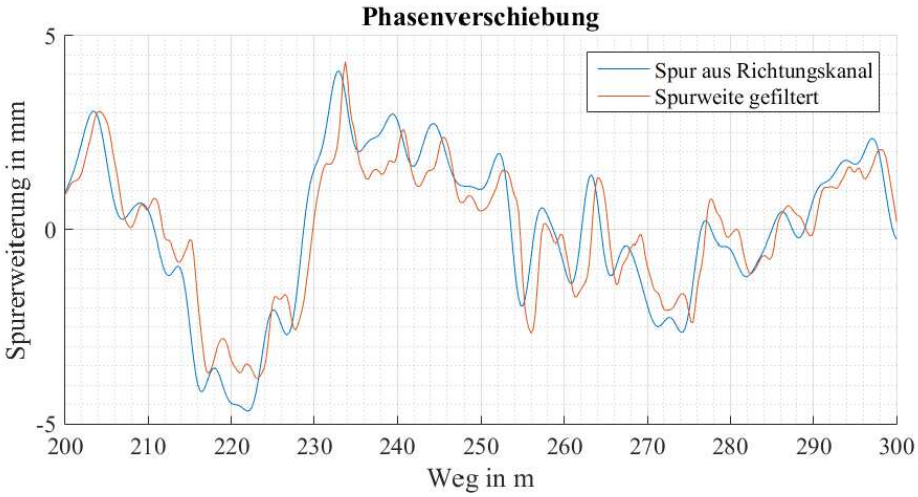


Abbildung 49: Phasenverschiebung Richtungssignal

Während die kleinsten Wellenlängen der Richtungs- und Höhenfehler bei 3 m liegen, kommen in den restlichen Signalen auch Wellenlängen < 3 m vor. Da diese dann zum Wellenlängenbereich D0 gehören und hier laut Norm eine Schrittweite von 0,1 m bei der Messung empfohlen wird, werden aus allen Signalen die 3 m Wellenlängen über einen digitalen Tiefpassfilter (Butterworth 4. Ordnung) mit der Eckwegfrequenz von 1/3 1/m phasengleich herausgefiltert. Zusätzlich ist die Auflösung der Krümmung und der Steigung gering, sodass es zu einem stufenförmigen Verlauf der Daten kommen kann. Um unrealistische Spitzen bei der Interpolation der Datenpunkte in „Simpack“ zu vermeiden, ist ein Filtern der Daten auf jeden Fall notwendig.

Tabelle 14 gibt die maximalen Anregefrequenzen der Richtungs- und Höhenfehler je Messstelle an. Die in Tabelle 3 angegebenen Bereiche werden nicht erreicht. Allerdings ist es nicht das Ziel, dynamische Größen zu bestimmen, sondern den quasistatischen Verlauf der Kräfte über die Messstelle. Daher ist es wichtig, dass die Wellenlängen der Gleislagedaten im Bereich der Länge der Messstellen liegen. Leider steht bei der Messstelle BS der Wellenlängenbereich D2 nicht zur Verfügung. Wie Kapitel 4.6 zeigen wird, können mit den betrachteten Messstellen keine quasistatischen Größen gemäß EN 14363 bestimmt werden, da die Messstellen einen zu kurzen Streckenabschnitt erfassen.

Strecke	f_{min} in Hz	f_{max} in Hz
AS07 (160 km/h)	0,6	15
AS07 (220 km/h)	0,9	20
VE10 (118 km/h)	0,5	11
GA19 (80,5 km/h)	0,3	7,5
BS (61,25 km/h)	0,7	6

Tabelle 14: Anregefrequenzen nach Messstellen

Die aufbereiteten Daten müssen in ein entsprechendes Input-File von „Simpack“ geschrieben werden und können dann in „Simpack“ ausgelesen werden. Hier können die Files ausgewählt und zusätzliche Einstellungen getätigt werden. Unter anderem wird den Gleisdaten ein gerader Streckenabschnitt am Start angehängt. In den Einstellungen

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

des Tracks können nochmals das Streckenlayout und alle Fahrbahnanregungen überprüft werden.

Ein weiteres Problem, das im Zuge der Gleislagedatenerhebung aufgetreten ist, ist die genaue Positionsbestimmung der Messstellen in Bezug auf die Kilometrierung der gemessenen Gleislagedaten. Eine genaue Bestimmung der Messstellenlage ist über die Markierungen der Fahrbahn und der ÖBB internen Gleisdatenbank möglich. Auch der Messwagen greift auf diese Gleisdatenbank zu, aber aufgrund physikalischer Rahmenbedingungen ist gemäß Auskunft der ÖBB mit einer Toleranz der Messstellenlage von ± 2 m zu rechnen. Tabelle 15 gibt die Lage der Messstellen in Bezug auf die Streckenkilometer an. Der Start und das Ende verstehen sich auf die Mitte des ersten und letzten Schwellenfachs. Auch wenn nur quasistatische Größen betrachtet werden, ist die Lage der Messstelle vor allem auf der geraden Strecke bei AS07 von entscheidender Bedeutung. Hier können Abweichungen von der Lage von ± 2 m zu komplett unterschiedlichen Ergebnissen führen (siehe Kapitel 4.6). Da die Wegkoordinate in „Simpack“ bei Verwendung eines geraden Streckenabschnitts am Anfang der Gleislagedaten mit 0 m beginnt, entsprechen die Positionen der Messstellen in „Simpack“ nicht der in Tabelle 15 angegebenen Kilometrierung. Die Lage der Messstellen in Bezug auf die Auswertung in der Simulation wird in den entsprechenden Kapiteln angeführt.

Strecke	km Start	km Ende
AS07	172,31540	172,32446
VE10	148,68703	148,70208
GA19	9,06443	9,07314
BS	97,29175	97,30072

Tabelle 15: Messstellenposition nach Streckenkilometrierung [44]

4.2.6 Fahrwiderstände

Die während der Fahrt auf ein Schienenfahrzeug wirkenden äußeren Kräfte führen zu einem Widerstand gegen die Fahrtrichtung. Daher muss die Lokomotive auch bei konstanter Geschwindigkeit Traktionskräfte erzeugen. Der gesamte Fahrwiderstand setzt sich zusammen aus den folgenden Komponenten [45]:

- Rollwiderstand
- Reibungswiderstände in den Lagerungen der Radsätze
- Widerstände, die durch Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn hervorgerufen werden (abhängig vom Verhalten der Fahrwerke z. B. Dämpfer)
- Luftwiderstand
- Bogenwiderstand
- Steigungswiderstand

Insbesondere für die numerische Simulation ist nun relevant, welche Widerstände im Modell abgebildet werden und welche nicht. Aufgrund der Modellierung der Fahrwerke, des Rad-Schiene-Kontaktes und der Fahrbahnanregung werden der Rollwiderstand und die Widerstände, die durch Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn hervorgerufen werden, berücksichtigt. Gleiches gilt für den Bogenwiderstand und den Steigungswiderstand, die von der Gleislage und den Rad-Schiene-Kontaktparametern abhängig sind. Je näher die in das Simulationsprogramm eingegebenen Parameter den realen Bedingun-

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

gen kommen (z. B. Verwendung von realen Schienenprofilen), desto besser werden auch die entsprechenden Fahrwiderstände abgebildet. Die Reibungswiderstände in den Radsatzlagern werden in den vorhandenen Modellen nicht berücksichtigt, könnten aber, bei Vorhandensein von Messdaten zum Reibungsverhalten in das Modell eingebunden werden. Bei Analysen des gesamten Antriebsstrangs der Lokomotive wären die Lagerreibungen relevante Größen, um z. B. den Wirkungsgrad des Antriebs bestimmen zu können. In der Realität ist mit einer leichten Bremswirkung durch die Lagerreibungen zu rechnen, die in der Regel dank der Rollenlager sehr gering ausfällt und damit für die Simulationen vernachlässigbar ist. Bei hohen Geschwindigkeiten stellt der Luftwiderstand einen Großteil des Fahrwiderstandes dar. Nach [45] ist bei Geschwindigkeiten ab 200 km/h mit einem Anteil des Luftwiderstands von 90 % vom Gesamtwiderstand zu rechnen. „Simpack“ erlaubt zwar, mit spezifischen Kraft-Elementen den Luftwiderstand zu simulieren, dazu werden aber entsprechende Parameter wie der Luftwiderstandsbeiwert benötigt. Für genaue Betrachtungen kann durch Eingabe entsprechender Parameter der Luftwiderstand im Bogen (Einbeziehen der Seitenflächen des Fahrzeugs) simuliert werden. Für den gesamten Luftwiderstand müsste weiters der gesamte Zugverband betrachtet werden. Die aerodynamischen Parameter der verwendeten Schienenfahrzeuge stehen allerdings nicht zur Verfügung. Wichtig wird der Einfluss des Luftwiderstandes allerdings bei der Simulation der Lokomotive und den entsprechenden Traktionskräften. Um den Luftwiderstand zu simulieren, werden daher die aus der Messung bekannten Traktionskräfte verwendet und als Eingang für die Simulation herangezogen.

4.2.7 Geschwindigkeitsregelung der Lokomotive

Die Regelung von Traktions- und Bremskräften von Schienenfahrzeugen stellt ein eigenes komplexes Themengebiet dar. So sollte z. B. beim Anfahren einer Lokomotive im Bereich des Kraftschlusslimits eine Verteilung der Antriebsmomente so erfolgen, dass für jeden Radsatz das Kraftschlussmaximum gefunden wird. Weiters muss die Regelung das Schleudern (bzw. Gleiten bei Bremsvorgängen) verhindern. „Simpack“ erlaubt, mittels Ko-Simulationen mit z. B. „Matlab“ komplexe Regelalgorithmen in der MKS Simulation zu berücksichtigen. Da in dieser Diplomarbeit meist nur konstante Geschwindigkeiten des Zugverbands berücksichtigt werden, die Traktionskräfte deutlich unter den Sättigungswerten erfordern, wird ein direkt in „Simpack“ verfügbarer Regler verwendet. Es wird ein sogenannter Track Controller, der auf die Regelung von Geschwindigkeiten in longitudinaler Richtung angepasst ist, verwendet. Dieser stellt einen realen PID Regler dar, wobei Parameter wie Proportionalitätsfaktor, Nachstellzeit, Vorhaltzeit und sog. parasitäre Zeitkonstanten anzugeben sind. Die Ausgangsgröße des Reglers hat die Form eines Drehmomentes, welches auf die vier Radsätze der Lokomotive gleichmäßig verteilt wird. Die Parameter des Reglers wurden in einer einfachen Parameterstudie empirisch bestimmt. Grundsätzlich wurde darauf geachtet, dass kein Überschwingen auftritt und der Regler eher träge arbeitet, um unerwünschte Ausschläge zu vermeiden. Die wirkenden Traktionskräfte der Lokomotive werden aus den gemittelten Werten der Messdaten bestimmt und dem Modell zugewiesen.

4.3 Durchführung der numerischen Simulation und Solver Settings

Für die numerische Integration werden die von „Simpack“ empfohlenen Solver Einstellungen bei Verwendung des Moduls „Simpack Rail“ verwendet (Details siehe [13]).

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

Bei Auswahl der „Time Integration with Measurements“ wird die numerische Simulation durchgeführt. Die Datenausgabe kann entweder in einem „Simpack“ spezifischen Dateiformat erfolgen, welches in „Simpack“ Post geöffnet werden kann, oder die Datenausgabe erfolgt direkt in ein „Matlab“ File. Für eine weitergehende Verarbeitung der Daten und einen Vergleich mit der Messdatenauswertung werden die Daten in einem „Matlab“ File ausgegeben. Wird eine reine Offline-Integration durchgeführt, werden alle verfügbaren Informationen, die im Laufe der Simulation berechnet werden, in das Ergebnis-File geschrieben. Darunter sind z. B. die Zustände aller Joints oder Kräfte in allen Force Elements. Die sich daraus ergebenden Datenmengen können selbst bei kurzen Modellzeiten mehrere hundert Megabyte betragen. Da für den Vergleich mit den Messdaten nur eine begrenzte Menge an Informationen benötigt wird, kann über eine DoE (Design of Experiment) Berechnung jener Datensatz ausgewählt werden, der in weiterer Folge benötigt wird. So kann die Datenmenge deutlich reduziert werden. Zusätzlich bietet die DoE Berechnung den Vorteil, dass dort - ohne das ursprüngliche Modell zu verändern – Parametervariationen durchgeführt werden können. Da z. B. keine konkreten Informationen über den Reibwert und den Schmierzustand der Spurkränze vorliegen, kann so eine Variation der entsprechenden Parameter durchgeführt werden. Ebenso können über eine Parametersteuerung die Geschwindigkeit, die freie Seitenbeschleunigung oder die Schienenprofile variiert werden. Folgende fünf Aktionen werden bei jeder Simulation im DoE Bereich durchgeführt:

- Test Call: Überprüfung, ob alle Eingaben korrekt
- Preload: Wird z. B. eine Zusatzbeladung im Modell berücksichtigt, wird das Modell in einen Zustand des Gleichgewichts gebracht. Dadurch werden unrealistische Schwingungen beim Start der Simulation vermieden.
- Update Initial Vehicle Velocity: Die gewünschte Geschwindigkeit wird dem Modell zugewiesen.
- Time Integration
- Measurements: Die gewählten Ergebnisgrößen werden bestimmt

Die erhaltenen Ergebnisse werden gemäß EN 14363 mit einem Tiefpassfilter 4.Ordnung (Butterworth) bei einer Eckfrequenz von 20 Hz gefiltert.

4.4 Betrachtung des Regressionsmodells nach EN 14363 Anhang K

Das bereits vorgestellte Regressionsmodell für T_γ (Gleichungen 2.3 und 2.4) wurde gemäß Anhang K über ein generisches Fahrzeugmodell hergeleitet, bei dem eine Variation von Fahrzeug- und Fahrwegparametern durchgeführt wurde. Unter anderem wurden die Ausdrehsteifigkeit der Radsätze, der Radsatzabstand und die statische Radlast variiert. Daher ist es angebracht, einen Vergleich zwischen T_γ und T_{qst} mit einem spezifischen Fahrzeugmodell („Railjet“-Reisezugwagen) unter Variation der Fahrweg- und Rad-Schiene Kontaktparameter durchzuführen. Auf eine fahrbahnseitige Anregung durch Gleislagefehler wird verzichtet, da hier quasistatische Größen berechnet werden. Die Geschwindigkeit wird bei den einzelnen Simulationen stets konstant gehalten. Ferner werden ausschließlich neuwertige Schienen- und Radprofile in der Simulation verwendet. T_γ und T_{qst} werden, wie in der Norm gefordert, jeweils für das führende kurvenäußere Rad eines Drehgestells ermittelt. Für den vierachsigen Reisezugwagen ergeben sich daher zwei ausgewertete Laufräder. In den folgenden Diagrammen sind jeweils

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

auch drei horizontale strichlierte Linien eingetragen. Diese repräsentieren die Grenzen für die Bereiche der Schienenoberflächenschädigung (siehe Kapitel 2.5). In der ersten Grafik sind die einzelnen Bereiche beschriftet.

4.4.1.1 Variation des Bogenradius

Abbildung 50 zeigt die Abhängigkeit von T_γ und T_{qst} vom Bogenradius, wobei stets mit einer konstanten freien Seitenbeschleunigung a_q von 0,5 m/s² (Geschwindigkeit wurde bei konstanter Überhöhung angepasst), einem Reibwert von 0,4 und ohne Schmierung im Spurkranz simuliert wurde[4]. Deutlich zu erkennen ist, dass es sowohl absolut als auch relativ deutliche Abweichungen zwischen den Werten T_γ und T_{qst} gibt.

Erwartungsgemäß ist die Schienenschädigung (besonders bei enger werdenden Bogenradien) für den ersten Radsatz des Wagens höher als beim dritten Radsatz, da der erste Radsatz bei den hier betrachteten Drehgestellfahrzeugen die höchsten Führungskräfte aufweist. Bei Bogenradien von 200 m bis ca. 550 m ist T_{qst} größer als T_γ. Der Bereich, in dem Verschleiß und RCF auftritt, wird jeweils bei ca. 500 m Bogenradius erreicht. Ab einem Bogenradius von ca. 600 m wird T_γ größer als T_{qst}. Nach T_γ wäre mit reinem RCF ab einem Bogenradius von ca. 1250 m zu rechnen, während das bei T_{qst} schon bei ca. 750 m der Fall wäre. Bei größer werdenden Bogenradien geht T_γ gegen null, da die lateralen und longitudinalen Kräfte im Mittel ebenfalls null sind (kein quasistatischer Anteil). Da T_{qst} definitionsbedingt (Gleichung 2.3) stets die vertikale Kraft beinhaltet, wird T_{qst} nicht exakt null. Da T_{qst} nicht auf geraden Streckenabschnitten zu bestimmen ist, spielt das allerdings keine Rolle.

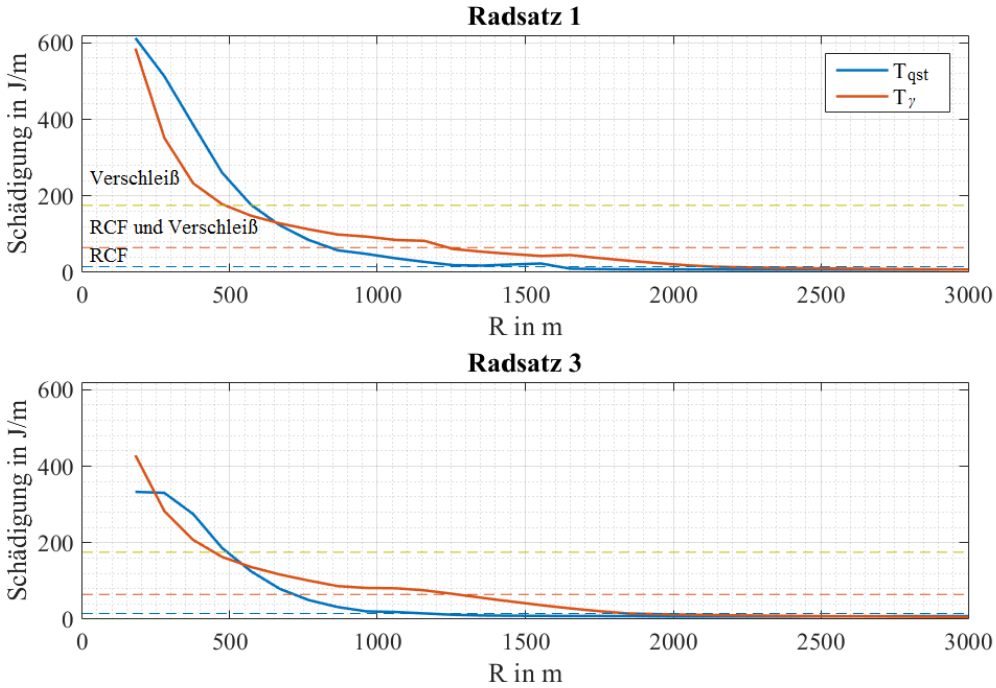


Abbildung 50 T_γ und T_{qst} im Vergleich R variiert

[4] Wenn nicht gesondert angeführt, dann werden bei allen folgenden Simulationen keine geschmierten Spurkränze berücksichtigt.

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

4.4.1.2 Variation von a_q

Für die nächste Parametervariation wurde die freie Seitenbeschleunigung bei einem konstanten Bogenradius von 600 m variiert. Der 600 m Bogenradius wurde deswegen gewählt, weil die Abweichungen von T_γ zu T_{qst}, wie vorher zu sehen, in diesem Fall vergleichsweise gering sind. Der Reibwert wird wieder mit 0,4 angenommen. Die Schädigung nimmt bei Radsatz 1 über den gesamten Bereich von a_q Werte nahe 150 J/m an (siehe Abbildung 51). Während T_γ bei Anwachsen der freien Seitenbeschleunigung an beiden Radsätzen sinkt, steigt bei Radsatz 1 bei höheren a_q-Werten T_{qst} aufgrund der wachsenden Y-Kraft. Die Abweichungen sind besonders bei Radsatz 3 groß und wachsen mit steigendem a_q.

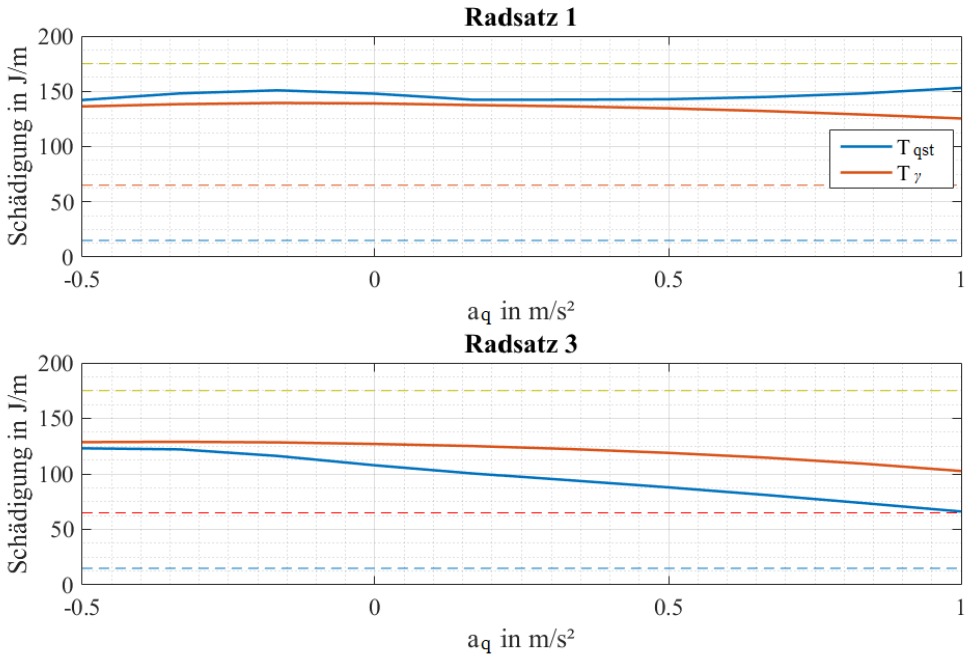


Abbildung 51: T_γ und T_{qst} im Vergleich a_q variiert

4.4.1.3 Variation des Reibwerts

Abbildung 52 zeigt die Abhängigkeit vom Reibwert, wobei hier wiederum die Simulation mit einer freien Seitenbeschleunigung von 0,5 m/s² und einem Bogenradius von 600 m durchgeführt wurde. Logischerweise steigt T_γ an beiden Radsätzen mit dem Reibwert, da durch den höheren Reibwert auch höhere Tangentialkräfte übertragen werden können. T_{qst} folgt diesem Verlauf, wobei mit steigendem Reibwert der relative Fehler zwischen den beiden Werten an Radsatz 3 größer wird. Weiters ist bei dieser Grafik gut zu erkennen, dass bei geringen Reibwerten eher mit RCF zu rechnen ist. Dagegen kann durch hohe Reibwerte mehr Energie in die Schiene eingebracht werden, was zu einem erhöhten Verschleiß führt.

