Technische Universität Berlin

TU Berlin • FG Schienenfahrzeuge • Sekr. SG 14 • Salzufer 17-19, D-10587 Berlin

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME

Institut für Land-
und Seeverkehr

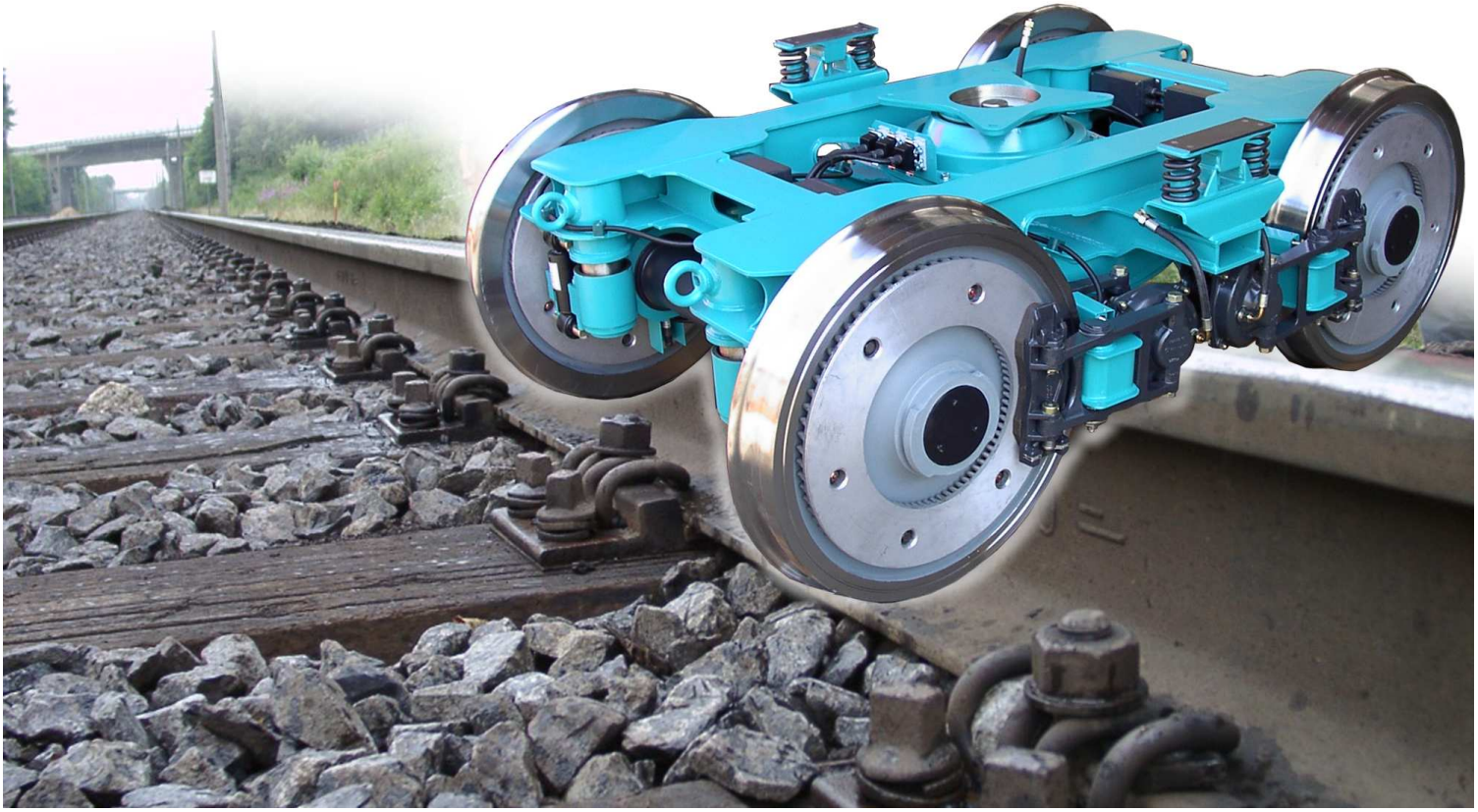
Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Tel.: +49-(0)30 314-25195
Fax.: +49-(0)30 314-22529
e-mail: Markus.Hecht@TU-Berlin.de

Bericht Nr. 12/2005

LEILA-DG
Numerischer Nachweis der Laufstabilität



Bearbeitet von: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Dipl.-Ing. Johannes Keudel

Stand: Juli 2005

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 19 U 0007B gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Zusammenhang 1

1.2 Koordinatensystem 2

2 Methode und Modellierung **3**

2.1 Methode der Stabilitätsuntersuchung 3

2.2 Fahrzeug und Fahrweg 4

3 Simulationsergebnisse **7**

4 Zusammenfassung und Fazit **11**

A Literaturverzeichnis **13**

B Grafische Darstellung der Simulationsrechnungen **15**

B.1 Erläuterung zur grafischen Darstellung 15

B.2 Ergebnisse Kesselwagen 19

B.3 Ergebnisse Taschenwagen T4.1 40

Symbol	Beschreibung	Zusammenhang
a^*	Halber Drehzapfenabstand	Allgemeine Fahrzeugparameter
a^+	Halber Achsstand im Drehgestell	Allgemeine Fahrzeugparameter
s_z	vertikale Einsenkung Primärfesselung	Allgemeine Fahrzeugparameter
s_y	laterale Auslenkung Primärfesselung	Allgemeine Fahrzeugparameter
s_x	longitudinale Auslenkung Primärfesselung	Allgemeine Fahrzeugparameter
c_{t^*}	Verwindungssteifigkeit des Fzg-Aufbaus	Allgemeine Fahrzeugparameter
z_3	Maß für Vertikal-Spiel der Primärfesselung nach DB AG [1]	Allgemeine Fahrzeugparameter
s_w	Stützweite	Allgemeine Fahrzeugparameter
b^+	Halber Querabstand der Primärfedern	Allgemeine Fahrzeugparameter
b_A	Halber Querabstand der (Nenn-)Radaufstandspunkte	Allgemeine Fahrzeugparameter
D	Dämpfungsgrad	Allgemeine Fahrzeugparameter
d^+	Dicke der Beilage für Drehgestellverwindung	Zulassung / Prüfverwindung
d^*	Dicke der Beilage für Fahrzeugverwindung	Zulassung / Prüfverwindung
g^*	Prüfverwindung des Fahrzeugaufbaus	Zulassung / Prüfverwindung
g^+	Prüfverwindung des Drehgestells	Zulassung / Prüfverwindung
r_B	Bogenradius	Trassierung
g	Steigung der Gleisverwindung	Trassierung
u	(ausgeführte) Überhöhung	Trassierung
u_f	Überhöhungsfehlbetrag	Trassierung
a_q	Freie Seitenbeschleunigung	Trassierung
g_{erd}	Gravitationsbeschleunigung	Trassierung
v	Fahrgeschwindigkeit	Trassierung
$\underline{\tilde{\varepsilon}}^{ia}$	Koppelelementhilfsbasis am Körper i	MEDYNA
$\underline{\tilde{\varepsilon}}^{ja}$	Koppelelementhilfsbasis am Körper j	MEDYNA
spw	Spurweite	Rad/Schiene-Kontakt
e_0	Halber Messkreisabstand	Rad/Schiene-Kontakt
μ_{rs}	Reibungskoeffizient zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
Q	Vertikalkraft zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
Y	Horizontalkraft zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
T_x	Längsschlupfkraft	Rad/Schiene-Kontakt
T_y	Querschlupfkraft	Rad/Schiene-Kontakt
Δz_{rad}	Radanhebung	Rad/Schiene-Kontakt
gp_{AL-DGy}	Laterales Spiel (gap) AL-Gehäuse - DG-Rahmen	Y25 Drehgestell
μ_{HK}	Reibungskoeffizient Halbkugelgelenk	Allg. Drehgestell-Parameter
μ_{GS}	Reibungskoeffizient Gleitstück	Allg. Drehgestell-Parameter
r_{Ku}	Kugelradius der Drehpfanne	KE91 - Drehpfanne
μ_{HK}	Reibungskoeffizient Drehpfanne	KE91 - Drehpfanne

Tabelle 1: Verwendete Formelzeichen und Symbole

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Zusammenhang

Ziel der Untersuchung ist es, im Rahmen des Projektes LEILA-DG entsprechend dem jeweiligen Konstruktionsstand durch projektbegleitende Simulationsrechnungen die Laufstabilität für spezifische LEILA-DG-Wagen durch numerische Simulation zu kontrollieren, bevor dies anschließend durch Fahrversuche mit dem realen Fahrzeug nachgewiesen werden muss.

Für die Simulation wird das Fahrzeug wie auch der Fahrweg in einem Mehr-Körper-System (MKS) durch entsprechende Modellierung abgebildet. Das dieser Untersuchung zugrunde liegende MKS-Modell der LEILA-DG-Wagen sowie des Fahrwegs inklusive der im Modell hinterlegten Kennlinien und Massen der einzelnen Komponenten etc. ist in KEUDEL [2] umfassend dargelegt.

1.2 Koordinatensystem

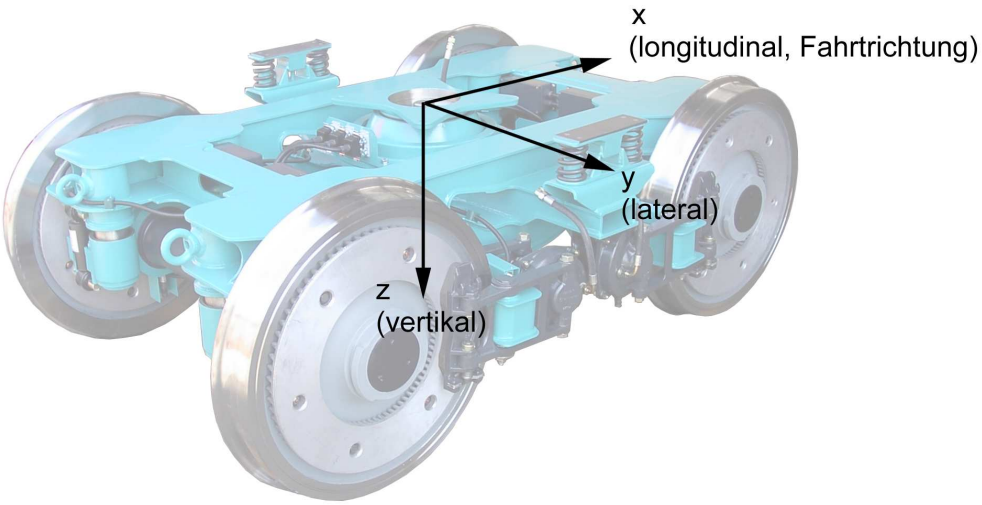


Abbildung 1.1: Allgemeines Koordinatensystem

Die Abbildung 1.1 zeigt das allgemeine Koordinatensystem (Referenzsystem) der vorliegenden Arbeit. Wie für Betrachtungen von Schienenfahrzeugen gebräuchlich, zeigt die X-Achse in Fahrtrichtung und die Y-Achse quer zur Fahrtrichtung nach rechts, so dass der Z-Achse im Rechtssystem die Ausrichtung nach vertikal unten verbleibt.

Kapitel 2

Methode und Modellierung

2.1 Methode der Stabilitätsuntersuchung

Während sich lineare oder linearisierte Modelle von Fahrzeugen hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens z.B. anhand von Wurzelortskurven wie in KURZECK [3] vergleichsweise schnell und übersichtlich beurteilen lassen, ist dies aufgrund von Nichtlinearitäten in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Diese Nichtlinearitäten bestehen - abgesehen vom Rad/Schiene-Kontakt - insbesondere in den Reib- und Anschlagelementen der Sekundäranbindung (Drehpfanne und seitliche Gleitstücke) aber auch in den lastabhängigen progressiven Kennlinien der Gummimetallelemente sowie der nichtlinearen Dämpfercharakteristik.

Eine explizite Berechnung von Grenzzykeln, wie sie durch MOELLE [4] in der Simulationssoftware *MEDYNA* implementiert ist, ermöglicht zwar die Berücksichtigung nichtlinearer Steifigkeiten. Da aber bei dieser Grenzzykelberechnung bislang keine Reibeffekte berücksichtigt werden können, Reibpaarungen aber die dominante Funktion auf die Ausdrehungvorgänge in der Sekundäranbindung haben, ist diese Methode in Hinblick auf die Stabilitätsuntersuchung von LEILA-DG nicht geeignet.

Eine übliche und vergleichsweise pragmatische Methode zur numerischen Ermittlung der kritischen Geschwindigkeit für allgemeine Fahrzeugmodelle ist die Beobachtung der in der Simulation auftretenden Radsatzquerverschiebungen bei hoher Fahrgeschwindigkeit

(z.B. POLACH [5]). Dazu existieren zwei Vorgehensweisen: Die eine Möglichkeit ist, die Simulation mit einer derart hohen Fahrgeschwindigkeit zu starten, bei der sich garantiert ein instabiles Laufverhalten einstellt. Während der anschließenden Geschwindigkeitsreduktion lässt sich die kritische Geschwindigkeit anhand des Abklingens der lateralen Radsatzschwingung detektieren. Die zweite Vorgehensweise ist eine diskrete Geschwindigkeitsvariation und je Rechenlauf eine deutliche Einzelanregung, die das Aufklingen von Schlingerbewegungen provoziert. Diejenige simulierte Fahrgeschwindigkeit, bei der die Radsätze infolge hinreichender Eigendämpfung des Systems noch abklingend zur quasistationären Ruhelage in die Gleismitte zurück finden, stellt dann den Wert der kritischen Geschwindigkeit dar.
In der vorliegenden Untersuchung startet das jeweilige Fahrzeug mit einer großen Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h. Nach dem Simulationsstart erfolgt unmittelbar eine einmalige laterale Anregung durch eine *„ruppig“* trassierte Gleisverziehung, die das Aufschwingen des Modells sicher stellt. Während der anschließenden Reduktion der Fahrgeschwindigkeit kann die verbleibende Querverschiebung als Beurteilungsgröße der Stabilität herangezogen werden.

2.2 Fahrzeug und Fahrweg

Das dieser Untersuchung zugrunde liegende Simulationsmodell von Fahrzeug und Fahrweg ist in KEUDEL [2] umfassend dokumentiert. In Bezug auf die Stabilitätsuntersuchung werden folgende Randbedingungen vorgesehen:

Die Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene haben einen wesentlichen Einfluss auf die kritische Geschwindigkeit. Um im Sinne einer Berechnung *„zur sicheren Seite“* die jeweils ungünstigen Bedingungen zu berücksichtigen, wird die minimal zulässige Spurweite von spw $=$ 1430 mm [6] angesetzt, was schon bei geringen Querverschiebungsamplituden eine große Konizität bewirkt (s. Abb. 2.1). Der Reibbeiwert zwischen Rad und Schiene wird zunächst auf $\mu_{\text{rs}} = 0.5$ für trockene Verhältnisse (DIN PREN 14363 [7]) gesetzt. Vor dem Hintergrund der Sättigung von Längs- und Querschlupf wird aber auch exemplarisch der Rad/Schiene-Reibbeiwert $\mu_{\text{rs}} = 0.2$ zugrunde gelegt.

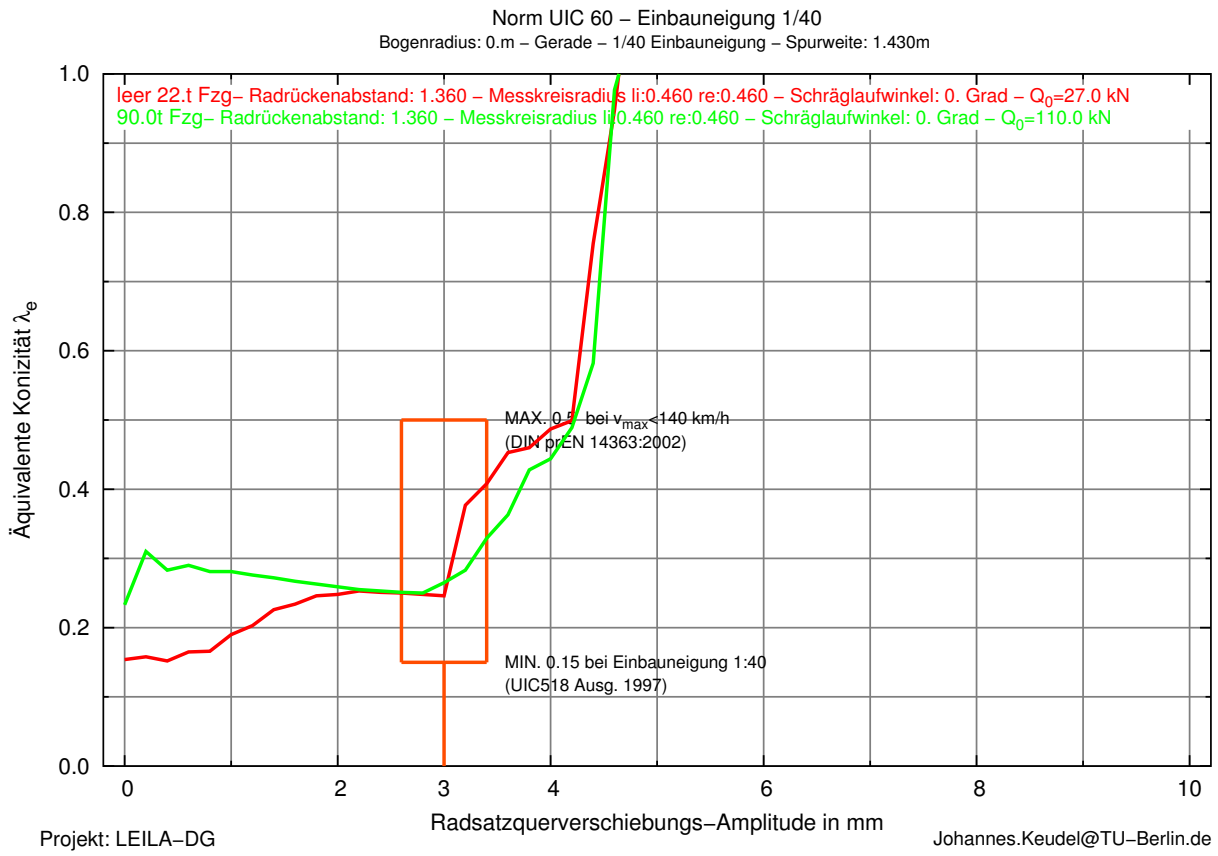


Abbildung 2.1: Äquivalente Konizität bei enger Spurweite von 1430 mm

Für die Gummisteifigkeiten werden die Nennwerte im Neuzustand bei Raumtemperatur angesetzt, so dass sich die versteifenden Einflüsse infolge Temperatur und Alterung demgegenüber stabilisierend auswirken.