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

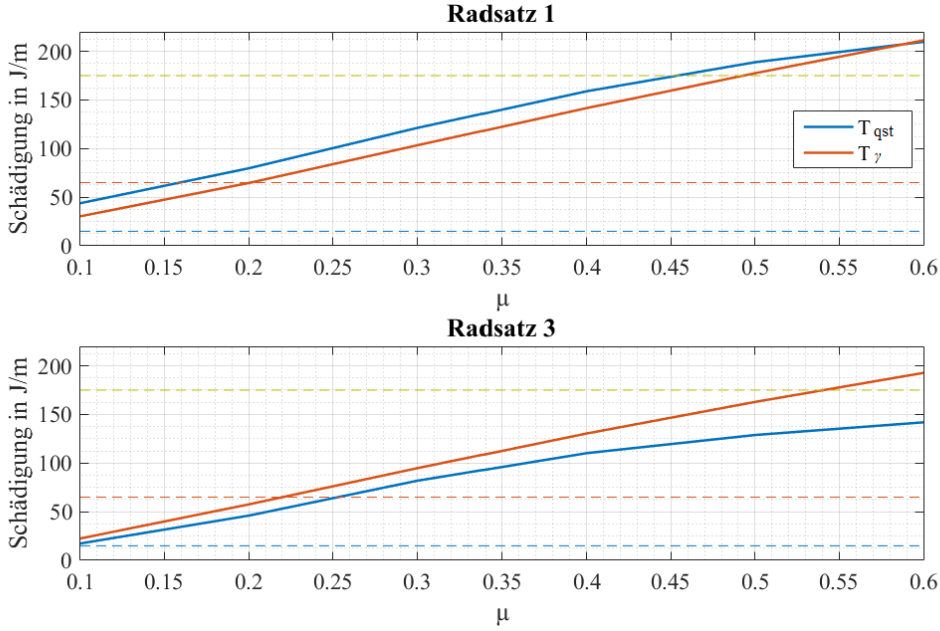


Abbildung 52: T_γ und T_{qst} im Vergleich mit variierten μ

4.4.1.4 Variation des Einflusses von Spurkranzschmiersystemen

Der Einfluss von geschmierten Spurkränzen wurde mit den gleichen Parametern wie bei der Abhängigkeit vom Reibwert am Radaufstandspunkt analysiert, wobei der Reibwert nun mit 0,4 konstant gehalten wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 53 dargestellt. Die Abszisse zeigt den Faktor, mit dem der Reibwert der Lauffläche multipliziert wird, um den reduzierten Reibwert im Spurkranz zu erhalten. Besonders gut zu erkennen ist, dass sich mit sinkendem Reibwert im Spurkranz (Faktor wird kleiner) T_γ und T_{qst} voneinander entfernen. Während sich die Y-Kräfte der führenden äußeren Radsätze bei sinkender Reibung im Spurkranz kaum verändern, können aufgrund der reduzierten Reibung im Spurkranz nur geringere Tangentialkräfte übertragen werden. Somit weisen T_γ und T_{qst} hier ein indirekt proportionales Verhalten auf.

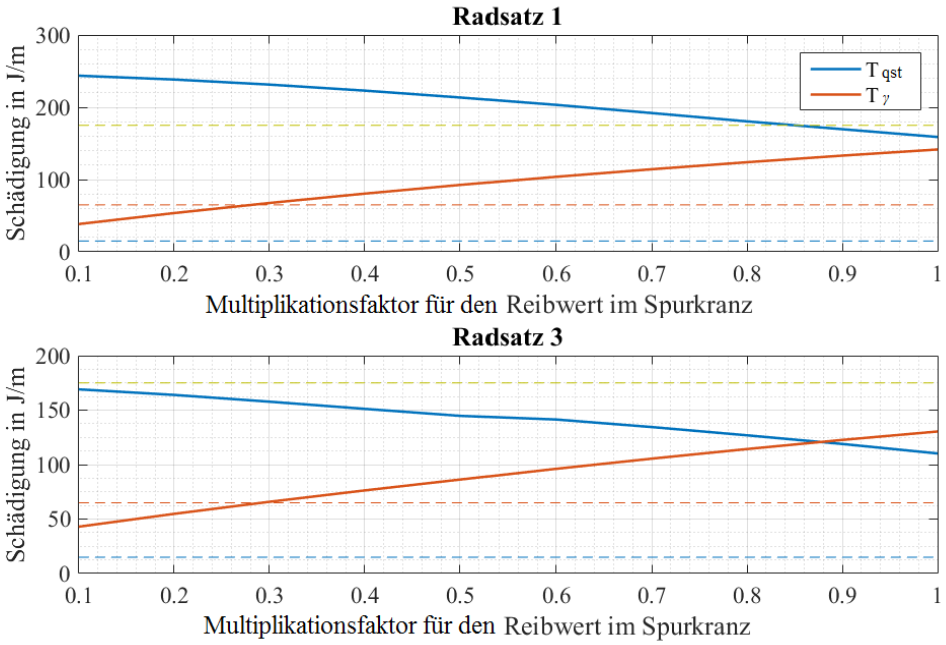


Abbildung 53: T_γ und T_{qst} im Vergleich - Reibwert im Spurkranz variiert

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

4.4.1.5 Schlussfolgerung aus der Parameteranalyse

Die oben angeführten Vergleiche haben gezeigt, dass – mit Ausnahme des Einflusses von geschmierten Spurkränzen – T_γ und T_{qst} direkt proportional zueinander sind. Allerdings ist in einigen Fällen mit hohen relativen und absoluten Abweichungen zu rechnen. Abweichungen zufolge der Einflüsse von weiteren Größen, wie eine variierte Spurweite und variable Schienen- und Radprofile, könnten zukünftig untersucht werden. Der indirekt proportionale Verlauf zwischen T_γ und T_{qst} bei Berücksichtigung von geschmierten Spurkränzen deutet darauf hin, dass geschmierte Spurkränze nicht im Regressionsmodell der Norm EN 14363 berücksichtigt wurden. Wenn reale Betriebsbedingungen abzubilden sind, müssen Spurkranzschmiersysteme allerdings berücksichtigt werden. Die großen absoluten und relativen Fehler der beiden Größen legen nahe, eine für das konkrete Fahrzeugmodell gesonderte Regression zu erstellen, um zu überprüfen, ob auch ein quantitativer Zusammenhang zwischen den Größen hergestellt werden kann, der zu einer konkreten Abschätzung der Schienenoberflächenschädigung führt.

4.5 Einfluss der Wellenlängenbereiche

Um zu zeigen, welchen Einfluss die Anregungen durch Gleislagefehler auf die Kräfte in den Kontaktgebieten haben, wurden Simulationen mit den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen der Richtungs- und Höhenfehler durchgeführt. Es sei angemerkt, dass die aus der Simulation erhaltenen Größen jeweils gegenüber der Zeit als unabhängige Größen ausgewertet sind. Da sich für einen Vergleich mit den Messdaten die Darstellung über den Weg als wesentlich geeigneter erweist als jene über die Zeit, wird im Weiteren auch nur diese Darstellung verwendet. Zu beachten ist, dass für die jeweilige Wegkoordinate die Position der Radsätze herangezogen wird. Der Bezugspunkt je Radsatz ist der Mittelpunkt der Radsatzwelle.

Abbildung 54 zeigt die drei Kräfte am führenden rechten Radsatz (RS1) eines „Railjet“-Reisezugwagen auf der geraden Strecke bei AS07 in einem Ausschnitt von 100 m. Für die Simulation wurden die gemessenen Schienenprofile verwendet, mit einem Reibwert von 0,4 bei 220 km/h. Die Messstelle befindet sich in dieser Darstellung zwischen 314,5 und 324 m (± 2 m) und wird durch zwei vertikale rote Linien angedeutet. Es sind jeweils vier Kurven aufgetragen, wobei beide aufsummierten Wellenlängenbereiche (D1 + D2), die einzelnen Wellenlängenbereich (D1 oder D2) und eine Trassierung ohne Anregung dargestellt werden (siehe Legende). Die Signale für Krümmung, Überhöhung und Steigung werden in allen Simulationen - mit Ausnahme der blauen Kurve, die eine ideal gerade und ebene Strecke darstellt - berücksichtigt.

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

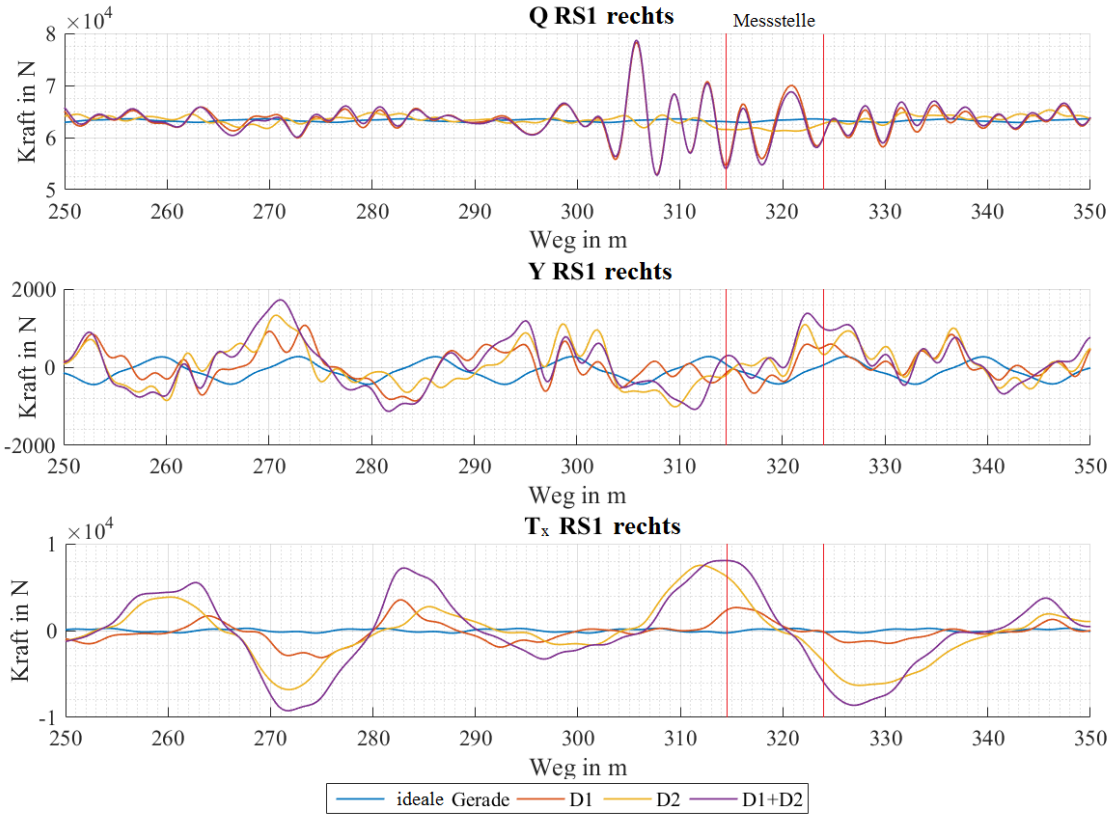


Abbildung 54: Einfluss Wellenlängenbereiche AS07

Bei der vertikalen Kraft Q ist zu erkennen, dass es im Bereich der Messstelle zu starken Schwingungen kommt (Kapitel 5.2.1 zeigt einen Vergleich mit den 0,15 % und 99,85 % Werten der Messdaten), die möglicherweise auf an dieser Stelle auftretende erhebliche Höhenabweichungen zurückzuführen sind. Hier handelt es sich um Schwingungen im Wellenlängenbereich D1. Im Gegensatz dazu zeigt der Verlauf der Längskraft T_x, dass hier der Wellenlängenbereich D2 den größten Beitrag zum Gesamtergebnis (D1+D2) liefert. Die Ausschläge sind hier auf die langwelligen Richtungsabweichungen in D2 zurückzuführen. Weiters ist im Verlauf der Y-Kraft zu erkennen, dass sich diese (D1 + D2 oder D2) mit der gleichen Periode wie die Kraft in Längsrichtung verändert. Es ist zu beachten, dass diese Wellenbewegung nicht durch den bekannten Sinuslauf zustande kommt, sondern durch die lateralen Gleislagefehler. Der Sinuslauf ist auf dem rein geraden Streckenabschnitt ohne Gleislagefehler gut zu beobachten (blaue Kurve). Nach der Formel von Klingel (Gleichung 4.8 aus [45]) ergibt sich für einen einzelnen konischen Radsatz die Wellenlänge λ_{sin} in m.

$$\lambda_{sin} = 2\pi\sqrt{\frac{b \cdot r}{2\tan(\gamma)}} \tag{4.8}$$

Mit b als Abstand zwischen den Berührpunkten (ca. 1,5 m), r als nominellem Radradius (ca. 0,46 m), γ als Kegelneigung, wobei hier die äquivalente Konizität für kleine Verschiebungen aus „Simpack“ ausgelesen wird (ca. tan(γ) = 0,1), ergibt sich eine Wellenlänge von ca. 12 m. Dieser Wert entspricht in etwa jener Wellenlänge, die aus der Y-Kraft ausgelesen werden kann (blaue Kurve im mittleren Diagramm von Abbildung 54).

Abbildung 54 hat deutlich gezeigt, dass besonders auf geraden Streckenabschnitten beide Wellenlängenbereiche, D1 und D2, relevant für die Ergebnisse sind, da es keine

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

quasistatischen Anteile in den Y und T_x Kräften gibt. Insbesondere weil die Messstelle eine Länge von knapp 10 m hat, sind genaue Gleislagedaten mit erweitertem Wellenlängenbereich nach EN 13848-1 für die Mittelwertbildung über die Messstelle von großer Bedeutung. Besonders bei hohen Geschwindigkeiten könnten auch noch Wellenlängen im Bereich D3 aus den Gleislagedaten relevant sein.

Im Folgenden zeigt Abbildung 55 das Verhalten im Bogen für das äußere führende Rad im Bereich der Messstelle GA19, die sich hier zwischen 364 und 373,5 m (± 2 m) befindet (markiert durch zwei vertikale rote Linien). Für die Simulation wurden die gemessenen Schienenprofile verwendet, mit einem Reibwert von 0,4 bei 80,5 km/h Fahrgeschwindigkeit. Die blaue Kurve stellt das Ergebnis bei gefilterten Trassierungsdaten dar und repräsentiert damit den quasistatischen Anteil. Bei Überhöhung, Spurweite und Krümmung wurden dazu jeweils Wellenlängen kleiner 70 m herausgefiltert. Die restlichen Kurven unterscheiden sich wieder in den Wellenlängenbereichen der Gleislagefehler Richtung und Höhe. Im Vergleich zum quasistatischen Anteil ist der relative Anteil durch die Anregung deutlich geringer als auf der Geraden. Trotzdem können die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche einen wesentlichen Einfluss auf die Mittelwerte der Kräfte über die Länge der Messstelle haben. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der sich daraus ergebenden Erregungsfrequenzen aus Kapitel 4.2.5 wäre hier der Einfluss des Wellenlängenbereichs D0 interessant.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass trotz Betrachtung von quasistatischen Größen die Erregung durch das Gleis eine entscheidende Rolle spielt. Da der Wellenlängenbereich der Gleislagefehler mit 3 bis 70 m begrenzt ist, wäre es für zukünftige Betrachtungen sinnvoll, die Filterung der Messdaten im Oberbaumesswagen der ÖBB anzupassen. Ein möglicher Einfluss von Überschneidungen oder Lücken bei Übergang von D1 auf D2 kann im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht bewertet werden.

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

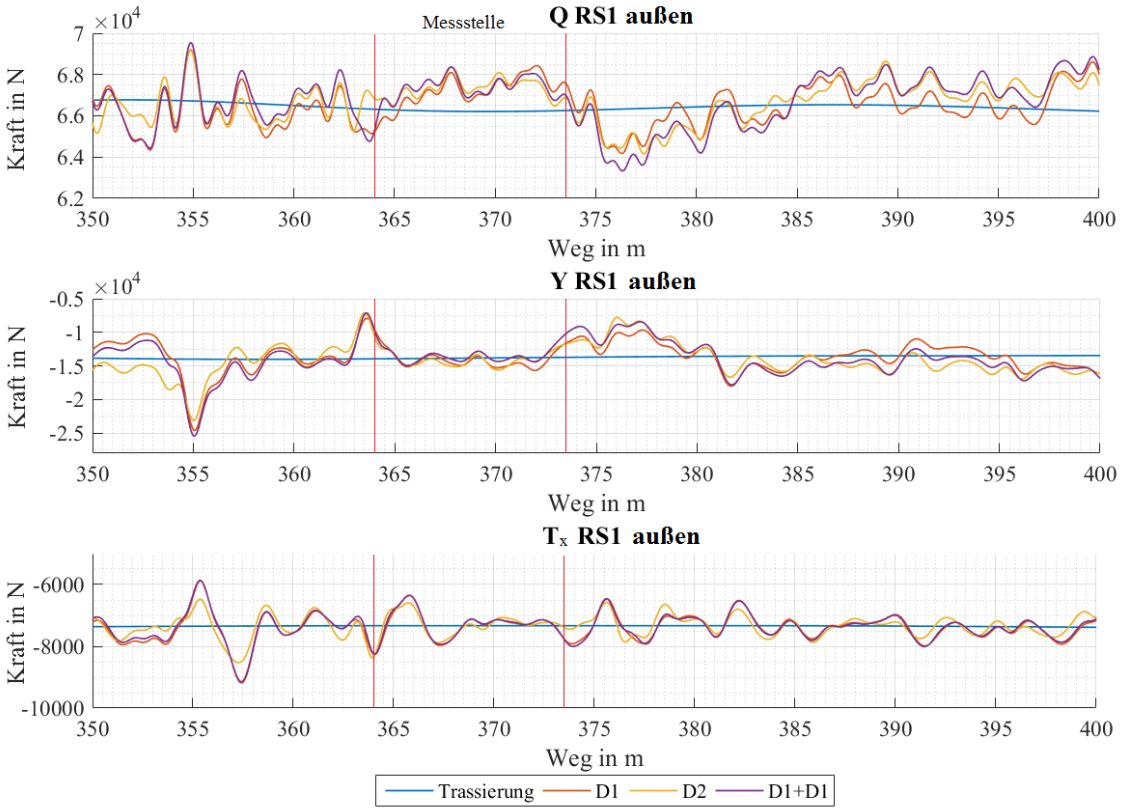


Abbildung 55: Einfluss Wellenlängenbereiche GA19

4.6 Einfluss der Messstellenlage

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, werden die simulierten Daten über die Messstellenlänge gemittelt. Kapitel 4.2.5 hat gezeigt, dass die Genauigkeit der Lagebestimmung der Messstellen in Bezug auf die Gleislagedaten mit ± 2 m angenommen werden kann. Der aus dem vorherigen Kapitel bekannte Kraftverlauf des ersten Radsatzes auf dem geraden Streckenabschnitt bei der Messstelle AS07 ist in Abbildung 56 nochmals angeführt, wobei hier exemplarisch nur der Verlauf der Kraft in Längsrichtung betrachtet wird. Dieser Verlauf weist offenbar eine Wellenlänge von ca. 30 m auf.

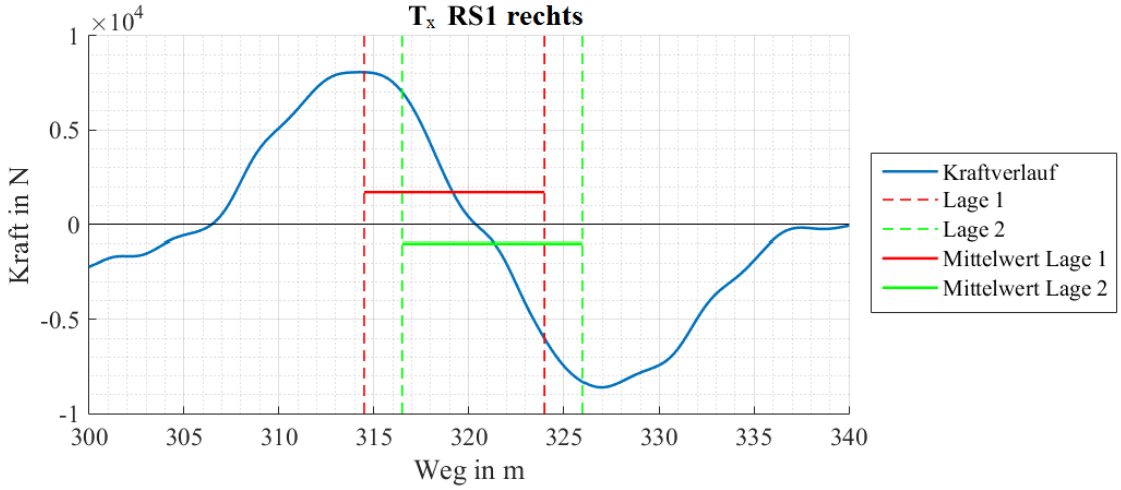


Abbildung 56: Einfluss der Messstellenlage

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

Weiters ist die gemessene Lage der Messstelle (rot strichliert) eingetragen. Zusätzlich ist eine angedachte um zwei Meter versetzte Messstellenlage dargestellt (grün strichliert). Die Wegkoordinate in den Simulationsergebnissen ergibt sich aus der Länge der zur Verfügung gestellten Gleislagedaten und dem geraden Streckenabschnitt, der in „Simpack“ am Anfang der Strecke eingefügt wird. Die sich aus den Positionen der Messstellen ergebenden Mittelwerte werden durch gleichfarbige durchgezogene Linien dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass daher die exakte Lage der Messstelle auf einer geraden Strecke bzw. auf einer Strecke mit großen Bogenradien einen erheblichen Einfluss auf die zu messenden Größen hat. Die Mittelwerte unterscheiden sich demnach bei einer exemplarischen Verschiebung der Lage um nur zwei Meter deutlich (rot: 1800 N, grün -1000 N). Selbst bei Betrachtung der Lokomotive, bei der ein quasistatischer Anteil zufolge der Längskräfte der Traktion vorhanden ist, ist die Lage der Messstelle sehr wichtig, da sich der dynamische Anteil und der quasistatische Anteil überlagern. Dieses Verhalten ist auch schon in den Messdaten in Abbildung 24 zu erkennen, bei der auf der rechten Schiene bei der Lokomotive deutlich höhere Kräfte auftreten als bei der linken Schiene. In der Bogenfahrt hingegen nehmen die dynamischen Anteile in Relation zu den quasistatischen Anteilen ab, und die Messstellenlage hat beim Ermitteln der quasistatischen Größen keinen so großen Einfluss. Nichtsdestotrotz ist auch im Bogen, z. B. bei Vorhandensein von besonders ausgeprägten Gleislagefehlern im Bereich der Messstelle, für eine realitätsnahe Mittelung der Kräfte die Kenntnis der genauen Position der Messstelle wichtig. Für den Vergleich zwischen Messdaten und Simulation ergibt sich daher eine mögliche Fehlerquelle.

Die Simulationsergebnisse lassen daher folgende Schlussfolgerung zu: Ist es das Ziel, quasistatische Kräfte mit einer Messstelle zu bestimmen, dann muss die Länge der Messstelle so gewählt werden, dass diese die größten relevanten Wellenlängen erfassen kann. Werden z. B. die Messaufnehmer nicht in jedem Schwellenfach montiert, sondern in größeren Abständen, reicht das zur Bestimmung der quasistatischen Kräfte. Allerdings darf der Abstand zwischen den Aufnehmern nicht zu groß werden, um sogenannte Aliasing Effekte zu vermeiden. Will man hingegen dynamische Kräfte messen, muss einerseits die Messstelle ausreichend lang gewählt werden und andererseits muss der Abstand zwischen den Messaufnehmern entsprechend dem auflösbaren Wellenlängenbereich angepasst sein.

4.7 Simulationsergebnisse

4.7.1 Allgemeine Anmerkungen

Sämtliche Resultate der Simulationsrechnung wurden direkt mittels „Matlab“ verarbeitet und ausgewertet. Wie bereits erwähnt, wird die Simulation mit Einzelfahrzeugen durchgeführt. Die Messdatenauswertung aus Kapitel 3.4.4 hat gezeigt, dass die Abweichungen der Kräfte über den gesamten Zugverband relativ gering sind. Weiters werden meist Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit betrachtet, wodurch der Einfluss von Brems- und Beschleunigungsvorgängen auf die Zugdynamik wegfällt.