Für die Reibwerte in der Sekundärfesselung werden seitens verschiedener Hersteller unter Laborbedingungen Reibbeiwerte um 0.2 angegeben [8, 9], während die Ergebnisse von Ausdrehversuchen realer Fahrzeuge zum Teil auf mehr als das Doppelte rückschließen lassen. Daher werden diese Werte entsprechend variiert.

In aller Regel ist das Leerfahrzeug bezüglich des stabilen Laufverhaltens als kritischer einzuschätzen. Daher liegt der Fokus jeweils auf dem Leerfahrzeug des Taschenwagens T4.1 wie auch des exemplarischen Kesselwagens. Trotzdem gilt es, auch das beladene Fahrzeug zu kontrollieren.

Das Modell entspricht insofern einem geschobenen Wagen, als dass keine ziehenden Zughakeneffekte in die Kopfträger des Fahrzeugaufbaus eingeleitet werden[1]. Während die Zughakenkräfte innerhalb des Zugverbands mutmaßlich eine stabilisierende Wirkung auf das Laufverhalten zeigen würden, liegt dieser Untersuchung dahingehend eine ungünstige Bedingung zugrunde.

[1] Die Fahrgeschwindigkeit wird dem Fahrzeugmodell durch eine Kopplung an das Referenzsystem aufgezwungen.

Kapitel 3

Simulationsergebnisse

Die Anforderung an die Fahrgeschwindigkeit ist mit 120 km/h für den leeren Wagen wie auch das 90t-Fahrzeug beziffert [10].
Die Berechnungen werden sowohl für den zum Erstbetrieb vorgesehenen Taschenwagen T4.1 der HUPAC SA als auch für den aufgrund seiner extremen Massen- und Geometrieeigenschaften exemplarisch berücksichtigten Kesselwagen durchgeführt [2].

Für den unbeladenen Kesselwagen im Nennzustand von Drehpfannenreibwert $\mu_{\mathrm{HK}} = 0.2$, Gleitstückreibwert $\mu_{\mathrm{GS}} = 0.2$, Gleitstücklängsspiel ± 1 mm sowie Gumminennsteifigkeit zeigt sich in den Simulationsergebnissen der schienenseitigen Berührlage in der Abbildung B.4 (Seite 20), dass das vorlaufende Drehgestell durch die trassierte Anregung bei hoher Fahrgeschwindigkeit zunächst eine Grenzzykelbewegung ausführt, während das nachlaufende Drehgestell mit sehr geringer Änderung der Berührlage nahezu in quasistationärer Ruhelage verbleibt. Mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit ändert sich die Amplitude der Radsatzquerverschiebungen im vorlaufenden Drehgestell in der Abbildung B.5 (Seite 21) erwartungsgemäß zunächst nur unwesentlich. Bei Unterschreiten von ca. 120 km/h erreicht das Simulationsmodell hinreichend Dämpfungsvermögen, so dass die Querverschiebungsamplituden der beiden vorlaufenden Radsätze nahezu sprunghaft zurückgehen. Wie die Verläufe der Druckkräfte in den Längsanschlägen der Gleitstücke in Abbildung B.6 (Seite 22) zeigen, verbleibt die Drehbewegung des nachlaufenden Drehgestells deutlich innerhalb der Anschlagmaße, während die Anschläge des vorlaufenden Drehgestells bei der Grenzzykelbewegung mit jeder Ausdrehwiederholung durch Kräfte

beaufschlagt werden. Dementsprechend findet sich in der Abbildung der Haftkräfte der Gleitstückreibflächen B.7 (Seite 23) wieder, dass die Reibpaarungen des nachlaufenden Drehgestells nahezu durchgehend im Haften verbleiben, während die Gleitstücke des vorlaufenden Drehgestells bei der Grenzzykelbewegung ganz überwiegend Gleiten.

Für diesen Fahrzeugzustand unter ungünstigen Randbedingungen und im geschobenen Fall wäre nach den Simulationsergebnissen ein stabiler Lauf also nur bis 120 km/h abzüglich entsprechender Sicherheit gewährleistet. Es ist aber offenkundig, dass nennenswert verbreitete Güterwagendrehgestelle wie das Y25 mit eben dieser Sekundäranbindung selber mit bis zu 120 km/h verkehren.

Abgesehen von der Vermutung dass sich das reale System gegenüber der numerischen Berechnung gutmütiger verhält, zeigen Messungen von Drehgestellausdrehwiderständen unabhängig vom Einlaufzustand gegenüber dem Nennwert von $\mu_{\mathrm{HK}} = \mu_{\mathrm{GS}} = 0.2$ zumeist größere Werte auf. Eine Anhebung der simulierten Reibbeiwerte auf $\mu_{\mathrm{HK}} = \mu_{\mathrm{GS}} = 0.3$ führt für den leeren Kesselwagen zu den im Anhang B.2.3 (ab Seite 28) dargestellten Verläufen: Sowohl für das vor- wie auch das nachlaufende Drehgestell verbleiben die schienenseitigen Berührlagen im Bereich des Schienenkopfes (Abb. B.12 (Seite 28)). Die Querverschiebung der Radsätze erreicht mit maximal 1 mm keine nennenswerte Amplitude (Abb. B.13 (Seite 29)). Bis auf den Bereich der Gleisverziehung zu Beginn der Simulation haften die Gleitstücke gegenüber dem Fahrzeugaufbau (Abb. B.15 (Seite 31)), die Längsanschläge der Gleitstücke kommen nicht in Eingriff (Abb. B.14 (Seite 30)).

Trotz gezielten Beibehaltens der konventionellen Anbindung von Fahrzeugaufbau und Drehgestell durch Drehpfanne und seitliche Gleitstücke aus vordringlich wirtschaftlichen Erwägungen heraus [11] zeigen diese Simulationsergebnisse für das LEILA-DG auch bei theoretischen 250 km/h noch eine hinreichende Laufstabilität.

Für den beladenen Kesselwagen ergibt sich bei Nennkonfiguration für vor- wie nachlaufendes Drehgestell mit Reduktion der Fahrgeschwindigkeit ein Abnehmen der Grenzzykelbewegung (s. Abb. B.20 (Seite 36) und B.21). Ab einer Reduktion auf ca. 140 km/h zeigen die Simulationsergebnisse genügend Eigendämpfung für einen stabilen Lauf, der sich ebenso in den Anschlagkräften der Gleitstücke (Abb. B.22 (Seite 38)) wie auch dem Übergang der Gleitstückreibung ins Haften (Abb. B.23 (Seite 39)) wiederfindet.

Die gegenüber dem Kesselwagen leichtere und elastischere Struktur des Taschenwagens T4.1 zeigt in der Simulation bei Nennkonfiguration ein sensibleres Laufverhalten. Während für den Nennzustand geringer Sekundärreibwerte neben dem vorlaufenden auch das nachlaufende Drehgestell Grenzzykelbewegungen ausführt (Abb. B.24 (Seite 41)), erreicht das Fahrzeug erst bei einer Reduktion auf ca. 110 km/h einen stabilen Lauf (Abb. B.25 (Seite 42)).

Wie schon beim Kesselwagen hat auch hier eine Anhebung der Reibbeiwerte von Drehpfanne und seitlichen Gleitstücken auf $\mu_{\mathrm{HK}} = \mu_{\mathrm{GS}} = 0.3$ in der Abb. B.33 (Seite 50) einen deutlichen Einfluss auf die kritische Geschwindigkeit in der Simulation: Dies bewirkt eine Steigerung auf ca. 120 km/h.

Eine Zunahme der Gummisteifigkeiten, wie sie z.B. infolge von Alterung zu erwarten ist, wirkt sich bei einer exemplarischen Versteifung um 20% und ansonsten unverändert im Nennzustand belassenen Werten in der Simulation ebenfalls in einer Steigerung der kritischen Geschwindigkeit auf ca. 120 km/h aus (s. Abb. B.45 (Seite 62)).

Wie z.B. EVANS U. ROGERS [12] wie auch MÜLLER U. GEBHARD [13] festgestellt haben, hat das Längsspiel der seitlichen Gleitstücke einen erheblichen Einfluss auf die Laufstabilität. Die ursprüngliche Funktion des Längsspiels ist es, ein Festrosten des Gleitstücks während längerer Standphasen zu verhindern. Innerhalb des Längsspiels wirken der Ausdrehbewegung des Drehgestells nur die Reibeffekte der Drehpfanne entgegen, während die Gleitstückreibung erst ab dem Erschöpfen des Längsspiels einsetzt. Somit erfährt zumindest der Beginn einer Gierbewegung vergleichsweise wenig Rückstellmoment - die Gierbewegung kann innerhalb des Gleitstück-Längsspiels *„Schwung holen“*. Hinzu kommt bei LEILA-DG der Einfluss der Sekundärfeder, deren Giersteifigkeit eine gewisse Ausdrehung zwischen Drehgestell und Fahrzeugaufbau erlaubt, bevor die Drehpfanne aus dem Haften in die Gleitreibung übergeht.

So zeigen die Simulationsergebnisse mit längsstarren Gleitstücken bereits für den Nennzustand bei geringen Reibbeiwerten von $\mu_{\mathrm{HK}} = \mu_{\mathrm{GS}} = 0.2$ für den Taschenwagen wie auch den Kesselwagen bereits für die theoretische Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h ein sehr stabiles Laufverhalten (s. Abb. B.29 (Seite 46) und B.9 (Seite 25)).

Ein exemplarischer Simulationslauf bei Nennspurweite von 1435 mm respektive entsprechend geringerer Konizität, Reibbeiwert zwischen Rad und Schiene von $\mu_{rs} = 0.2$, längsstarren Gleitstücken sowie Reibbeiwerten von Drehpfanne und Gleitstücken von $\mu_{HK} = 0.3$ und $\mu_{GS} = 0.3$ ergibt im untersuchten Geschwindigkeitsbereich ebenfalls ein stabiles Laufverhalten. (s. Abb. B.49 (Seite 66)).

Sofern das reale System sich also gegenüber der numerischen Simulation nicht gutmütiger verhalten sollte, und trotz der simulationstechnischen Berücksichtung einer selten auftretenden Überlagerung ungünstiger Randbedingungen die Konstruktion der Sekundäranbindung zu einer weiteren Stabilisierung konstruktiv geändert werden muss, stellt die Unterbindung des Längsspiels eine effektive Methode bei geringem Änderungsaufwand dar.

Bereits bei MÜLLER [14, 13] finden sich Beispiele für eine spielfreie Anlenkung der seitlichen Gleitstücke, wie sie heute beispielsweise bei Laufwerken der Rollenden Landstraße (RoLa) üblich sind (s. Abbildung 3.1).

Abbildung 3.1: Gleitstück ohne Längsspiel am Beispiel eines RoLa-Fahrwerks

Kapitel 4

Zusammenfassung und Fazit

Ausgehend von der Fragestellung nach der Laufstabilität von mit LEILA-DG ausgerüsteten Fahrzeugen, lassen sich folgende Erkenntnisse aus der vorliegenden numerischen Simulation zusammenfassen:
Die Untersuchung wurde exemplarisch für zwei Fahrzeuge durchgeführt: einerseits für den im Rahmen des Erstbetriebs vorgesehenen Taschenwagen T 4.1 der HUPAC SA sowie andererseits für einen aufgrund seiner extremen Massen- und Geometrieeigenschaften exemplarisch berücksichtigten Kesselwagen mit großem Drehzapfenabstand, hohem Schwerpunkt und äußerst starrer Struktur. Sowohl die Eigenschaften der Fahrzeugaufbauten als auch des LEILA-DG sind in KEUDEL [2] umfassend beschrieben.

Um die volle Migrationsfähigkeit zu bieten, hält das LEILA-DG-Konzept ganz gezielt an der herkömmlichen Sekundäranbindung von Drehpfanne und seitlichen Gleitstücken fest. Während die neu entwickelte Primärfederstufe inklusive Kreuzanker auch für deutlich höhere Fahrgeschwindigkeiten geeignet erscheint, liegt der Fokus dieser Stabilitätsuntersuchung auf der konventionellen Sekundärfesselung. Dabei existieren für die relevanten Reibwerte von Drehpfanne und Gleitstücken je nach Quelle (normgerechte Laborbedingungen, reale Ausdrehversuche) unterschiedliche Eingangswerte.

Eine Überlagerung von ungünstigen Randbedingungen in Form enger Spurweite respektive hoher äquivalenter Konizität, geringer Gummisteifigkeiten und niedriger Reibbeiwerte in Drehpfanne sowie seitlichen Gleitstücken zeigt in der numerischen Simulation für den

unbeladenen Taschenwagen T4.1 ein mögliches Erreichen der kritischen Geschwindigkeit im Bereich von 110 bis 120 km/h. Jede Entschärfung der überlagerten ungünstigen Bedingungen bringt in der Simulation eine entsprechende Anhebung der kritischen Geschwindigkeit.
Übereinstimmend mit entsprechenden Untersuchungen [12, 13] erweist sich das Längsspiel der Gleitstücke als dominierender Einfluss. Für längsstarre Gleitstücke tritt in der Simulation im untersuchten Bereich bis 250 km/h kein instabiler Lauf auf.

Für den beladenen Wagens zeigen die Simulationsergebnisse gegenüber der Anforderung von 120 km/h ein unkritisches Laufverhalten auf.

Als Fazit dieser Untersuchung lässt sich somit formulieren, dass die kritische Geschwindigkeit in der Simulation für den unbeladenen Taschenwagen bei Überlagerung ungünstiger Bedingungen in der Größenordnung der Anforderung von 120 km/h liegt. Sofern sich das Fahrzeug in den Messfahrten gegenüber der Simulation nicht z.B. aufgrund realer Reibwerte als gutmütiger und die Stabilität als nicht ausreichend herausstellen sollte, empfiehlt sich der Einsatz längsstarrer Gleitstücke als eine Lösung mit sehr geringem konstruktiven Aufwand. Eine Anhebung der Gummisteifigkeiten in der Primärfesselung zur Steigerung der Laufstabilität wäre in Bezug auf die Entgleisungssicherheit [15] unter Berücksichtigung ihrer potenziellen Verdopplung infolge Alterung und Temperatur entsprechend sorgfältig zu prüfen.

Berlin, den

Prof. Dr.-Ing. M. Hecht Dipl.-Ing. J. Keudel

Literaturverzeichnis

[1] DEUTSCHE BAHN AG: *Richtlinie DB AG 984 03: Güterwagen und Container instandhalten - Drehgestelle*. Geschäftsbereich Werke, TRF-Geschäftsstelle, Werkstättenstr. 8, 04439 Engelsdorf, Januar 1995.

[2] HECHT, M. und J. KEUDEL: *LEILA-DG - Dokumentation zum MKS-Modell (inkl. Kesselwagen + Hupac Taschenwagen T.4) - Komponenten, Kennlinien + Massenbilanz - Statische Kräfte und Einsenkungen*. Technischer Bericht 30/2004, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, Juni 2005.

[3] KURZECK, B.: *Analyse des lateralen Schwingungsverhaltens eines Nahverkehrs-Triebfahrzeugs unter Komfortgesichtspunkten*. ZEVrail Glasers Annalen, 127(8):358–368, September 2003.

[4] MOELLE, D.: *Digitale Grenzzykelrechnung zur Untersuchung der Stabilität von Eisenbahndrehgestellen unter dem Einflusß von Nichtlinearitäten*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, Mai 1989.

[5] POLACH, OLDRICH und ADRIAN VETTER: *Methods for Running Stability Prediction and their Sensitivity to Wheel/Rail Contact Geometry*. In: *Extended Abstracts - 6th International Conference on Railway Bogies and Running Gears - Budapest, 13-16 September 2004*, Seiten 62–64. Budapest University of Technology and Economics, István Zobory, September 2004.