Durch die Reibwertabschätzung aus den Messergebnissen kann von einem trockenen Schienenzustand für die Simulation ausgegangen werden. Daher wird für AS07 stets mit einem Reibwert von 0,4 gerechnet. Variationen über den Reibwert bei AS07 haben

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

gezeigt, dass der Einfluss des Reibwerts auf die Ergebnisse bei einer geraden Strecke relativ gering ist. Das liegt daran, dass die Sättigung der Tangentialkräfte bei weitem nicht erreicht wird. Daher kann die Reibwertannahme solange reduziert werden, bis die Sättigung eintritt (ca. bei $\mu < 0{,}1$). Erst dann ist mit deutlich geringeren Y und T_x-Kräften zu rechnen. Bei den restlichen Strecken, die sich jeweils in einem Bogen befinden, kann ein Einfluss von geschmierten Spurkränzen und des Reibwerts relevant sein (zum tatsächlich vorhandenen Schmierzustand im Spurkranz steht keine Informationen zu Verfügung). Daher werden dort die beiden Größen auf den Schienen unabhängig voneinander variiert (DoE). Über den Vergleich mit den Messdaten kann dann das beste Ergebnis bestimmt werden. Dazu werden die Fehler der einzelnen DoE Runs zu den Messdaten bestimmt, quadriert und anschließend summiert. Jener Run mit dem geringsten Fehler stellt dann das beste Ergebnis dar. Diese Vorgehensweise dient unter anderem auch als Plausibilitätsüberprüfung. Ist z. B. der Reibwert im besten Run gering (z. B. 0,1) stellt das einen Widerspruch zu den Messdaten dar.

Je Simulation wird der Zeitverlauf von 40 benötigten Größen ausgegeben, darunter die Kräfte im Kontaktgebiet und T_γ je Rad, die Position und Geschwindigkeit des Wagenkastens, die Position der einzelnen Radsätze und die freie Seitenbeschleunigung. Nach EN 14363 und [37] werden die Ergebnisse im Zeitbereich mit einem Tiefpassfilter bei einer Eckfrequenz von 20 Hz gefiltert (Butterworthfilter 4. Ordnung). Da in Kapitel 5 ein übersichtlich dargestellter Vergleich zwischen den Messungen und der Simulation angeführt ist, wird im Folgenden nur auf interessante Details in den Kraftverläufen eingegangen.

4.7.2 Kraftverläufe

Im Folgenden seien nochmals die Kraftverläufe für ausgewählte Strecken angeführt, wobei diese nicht den Endergebnissen für den Vergleich mit der Messdatenauswertung entsprechen. Abbildung 57 zeigt den Verlauf der Kräfte in AS07 für einen Reisezugwagen bei konstanter Geschwindigkeit von 220 km/h (Bereich 2). Der Reibwert ist mit μ = 0,4 gewählt und repräsentiert trockene Bedingungen. Bei genauer Betrachtung ist beim Start des Signals ein Versatz von Radsatz 1 und 2 von 2,5 m zu erkennen. Dieser Wert entspricht dem Abstand der Radsätze im Drehgestell. Der Startpunkt des Fahrzeugs ist so gewählt, dass der letzte Radsatz (Radsatz 4, hier nicht abgebildet) genau bei der Wegkoordinate s = 0 beginnt. Die Lage der Messstelle wird auch hier wieder durch zwei vertikale rote Linien angedeutet.

Die ersten 100 m in der Simulation entsprechen einer reinen Geraden mit Nennspurweite ohne Gleislagefehler. In den nächsten 70 m wird die tatsächliche Gleislage allmählich eingeleitet. Dadurch wird sichergestellt, dass das Modell nicht abrupt in die tatsächliche Gleislage startet. Das könnte zu unrealistischen Kraftspitzen und im Extremfall z. B. bei direktem Start in einen Bogen zum Entgleisen führen. Die gerade erwähnten Bereiche sind in Abbildung 57 zu erkennen. Im Bereich des ideal geraden Streckenabschnitts sind nur geringe Ausschläge der Kräfte zu identifizieren, und es kommt wie in Kapitel 4.5 zum Sinuslauf. Sobald die Gleislagefehler voll ausgeprägt sind (ab ca. s = 170 m), sind deutlich größere Ausschläge zu erkennen. Die Vertikalkräfte zeigen zwischen 160 und 200 m und zwischen 290 und 325 m besonders hohe Ausschläge. Die Messstelle ist im Abschnitt zwischen 290 und 325 m zu finden, was eine Erklärung der hohen dynamischen Kräfte aus Kapitel 3.4.4 sein kann.

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

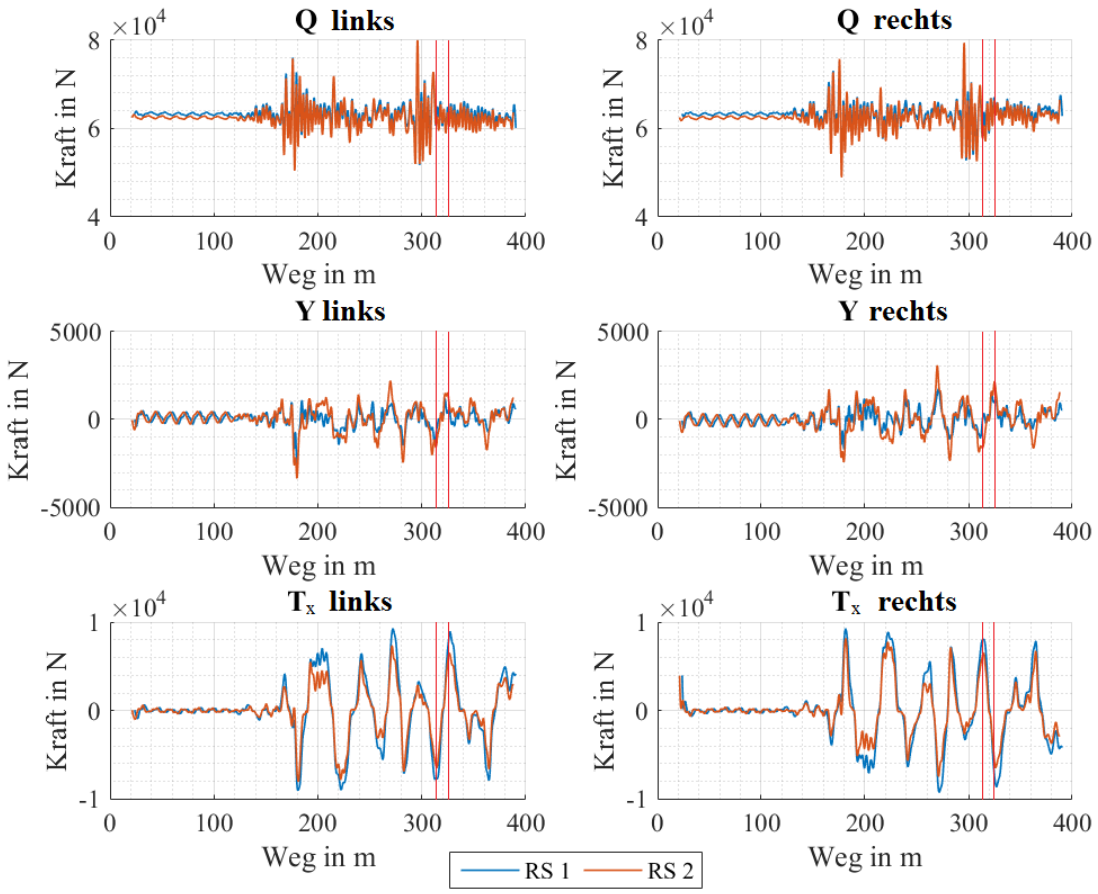


Abbildung 57: Kraftverlauf AS07 Drehgestell 1

Besonders interessant sind die lateralen und longitudinalen Kräfte. Während die *Y*-Kräfte für beide Radsätze einen nahezu identischen Verlauf aufweisen, zeigen die Längskräfte ebenfalls einen nahezu identischen Verlauf, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen (z. B. bei 200 m T_x links positiv und T_x rechts negativ). Wie in Kapitel 4.5 gezeigt, liegt diese Verhalten an den ausgeprägten langwelligen Richtungsabweichungen. In Verbindung mit Abbildung 58 (konischer Radsatz auf Schiene, die als scharfe Schneide betrachtet wird) ist zu erkennen, dass bei einer Verschiebung des Gleises in negative y-Richtung (roter Pfeil) der Radsatz nicht mehr in der Mitte des Gleises liegt. Der Radsatz beginnt sich aufgrund der entstehenden Rollradiendifferenz um die z-Achse zu drehen (Gierbewegung des Radsatzes) und in Richtung der Verschiebung zu bewegen (translatorisch in y-Richtung). Die Drehung ruft auf der linken Schiene positive Längskräfte hervor (grüner Pfeil), da sich das Rad links langsamer bewegt als rechts (Bremswirkung). Auf der rechten Schiene ist das Rad allerdings schneller, und es wirken entsprechend negative Kräfte auf die Schiene. Um die Bewegung zur Richtungsabweichung hin zu gewährleisten, werden entgegengesetzte Kräfte in y-Richtung benötigt (blaue Pfeile). Aufgrund der sich ändernden Richtungsabweichung mit Amplituden bis zu 3,5 mm ergibt sich daher der dargestellte Kraftverlauf, wobei hier zu beachten ist, dass die Betrachtung der PSD in Kapitel 4.2.5 gezeigt hat, dass es im Wellenlängenbereich D2 zur Verstärkung der tatsächlichen Richtungsabweichung kommen kann, was dann folglich auch zu erhöhten Ausschlägen in der Simulation führt.

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

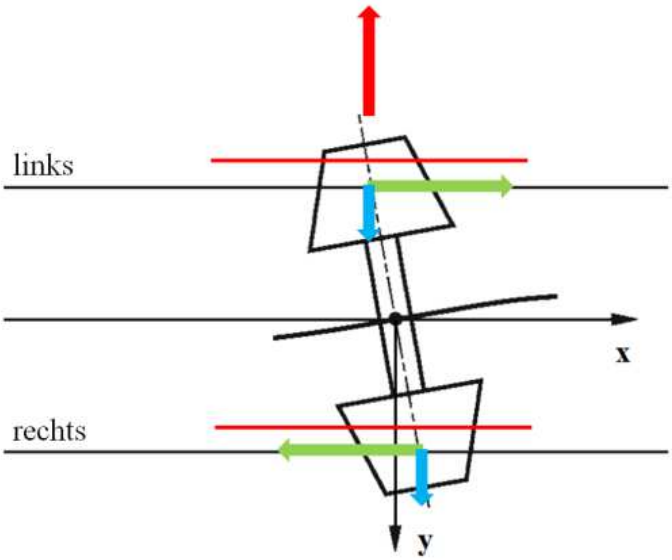


Abbildung 58: Kräfte durch Richtungsabweichungen

Abbildung 59 zeigt nun den Verlauf der Kräfte für die Strecke im Bereich der Messstelle GA19. Auch hier ist wieder ein 100 m langer gerader Streckenabschnitt zu erkennen. Der anschließende Übergangsbogen gemäß den Gleislagedaten wird bei ca. 220 m erreicht. Bei ca. 270 m beginnt dann der Bogen mit 596 m Radius, in dem die Messstelle situiert ist

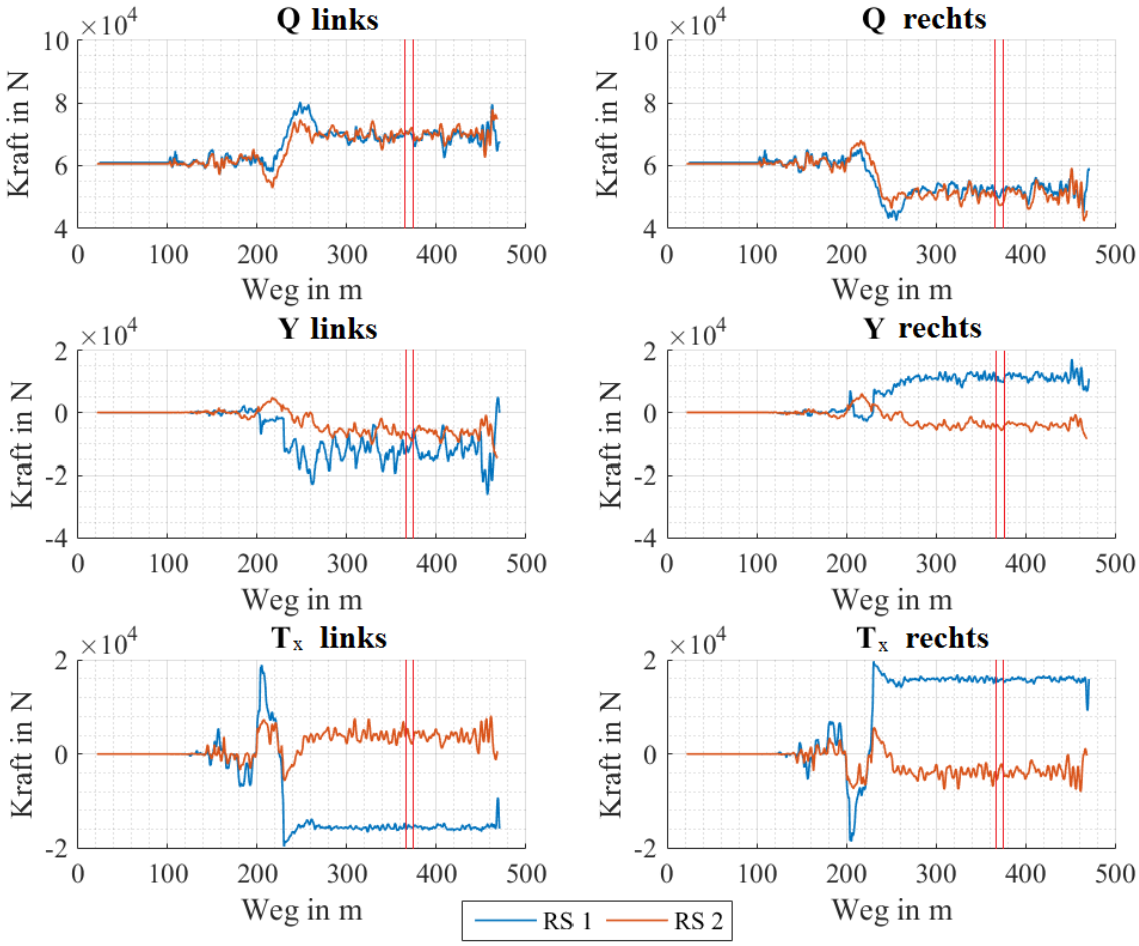


Abbildung 59: Kraftverlauf GA19 Drehgestell 1

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

Die Kräfte in der linken Diagrammhälfte entsprechen den Kräften an der Außenschiene. Erwartungsgemäß ist zu erkennen ist, dass der führende Radsatz (RS 1) besonders an der Außenschiene höhere *Y*-Kräfte aufnimmt. Das ist ein klassisches Verhalten für Schienenfahrzeuge. Die hohe *Y*-Kraft dient dazu, das Fahrzeug in der Spur zu halten. Die Größe und die Aufteilung der *Y*-Kräfte auf RS 1 und RS 2 sind unter anderem Funktionen von Steifigkeit und Geometrie der Drehgestelle.

Abbildung 60 zeigt ergänzend den Geschwindigkeitsverlauf der simulierten Lokomotive auf der Strecke bei GA19. Die Soll-Geschwindigkeit von 80 km/h wird bis auf einen kurzen Einbruch am Beginn der Simulation durch die Traktionskräfte konstant gehalten. Aufgrund der Trägheit des Reglers führen nicht alle Unregelmäßigkeiten der Gleislage zu einer Stellgrößenänderung im Regler. Der kurze Einbruch zu Beginn der Simulation lässt sich durch die erst kurz nach dem Start aktivierte Last erklären, die den Zugverband simulieren soll.

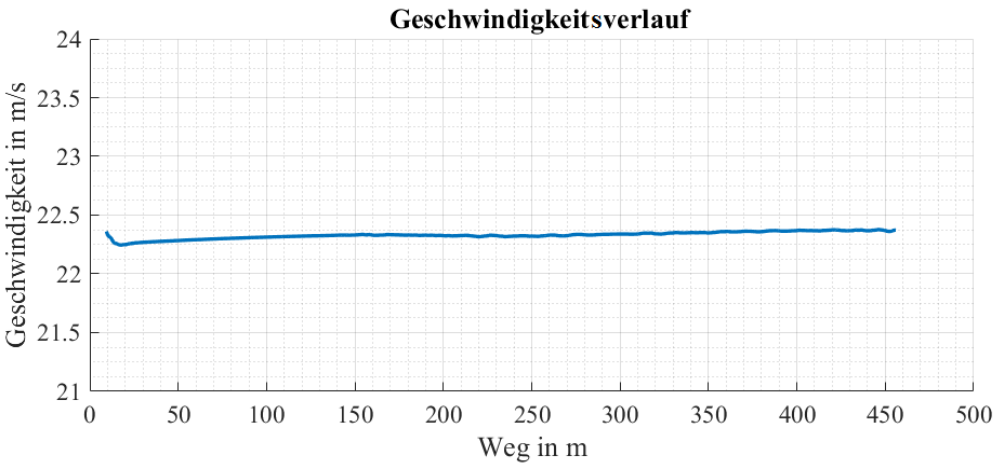


Abbildung 60: Geschwindigkeitsverlauf Lokomotive GA19

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

5 Vergleich Simulation und Messdatenauswertung

5.1 Grundsätzliches zu den Vergleichen

Um die aus der Simulation erhaltenen Kräfte mit den Messdaten vergleichen zu können, müssen die Simulationsergebnisse über die Länge der Messstelle gemittelt werden. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgt in „Matlab“, wobei über die Wegkoordinate der Radsätze und die Position der Messstelle in Bezug auf die Gleislagedaten jener Bereich bekannt ist, in dem die Kräfte gemittelt werden müssen. Da das Kraftverhältnis Y/Q eine aus fahrdynamischer Sicht wichtige Größe ist, wird diese ebenfalls als Mittel über die Messstelle bestimmt. Für den Vergleich mit den Messdaten im Bogen wird an der Außenschiene h_2 des Kraftverhältnisses bestimmt. Es sei hier angemerkt, dass es sich bei diesem Vergleich nicht direkt um eine Überprüfung der Validität des Modells handelt. Für eine Modellvalidierung währen deutlich umfangreichere Daten nötig, wobei auch die Messdaten gesicherte Ergebnisse liefern sollten. Für weitere Informationen sei auf [1] oder [56] verwiesen. Die folgenden Vergleiche sind daher stets kritisch zu hinterfragen, da Abweichungen sowohl von Seiten der Simulation aber auch von Seiten der Messung auftreten können. Wenn nicht weiter angeführt, dann sind in den folgenden Grafiken (Abbildung 61 bis Abbildung 75) Messdaten dunkelblau und simulierte Ergebnisse gelb dargestellt.

5.2 Ergebnisse von den Messstellen

5.2.1 AS07

Aus den Messdaten wurden drei zu betrachtende Bereiche identifiziert, die auch mithilfe numerischer Simulation überprüft werden. Wie die Messdatenauswertung in Kapitel 3.4.4 gezeigt hat, sind die Kräfte über die Messstelle nicht konstant. Z. B. lässt sich der Verlauf von Q über h_1 und h_2 abschätzen. Der konkrete Kraftverlauf von Q lässt sich in der Simulation bestimmen. Abbildung 61 zeigt den Verlauf der vertikalen Kraft für das rechte führende Rad eines „Railjet“-Reisezugwagen (blaue Linie). Die durchgezogenen roten Linien entsprechen den Mittelwerten von h_1 (unten) und h_2 (oben). Die strichlierten roten Linien geben den Bereich der entsprechenden einfachen Standardabweichung an.

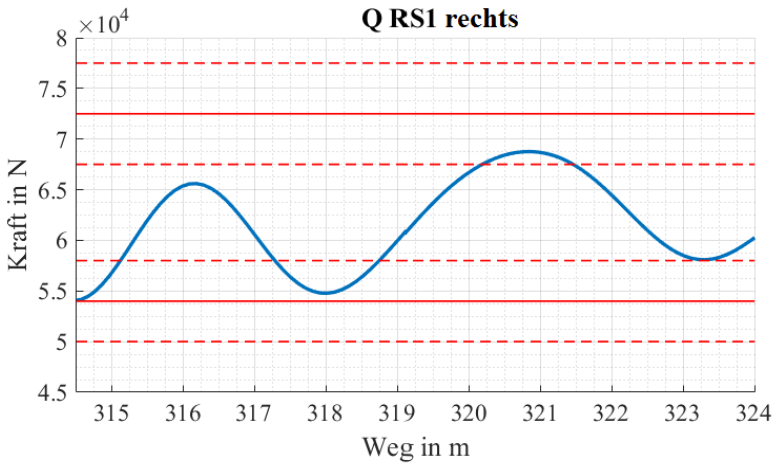


Abbildung 61: Kraftverlauf AS07

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

Die vertikale Kraft erreicht sowohl den oberen als auch den unteren Bereich (h_1 und h_2), wobei der Mittelwert von h_2 deutlich höher ist als der Maximalwert des Kraftverlaufs. Dieser lässt darauf schließen, dass die Messdaten und somit der Verlauf der Kräfte über die Messstelle durchaus konsistent sind. Unregelmäßigkeiten in den Radunrundheiten können zu besonders hohen Kraftspitzen führen. Da jedes nicht neuwertige Radprofil individuell ist (Profil und Rundheit) ergeben sich auch große Streuungen in den Messdaten.

Die Simulationen wurden in allen Bereichen mit einem Reibwert von 0,4 (außen und innen, trockene Bedingungen) durchgeführt. Da es sich hier um einen geraden Streckenabschnitt mit nahezu Nennspurweite handelt, erreichen die Berührpunkte auf der Lauffläche allgemein nicht jene Bereiche, in denen Spurkranzschmiersysteme wirksam sind. Weiters sind die Tangentialkräfte in den Kontaktgebieten relativ gering, da die Fahrt auf einem geraden Gleisabschnitt im Vergleich zur Bogenfahrt (z. B. GA19) nur dynamische Kräfte erzeugt, wobei diese von der Gleislage und der Berührgeometrie abhängig sind. Quasistatische Anteile werden auf der Geraden jedoch durch Traktionskräfte der Lokomotive oder beim Bremsen erzeugt. Die in den betrachteten Bereichen maximal vorkommende Traktionskraft einer Lokomotive wurde mit 107 kN bestimmt (siehe Kapitel 3.4.4.1). Bei einer Anfahrzugkraft von 300 kN für eine „Taurus"-Lokomotive [38] auf trockenen Schienen wird die Sättigung bei μ = 0,4 mit einer Traktionskraft von 107 kN nicht erreicht. Aus der Simulation kann das Verhältnis von Tangentialkraft zu Normalkraft bestimmt werden. Hier werden bei der Lokomotive Werte von ca. 0,6 je Rad erreicht und beim Reisezugwagen ca. 0,2. Die Simulationsergebnisse auf der Geraden werden daher vom Reibwert nur geringfügig beeinflusst, da noch Reserven bis zur Sättigung vorhanden sind.

Abbildung 62 zeigt den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den Messdaten im Bereich 2 (gemäß Kapitel 3.4.2.1) für den Reisezugwagen. Da sich die Ergebnisse für diesen in den unterschiedlichen Bereichen (1 bis 3) nur geringfügig unterscheiden, wird auf eine Darstellung verzichtet. Erwartungsgemäß sind bei den vertikalen Kräften bei allen Radsätzen nur geringe Differenzen zu erkennen. Aufgrund des hohen quasistatischen Anteils des Fahrzeuggewichts liefern die dynamischen Anteile durch die Gleisanregung nur einen geringen Beitrag. Abweichungen lassen sich besonders durch den tatsächlichen Beladungszustand der Fahrzeuge erklären. Das Simulationsmodell wird mit einer Zusatzbeladung versehen, die aus den Messdaten hervorgeht, wobei die Massenverteilung im Modell abhängig von der Zusatzbeladung automatisch angepasst wird. Die tatsächliche Beladung und die entsprechende Verteilung in den Fahrzeugen sind nicht bekannt und können aus der Messung aufgrund der dynamischen Anteile und der Messunsicherheiten nicht genau bestimmt werden.

Die Y-Kräfte können nur aus der Simulation gewonnen werden, da für die Messung auf der Geraden diesbezüglich keine Messaufnehmer vorhanden sind (siehe Kapitel 3.2.2). Bei den Kräften in Längsrichtung (T_x) ist zu beachten, dass die Vorzeichen aus der Simulation an die der Messung angepasst wurden (gilt für alle folgenden Vergleiche). Somit ergeben positive Kräfte eine Kraft im Sinne einer Traktion. In den Vergleichsdiagrammen ist zu erkennen, dass die Vorzeichen von Messung und Simulation jeweils übereinstimmen, wobei die gemittelten Kräfte ähnlich groß sind. Weiters ist im Vergleich von Messung und Simulation jeweils eine Tendenz für die Verteilung der Längskräfte über die Radsätze zu erkennen. Die führenden Radsätze der Drehgestelle

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

weisen höhere Werte auf als die nachfolgenden Radsätze. In der Simulation sind die Längskräfte je Radsatz (links und rechts) betragsmäßig gleich groß. In Kombination mit dem Vorzeichen der *Y*-Kräfte passt dieses Ergebnis zu dem in Abbildung 58 gezeigten Verhalten. Grundsätzlich zeigen die Längskräfte eine gute qualitative Übereinstimmung. Zu beachten ist aber, dass man bei einer Verschiebung der Messstelle um ca. 2 m bei der Auswertung der Simulationsdaten ein deutlich abweichendes Ergebnis erhält (siehe Kapitel 4.6).

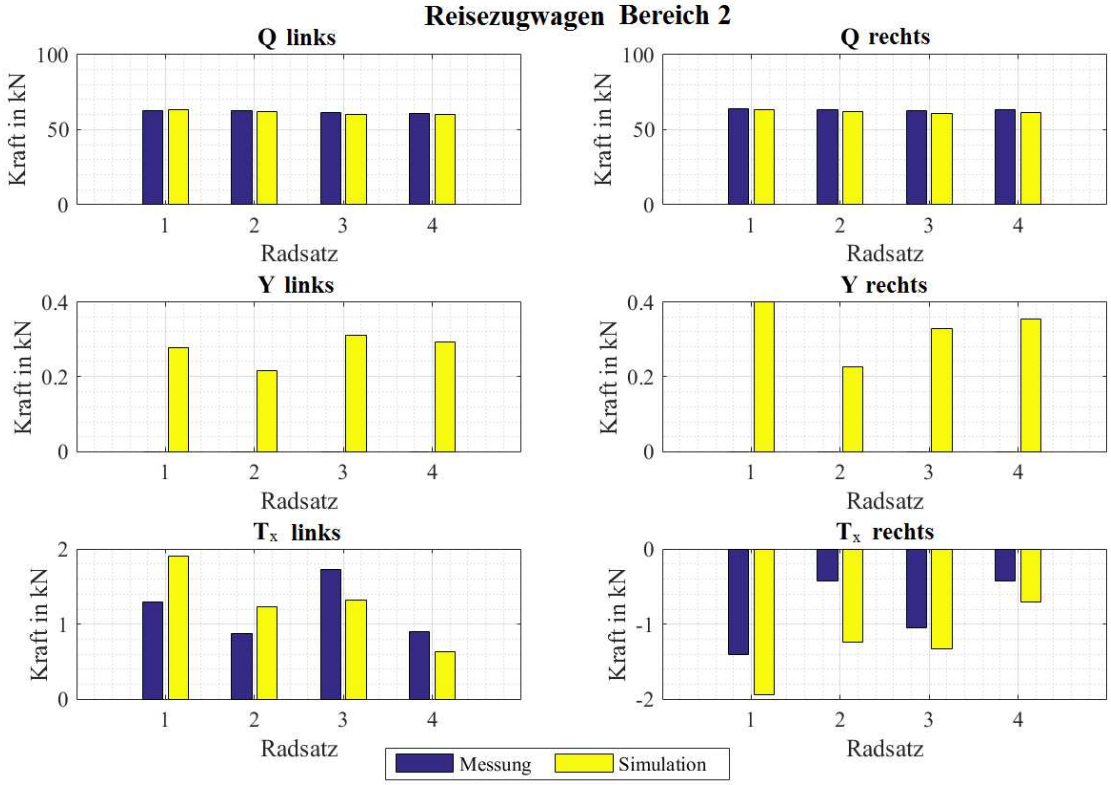


Abbildung 62: Vergleich AS07 Reisezugwagen Bereich 2

Abbildung 63 zeigt den Vergleich für die Lokomotive im Bereich 2. Zusätzlich werden die Längskräfte der anderen Bereiche abgebildet. Hier ist zu beachten, dass das zur Verfügung gestellte Lok-MKS-Modell der Baureihe 1216 entspricht. Innerhalb der ausgewerteten Daten waren auf dieser Strecke allerdings nur Lokomotiven der Reihe 1116 in Betrieb. Bei den anderen Messstellen konnten Fahrzeuge vom Typ 1216 betrachtet werden, wobei zwischen den Baureihen 1116 und 1216 keine signifikanten Unterschiede in den Messergebnissen ausgemacht werden konnten. Die vertikalen Kräfte zeigen in Bezug auf die Radsätze einen Verlauf auf, der sowohl in der Messung als auch in der Simulation zu erkennen ist (*Q* für den führenden Radsatz geringer als für den nachfolgenden Radsatz).

Besonders interessant sind hier die Traktionskräfte in den einzelnen Bereichen. In Bereich eins wurden 31 kN ermittelt, in Bereich zwei 51 kN und in Bereich drei 107 kN. Auch hier stimmen in den einzelnen Bereichen die Tendenzen überein. Bereits bei der Messdatenauswertung in Kapitel 3.4.4 wurde gezeigt, dass auf der rechten Schiene (außen) höhere Längskräfte auftreten. Die Längskräfte in Bereich 1 zeigen die größten Abweichungen, da hier die gesamte Traktionskraft geringer ist und somit die dynamischen Anteile einen größeren Anteil an der gesamten Kraft haben.

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

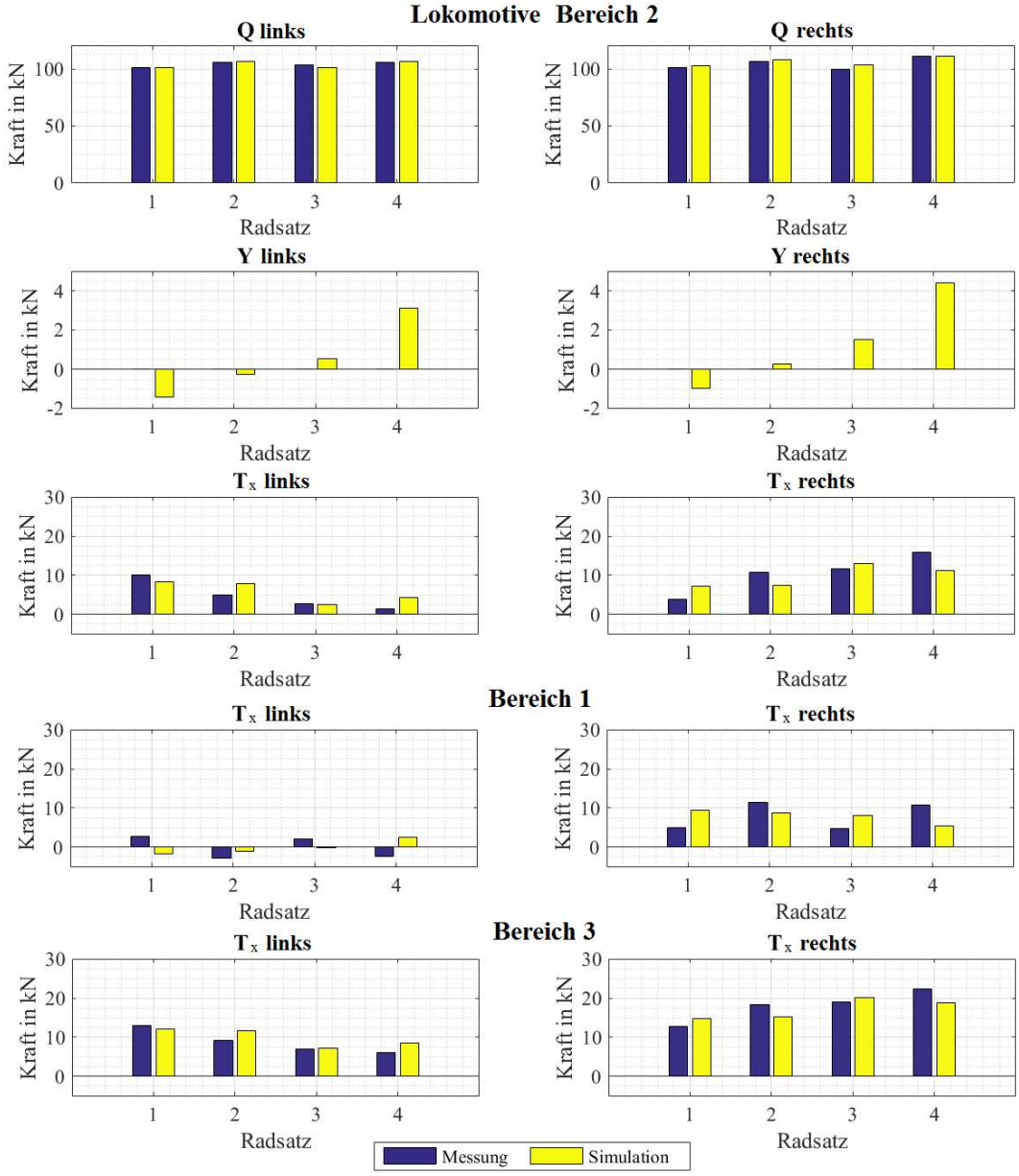


Abbildung 63: Vergleich AS07 Lokomotive Bereich 2 (inkl. T_x aus Bereich 1 und 3)

Sowohl beim Reisezugwagen als auch bei der Lokomotive ist zu beachten, dass die Streuungen bei den Längskräften sehr groß sind, da die dynamischen Kräfte sehr stark von der tatsächlichen Berührgeometrie und der Radform abhängen. Weiters treten bei den gemessenen Lokomotiven nur selten exakt identische Traktionskräfte auf, womit sich eine große Streuung ergibt. Die simulierten Längskräfte auf dem geraden Streckenabschnitt liegen somit alle im Streubereich der Messung. Da keine *Y*-Kräfte gemessen werden, wird auf die Bestimmung von T_{qst} verzichtet.

In Anhang E sind Grafiken zu finden, die beispielhafte Vergleiche von einzelnen Zugüberfahrten bei bekannten Radprofilen zeigen. Hier ist allerdings zu beachten, dass zwischen der Messung der Radprofile des Reisezugwagens und der Erfassung der Daten zwei Monate liegen. Bei der Lokomotive sind es nur 8 Tage. Weiters sind keine Informationen zu konkreten Radformen und der Radradien vorhanden sind (gesamter Verschleißzustand). Diese Grafiken sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

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

5.2.2 VE10

Im Bogen um die Messstelle VE10 konnten aus den Messdaten und den Wetterdaten jene Überfahrten für die folgenden Betrachtungen ausgewählt werden, bei denen mit trockenen Schienen zu rechnen ist. Da allerdings keine Informationen zum Reibewert im Spurkranz vorhanden sind, wird - wie bereits erwähnt - bei der numerischen Rechnung eine DoE Analyse durchgeführt. Dabei werden die Parameter Reibwert und der Multiplikationsfaktor für den Reibwert im Spurkranz variiert. Weiters werden die Schienenprofile variiert (gemessen und neuwertig). „Simpack“ führt die Parametervariation nach Eingabe der zu variierenden Parameter und deren Bereiche automatisch durch.

Abbildung 64 zeigt den Vergleich mit dem besten Durchlauf (jener mit den kleinsten Fehlerquadraten gemäß Kapitel 4.7.1) eines Reisezugwagens, wobei der Reibwert auf beiden Schienen 0,4 beträgt und sich der Reibwert im Spurkranz der Außenschiene zu 0,25 (Multiplikationsfaktor) ergibt. Die Streuungen der Messdaten können dem Anhang B entnommen werden. Die vertikalen Kräfte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (zwischen Messung und Simulation) in Betrag und Verteilung bei den einzelnen Rädern. Die freie Seitenbeschleunigung beträgt ca. 0,6 m/s². Durch die positive freie Seitenbeschleunigung ergibt sich eine deutliche Verlagerung der Aufstandskräfte auf die Außenschiene.

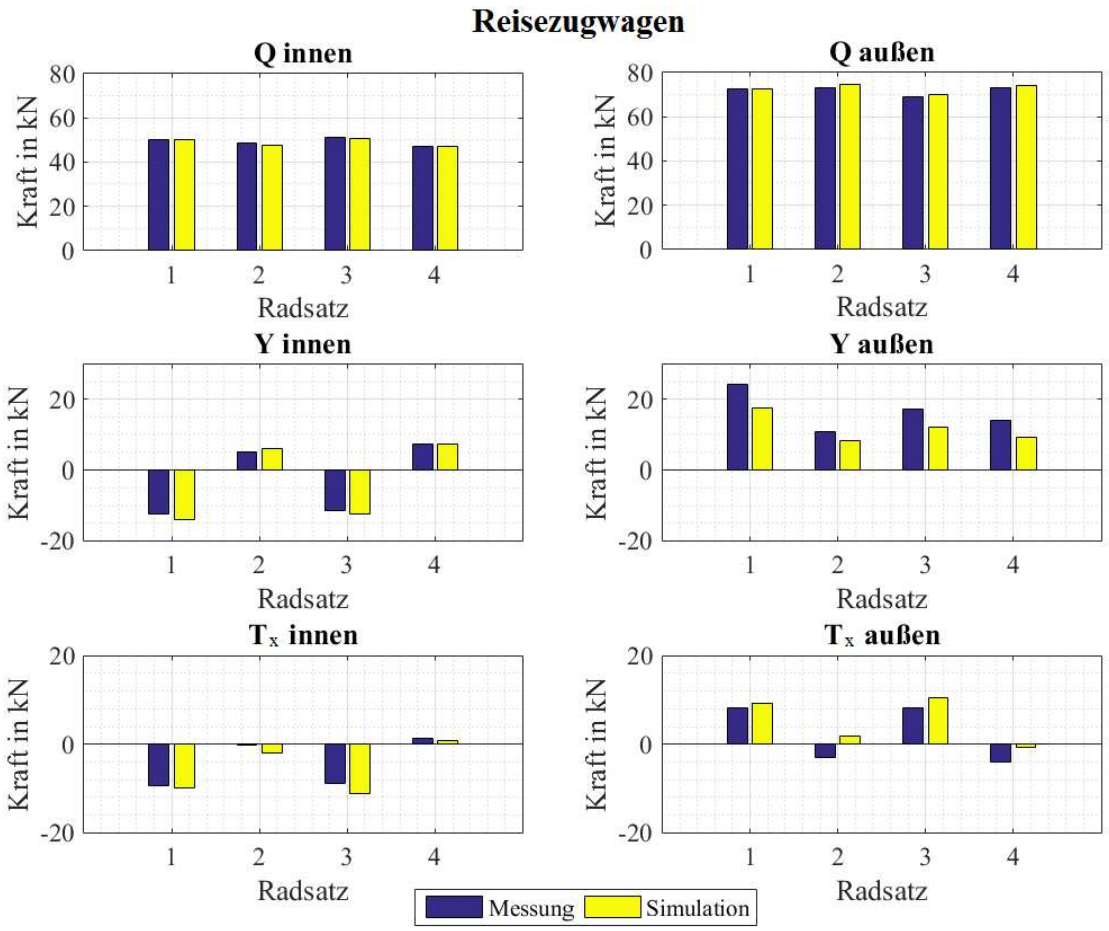


Abbildung 64: Vergleich VE10 Reisezugwagen

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

Die *Y*-Kräfte stimmen qualitativ gut überein. An der Außenschiene ist die höhere vertikale Kraft am führenden Radsatz 1 aufgrund der Spurführung zu erkennen. Besonders an der Außenschiene fällt allerdings auf, dass die gemessenen Werte für die *Y*-Kräfte alle deutlich höher ausfallen als jene der Simulation. Zur Kontrolle wurde aus [25] Bild 6 betrachtet. Gemäß dieser Abbildung liegen für verschiedene Wagentypen in einem Bogenradius von 750 m die Führungskräfte in einem Bereich zwischen 4 kN und 17 kN. Während die simulierte *Y*-Kraft für den führenden Radsatz noch fast in diesem Bereich liegt (17,5 kN), ist der gemessene Wert von ca. 25 kN deutlich höher. Weiters tritt auch hier die aus Kapitel 3.4.5 bekannte Problematik auf, dass die Summe aller *Y*-Kräfte (55 kN) deutlich über dem theoretischen Wert (30 kN) liegen. Die Simulation erreicht hier ein nahezu übereinstimmendes Ergebnis (32,5 kN). Der theoretische Wert wurde mit einer gemittelten freien Seitenbeschleunigung und über ein Punktmassenmodell ermittelt. Daher sind Abweichungen von z. B. 2,5 kN zwischen dem theoretischen und simulierten Wert erklärbar. Die Abweichung zu den gemessenen Kräften ist allerdings so hoch, dass eine freie Seitenbeschleunigung von 1,1 m/s² nötig wäre, um den gemessenen Wert für die Summe aller *Y*-Kräfte zu erreichen. Die Streuung der gemessenen Längs- und Querkräfte sind grundsätzlich gering. Bei den nachfolgenden Radsätzen ist zu erkennen, dass die Längskräfte relativ gering sind (< 5 kN). Weiters ergibt sich für den zweiten äußeren Radsatz ein entgegengesetztes Vorzeichen für die Längskraft zwischen Messung und Simulation. Der konkrete Kraftverlauf für einen Reisezugwagen, der aus der Simulation generiert wurde, kann Anhang F entnommen werden.

In Abbildung 65 ist der Vergleich für die Lokomotive angeführt. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild. Die gesamte Traktionskraft ergibt sich hier zu 48 kN. Auffällig ist hier unter anderem die bogenäußere vertikale Kraft an Radsatz drei, die eine recht hohe Abweichung aufweist. Qualitativ gleich wie beim Reisezugwagen sind auch hier wieder die gemessenen bogenäußeren *Y*-Kräfte an allen Radsätzen deutlich höher als die simulierten. Wie aus den Simulationsdaten ersichtlich, wird die Sättigung in Bezug auf den Kraftschluss auch im Bogen bei VE10 nicht erreicht.

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

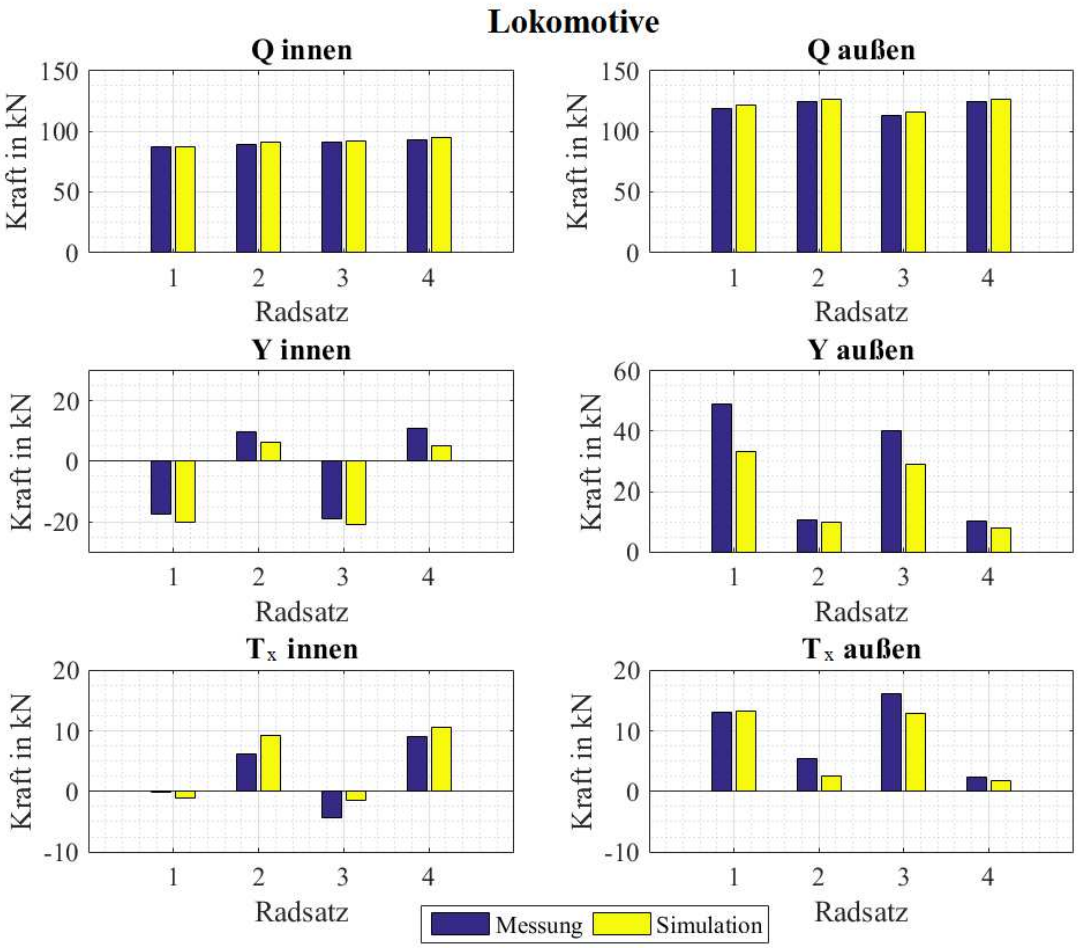


Abbildung 65: Vergleich VE10 Lokomotive

Ergänzend zu den bisherigen Grafiken ist die aus fahrdynamischer Sicht wichtige Größe *Y*/*Q* für die führenden Radsätze der Drehgestelle in Abbildung 66 angeführt, wobei an der Innenschiene h_0 betrachtet wird und an der Außenschiene h_2. Zu erkennen ist, dass an der Innenschiene gute Übereinstimmung erreicht wird. An der Außenschiene sind allerding große Abweichungen festzustellen. Die im Vergleich zur Simulation höheren *Y*-Kräfte aus der Messung an der Außenschiene führen dazu, dass auch das Verhältnis *Y*/*Q* an der Außenschiene entsprechend höher ausfällt (Messung im Vergleich zur Simulation). Im Zuge der Fehlersuche bezüglich der Summe *Y*-Kräfte konnte aufgrund der hohen Abweichungen festgestellt werden, dass ein Messaufnehmer, der für die Messung der *Y*-Kräfte verwendet wird, defekt war und hohe Signalspitzen lieferte. Diese Spitzen beeinflussen auch die Mittelwerte der *Y*-Kräfte. Das könnte daher eine Erklärung für die hohen gemessenen *Y*-Kräfte sein. Grundsätzlich sind die Messstellen so aufgebaut, dass fehlerhafte Sensoren detektiert werden. Die Ausschläge des Sensors waren allerdings noch nicht so hoch, dass sie die festgelegte Eingriffsschwelle überschritten hätten.