[6] PÄTZOLD, F., K. WITTENBERG, H.-P. HEINRICHS und W. MITTMANN: *Kommentar zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. Hestra Verlag, Postfach 10 07 51, D-64207 Darmstadt, 4 Auflage, 2001. ISBN 3-7771-0295-4.

[7] NORMENAUSSCHUSS SCHIENENFAHRZEUGE: *DIN prEN 14363:2002 - Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Schienenfahrzeugen*. Deutsches Institut für Normung, November 2002.

[8] FAIGLE INDUSTRIEPLAST GMBH: *Werkstoffübersicht*. Prospekt, A-6971 Hard, Juni 2001.

[9] DEUTSCHE BAHN AG, TZF35: *Liste der Produkte / Hersteller mit besonderer Zulassung für Güterwagen-Fahrwerke*. Deutsche Bahn DG - Forschungs- und Technologie-Zentrum, Weserglacis 2, D-32423 Minden, erhalten: 2003.

[10] DANZER, P., C. GROSSE, S. HEIDMEIER, T. SCHULIN, M. BÖHM und J. HERMA: *Anforderungskatalog LeiLa-DG*. Abschlussbericht, 23.11., November 2000.

[11] SELIGER, GÜNTHER, JÜRGEN SIEGMANN, MARKUS HECHT, ULRICH KROSS, PETER DANZER und JOHANNES KEUDEL: *Wettbewerbsvorsprung dank Leila*. Güterbahnen, 2:18–26, 2003.

[12] EVANS, J.R. und P.J. ROGERS: *Validation of Dynamic Simulations of Rail Vehicles with Friction Damped Y25 Bogies*. In: *Proceedings of the 15th IAVSD Symposium - The Dynamics of Vehicles on Road and on Tracks*, Band 29, Seiten 219–233. Vehicle System Dynamics, Palkovics, László, 1998.

[13] MÜLLER, L. und H. GEBHARD: *Laufwerke für hohe Geschwindigkeiten bei Güterwagen*. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 39(11):661–666, November 1990.

[14] MÜLLER, L.: *Konzepte für Güterwagenlaufwerke für Geschwindigkeiten über 120 km/h*. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 37(12):799–802, Dezember 1988.

[15] HECHT, M. und J. KEUDEL: *LEILA-DG - Numerischer Nachweis der Entgleisungssicherheit*. Technischer Bericht 12/2004, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, Juni 2005.

Anhang B

Grafische Darstellung der Simulationsrechnungen

B.1 Erläuterung zur grafischen Darstellung

Um die grafische Darstellung der Daten möglichst übersichtlich zu gestalten, wird das in der Abbildung B.1 wiedergegebene Piktogramm eingeführt.

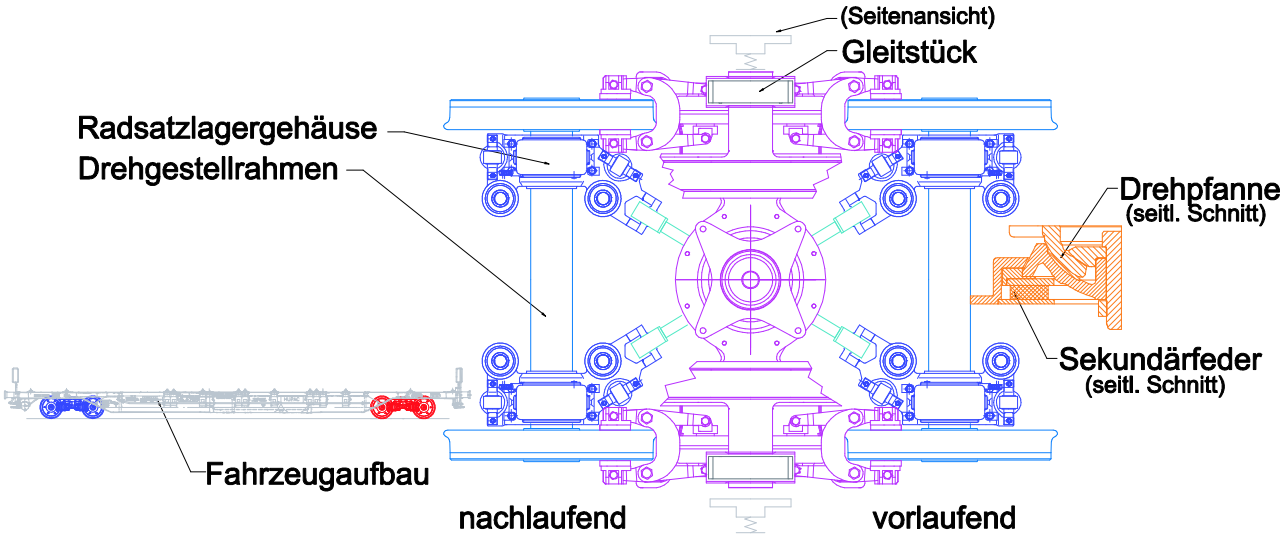


Abbildung B.1: Piktogramm des Drehgestells sowie des Fahrzeugaufbaus

Hier sind die relevanten Komponenten (Modell-Körper) schematisch gezeigt. Durch Punkte und Pfeile im Piktogramm werden bei der grafischen Darstellung diejenigen Stellen

markiert, auf die sich die dargestellten Verläufe beziehen. Zudem wird der Drehgestellrahmen bei der Darstellung von Simulationsergebnissen des vorlaufenden Drehgestells rot und bei denen des nachlaufenden Drehgestells blau eingefärbt.

Wird in *MEDYNA* im Zeitbereich eine Bogeneinfahrt berechnet, so ist dies standardmäßig ein Rechtsbogen. Die zugehörigen Betriebsverhältnisse wie Überhöhung und freie Seitenbeschleunigung werden ebenfalls im Piktogramm angeschrieben.

Weiterhin ist für die Auswertung wichtig, zu wissen, in welcher Richtung auf welchen Modell-Körper die dargestellten Größen wirken.

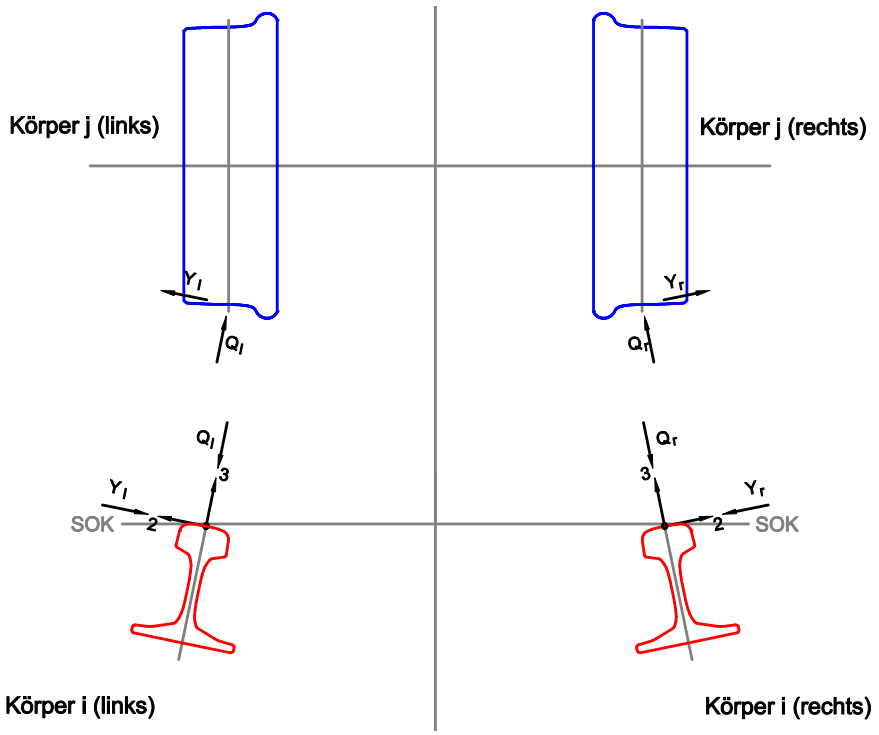


Abbildung B.2: Ausrichtung von Q- und Y-Kraft

Bei der Betrachtung der Werte des Rad/Schiene-Kontakts ist folgendes zu beachten:

- **Q-Kraft**

  Die Abbildung B.2 zeigt die für die Ausgabe der Zeitschrittintegration allgemeingültige Ausrichtung der Q-Kraft in Richtung $\vec{\varepsilon}_3^{ia}$ des Koppelelementes KE21. Im Rahmen dieser Arbeit werden Schienenprofildaten verwendet, die bereits eine Einbaunei-

gung enthalten. Die 2-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\vec{\underline{\varepsilon}}^{ia}$ liegt hier in der Schienenoberkante. Im Rahmen dieser Arbeit wirkt eine Q-Kraft daher immer senkrecht zur Schienenoberkante.

Die Q-Kraft wird mit dem Vorzeichensinn einer Druckkraft so ausgegeben, wie sie in $\vec{\varepsilon}_3^{ia}$ auf das Rad wirkt.

- **Y-Kraft**

  Analog zur Q-Kraft gilt für die Y-Kraft: Die Y-Kraft wird mit Vorzeichenorientierung der 2-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\vec{\underline{\varepsilon}}^{ia}$ auf das Rad wirkend ausgegeben. Die 2-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\vec{\underline{\varepsilon}}^{ia}$ liegt im Rahmen dieser Arbeit in der Schienenoberkante und zeigt rechts und links jeweils nach gleisaußen (siehe Abbildung B.2).

- **Verschiebungen und Verdrehungen der einzelnen Körper**

  Verschiebungen und Verdrehungen sind jeweils im körperfesten Koordinatensystem E^i ausgegeben.

  In Nominallage stimmt die Ausrichtung der körperfesten Koordinatensysteme für fast alle der verwendeten Körper mit der des Referenzsystems überein. Die Ausrichtung des Referenzsystems ist in den (meisten) Grafiken zur Orientierung eingezeichnet.

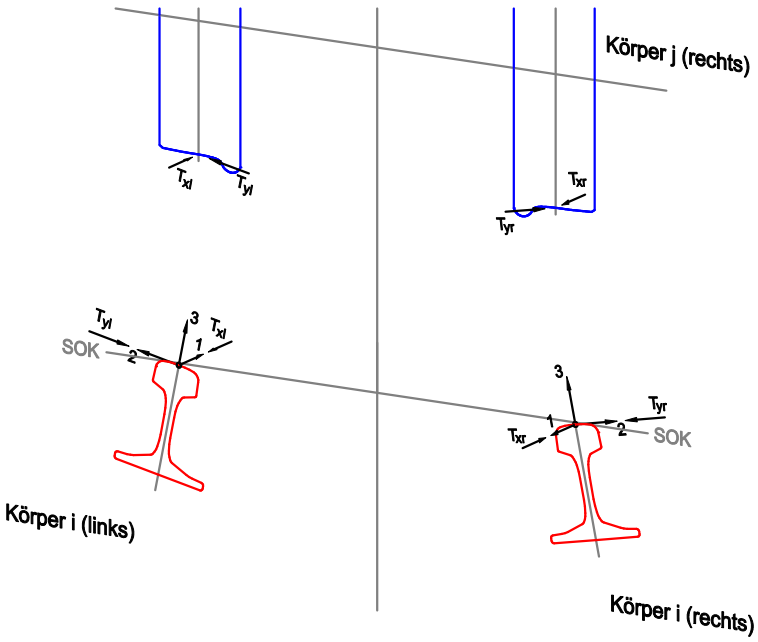


Abbildung B.3: Ausrichtung der Schlupfkräfte

- **Längsschlupfkräfte**

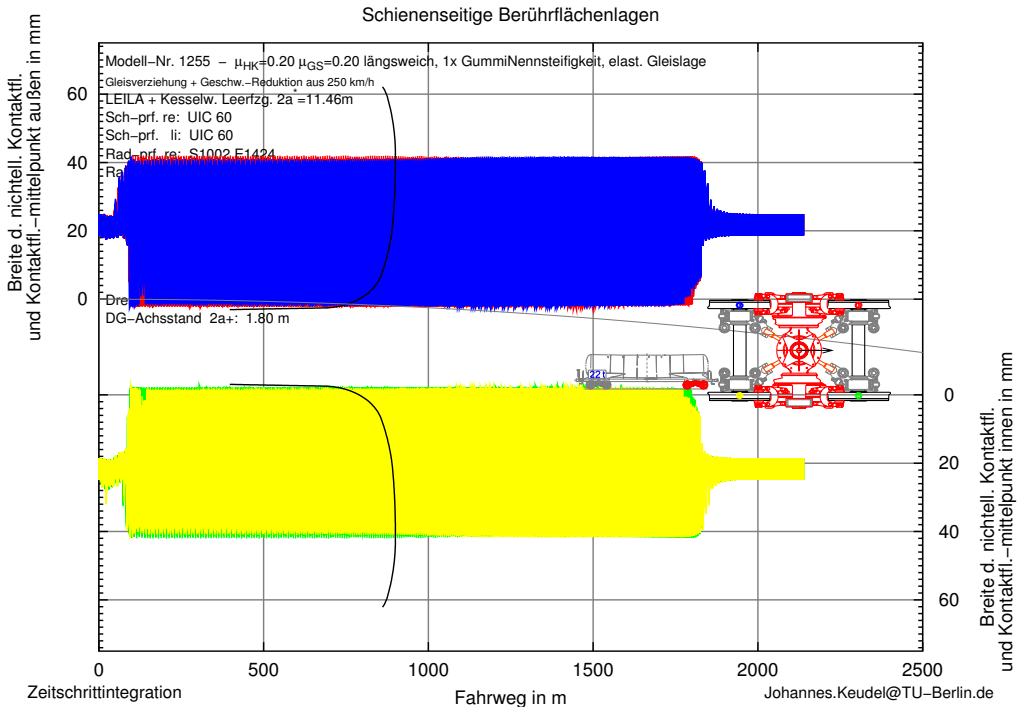
  Die Längsschlupfkräfte werden mit Vorzeichenorientierung der 1-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\underline{\vec{\varepsilon}}^{ia}$ auf das Rad wirkend ausgegeben. Die 1-Achse zeigt am linken Rad in Fahrtrichtung, am rechten Rad entgegen der Fahrtrichtung .

- **Querschlupfkräfte**

  Die Querschlupfkräfte werden mit Vorzeichenorientierung der 2-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\underline{\vec{\varepsilon}}^{ia}$ auf das Rad wirkend ausgegeben. Die 2-Achse der Koppelelementhilfsbasis $\underline{\vec{\varepsilon}}^{ia}$ liegt im Rahmen dieser Arbeit in der Schienenoberkante und zeigt rechts und links jeweils nach gleisaußen (siehe Abbildung B.3).