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

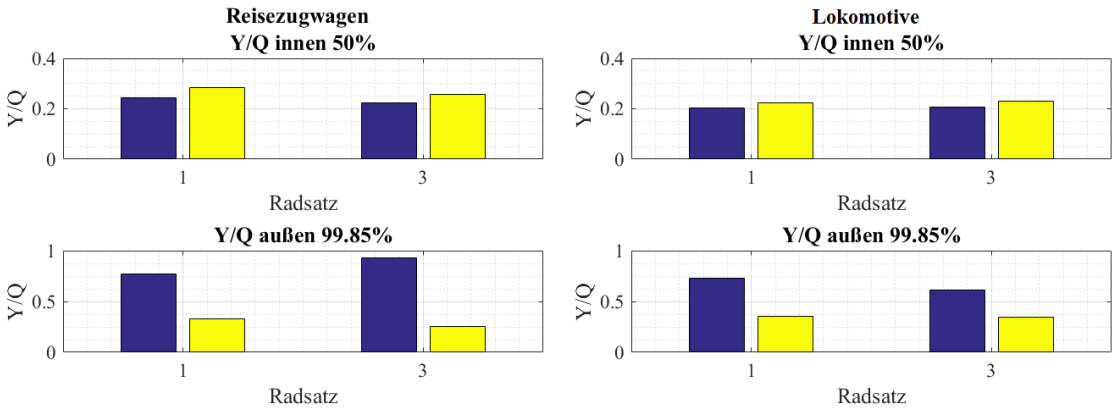


Abbildung 66: *Y/Q* Vergleich VE10

Aufgrund der erhöhten *Y*-Kräfte an der Außenschiene sind die Werte für T_{qst} der führenden äußeren Radsätze deutlich höher als die simulierten Werte. Weiters ist auch keine Übereinstimmung mit der simulierten Größe T_γ erkennbar. Während mit T_γ der Bereich mit kombiniertem Auftreten von RCF und Verschleiß erreicht wird, würde man aus dem gemessenen Wert T_{qst} auf reinen Verschleiß schließen.

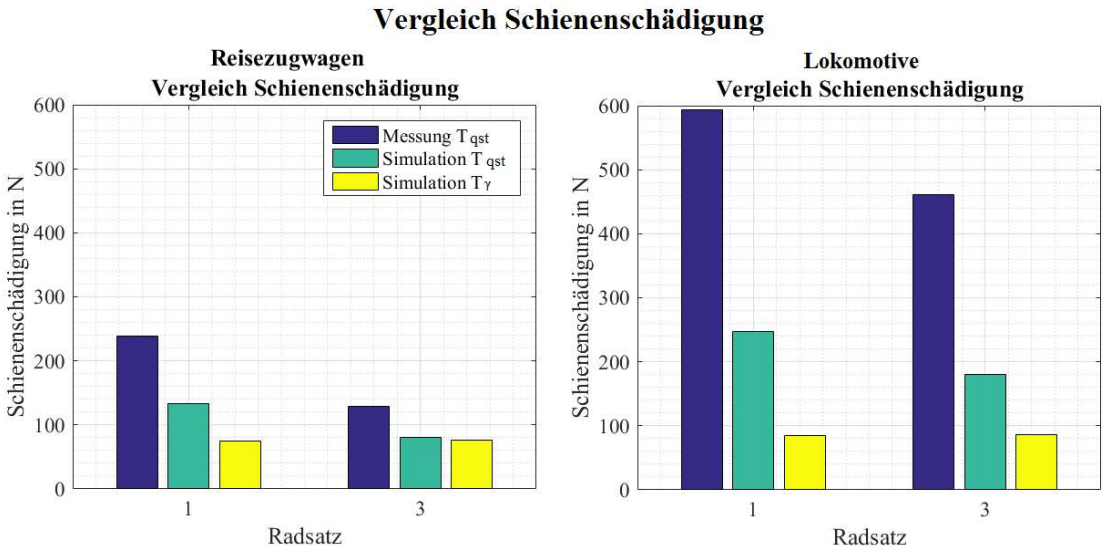


Abbildung 67: Vergleich Schienenschädigung VE10

5.2.3 GA19

Auch im Bogen um die Messstelle GA19 ist bei den verwendeten Messdaten mit trockenen Schienen zu rechnen. Die Vorgehensweise für die Durchführung der numerischen Simulation gleicht jener aus dem vorherigen Unterkapitel. Die Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen den Vergleich zwischen Messung und Simulation für die Messstelle GA19. Auch hier stimmt die Messung mit der Simulation qualitativ überein ($\mu_{außen}$ = 0,4 und μ_{innen} = 0,375 aus der Parametervariation). Im Vergleich zu VE10 ergibt sich für den Multiplikationsfaktor für den Reibwert im Spurkranz in GA19 ein Faktor von 1 (VE10: 0,25). Das kann einerseits an vorhandenen gleisgebundenen Spurkranzschmiereinrichtungen im Bereich von VE10 liegen oder andererseits daran, dass die Simulation an die Messdaten angepasst wurde. Da die Messdaten in VE10, wie im vorherigen Kapitel angeführt, fehlerhaft sind, ist der Faktor 0,25 in VE10 mit Vorsicht zu betrachten.

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

Die vertikalen Kräfte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung in Betrag und Verteilung. Die freie Seitenbeschleunigung liegt bei ca. 0,45 m/s² und es ergibt sich durch die positive freie Seitenbeschleunigung eine Verlagerung der Aufstandskräfte auf die Außenschiene. Differenzen gibt es wieder bei den *Y*-Kräften. An der Außenschiene und an der Innenschiene sind diese bei der Simulation überall betragsmäßig größer als bei der Messung. Die Summe aller *Y*-Kräfte aus der Simulation liefert gute Werte im Vergleich zum theoretischen Wert (Abweichung < 5 %). Auch bei den Messergebnissen werden plausible Werte erreicht (Abweichung < 7 %). Weitere Untersuchungen an der Messstelle GA19 haben gezeigt, dass die Summe aller *Y*-Kräfte auch bei anderen hier nicht behandelten Fahrzeugtypen (z. B. Güterwagen) plausible Werte liefert. In der numerischen Simulation wurden weiters einfache Plausibilitätschecks durchgeführt, indem z. B. ein Bogendurchlauf mit ausgeglichener Überhöhung betrachtet wird. In diesem Fall muss sich für die Summe aller *Y*-Kräfte ein Wert um ca. 0 N ergeben, wobei die Simulation entsprechend plausible Ergebnisse gezeigt hat.

Die *Y*-Kräfte an der Außen- und Innenschiene könnten zwar durch passende Wahl der Reibwerte bzw. des Reibwerts im Spurkranz in der Simulation vergrößert bzw. verkleinert werden, allerdings würden sich dann auch die Längskräfte entsprechend ändern. Das realitätsnächste Ergebnis der Simulation wurde daher mit den oben angeführten Parametern erreicht.

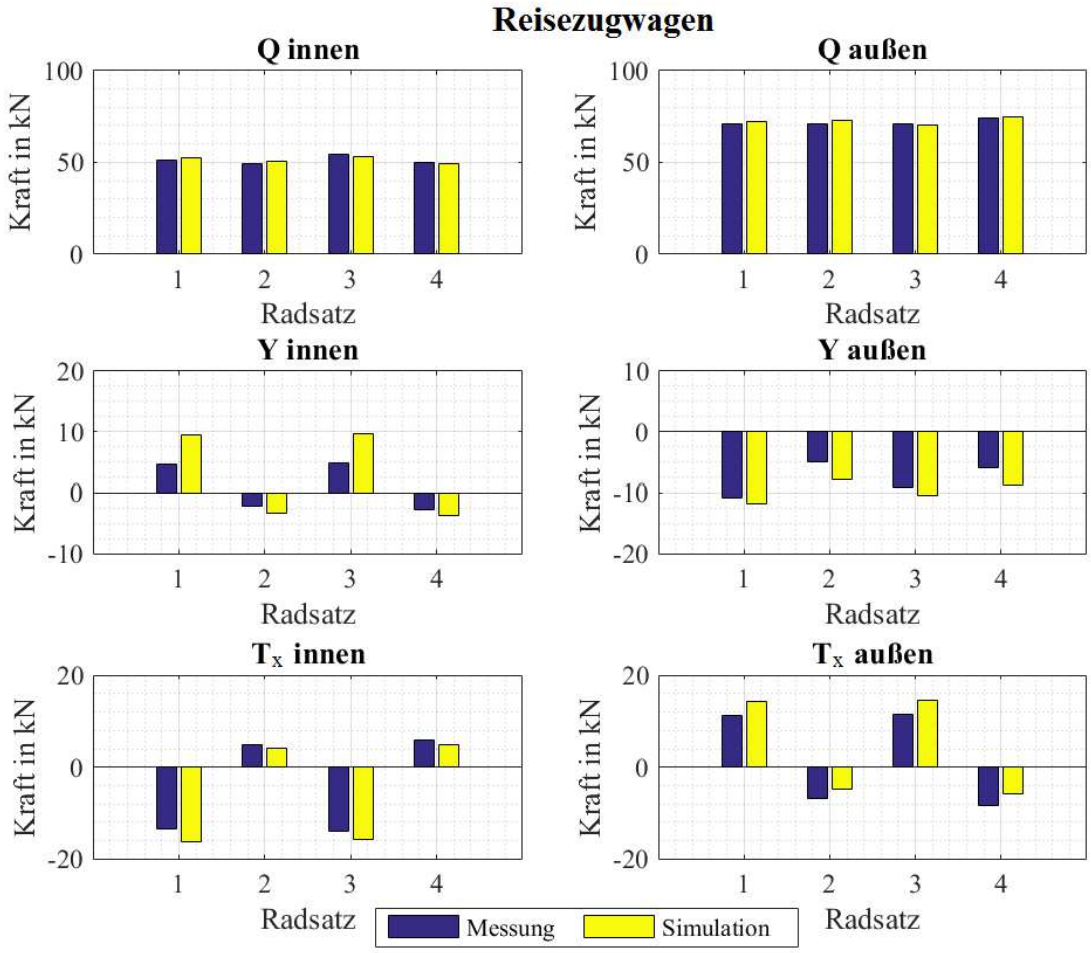


Abbildung 68: Vergleich GA19 Reisezugwagen

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

Die Lokomotive (siehe Abbildung 69) zeigt qualitativ das gleiche Verhalten wie der Reisezugwagen. Besonders an der Innenschiene weichen die *Y*-Kräfte der Simulation von den Messdaten deutlich ab. Die Summe aller *Y*-Kräfte bei der Lokomotive weist ebenfalls plausible Werte auf. Die Abweichung zum theoretischen Wert liegt bei ca. 14 % (theoretisch ca. 40 kN und gemessen ca. 34,4 kN). Die größere Abweichung bei der Lokomotive im Vergleich zum Reiszugwagen lässt sich einerseits durch die höhere Gesamtmasse der Lokomotive erklären und andererseits durch den Längskrafteinfluss in Verbindung mit der Zugdynamik. Die qualitative Verteilung der Traktionskräfte stimmt zwischen den beiden Methoden auch hier wieder gut überein.

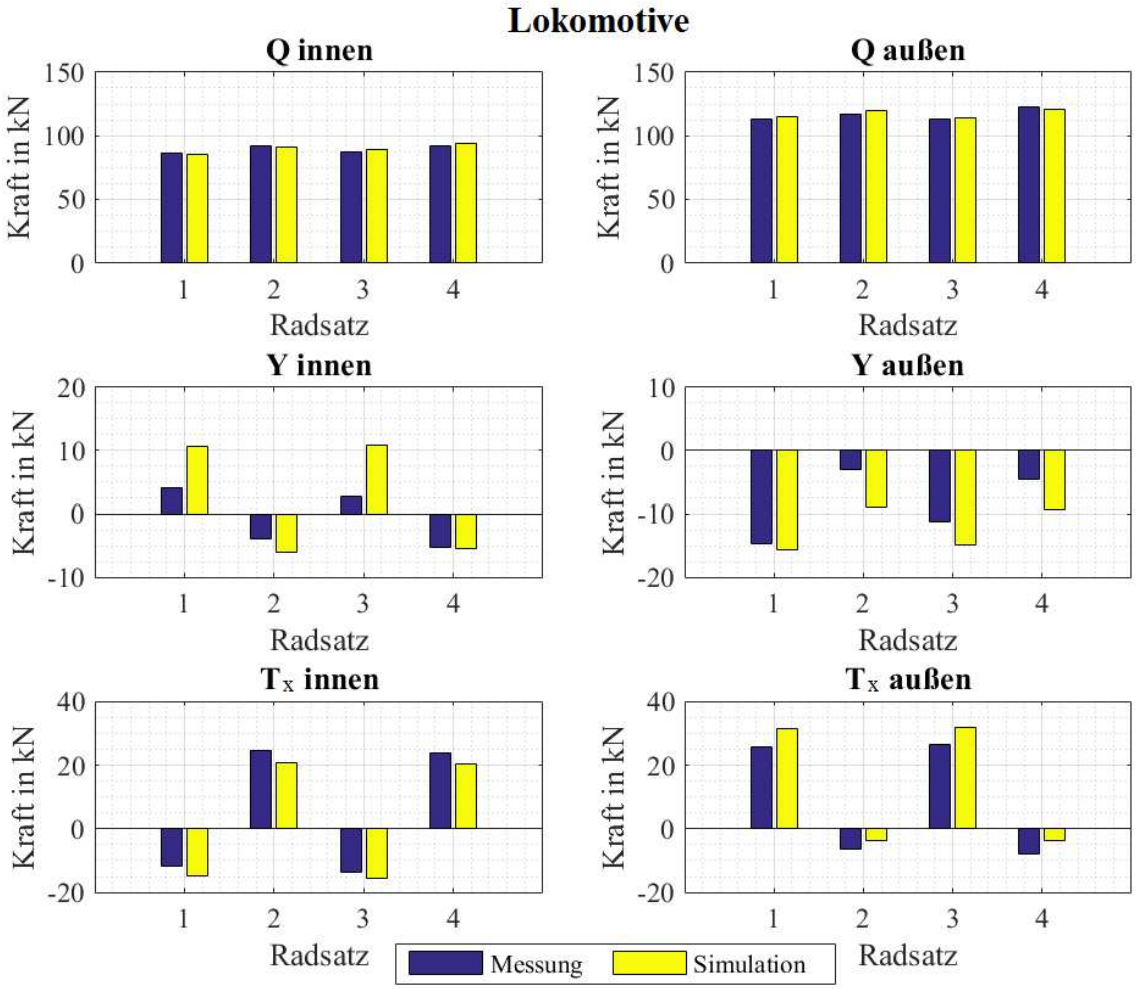


Abbildung 69: Vergleich GA19 Lokomotive

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

Die kleineren Werte der gemessenen *Y*-Kräfte an der Innenschiene führen auch dazu, dass sich ein entsprechendes Verhältnis von *Y*/*Q* an der Innenschiene einstellt. Gleiches gilt für h_2 an der Außenschiene.

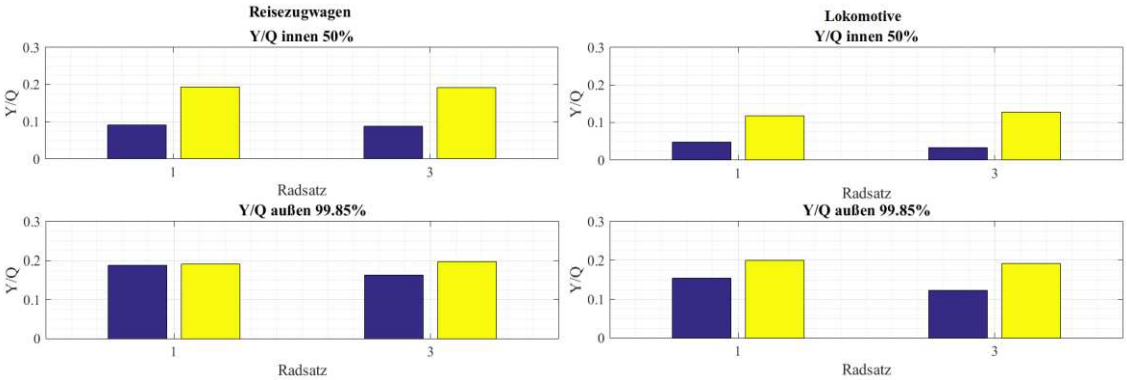


Abbildung 70: *Y*/*Q* Vergleich GA19

Die Kräfte an den führenden bogenäußeren Radsätzen liegen zwischen Messung und Simulation näher beieinander als bei VE10. Dadurch liegen auch die Werte für T_{qst} und T_γ näher beisammen. Da die Simulation nicht von einer Schmierung der Spurkränze ausgeht und der Bogenradius im Bereich von 600 m ist, liegen die approximierten Größen T_{qst} näher an T_γ. Die Werte für die Messung sind deutlich geringer, da dort vor allem die *Y*-Kräfte deutlich kleinere Werte im Vergleich zur Simulation gezeigt haben.

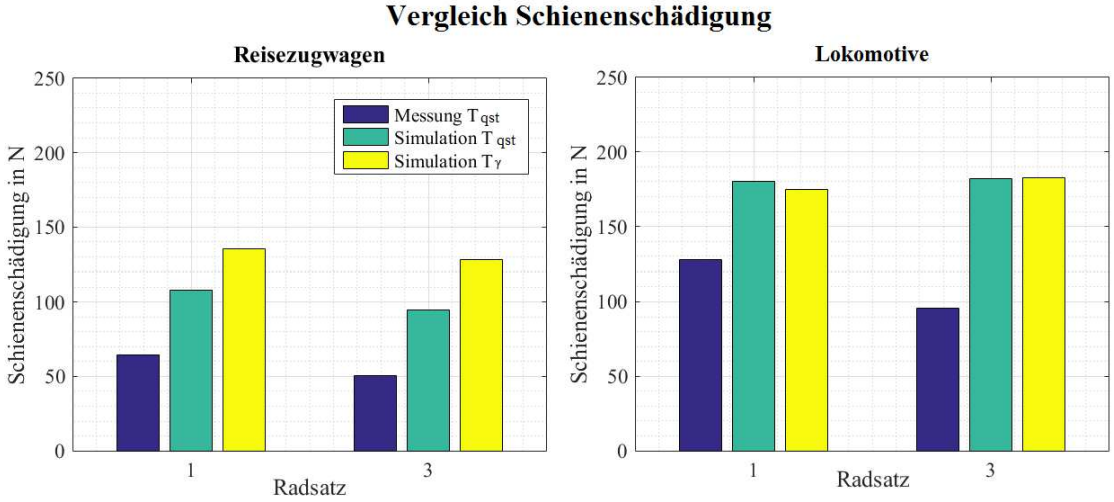


Abbildung 71: Vergleich Schienenschädigung GA19

Zu den Messstellen GA19 und VE10 sei nochmals angemerkt, dass die Lage der Messstelle in Bezug auf die Gleislagedaten um ± 2 m abweichen kann. Die Ergebnisse verändern sich durch Verschieben der Lage zwar, allerdings sind die Auswirkungen aufgrund der höheren Anteile an quasistatischen Werten deutlich geringer.

5.2.4 BS

Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die Vergleiche für den Reisezugwagen bzw. für die Lokomotive. Aufgrund fehlender Daten der Längskraftmessung wird hier auf die Darstellung der Längskräfte verzichtet. Für das Lok- und das „Railjet“-MKS-Modell fallen die Längskräfte am führenden Radsatz im Vergleich zum nachfolgenden Radsatz gering aus. Sowohl für den Reisezugwagen als auch für die Lokomotive haben sich je-

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

weils Reibwerte von 0,4 und Faktoren für die Reibwerte im Spurkranz von 0,25 (Faktor) als jene Werte für die Simulation herausgestellt, die am besten mit den Messresultaten übereinstimmen.

Ein qualitativer Zusammenhang der Kräfte zwischen Messung und Simulation ist bei der Messstelle Breitenstein nur mehr begrenzt vorhanden. Während die vertikalen Kräfte noch gute Vergleichswerte liefern, zeigen Messung und Simulation bei den lateralen Kräften ein anderes Bild. Die Messung lässt darauf schließen, dass die Fahrwerke aufgrund des engen Bogens in spießgangähnlicher Stellung sind. Dieser Zustand ist durch die hohen *Y*-Kräfte an der Innenschiene der nachfolgenden Radsätze zu erkennen. In der Simulation befinden sich beide Modelle nicht in der spießgangähnlichen Stellung, sondern eher in einer Freilaufstellung. Der qualitative Verlauf der *Y*-Kräfte an der Außenschiene zwischen Messung und Simulation ist bis auf die entgegengesetzten Vorzeichen bei den nachfolgenden Radsätzen sehr ähnlich. Auffällig sind vor allem die höheren *Y*-Kräfte der führenden Radsätze.

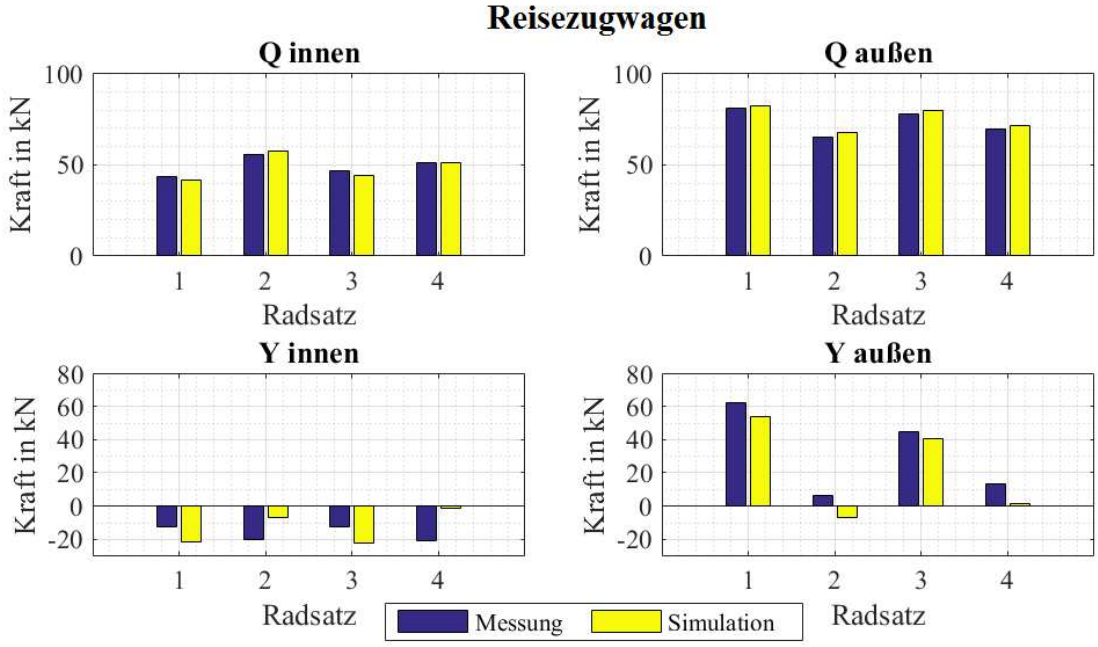


Abbildung 72: Vergleich BS Reisezugwagen

Weiters ist anzumerken, dass in den Gleislagedaten bei der Messstelle BS ein lokal stark ausgeprägter Gleislagefehler zu erkennen ist. Diese Unregelmäßigkeit ist auch in den 0,15 % und 99,85 % Werten der gemessenen Daten zu erkennen (siehe Anhang B). Die Werte weisen auf hohe dynamische Anteile hin, obwohl aufgrund des engen Bogens mit geringeren dynamischen Kräften im Vergleich zu den quasistatischen Kräften zu rechnen ist. Außerdem fällt auf, dass auch hier die Summe aller *Y*-Kräfte für die einzelnen Wagen fast doppelt so hoch ist wie der theoretische Wert (Abschätzung über Punktmassenmodell). Für den Reisezugwagen sollten theoretisch (siehe Kapitel 3.4.5) ca. 32.5 kN erreicht werden. Die Messung ergibt hier ca. 61 kN. Allerdings ist diesmal auch in der Simulation ein höherer Wert von 45 kN zu erkennen. Die Abweichungen können nun einerseits durch den oben erwähnten markanten Gleislagefehler erklärt werden oder durch eine nicht korrekte Auswertung an der Messstelle.