B.2 Ergebnisse Kesselwagen

B.2.1 Kesselwagen 22t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5



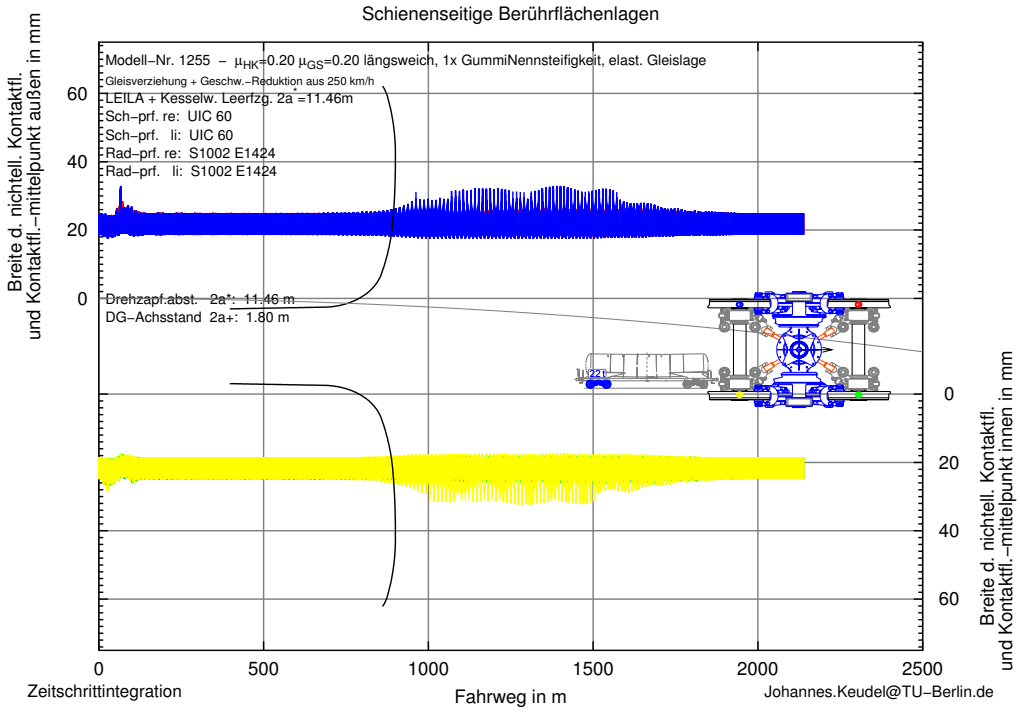
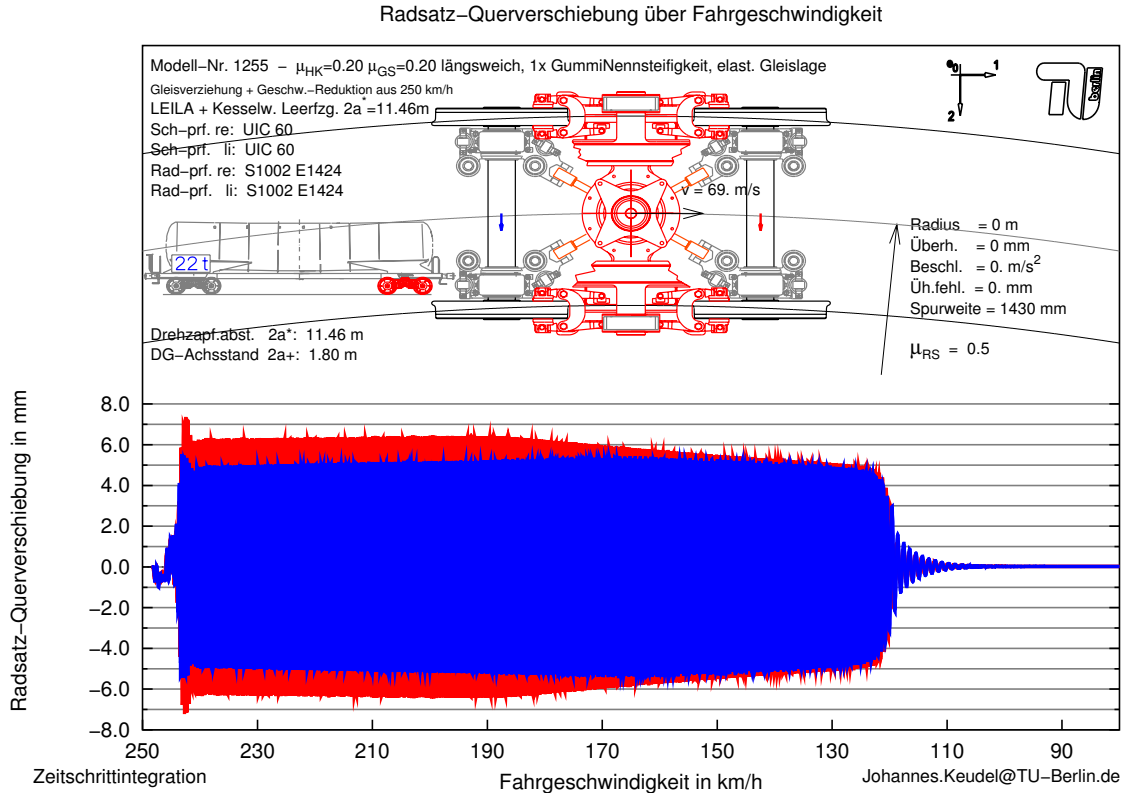


Abbildung B.4: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



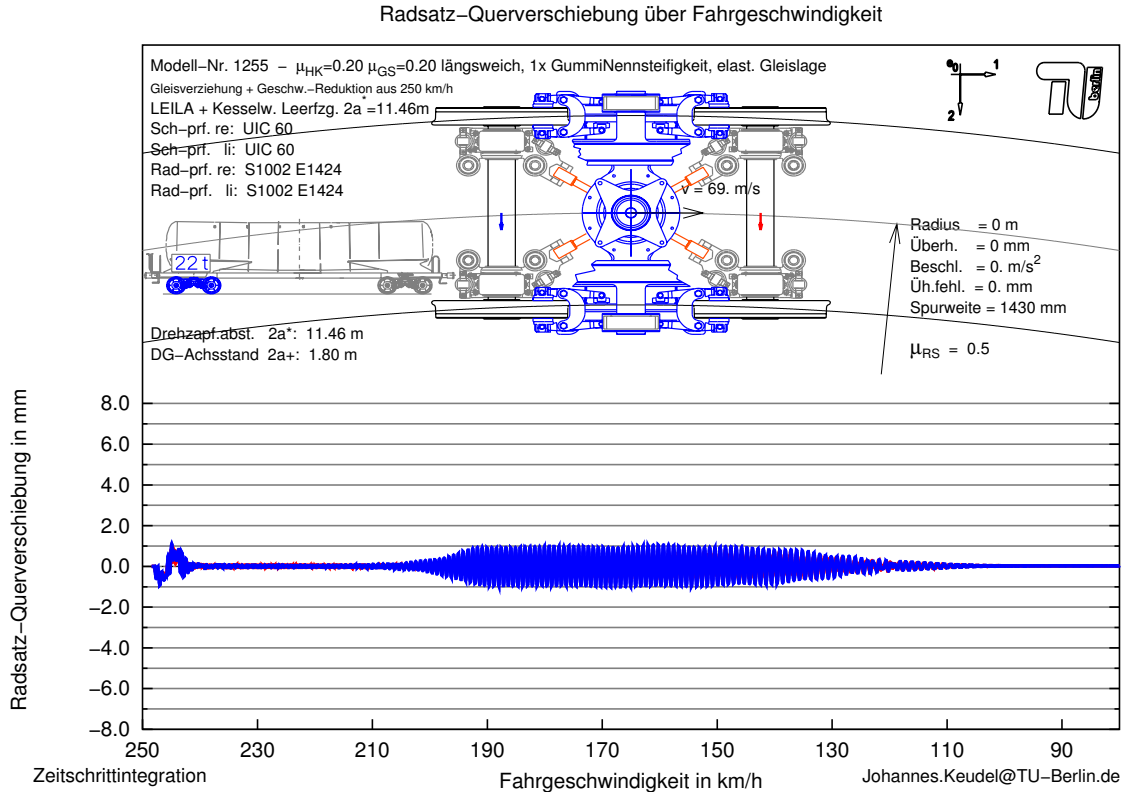
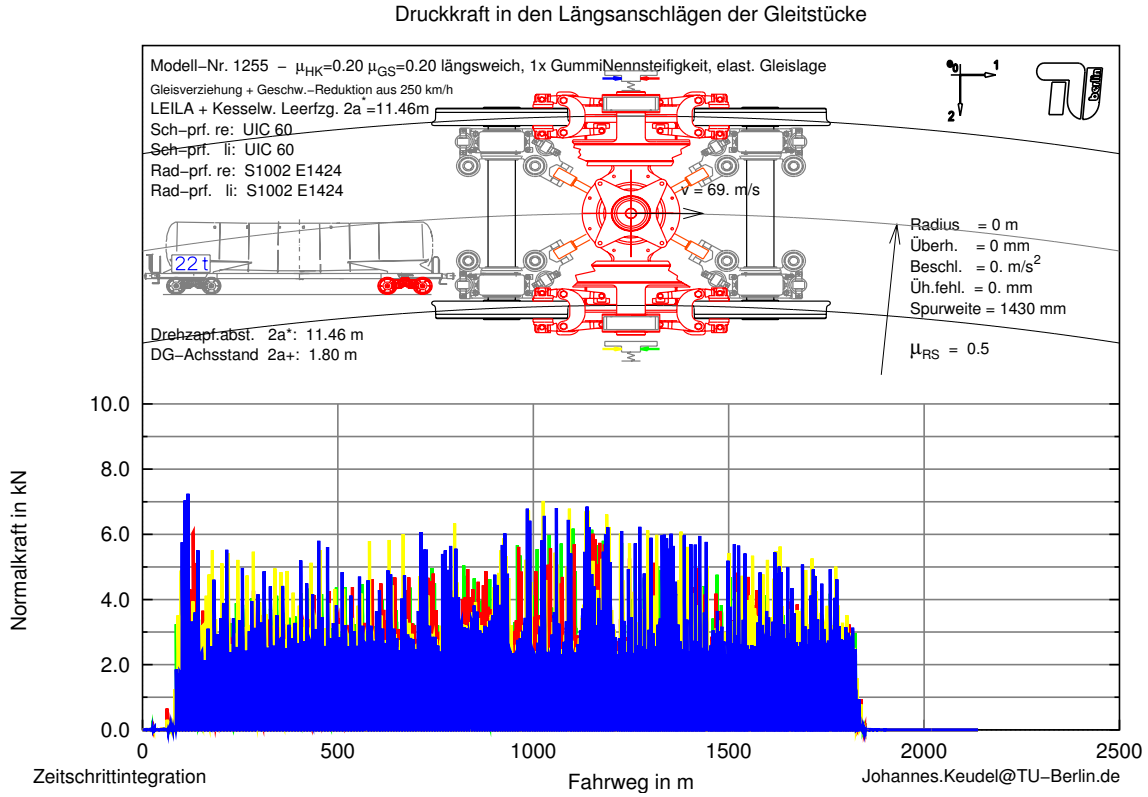


Abbildung B.5: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



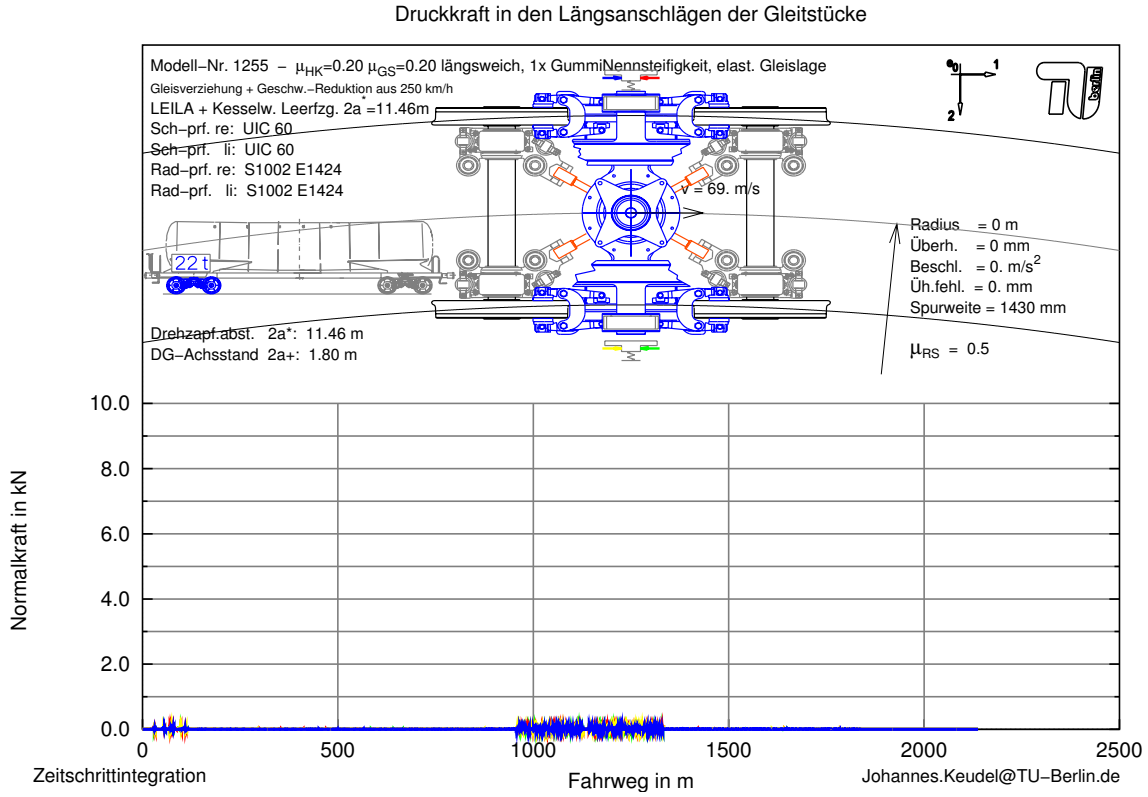
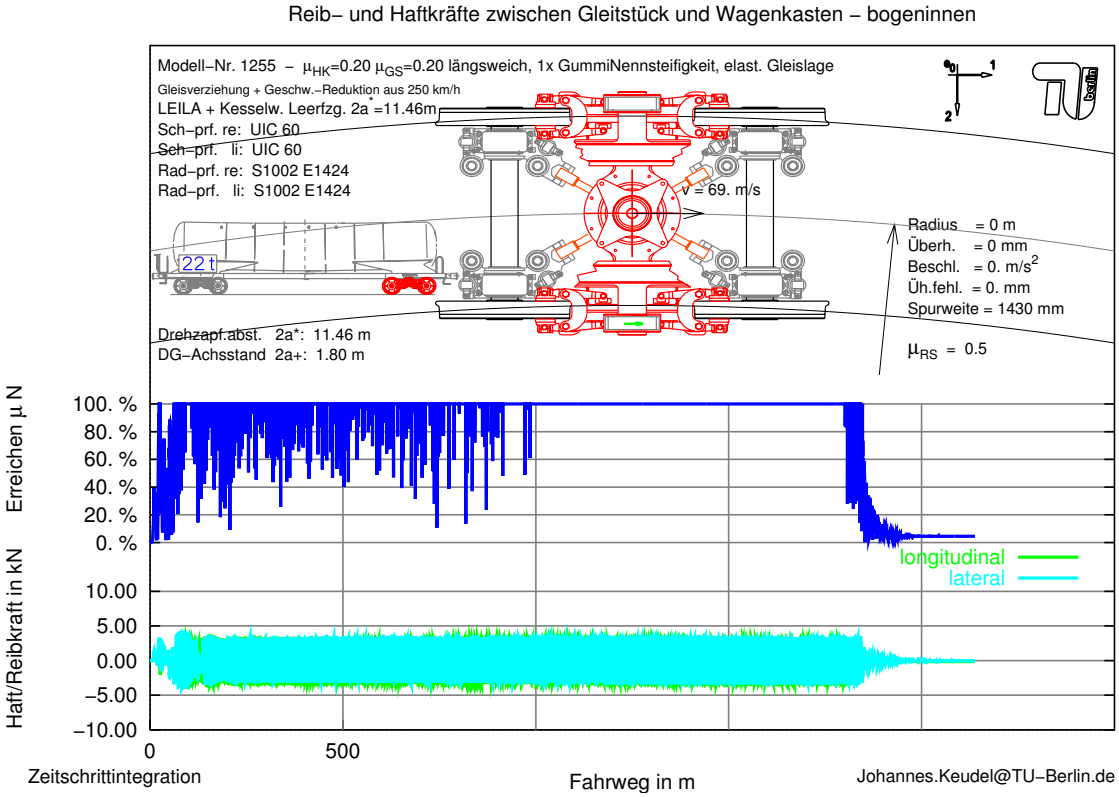


Abbildung B.6: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



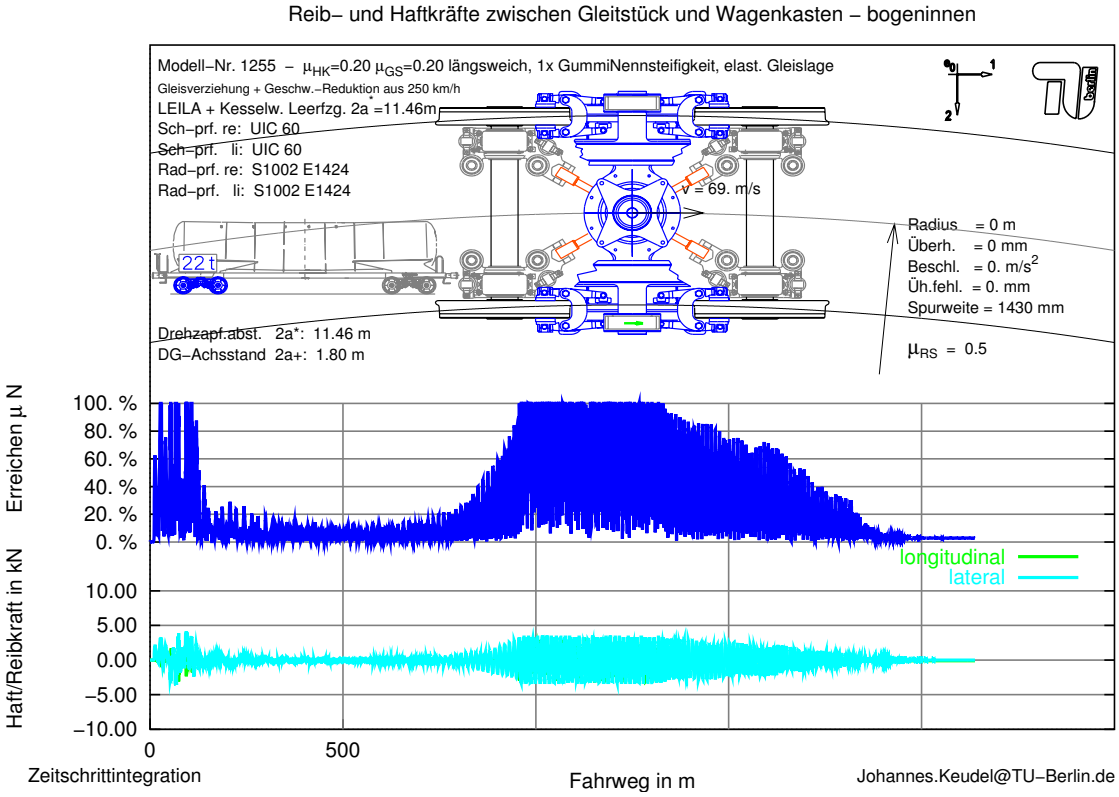


Abbildung B.7: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.2.2 Kesselwagen 22t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

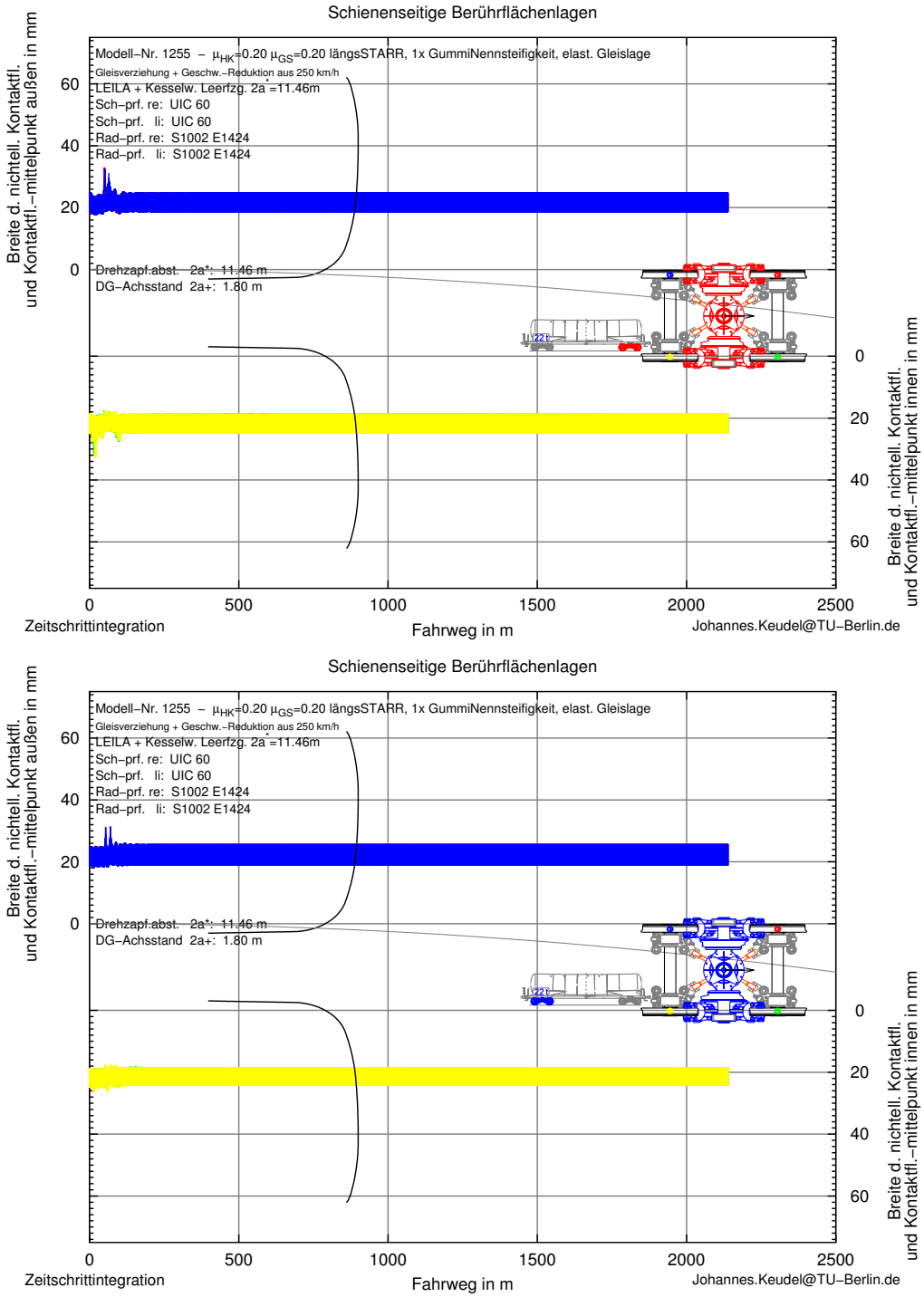
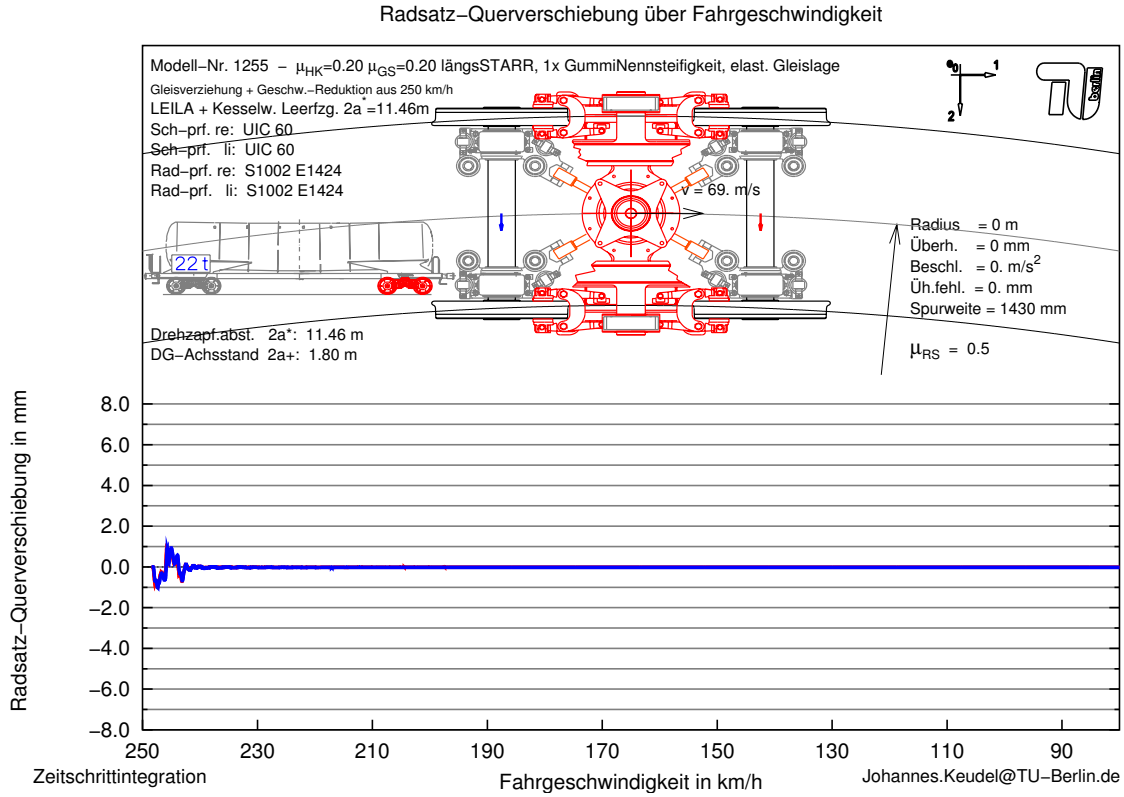


Abbildung B.8: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



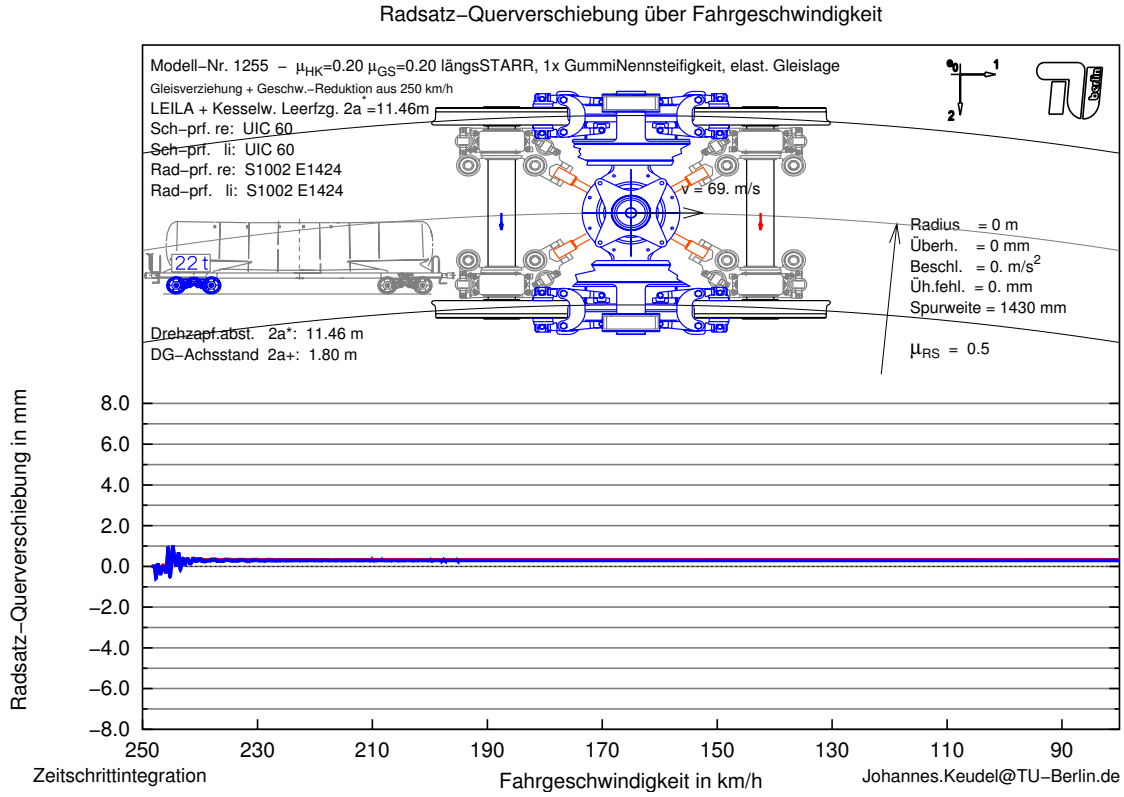
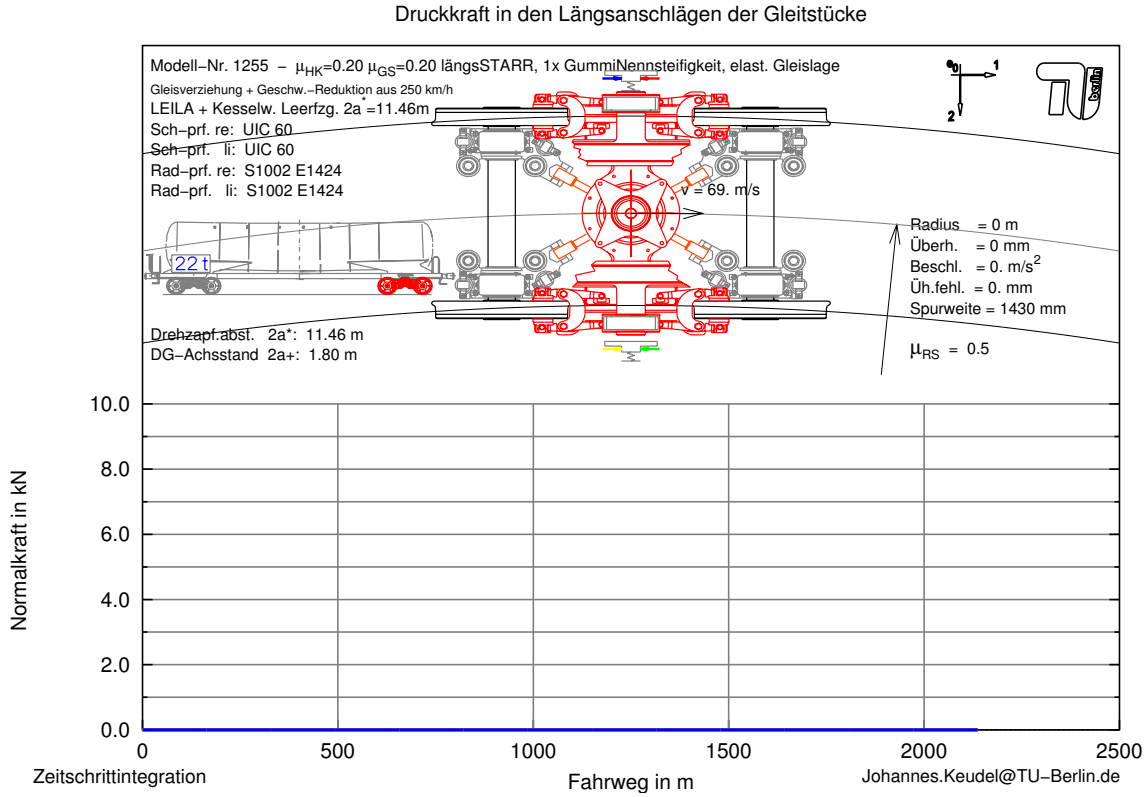


Abbildung B.9: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



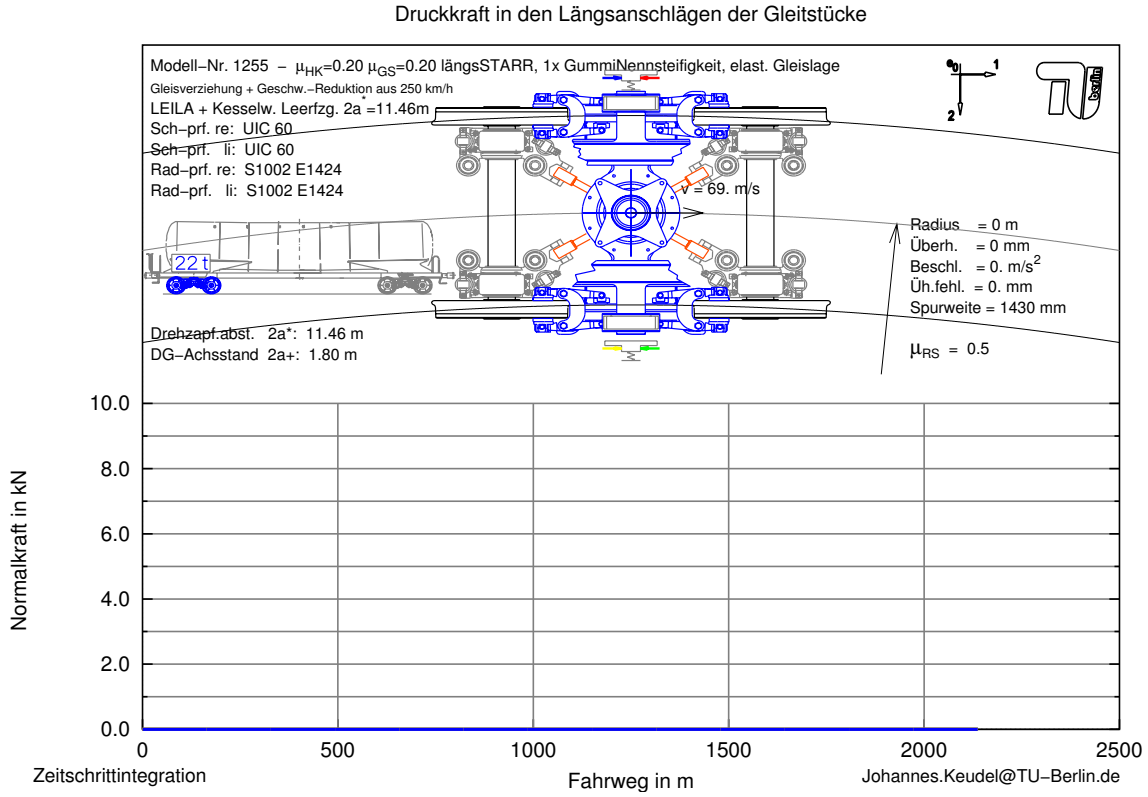
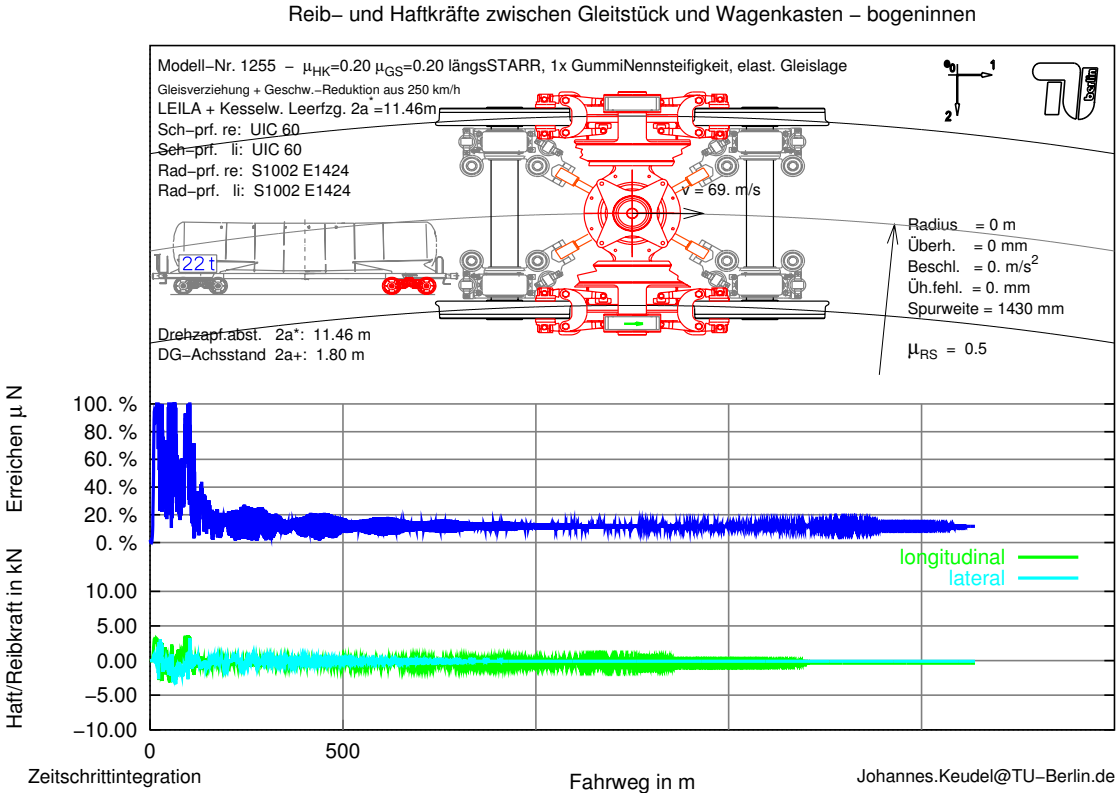