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

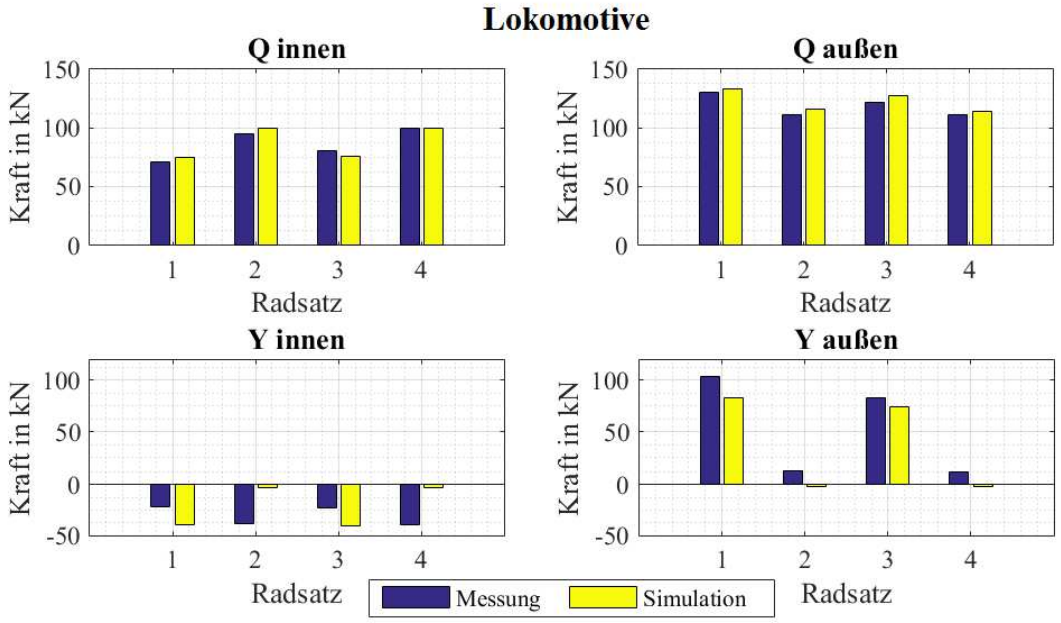


Abbildung 73: Vergleich BS Lokomotive

Da die aus der Simulation erhaltenen Ergebnisse für die führenden äußeren Räder nur sehr kleine Längskräfte aufweisen (Lok kleiner 5 kN und Reisezugwagen kleiner 2 kN) und die *Y*-Kräfte an der Außenschiene qualitativ durchaus zwischen Messung und Simulation übereinstimmen, macht ein Vergleich zwischen T_{qst} und T_{γ} Sinn. Dieser wird in Abbildung 74 dargestellt. Die Messwerte fallen jeweils höher aus als die Simulationsresultate, weil die höheren Querkräfte zu einer Erhöhung von T_{qst} führen. Während T_{qst} aus der Simulation im Vergleich zu T_{γ} durchaus Werte ähnlicher Größenordnung aufweist, ist vor allem für Radsatz 1 ein höherer gemessener Wert von T_{qst} zu erkennen. Bei beiden Fahrzeugen würde aus der Messung daher auf einen deutlich höheren Verschleiß geschlossen werden als aus der Simulation. Der konkrete Kraftverlauf, der aus der Simulation generiert wurde, kann Anhang F entnommen werden.

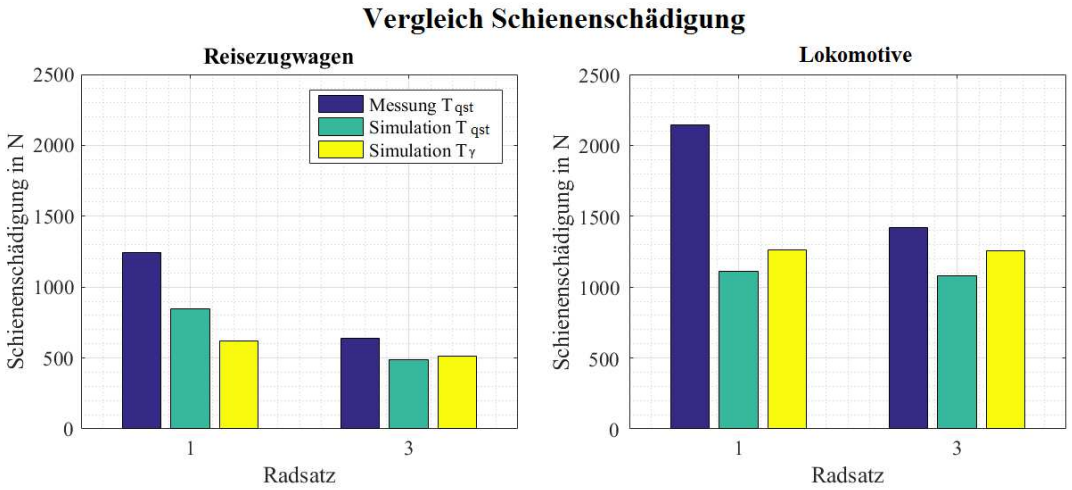


Abbildung 74: Vergleich Schienenschädigung BS

Da aufgrund der großen Unsicherheiten in den Messergebnissen (Summe *Y*-Kräfte) nicht mit Sicherheit auf eine spießgangähnliche Stellung der Drehgestelle geschlossen werden kann, stellt folgende Betrachtung lediglich eine Sensitivitätsanalyse des Modells

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

dar und bildet nicht die konstruktiven Eigenschaften des realen Fahrzeugs ab. Wird die Position der Drehgestelle (spießgangähnlich) aus der Messung als korrekt angesehen, dann würden die Modelle darauf schließen lassen, dass sie für Simulationen in derart engen Bögen wie jener in Breitenstein nicht geeignet sind. Das Verhalten (spießgangähnliche Stellung zu Freilaufstellung) könnte man durch die Verdrehung der Fahrwerke in engen Bögen erklären. Die Relativbewegung des Drehgestells zum Wagenkasten ist in der Realität aufgrund konstruktiver Rahmenbedingung nur in gewissen Grenzen möglich. Die Bewegung wird beispielsweise durch Anschläge oder progressive Federkennlinien eingeschränkt. Die zur Verfügung gestellten Modelle bilden nicht alle diese Einschränkungen ab. So besitzt z. B. die Sekundärfederung des „Taurus"-Modells konstante Federsteifigkeiten über den gesamten Federweg gesehen, und die Bewegung ist nicht durch einen Anschlag begrenzt.

Im 183 m Bogen, wie er in BS vorliegt, können sich im Modell die Drehgestelle sozusagen beliebig frei ausdrehen. Dieses Verhalten wird in Abbildung 75 Variante 1 gezeigt (rote Pfeile…*Y*-Kräfte, blauer Pfeil…Fahrtrichtung, Fahrt im Linksbogen). Durch Modellieren einer progressiven Federkennlinie für die Federsteifigkeit in x-Richtung der Sekundärfesselung kann eine Art Anschlag simuliert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 75 Variante 2 zu sehen. Die geringere Bewegungsfreiheit zwingt das Fahrzeug in die spießgangnähere Stellung, wodurch die Führungskraft an der Innenseite des nachfolgenden Radsatzes deutlich größer ausfällt als bei Variante 1 (blau eingerahmt). Nochmals sei angemerkt, dass diese Betrachtung nicht die Gültigkeit der Modelle in engen Bögen in Frage stellt. Dazu wären gesicherte Messergebnisse notwendig, die leider mangels einer zweiten im engen Bogen liegenden Messstelle nicht zur Verfügung stehen.

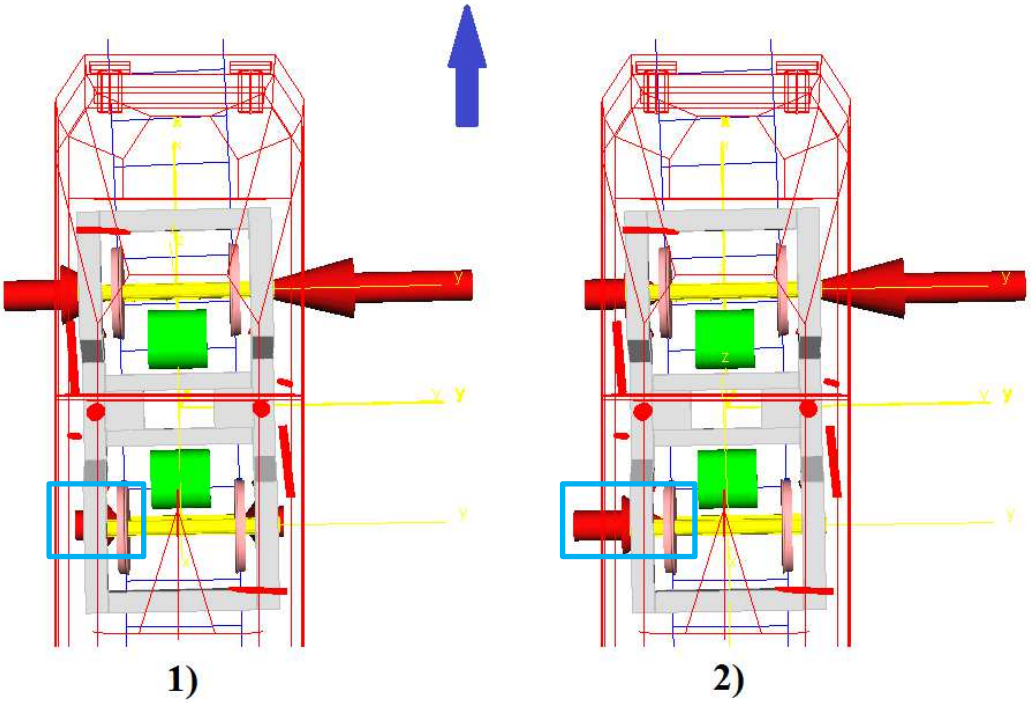


Abbildung 75: Exemplarisch eingefügter Anschlag

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

6 Schlussfolgerung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Simulationsergebnisse und auf ortsfesten Einrichtungen basierende Messdaten miteinander verglichen, um in weiterer Folge überprüfen zu können, ob sich die in EN 14363 approximierte Verschleißziffer T_{qst} als ein sinnvolles Maß für die Schienenoberflächenschädigung eignet. Da sich im Zuge der Arbeit herausgestellt hat, dass weder die Messdaten noch die Simulationsergebnisse als gesichert und den tatsächlichen Kräften entsprechend angesehen werden können, konnten zusätzlich Fehler im Bereich der Messstellen erkannt und Modellgrenzen aufgezeigt werden. Weiters sei erwähnt, dass die betrachteten Fahrzeuge nur einen sehr kleinen Ausschnitt von Fahrzeugen abbilden, die im Schienenverkehrsnetz in Betrieb sind. Daher lässt sich keine allgemeine Aussage aufstellen, sondern es können nur Tendenzen aufgezeigt werden.

Unter anderem konnte durch die einfache Überprüfung der Summe aller *Y*-Kräfte gezeigt werden, dass die Auswertungen an den Messstellen für die *Y*-Kräfte nicht korrekt waren bzw. sind. Für die Messstelle GA19 konnte der Fehler in der Auswertung identifiziert und eine neue Auswertung erwirkt werden, wodurch sich schlussendlich bessere Vergleichswerte zwischen der Simulation und der Messung ergeben. Die Auswertung der Messstellen VE10 und BS sollte in weiterer Folge überprüft werden, da dort weiterhin vor allem an den Außenschienen besonders hohe *Y*-Kräfte auftreten. Für den engen Bogen im Bereich der Messstelle Breitenstein gilt, dass dort die MKS-Modelle - bei Vorhandensein von gesicherten Messdaten - auf ihre Gültigkeit geprüft werden sollten. Da die zur Verfügung gestellten Modelle vereinfacht sind und das Verhalten der Drehgestelle nicht vollständig abbilden (Detailierungsgrad in der Modellbildung), ist bei der Verwendung in engen Bögen Vorsicht geboten. Die Messdatenauswertung erfolgte über eine statistische Auswertung, die eine Vielzahl von Überfahrten beinhaltet. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung gestellten Wetterdaten konnten die äußeren Einflüsse durch Niederschlag auf die Ergebnisse der Messdatenauswertung reduziert werden.

Die Ergebnisse auf dem geraden Streckenabschnitt bei AS07 haben gezeigt, dass ein aussagekräftiger Vergleich der beiden Methoden durchaus möglich ist. Die Messstelle AS07 dient daher vor allem als Referenz. Da auf der Geraden die dynamischen Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung dominieren, ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation auch im Bereich der dynamischen Kräfte gegeben. Eine exakte quantitative Übereinstimmung der Daten ist aber aus mehreren Gründen nicht möglich. Besonders die dynamischen Kräfte werden durch die Rad- und Schienenprofile stark beeinflusst. Zusätzliche Einflussgrößen wie Wind, Temperatur, tatsächliche Massenverteilung und reales Bettungsverhalten stellen Größen dar, die nicht ohne weiteres in ein Simulationsmodell miteinbezogen werden können, insbesondere wenn die zu vergleichenden Messdaten nicht einer Messkampagne zu Grunde liegen und sich die betrachteten Zeiträume über mehrerer Wochen erstrecken. Es konnte durch die Simulation in der Geraden gezeigt werden, dass die Messstelle für die quasistatische Kraftmessung mit knapp 10 m für die Geschwindigkeiten bei AS07 zu kurz ist. Für die Messstellenlänge sollten daher besonders die Wellenlängeninhalte der Gleislagefehler berücksichtigt werden, um nicht dynamische Anteile in den quasistatischen Kräften zu erhalten. Längere Messstellen würden auch den Einfluss lokal ausgeprägter Gleislagefehler auf die Ergebnisse deutlich reduzieren. Im Betrieb hat sich allerdings gezeigt, dass durch

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

die Messung der Vertikalkräfte die Fahrzeugmasse mit einer maximalen Abweichung von 1,5 % zum realen Wert bestimmt werden kann [44].

In den Bögen von GA19 und VE10 haben die Vergleiche gezeigt, dass sehr gute qualitative Übereinstimmungen zwischen der Messung und der Simulation erreicht werden können. Besonders GA19 zeigt, dass bei korrekter Auswertung an der Messstelle auch eine teilweise quantitative Übereinstimmung möglich ist. Einflüsse wie der tatsächliche Reibwert und geschmierte Spurkränze wurden im Zuge der DoE Berechnungen berücksichtigt. Besonders bei der Lokomotive ist anzumerken, dass die Modellierung des Antriebs sehr simpel ausgeführt wurde. Die tatsächliche Verteilung der Antriebsmomente kann einen Einfluss auf die restlichen Kräfte in den Kontaktgebieten haben. Obwohl ausgeprägte Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen eines Zugverbandes ausgeschlossen wurden, können trotzdem Wechselwirkungen aufgrund der Koppelung der einzelnen Züge einen gewissen Einfluss auf die Kräfte in den Kontaktgebieten haben. Einen wichtigen Einflussfaktor stellen weiters die Gleislagedaten dar, die im Vergleich mit der Norm EN 13848-1 mit einigen angeführten Unsicherheiten behaftet sind. Auch die exakte Lage der Messstellen sollte für zukünftige Betrachtungen ermittelt werden, um Abweichungen diesbezüglich ausschließen zu können. Zusammenfassend lässt sich aber sagen, dass weitere Veränderungen von Parametern oder Randbedingungen in der Simulation nur dann zielführend sind, wenn die Messstellen (vor allem in y-Richtung) gesicherte Ergebnisse liefern.

Weiters kann auf die wichtige Fragestellung, ob T_{qst} als sinnvolle Näherung für T_γ verwendet werden kann, eine Antwort abgeleitet werden. Zwar haben die Simulationen und die Vergleiche mit den Messungen gezeigt, dass meist ein qualitativer Zusammenhang erreicht werden kann, allerdings ist es aufgrund der teilweise großen betragsmäßigen Unterschiede zwischen T_{qst} und T_γ nur schwer möglich, exakte Aussagen über die tatsächliche Schienenoberflächenschädigung zu machen, besonders da auch deutliche Unterschiede von T_{qst} zwischen der Messung und der Simulation vorhanden sind. Schon kleine betragsmäßige Unterschiede können darüber entscheiden, in welcher Form und mit welcher Intensität die Schienenoberflächenschädigung eintritt [25][29][30]. Die betragsmäßigen Unterschiede zwischen T_{qst} und T_γ lassen sich dadurch erklären, dass T_{qst} schlichtweg nur eine Regression von T_γ darstellt. Mit T_{qst} wird versucht, die Reibenergie rein durch die Kräfte im Kontaktpunkt abzuschätzen, was stets mit großen Unsicherheiten verbunden ist, da Informationen über den Schlupf fehlen.

Die in EN 14363 verwendete Approximation soll ein allgemein gültiges Modell darstellen, um die Schienenschädigung von unterschiedlichen Fahrzeugen zu bestimmen. Für realitätsnähere Ergebnisse müsste für jedes Fahrzeug eine eigene Regression angefertigt werden. Während das für die Fahrzeug-Zulassung nach EN 14363 noch durchaus möglich wäre, ist das für den täglichen Betrieb im realen Schienennetz nicht zu realisieren, da z. B. nicht für jeden beliebigen Güterzug ein konkretes Modell vorhanden ist. Hier wäre ein allgemein gültiges Modell notwendig, das alle zusätzlichen Betriebsbedingungen (z. B. Spurkranzschmierung) abbildet. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich das allgemeine in EN 14363 Anhang K dargestellte Modell nicht für eine konkrete Abschätzung der Schienenoberflächenschädigung im täglichen Betrieb eignet.

Für zukünftige Betrachtungen, vor allem in Hinblick auf den Vergleich zwischen ortsfesten Messstellen und numerischer Simulation, wäre es sinnvoll, gezielte Mess-

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

kampagnen durchzuführen, bei denen bei dieser Arbeit zu Tage getretene Unsicherheiten wie reale Radprofile, Wellenlängenbereiche der Gleislagedaten, Rad-Schiene-Kontaktparameter, tatsächliches Wetter, Streuung durch nicht einheitliche Überfahrten (unterschiedliche Fahrzeuge und Geschwindigkeiten) etc. eliminiert werden könnten. Dadurch wären noch bessere Aussagen aus der numerischen Simulation möglich. Als zusätzlicher Vergleich könnte die Messung mit Messradsätzen dienen. Zusätzlich wäre es sinnvoll, umfangreichere Überprüfungsmechanismen für die ortsfesten Messstellen einzuführen, damit ein fehlerhaftes Verhalten schneller erkannt wird. Eine Möglichkeit wäre z. B., die Summe aller Y-Kräfte pro Wagen automatisiert auf Plausibilität zu überprüfen, wie in dieser Arbeit vorgestellt.

Darüber hinaus könnten andere Modelle für die Schienenoberflächenschädigung in Betracht gezogen oder entwickelt werden, die bei Messungen mit ortsfesten Messstellen effizientere Ergebnisse liefern.

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

7 Abbildungen

Abbildung 1: Koordinatensystem [1] ... 2
Abbildung 2: Rollradiendifferenz Δr [6] ... 3
Abbildung 3: Kräfte und Geschwindigkeiten im Kontaktpunkt (bearbeitet aus [3]) ... 4
Abbildung 4: Idealisierte Kraftschluss-Schlupf Kurve [18] ... 5
Abbildung 5: Orientierung der Kräfte im Kontaktpunkt (bearbeitet aus [3]) ... 8
Abbildung 6: Definition der Längshöhe [22] ... 12
Abbildung 7: Definition der Richtung [22] ... 12
Abbildung 8: Umrechnung der Gleislagefehler [22] ... 14
Abbildung 9: „Ratchetting“ [43] ... 15
Abbildung 10: Schienenoberflächenschädigung abhängig von T_γ [29] ... 16
Abbildung 11: „Railjet“ [35] ... 16
Abbildung 12: „Railjet“ Standardkonfiguration [36] ... 17
Abbildung 13: Kartografische Lage der betrachteten Messstellen [42] ... 20
Abbildung 14: Satellitenaufnahmen der Messstellen [43] ... 21
Abbildung 15: Sensorpositionen [21] ... 24
Abbildung 16: Belastungen auf Schiene in der y-z-Ebene [47] ... 24
Abbildung 17: Einflusszahlen auf das Biegemoment bei vertikaler Last [25] ... 25
Abbildung 18: AS07 Ausschnitt aus der Geschwindigkeitsverteilung ... 30
Abbildung 19: VE 10 gesamte Geschwindigkeitsverteilung ... 31
Abbildung 20: GA19 Ausschnitt aus der Geschwindigkeitsverteilung ... 31
Abbildung 21: BS gesamte Geschwindigkeitsverteilung ... 32
Abbildung 22: Regenmenge bei AS07 ... 33
Abbildung 23: Abschätzung des Reibwerts GA19 ... 34
Abbildung 24: Kräfte AS07 auf 32 Achsen gemittelt ... 35
Abbildung 25: Gemittelte Achslasten AS07 Bereich 3 ... 36
Abbildung 26: Kräfte AS07 auf 64 Achsen gemittelt ... 37
Abbildung 27: AS07 Perzentile der *Q*-Kräfte am Reisezugwagen ... 38
Abbildung 28: AS07 Kräfte über 4 Achsen gemittelt am Reisezugwagen ... 39
Abbildung 29: GA19 Kräfte über 32 Achsen gemittelt ... 40
Abbildung 30: GA19 Kräfte über 32 Achsen gemittelt Betrachtungsfall μ > 0,25 ... 41
Abbildung 31: Gemittelte Achslasten GA19 ... 42
Abbildung 32: GA19 Perzentile am Reisezugwagen ... 42
Abbildung 33: GA19 Kräfte über 4 Achsen gemittelt am Reisezugwagen ... 43
Abbildung 34: GA19 *Y*/*Q* am Reisezugwagen ... 44
Abbildung 35: Summe Y GA19 Reisezugwagen ... 45
Abbildung 36: Einfache Modellbildung [3] ... 47
Abbildung 37: MKS-Modell „Railjet“-Reisezugwagen [37] ... 48
Abbildung 38: Vereinfachte Topografie „Railjet“-Modell ... 49
Abbildung 39: MKS - Modell „Taurus“-Lokomotive [37] ... 50