Abbildung B.10: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



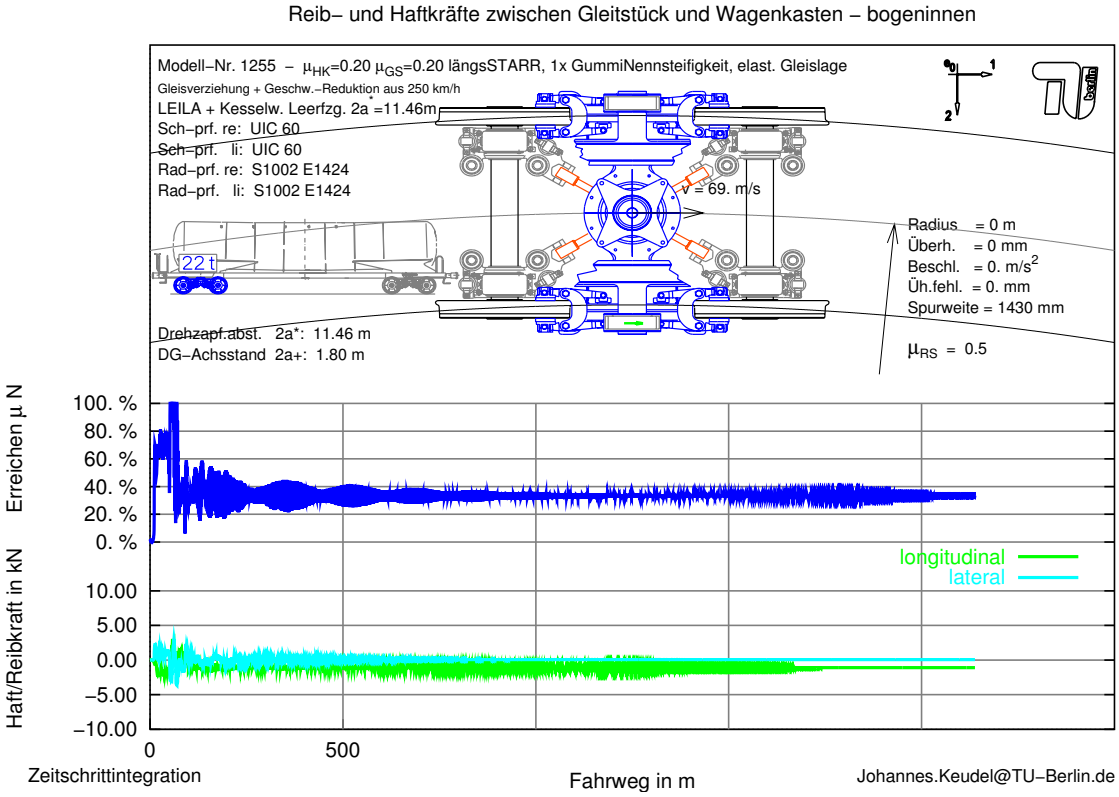
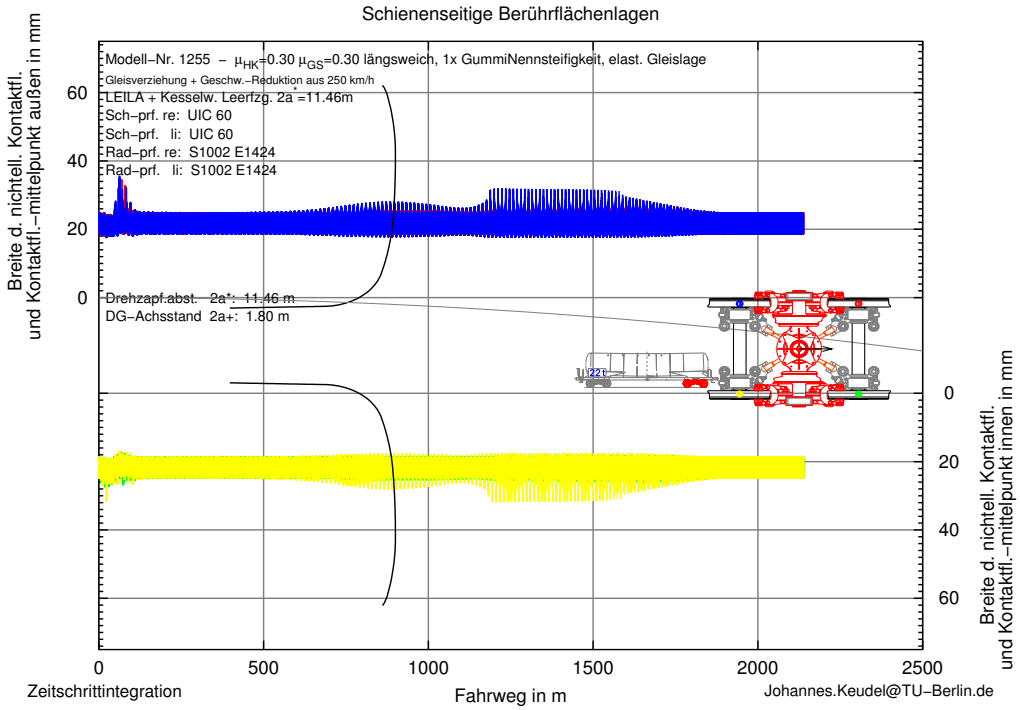


Abbildung B.11: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.2.3 Kesselwagen 22t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5



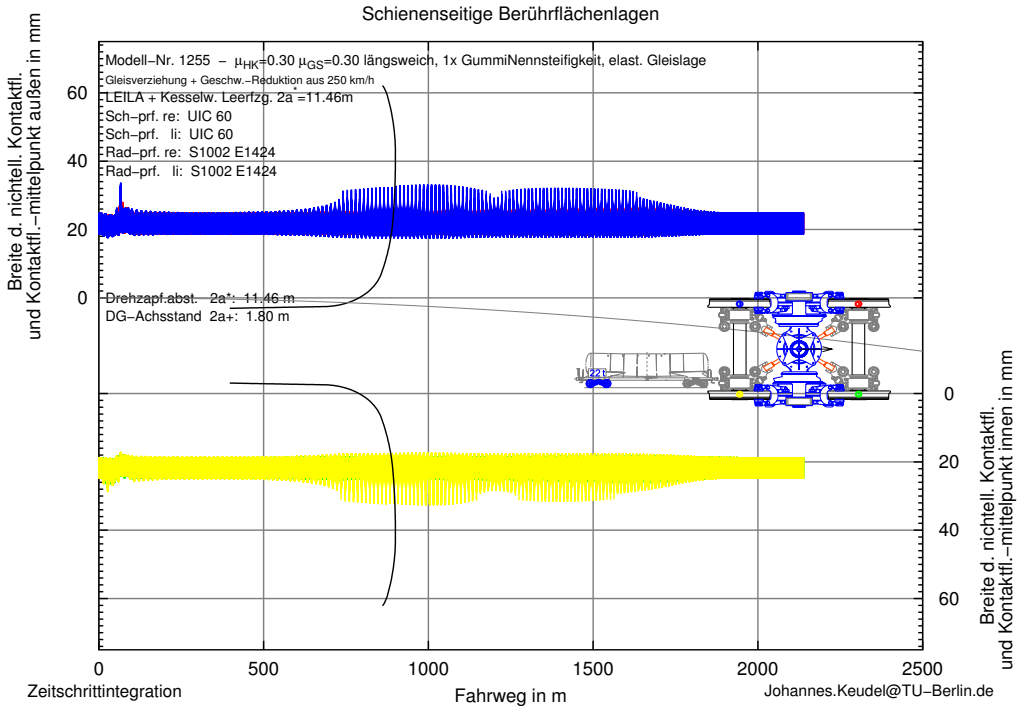
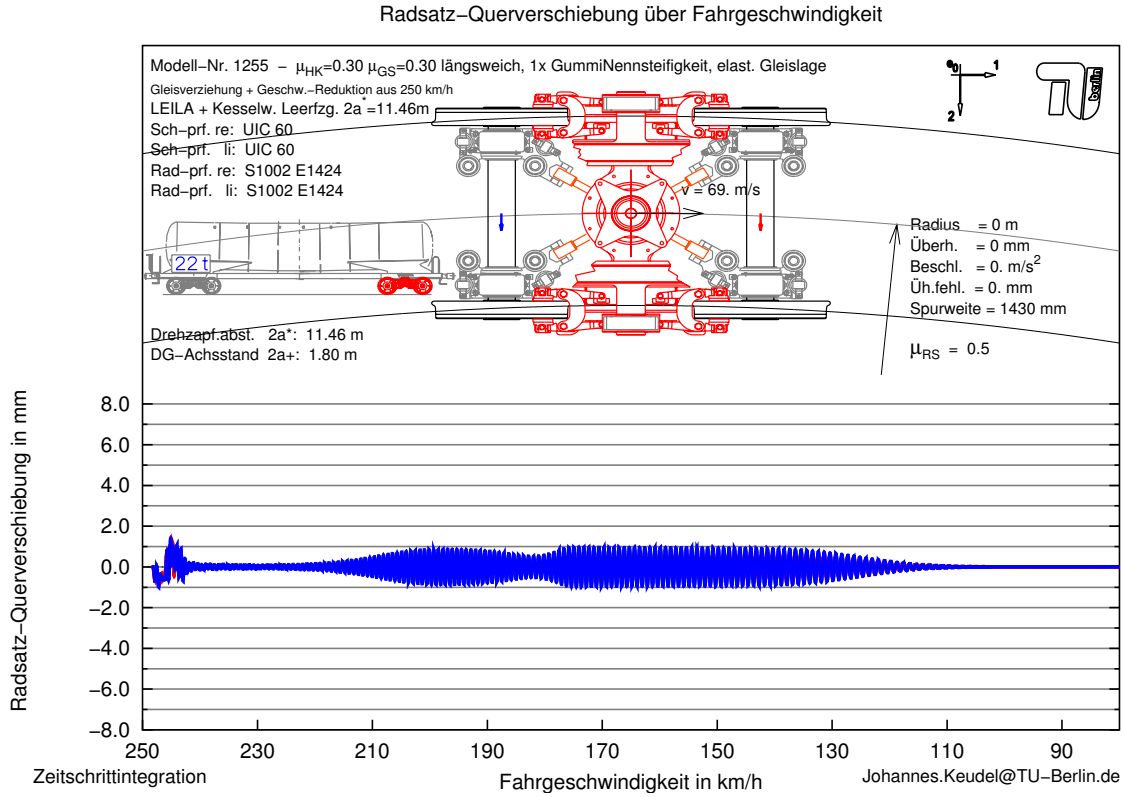


Abbildung B.12: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



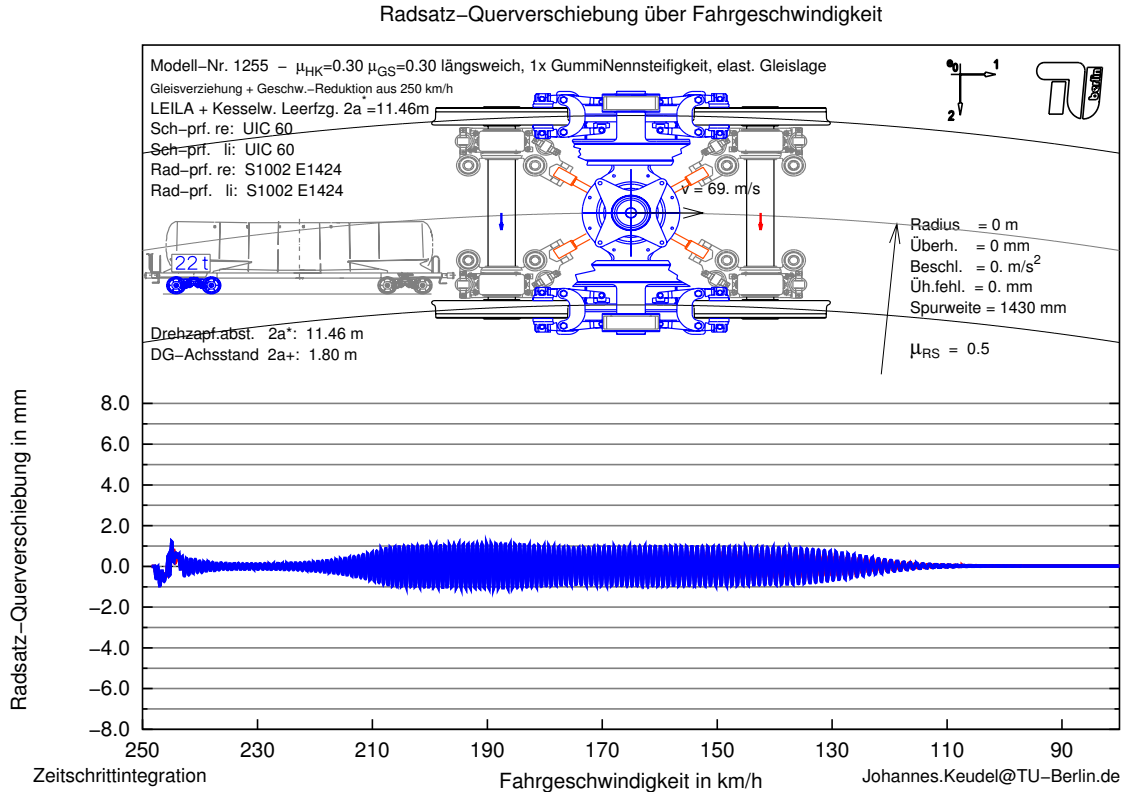
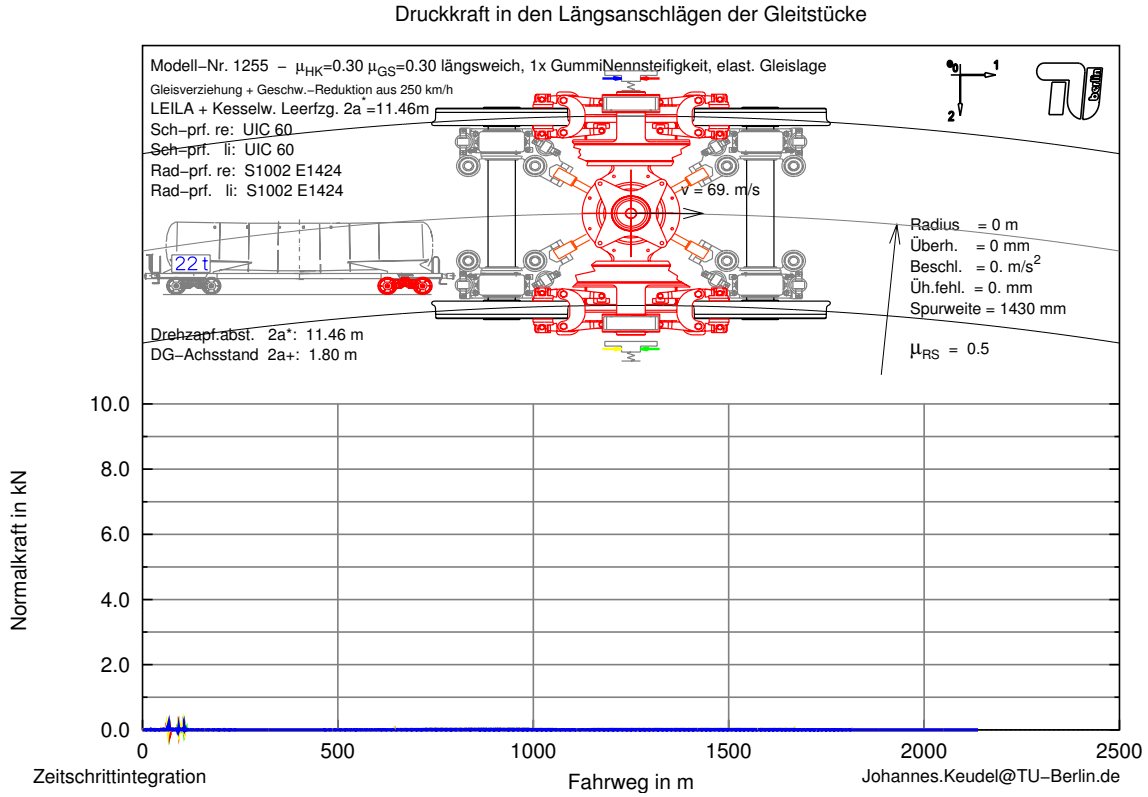