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

Abbildung 40: Vereinfachte Topografie Lok Modell 51
Abbildung 41: Kraftschlusskurve [13] 53
Abbildung 42: Modellierung der Reibwertabhängigkeit im Spurkranz [37] 54
Abbildung 43: Schienenprofile im Gleis bei GA19 56
Abbildung 44: Radsatzprofil Steuerwagen 57
Abbildung 45: Lage der Kontaktpunkte bei Paarung von 60E1 mit S1002 57
Abbildung 46: Leistungsdichtespektren der Gleislagedaten GA19 60
Abbildung 47: Trassierungsdaten GA19 61
Abbildung 48: Gleislagefehler GA19 62
Abbildung 49: Phasenverschiebung Richtungssignal 63
Abbildung 50 T_γ und T_{qst} im Vergleich R variiert 67
Abbildung 51: T_γ und T_{qst} im Vergleich a_q variiert 68
Abbildung 52: T_γ und T_{qst} im Vergleich mit variierten μ 69
Abbildung 53: T_γ und T_{qst} im Vergleich - Reibwert im Spurkranz variiert 69
Abbildung 54: Einfluss Wellenlängenbereiche AS07 71
Abbildung 55: Einfluss Wellenlängenbereiche GA19 73
Abbildung 56: Einfluss der Messstellenlage 73
Abbildung 57: Kraftverlauf AS07 Drehgestell 1 76
Abbildung 58: Kräfte durch Richtungsabweichungen 77
Abbildung 59: Kraftverlauf GA19 Drehgestell 1 77
Abbildung 60: Geschwindigkeitsverlauf Lokomotive GA19 78
Abbildung 61: Kraftverlauf AS07 79
Abbildung 62: Vergleich AS07 Reisezugwagen Bereich 2 81
Abbildung 63: Vergleich AS07 Lokomotive Bereich 2 82
Abbildung 64: Vergleich VE10 Reisezugwagen 83
Abbildung 65: Vergleich VE10 Lokomotive 85
Abbildung 66: Y/Q Vergleich VE10 86
Abbildung 67: Vergleich Schienenschädigung VE10 86
Abbildung 68: Vergleich GA19 Reisezugwagen 87
Abbildung 69: Vergleich GA19 Lokomotive 88
Abbildung 70: Y/Q Vergleich GA19 89
Abbildung 71: Vergleich Schienenschädigung GA19 89
Abbildung 72: Vergleich BS Reisezugwagen 90
Abbildung 73: Vergleich BS Lokomotive 91
Abbildung 74: Vergleich Schienenschädigung BS 91
Abbildung 75: Exemplarisch eingefügter Anschlag 92

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

8 Tabellen

Tabelle 1: Größenbezeichnung 3
Tabelle 2: Wellenlängenbereiche nach EN 13848-1 [22] 12
Tabelle 3: Wellenlängenbereiche abhängig von der Geschwindigkeit [22] 13
Tabelle 4: Technische Daten „Railjet“ [36] 17
Tabelle 5: Technische Daten „Taurus“ [38][39] 18
Tabelle 6: Trassierungsdaten im Bereich der Messstellen 22
Tabelle 7: Anzahl an Sensoren je Messstelle 23
Tabelle 8: Ausgewertete Größen 28
Tabelle 9: Zusammenfassung der Messdaten 29
Tabelle 10: Reibwertannahmen 53
Tabelle 11: Reibwerte für Lauffläche und Spurkranz 54
Tabelle 12: Einbauneigungen nach Messstelle 55
Tabelle 13: Modellierung der Bettung [51] 58
Tabelle 14: Anregefrequenzen nach Messstellen 63
Tabelle 15: Messstellenposition nach Streckenkilometrierung [44] 64

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

9 Literatur

[1] EN 14363. *Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche*. Ausgabe 15.10.2016

[2] C. Tomberger. Der Rad-Schiene Kraftschluss unter Berücksichtigung von Temperatur, fluiden Zwischenschichten und mikroskopischer Oberflächenrauheit. Doktorarbeit. Technische Universität Graz. Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften. 2009

[3] K. Knothe, S. Stichel. *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH. 2003

[4] A. Wickens. *Fundamentals of Railway Vehicle Dynamics*. Swets & Zeitlinger. 2005

[5] A. D. de Pater. *The exact theory of the motion of a single wheelset moving on a purely straight track.* Report No. 648. Delft University of Technology. 1979

[6] H. Hertz. *Über die Berührung fester, elastischer Körper*. Journal für die reine und angewandte Mathematik. Berlin und Leipzig 1882. 92:156- 171

[7] https://www.kalkersoftware.org

[8] J. J. Kalker. *On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction*. Doktorarbeit. TH Delft. 1967.

[9] O. Reynolds. *On rolling friction*. Philosophical Transactions of the Royal Society 01 London. 166(1):155- 174, 1876.

[10] A. H. Vollebregt, J . J . Kalker, G. Wang. *Contact 93 Users Manual*. Technical report. Technical University of Delft. 1993.

[11] F. W. Carter. *On the action of a locomotive driving wheel.* Proc. R. Soc. Lond. A 112:151-157. 1926.

[12] H.Weber. Untersuchung und Erkenntnisse über das Adhäsionsverhalten elektrischer Lokomotiven. Schweizerische Bauzeitung, Heft 48, S. 877-88 Zürich, Dezember 1965

[13] Simpack Aktiengesellschaft. *Simpack Documentation*. Simpack Release 8.9. Programmdokumentation. Gilching 2017.

[14] H. Schelle. *Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung.* Doktorarbeit. Technische Universität Berlin. Fakultät für Verkehrs und Maschinensysteme. 2014

[15] J. J. Kalker. *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*. Vehicle System Dynamics Vol. 11. Taylor & Francis. S. 1-13. 1982

[16] M. Spiryagina, O. Polach, C. Cole. *Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm.* Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis Group. 13.08.2013

[17] V. Matthews. *Bahnbau,* Teubner. 6. Auflage 2003

[18] T. Jendel. *Prediction of Wheel Profille Wear Methodology and Verification*. TRITA-FKT 2000:49. Licenciate Thesis. KTH Stockholm. Dept. of Vehicle Engineering. Sweden. 2000

[19] H. Krause, G. Poll. *Verschleiß bei gleitender und wälzender Relativbewegung.* Tribologie und Schmierungstechnik. Vol. 31 Nr. 4. 1984. S. 209-214

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

[20] E. Czuber. *Der Mittelwert eines Quotienten*. Journal für die reine und angewandte Mathematik. Berlin und Leipzig 1920. 150, S175-179.
[21] HBM GmbH. *Wayside Train Monitoring*. 2017
[22] EN 13848-1. *Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität.* Ausgabe Entwurf September 2016
[23] G. Jodlbauer, J. Neubert. *Digitales Aufzeichnungssystem für Gleisbaumaschinen.* El-Eisenbahningenier, August 2014
[24] N. Heuwold. *Parametrisierung der Gleisgeometrie aus Befahrungsdaten von Gleismesswagen.* Diplomarbeit. Technische Universität Berlin. Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik. August 2001.
[25] B. Lichtberger. *Handbuch Gleis.* DVV Media Group GmbH I Eurailpress 3. Auflage, 2010
[26] M. Dembosky, A. Doherty. *Management of Rolling Contact Fatigue (RCF) in the UK Rail system. Network Rail*. London UK. 2006
[27] R. Care, S. Clark, M. Dembosky. *Why rails crack – Gauge corner cracking on the British network: Investigation*. The Arup Journal 3/5. S. 37-41. 2005
[28] L. Deters, A. Fischer. *Arbeitsblatt Tribologie. Gesellschaft für Tribologie*. 2002
[29] M. Burstow. *Whole Life Rail Model Application and Development for RSSB-Development of an RCF Damage Parameter.* AEATR-ES-2003-832. Oktober 2003
[30] B. Johnson. *Plastic flow and shakedown of the rail surface in repeated wheel-rail contact.* Wear. Elsevier. Vol. 144. S. 1-18. 1991
[31] A. Orvnäs. *Simulation of Rail Wear on the Swedish Light Rail Line Tvärbanan.* Royal Institute of Technology (KTH). Master Thesis. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. TRITA AVE 2005:12
[32] I. Zobory. *Prediction of Wheel/Rail Profile Wear.* Vehicle System Dynamics. Taylor & Francis. 1997. 28:2-3, 221-259.
[33] T. Jendel & Mats Berg. *Prediction of Wheel Profile Wear.* Vehicle System Dynamics. Taylor & Francis. 2002. 37:2-3, 502-513
[34] https://de.wikipedia.org/wiki/Railjet. aufgerufen am 19.01.2018
[35] https://presse.oebb.at/de/fotos/railjet. aufgerufen am 19.01.2018
[36] ÖBB. *Railjet Technischer Infofolder*. Österreich. 2008
[37] *Interne Informationen Siemens*
[38] https://de.wikipedia.org/wiki/Siemens_ES64U4 aufgerufen am 19.01.2018
[39] https://de.wikipedia.org/wiki/Siemens_ES64U2 aufgerufen am 19.01.2018
[40] Siemens Transportation Systems. *Fahrwerke erster Klasse*. Programmheft Drehgestelle. 2008
[41] https://www.hbm.com/de/2393/messtechnik-auf-der-schiene/ aufgerufen am 19.01.2018
[42] http://www.oebb.at/infrastruktur/de/4_0_fuer_Nachbarn/4_4_Ihre_Baumassnahmen/4_4_Ihre_Baumassnahmen/Kontakte/Kontakte_fuer_Anfragen_Ansuchen/00_DmsDateien/_Karte_SBM_Regionen.jsp aufgerufen am 21.01.2018
[43] https://www.google.at/maps aufgerufen am 01.02.2018
[44] *Interne Informationen ÖBB*

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

[45] K. Endlicher. *Skriptum zur VO Grundlagen der Fahrzeugdynamik – Schienenfahrzeuge.* TU Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik. WS 2015/2016

[46] C. Pittner. Diplomarbeit, *Auswertung von Radkraft-Messdaten zur Ermittlung eines Lastkollektives für die Lebensdauerabschätzung von Schienen*. April 2017

[47] P. Seyboth. *Beanspruchung seitlich abgenutzter Schienen der Form UIC60*. Technische Universität München. Heft 48, 1986

[48] M. Plöchl. *Grundlagen der Mehrkörpersystemdynamik.* Skriptum zur Vorlesung. TU Wien Institut für Mechanik und Mechatronik. Sommer 2017

[49] A. Angerbauer. Längsdynamik des Eisenbahnzuges auf beliebigen Streckenführungen insbesondere auf Bergstrecken. Doktorarbeit. Technische Universität Wien. Fakultät für Maschinenbau. 1995

[50] O. Polach. *Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit.* Wear 258. S. 992-1000. 2003

[51] ORE B 176: *Bogies with steered or steering wheelsets.* Report No. 1: Specifications and preliminary studies, Vol. 2, Specification for a bogie with improved curving characteristics. ORE, Utrecht 1989

[52] Z. Shen, Z. Y, J. Hedrick. *The influence of rail lubrication on freight car wheel/rail wear rates.* Vehicle System Dynamics. Vol. 15. Taylor & Francis.S. 523–536, 1986.

[53] G. Goryacheva, S. Soshenkov, E. Torskaya. *Modelling of wear and fatigue defect formation in wheel–rail contact*. Vehicle System Dynamics. Taylor & Francis. S. 1–17, 2011.

[54] X. Shu, N. Wilson. *Simulation of dynamic gauge widening and rail roll: effects on derailment and rolling contact fatigue*. Vehicle System Dynamics. Vol. 46. Taylor & Francis. S. 981–994, 2008.

[55] J. Piotrowski: *Contact loading of a high rail in curves physical simulation method to investigate shelling.* Vehicle System Dynamics. Vol. 17. Taylor & Francis. S. 57–79, 1988.

[56] O. Polach, A. Bötticher. *A new approach to define criteria for rail vehicle model validation*. 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Qingdao, China, August 19-23, 2013

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

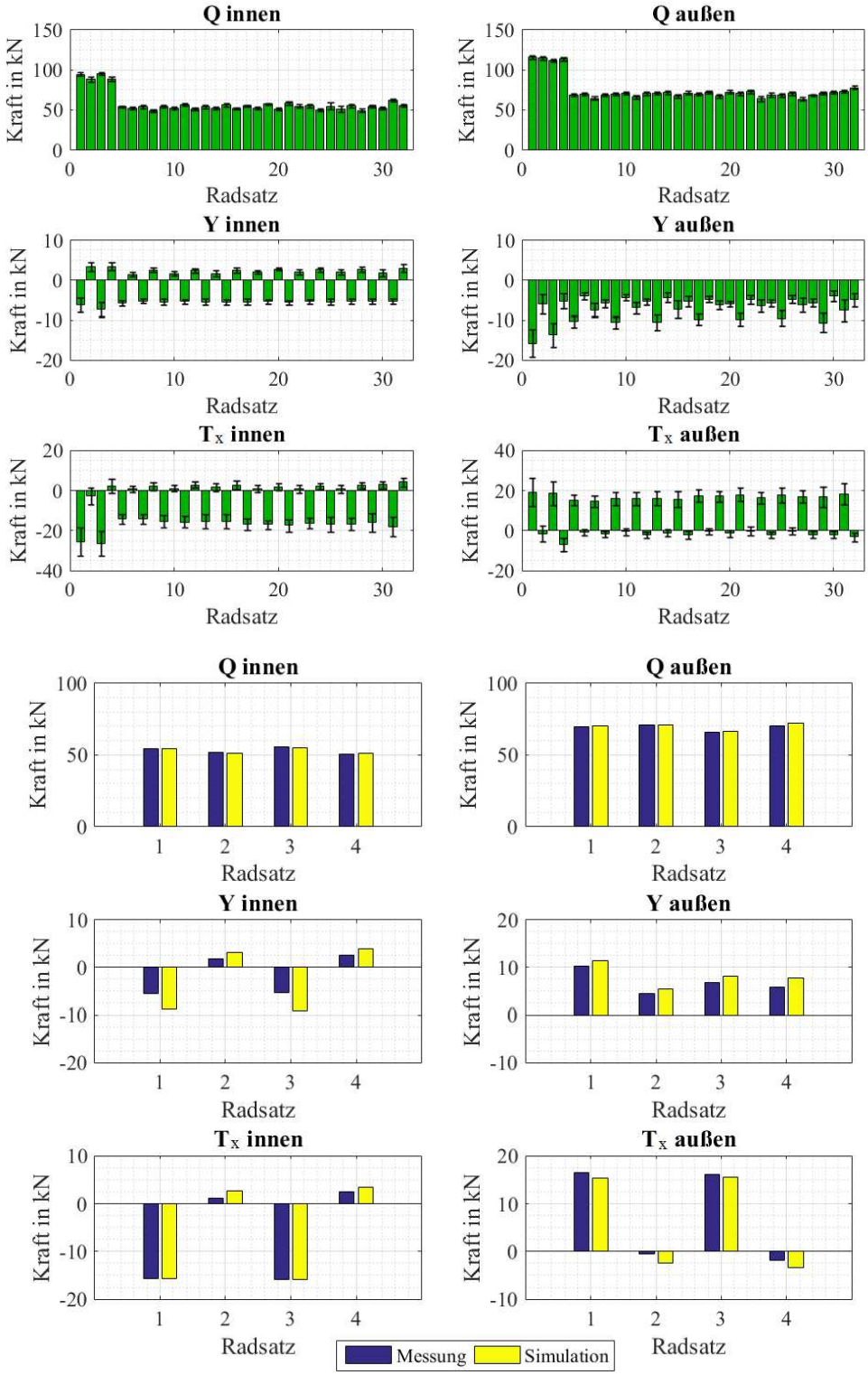
10 Anhang

A) GA 19

Messdatenauswertung Richtung 2 inklusive Vergleich mit Simulationsdaten

Geschwindigkeitsbereich: 80,5 ± 0,5 km/h (54 Überfahrten, 0 < a < 0,05 m/s²), bergab, Reisezugwagen ungebremst

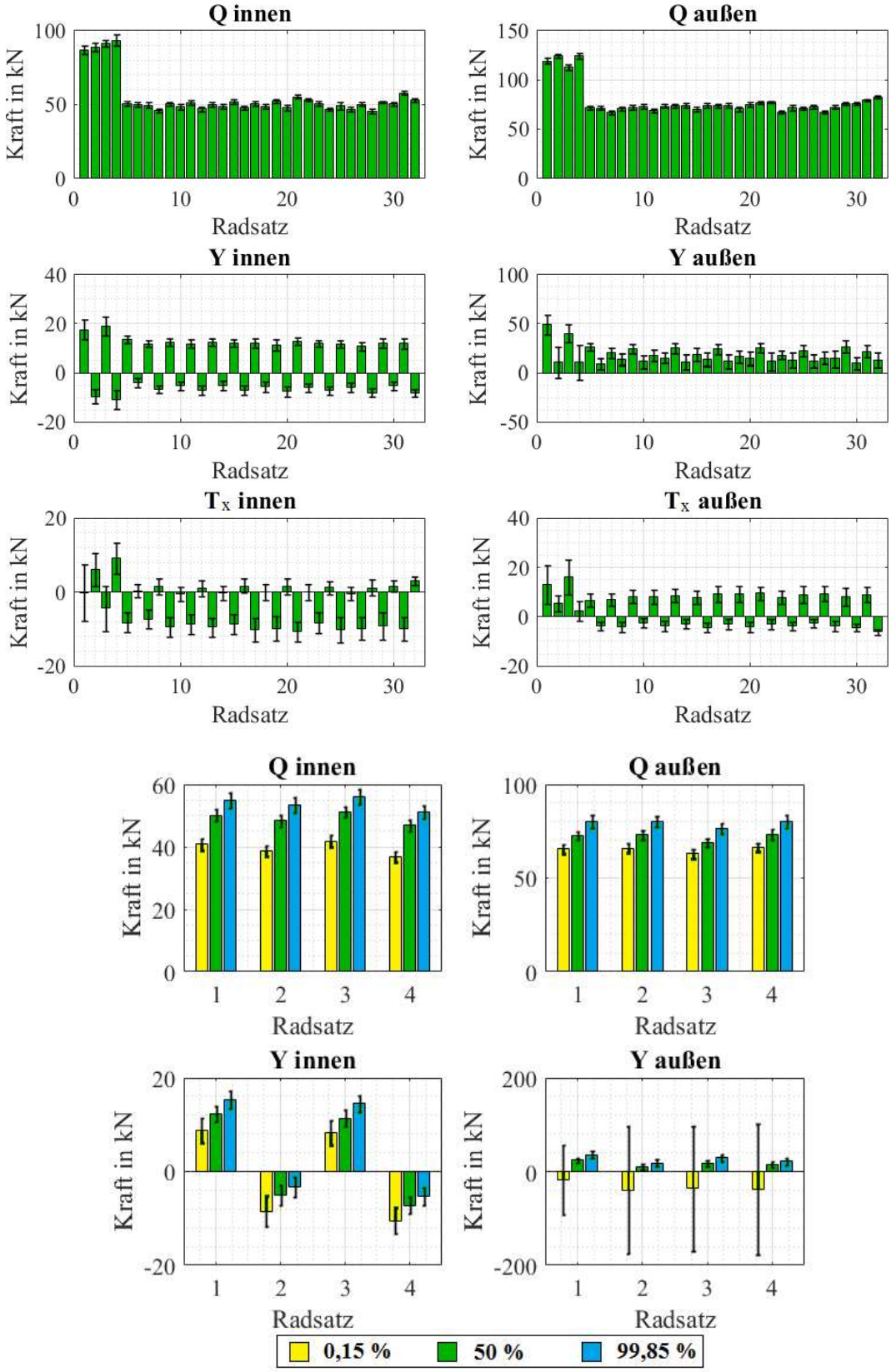
μ > 0,25



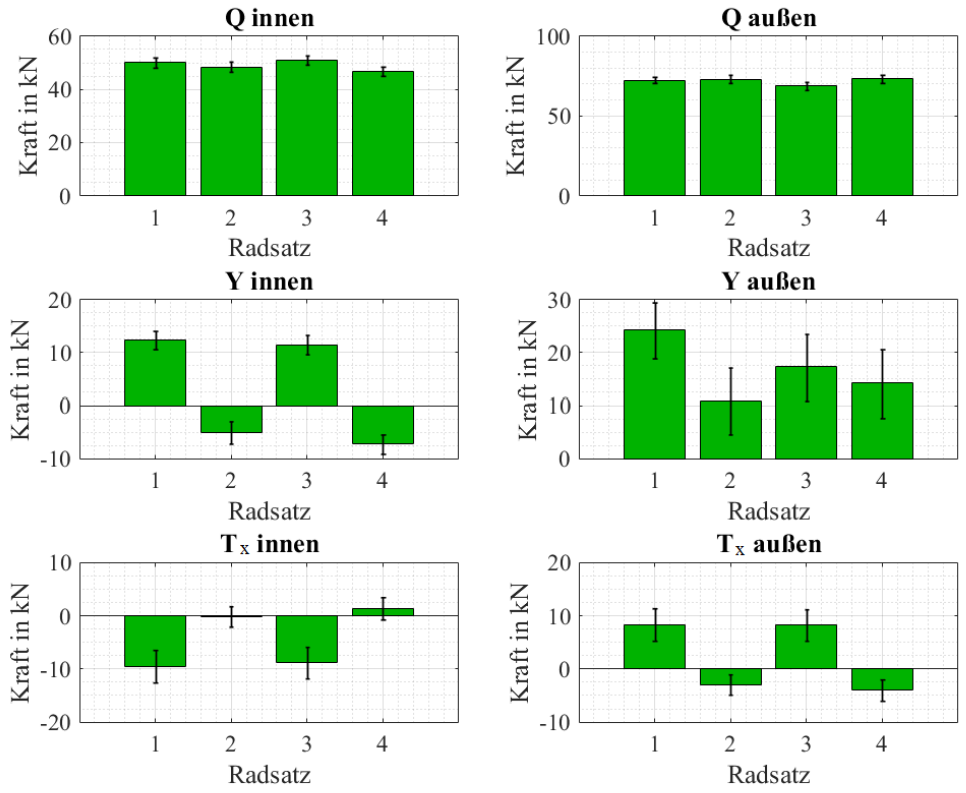
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

B) Messdaten VE10 und BS

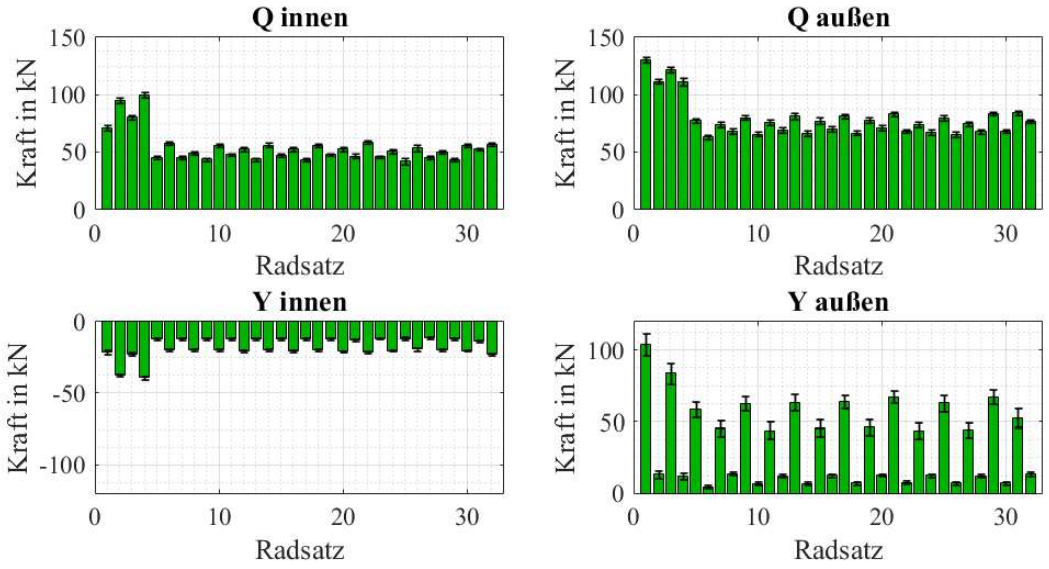
VE10 Messdatenauswertung für den gewählten Bereich aus Kapitel 3.4.2.2