Abbildung B.13: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



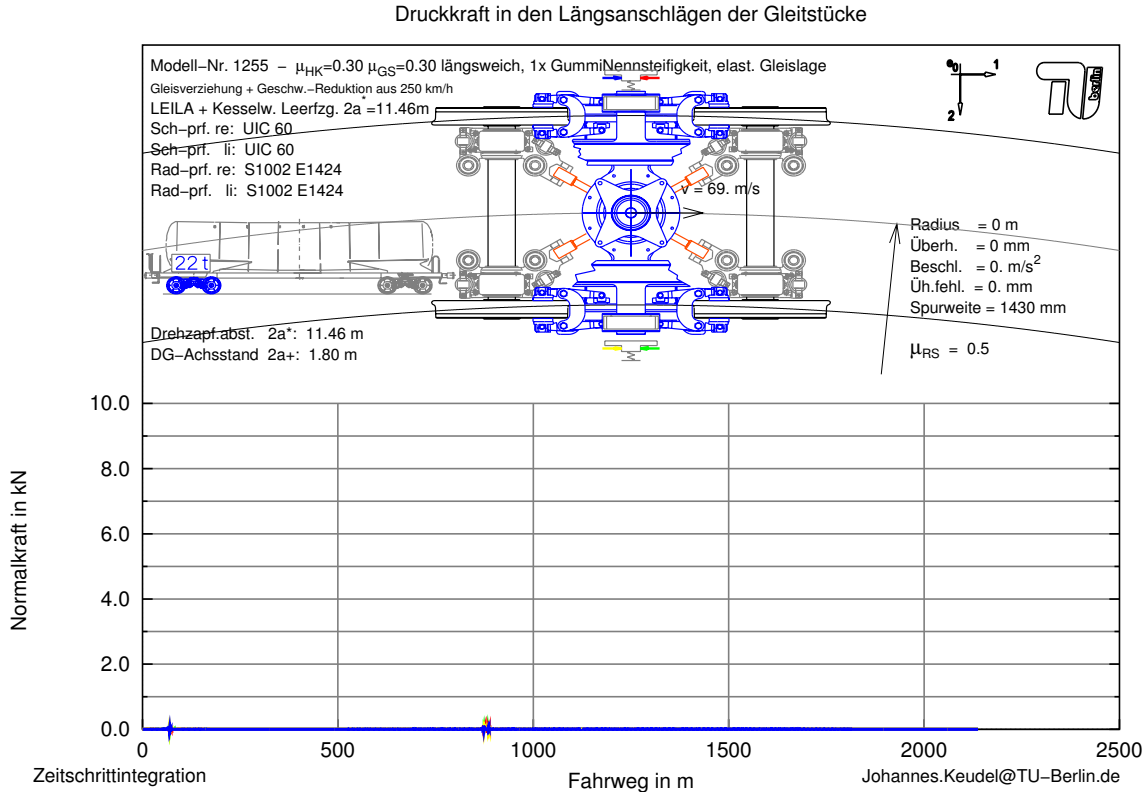
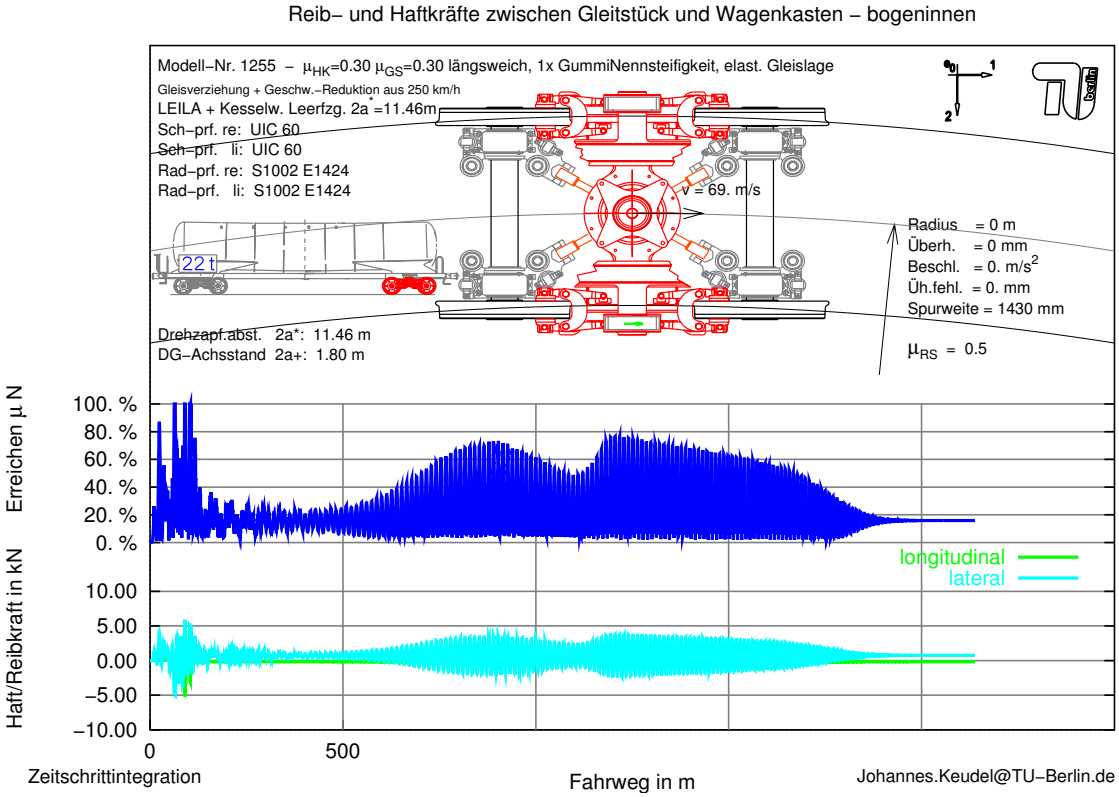


Abbildung B.14: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



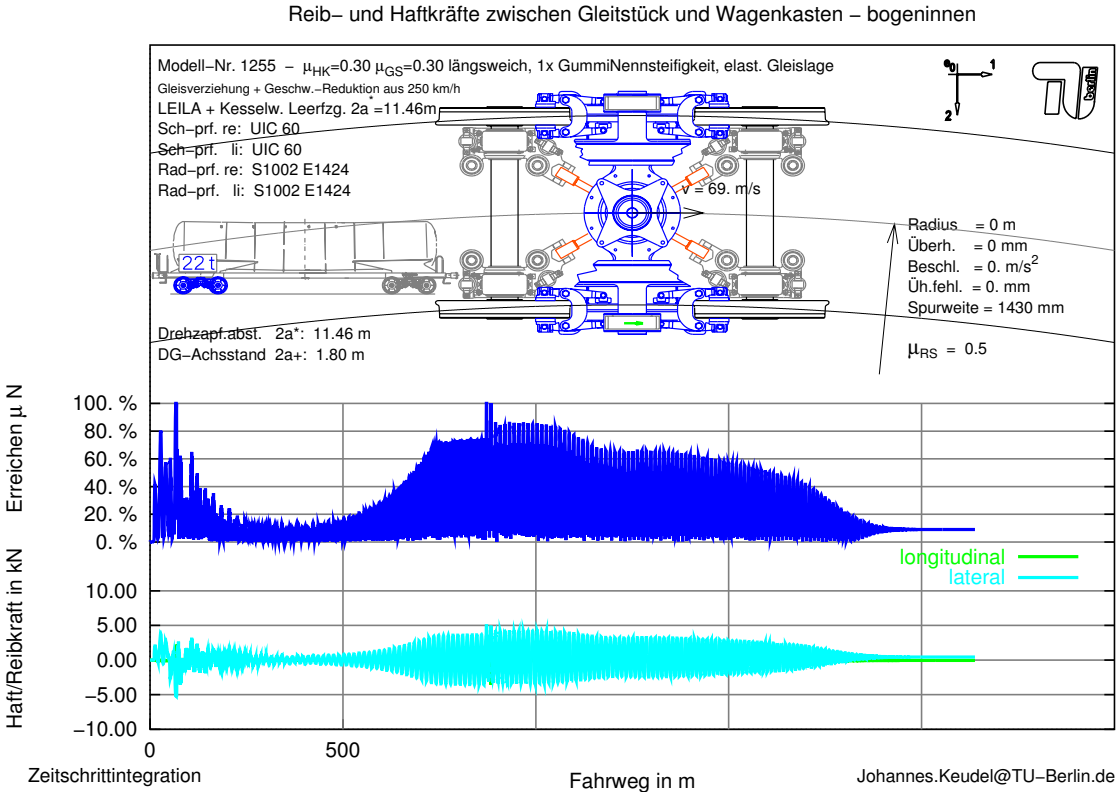


Abbildung B.15: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.2.4 Kesselwagen 22t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

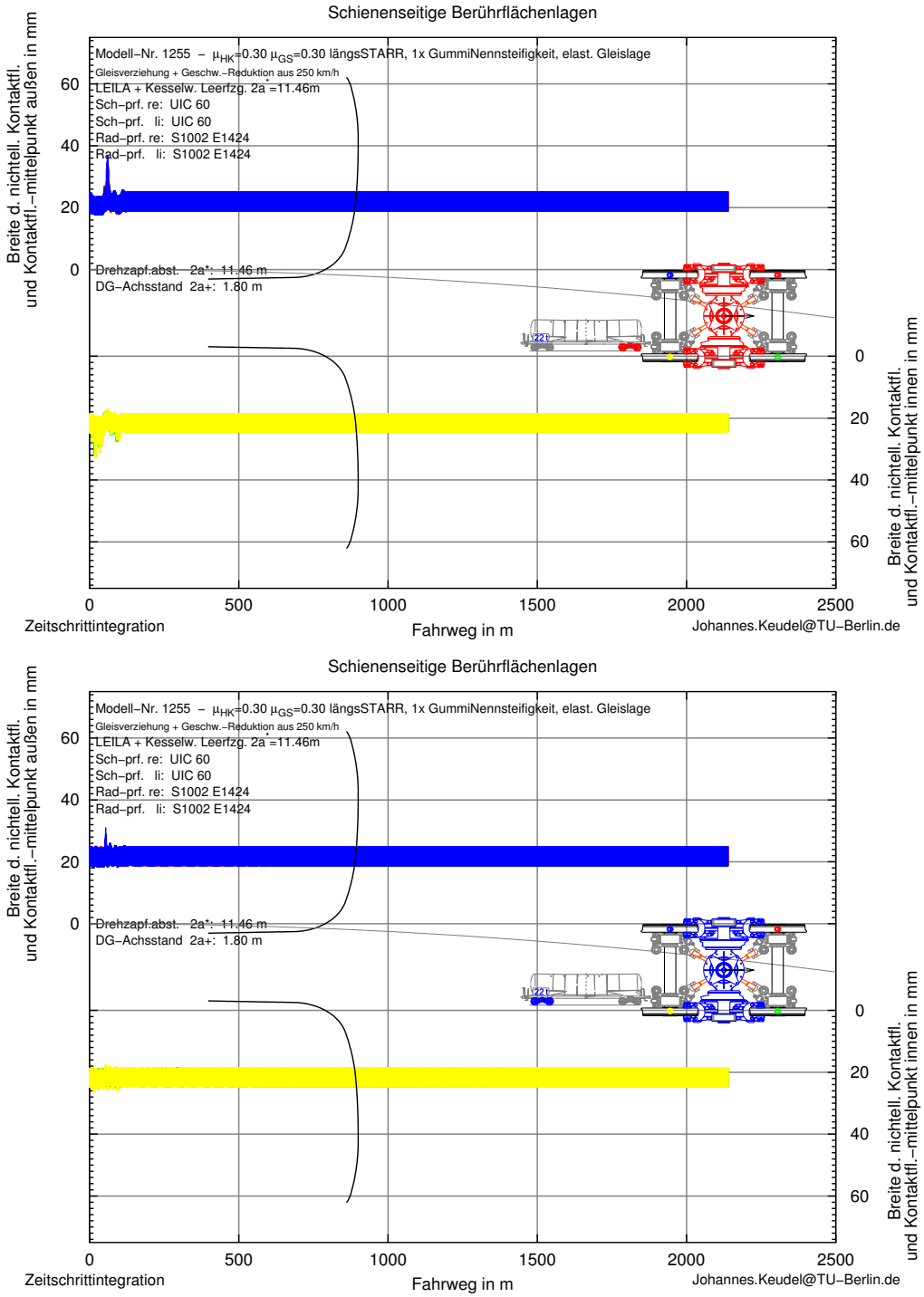
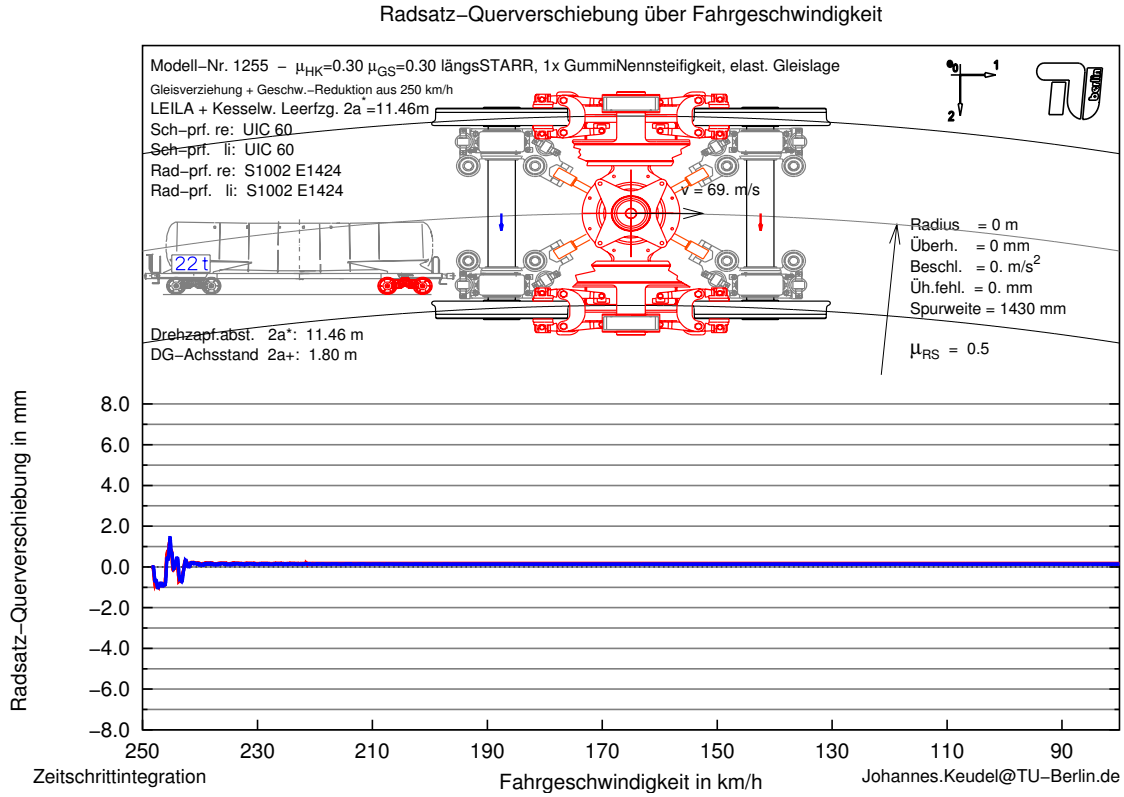