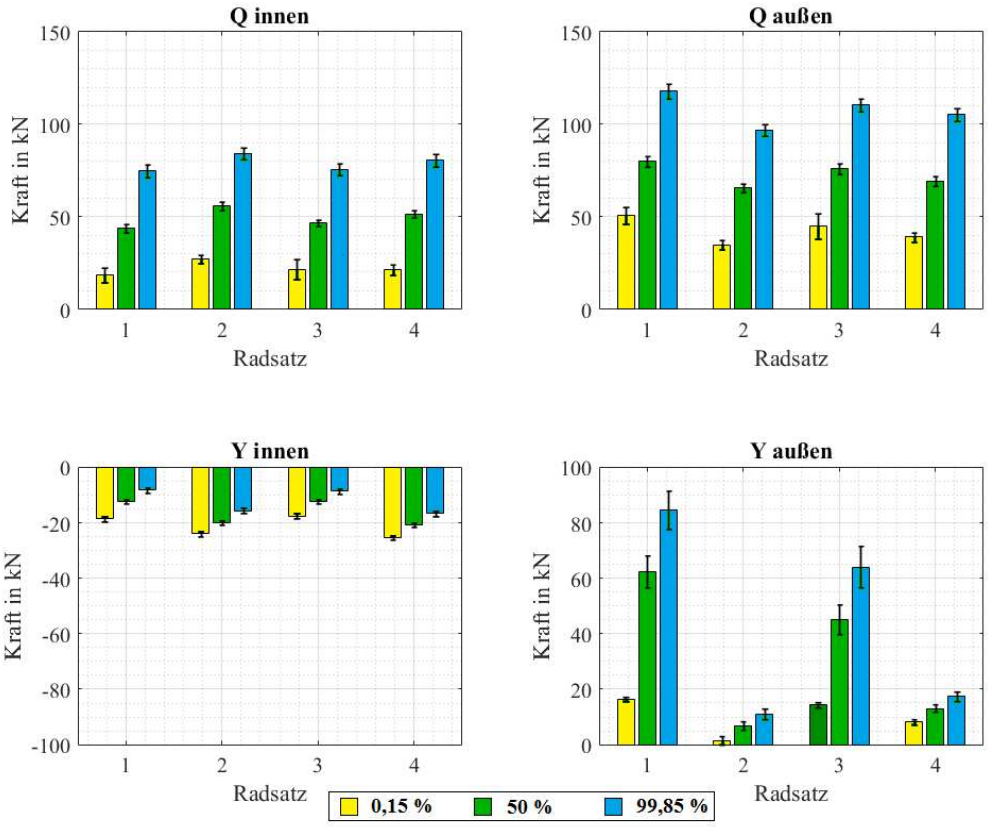
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

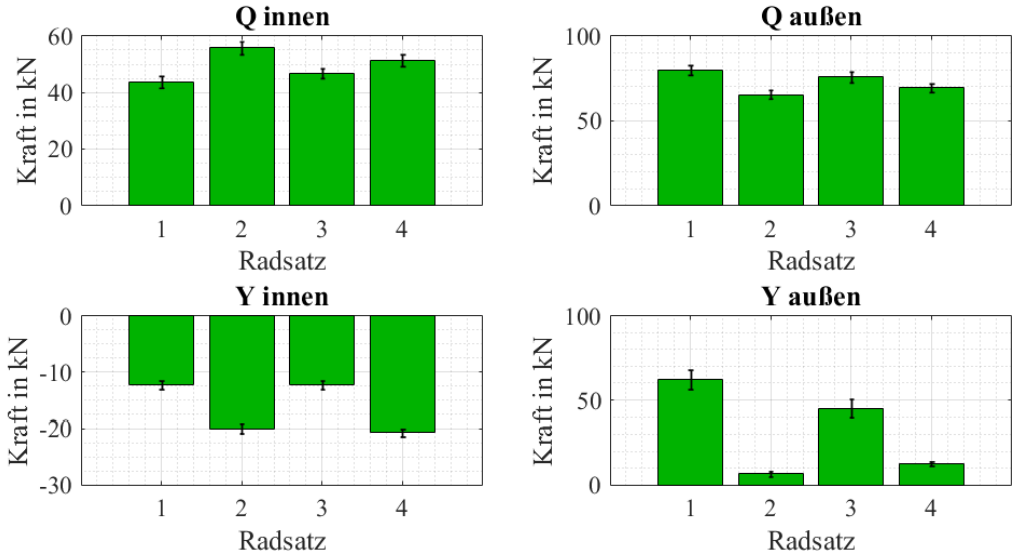


BS Messdatenauswertung für den gewählten Bereich aus Kapitel 3.4.2.4



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

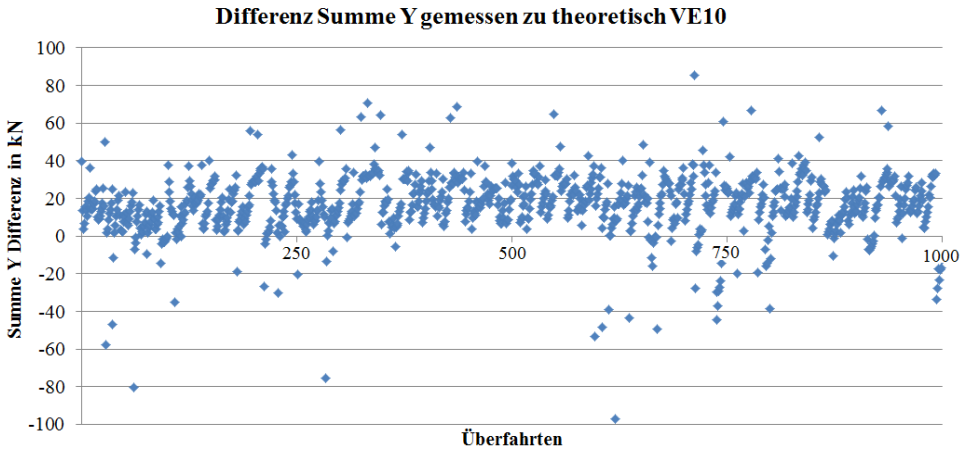


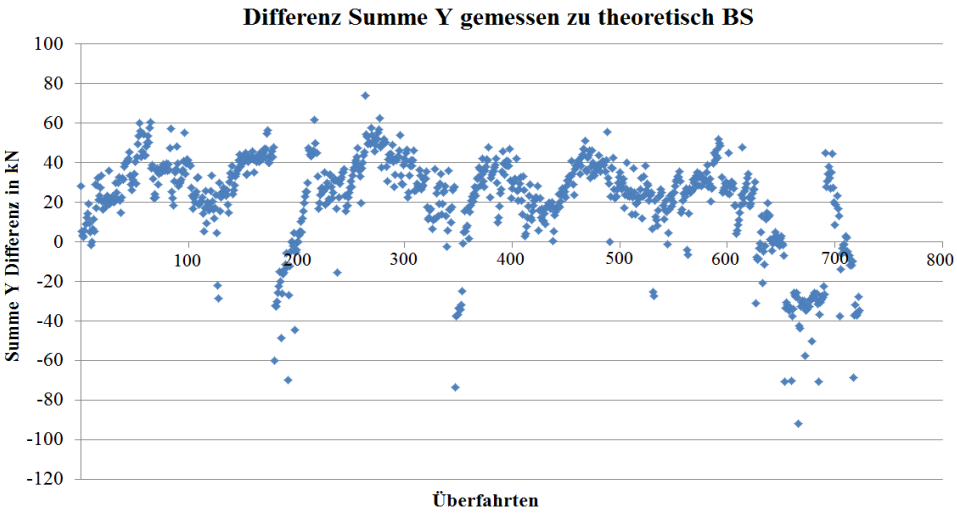


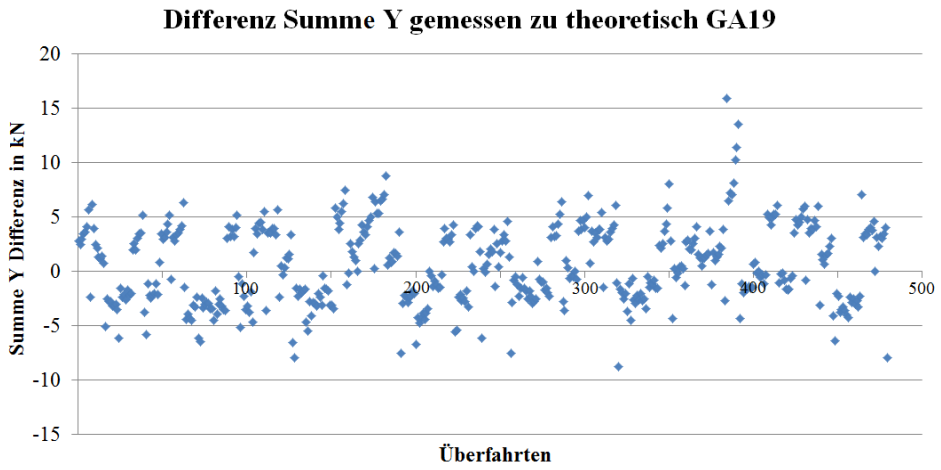
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

C) Summe *Y*-Kräfte im Vergleich

Folgende Grafiken zeigen für die Messstellen im Bogen die Differenz aus den gemessenen und den theoretischen Werten für die Summe aller *Y*-Kräfte. Ausgewertet wurde jeweils über einen Zeitraum von einer Woche. Jeder Punkt stellt einen Wagen dar.



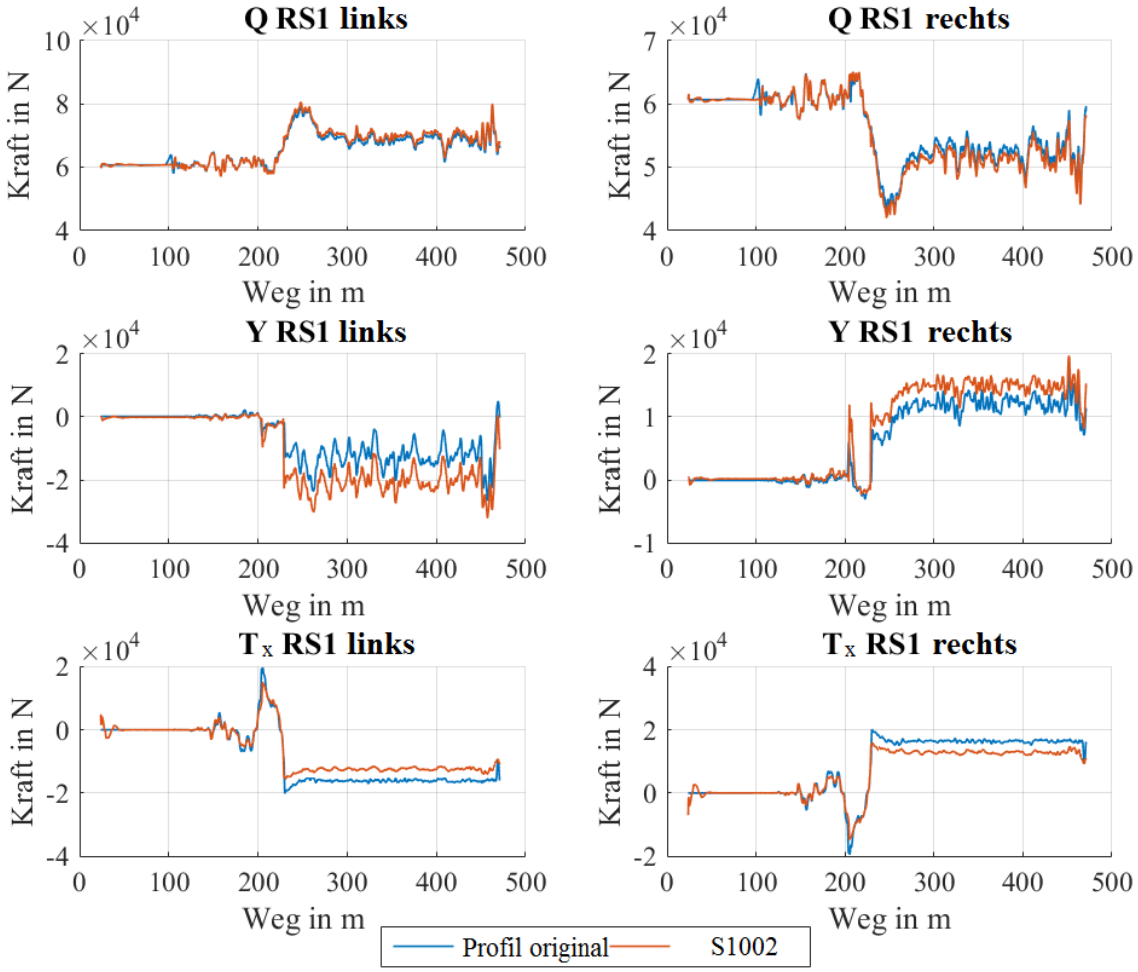




Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

D) Vergleich Schienenprofile

Vergleich des Einflusses der Schienenprofile auf der Strecke um die Messstelle GA19.

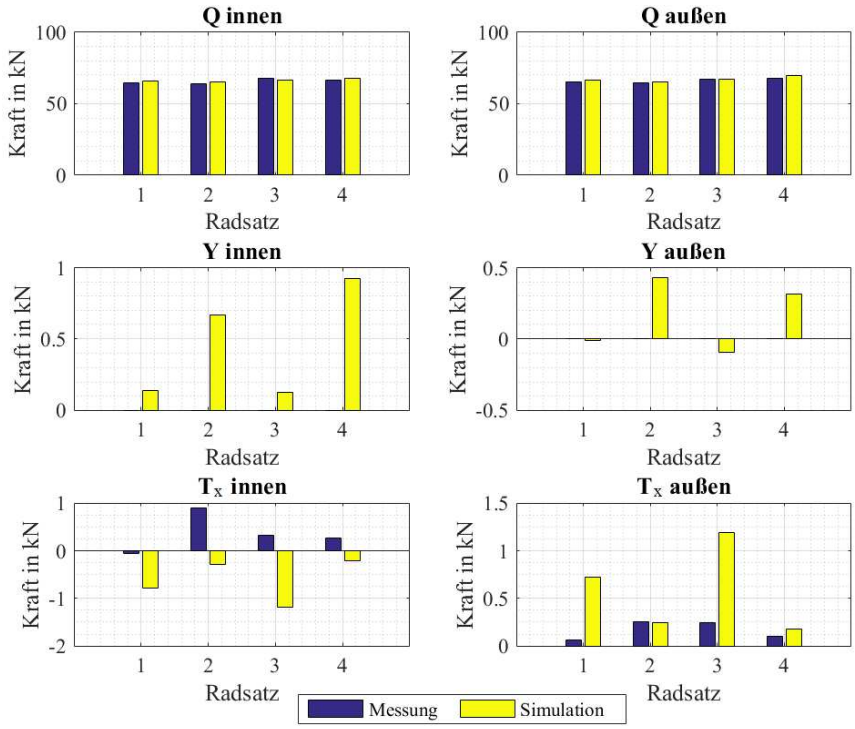


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

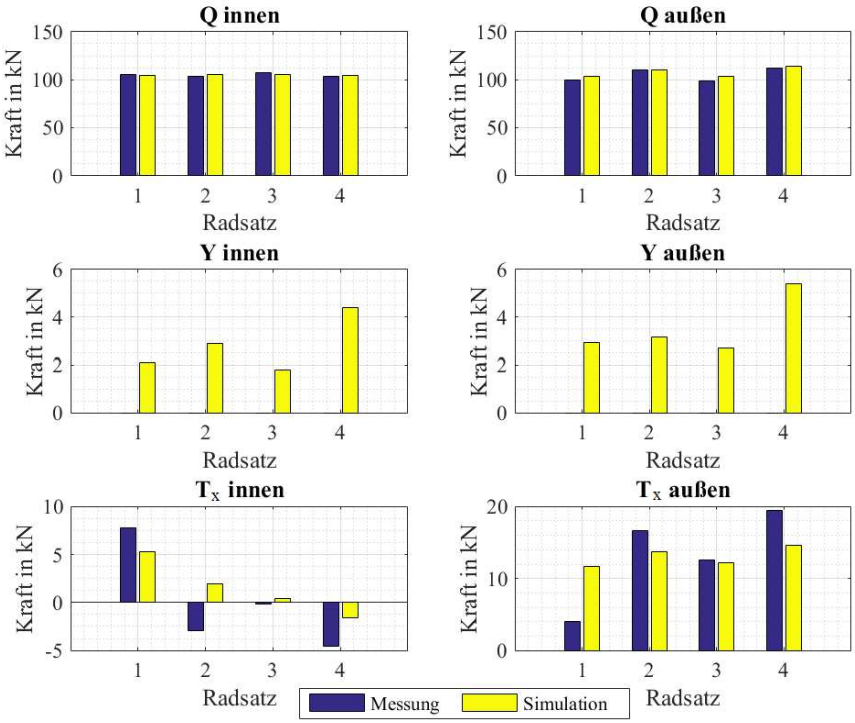
E) Radprofile

Die folgenden Grafiken zeigen Vergleiche von Simulationen mit gemessenen Radprofilen und einzelnen Überfahrten der Messstelle. Zu beachten ist die Zeitdifferenz, zwischen dem Datum der Überfahrt und dem Datum der Rad-Profilmessung. So wurden die Profile des Steuerwagens Ende August bestimmt und die der Lok Mitte Oktober.

AS07 200 km/h „Railjet“-Wagen (Mitte Oktober 2017)



AS07 200 km/h Lokomotive mit 50 kN Traktionskraft (Mitte Oktober 2017)

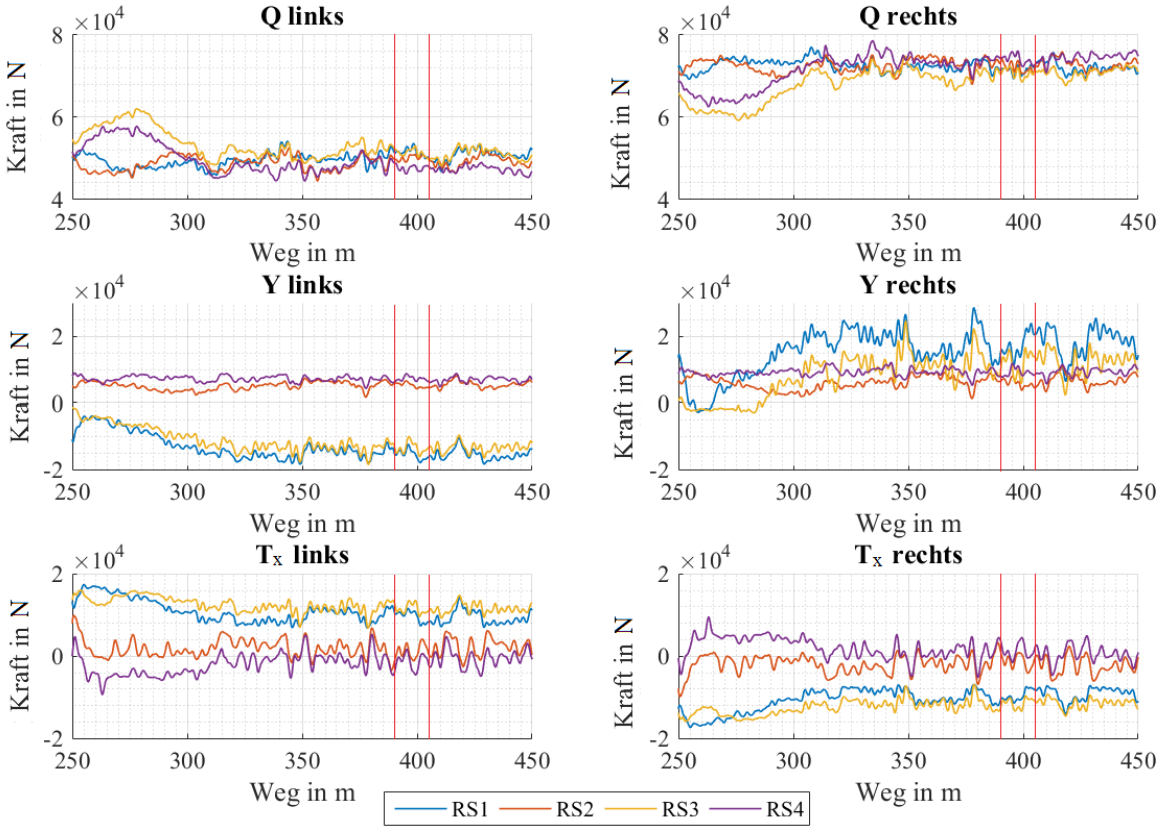


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

F) Kraftverläufe der Simulation aus VE10 und BS

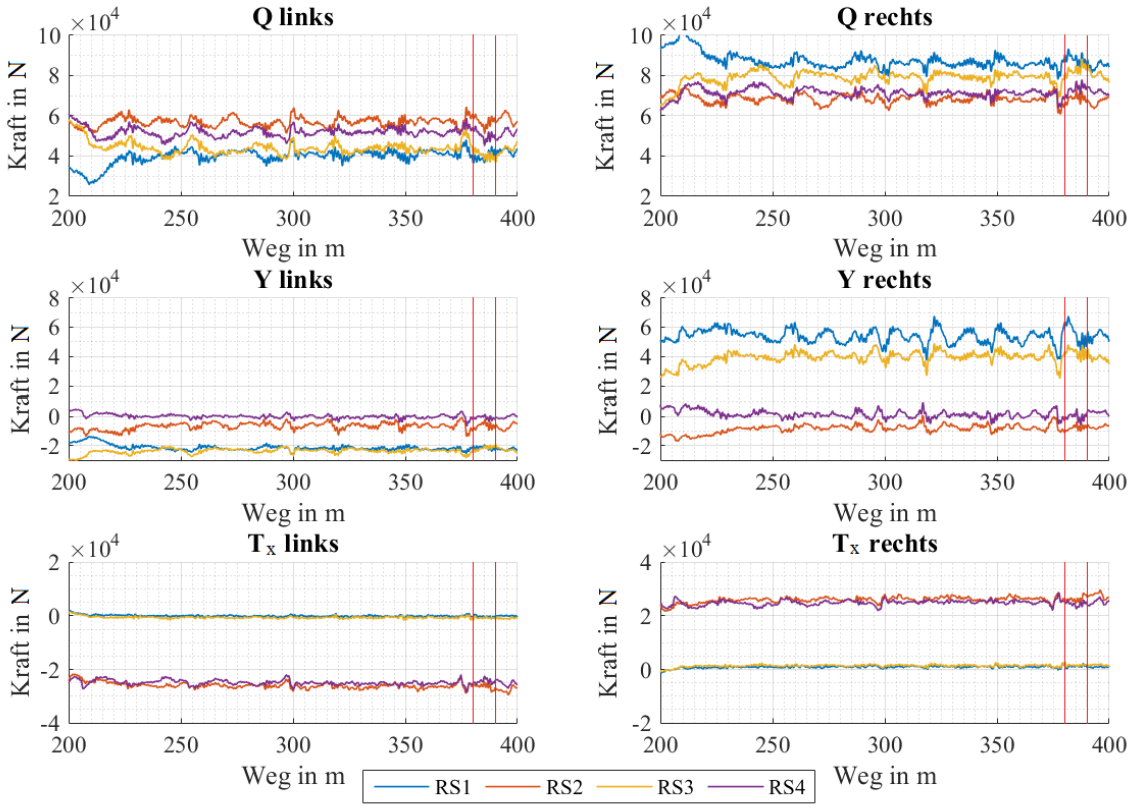
Folgende Grafiken zeigen die simulierten Kraftverläufe für alle Radsätze eines „Railjet“-Reisezugwagens. Die Positionen der Messstellen sind mit vertikalen roten Linien markiert.

VE10:



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

BS:



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