Abbildung B.16: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



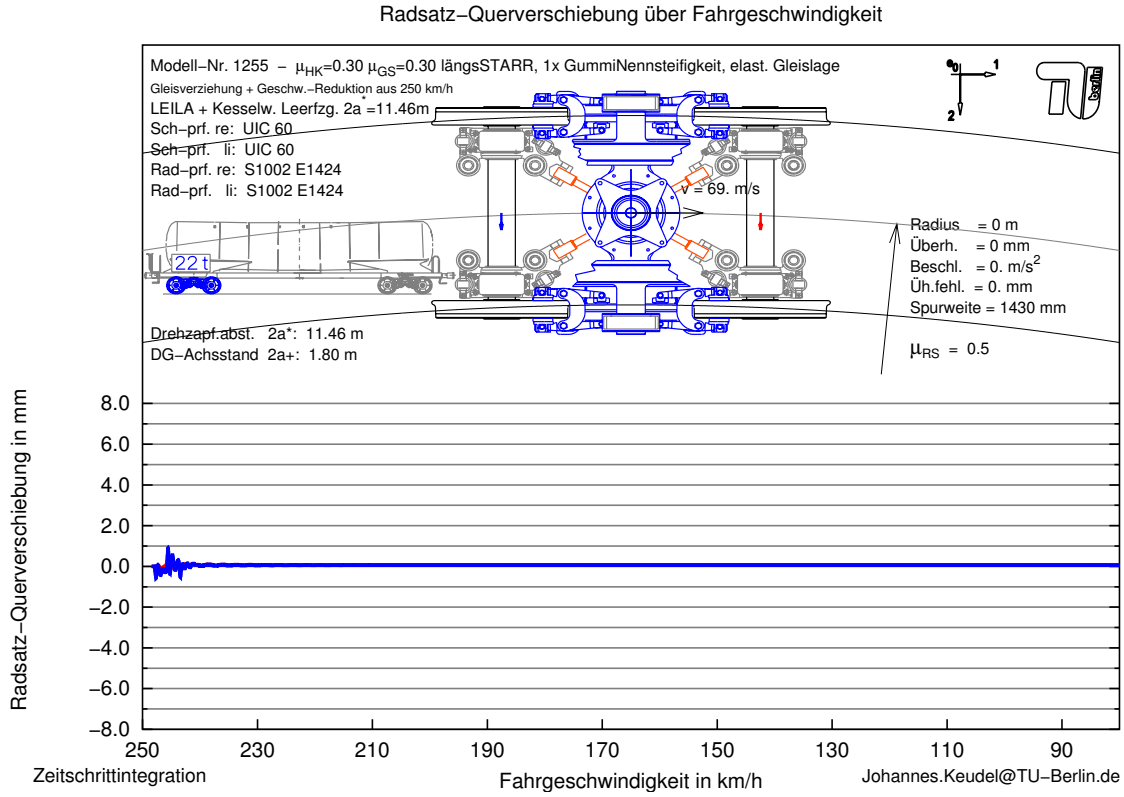
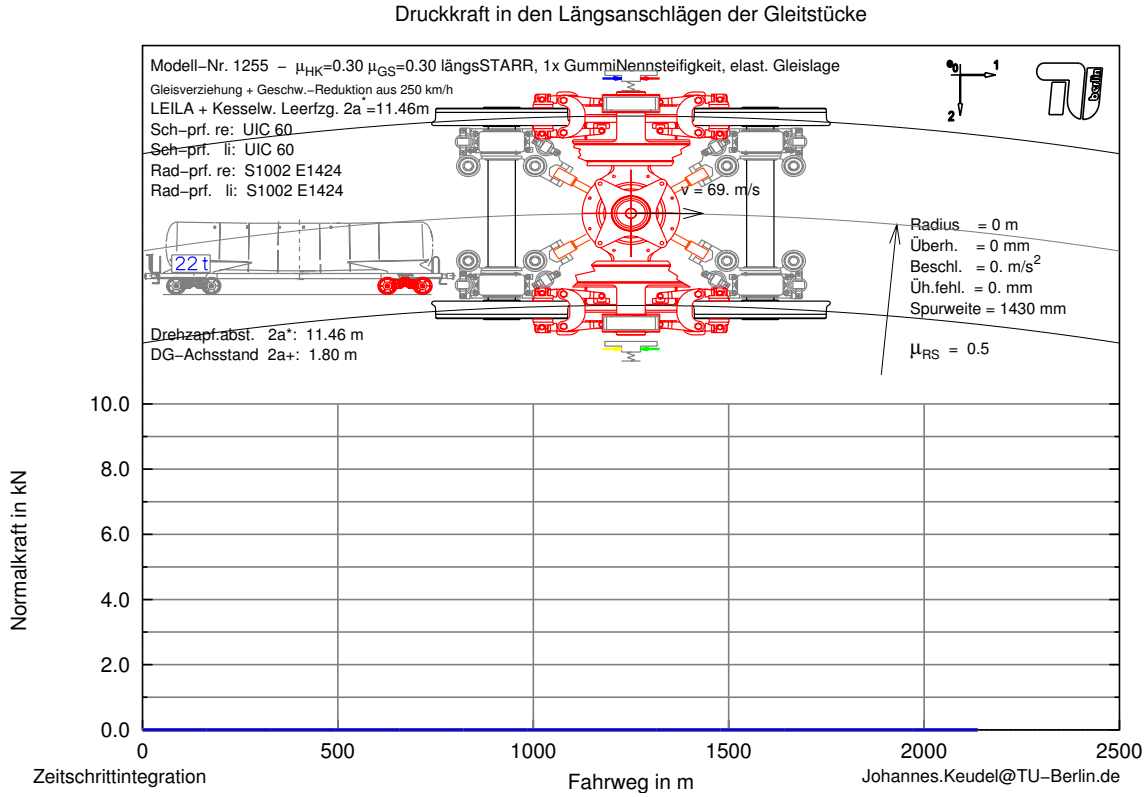


Abbildung B.17: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



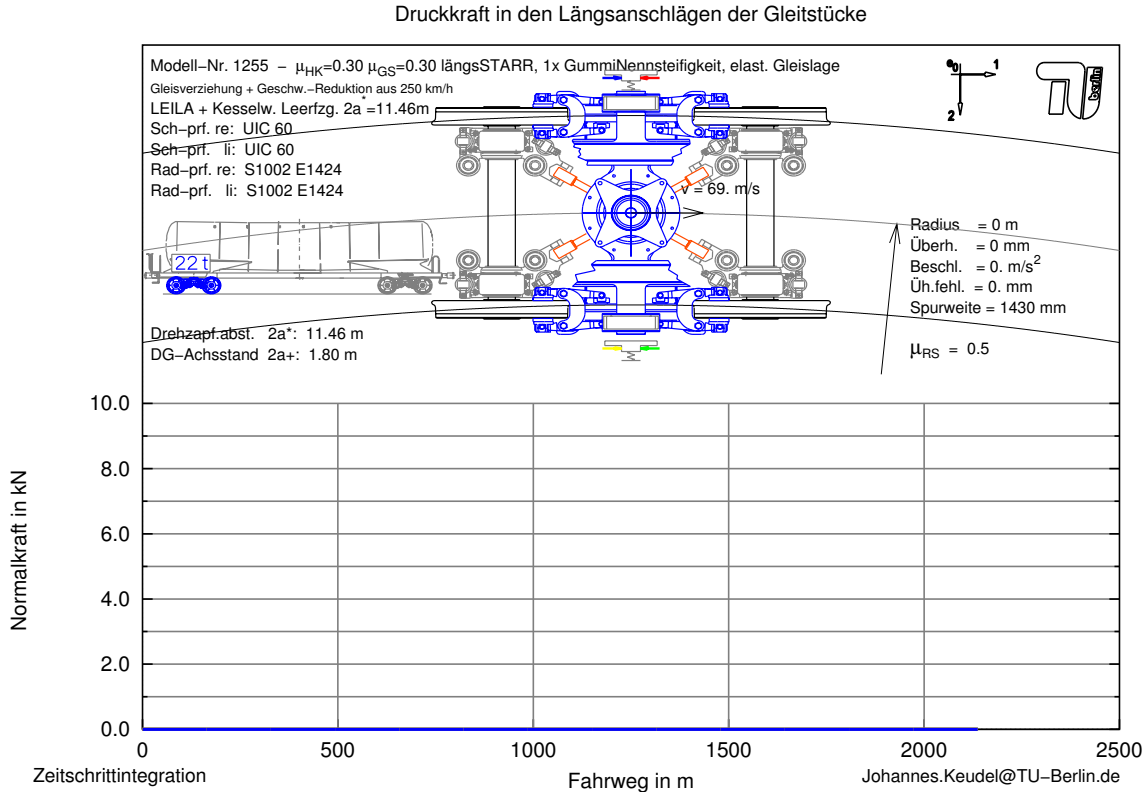
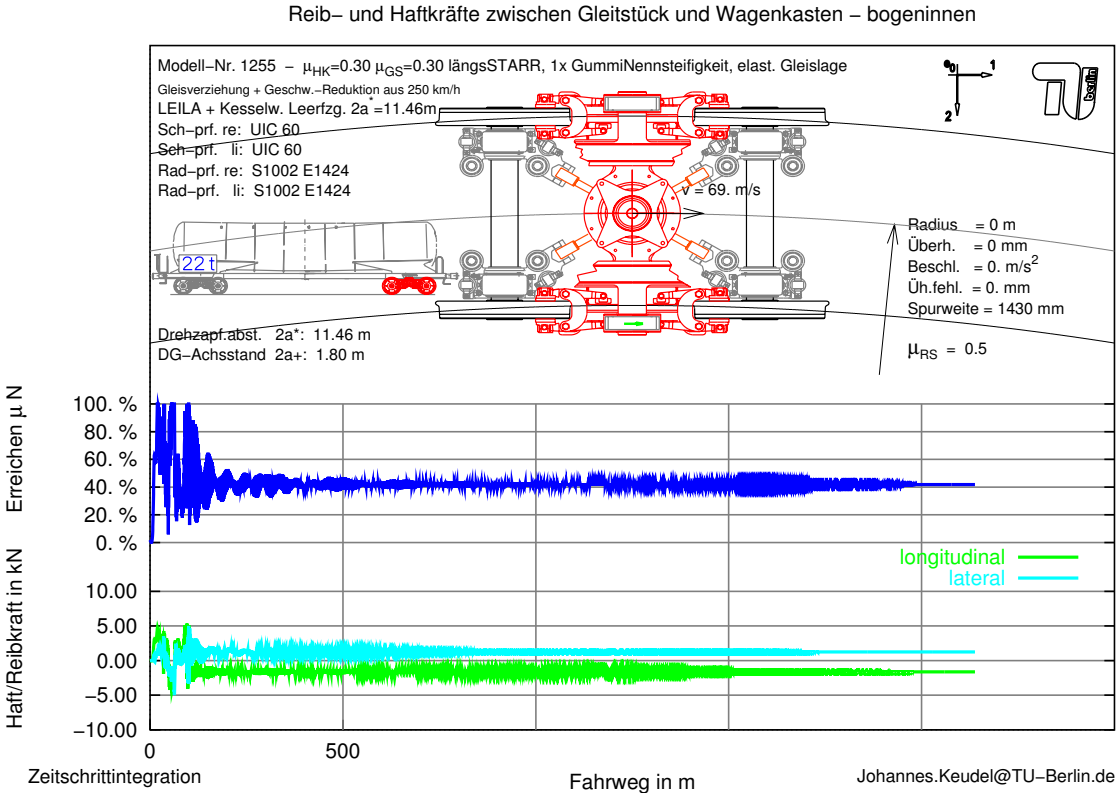


Abbildung B.18: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



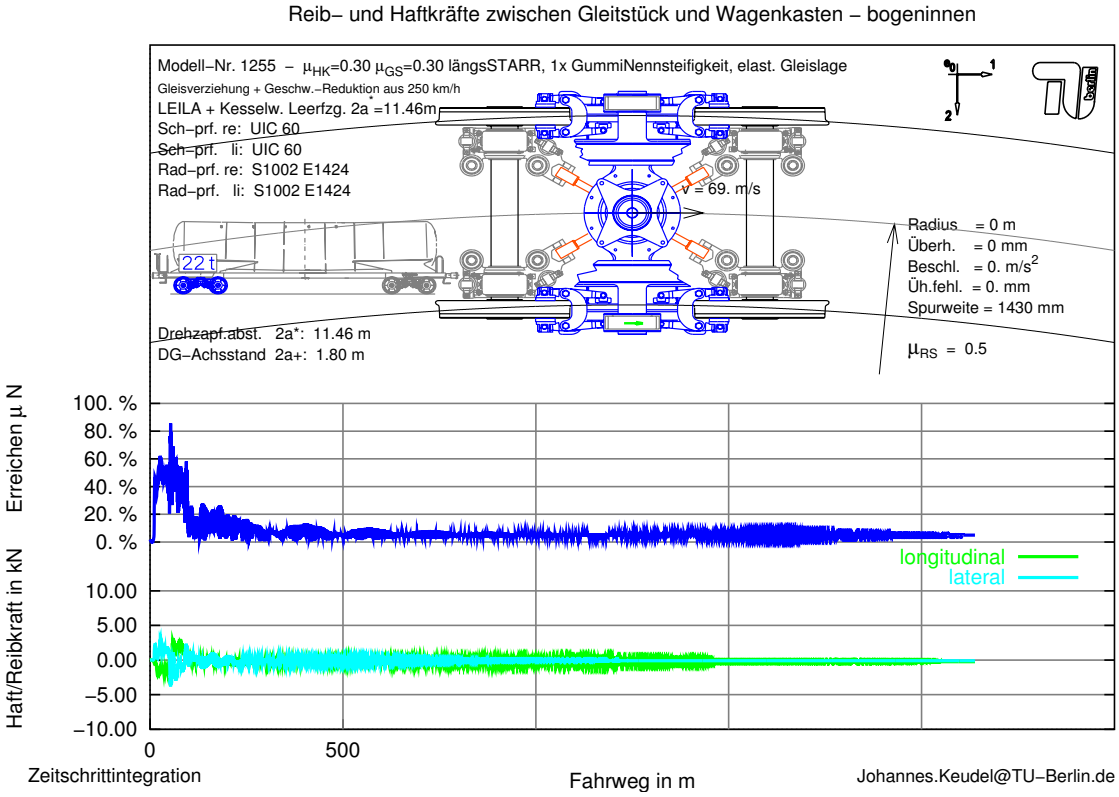


Abbildung B.19: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.2.5 Kesselwagen 90t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

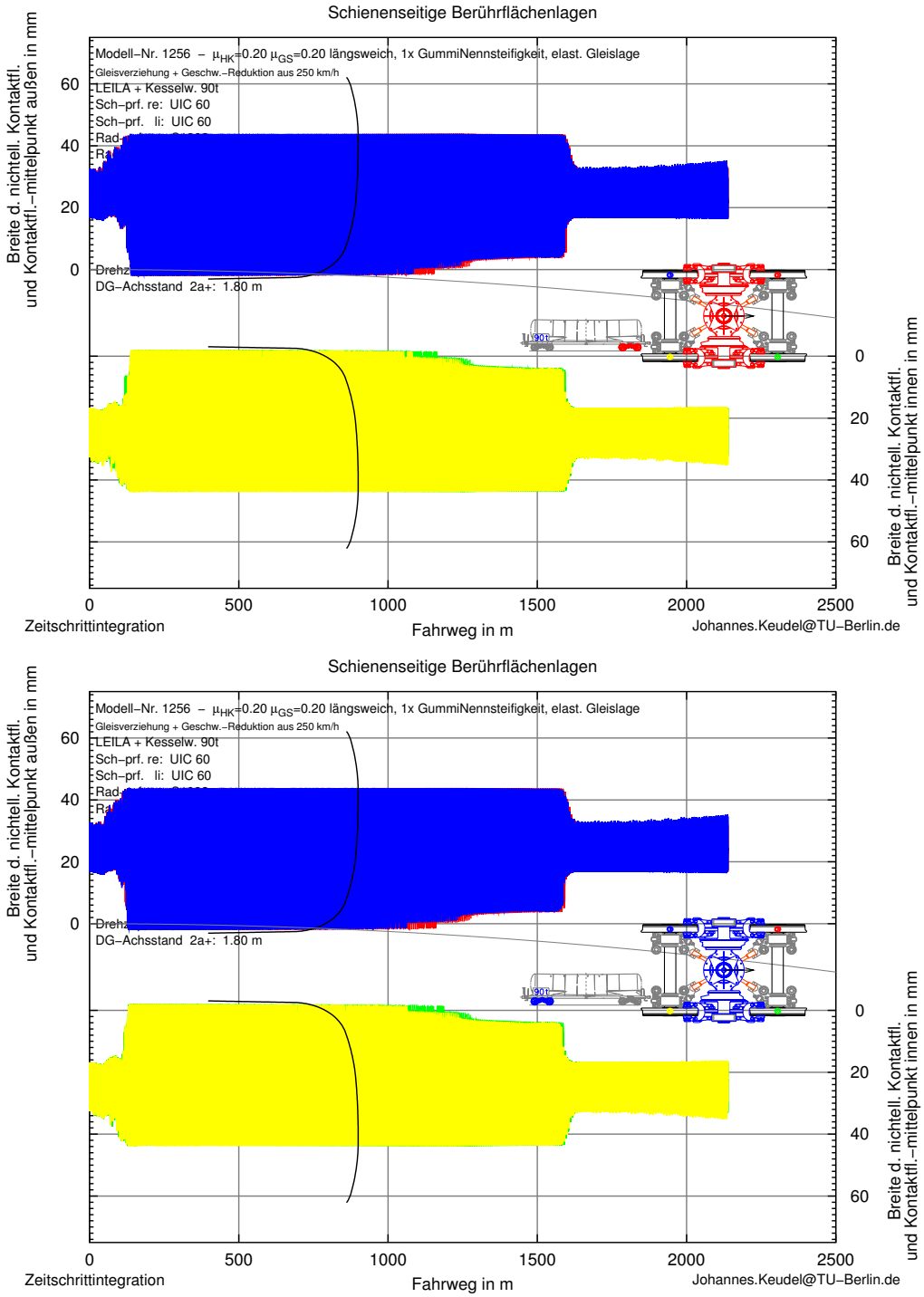
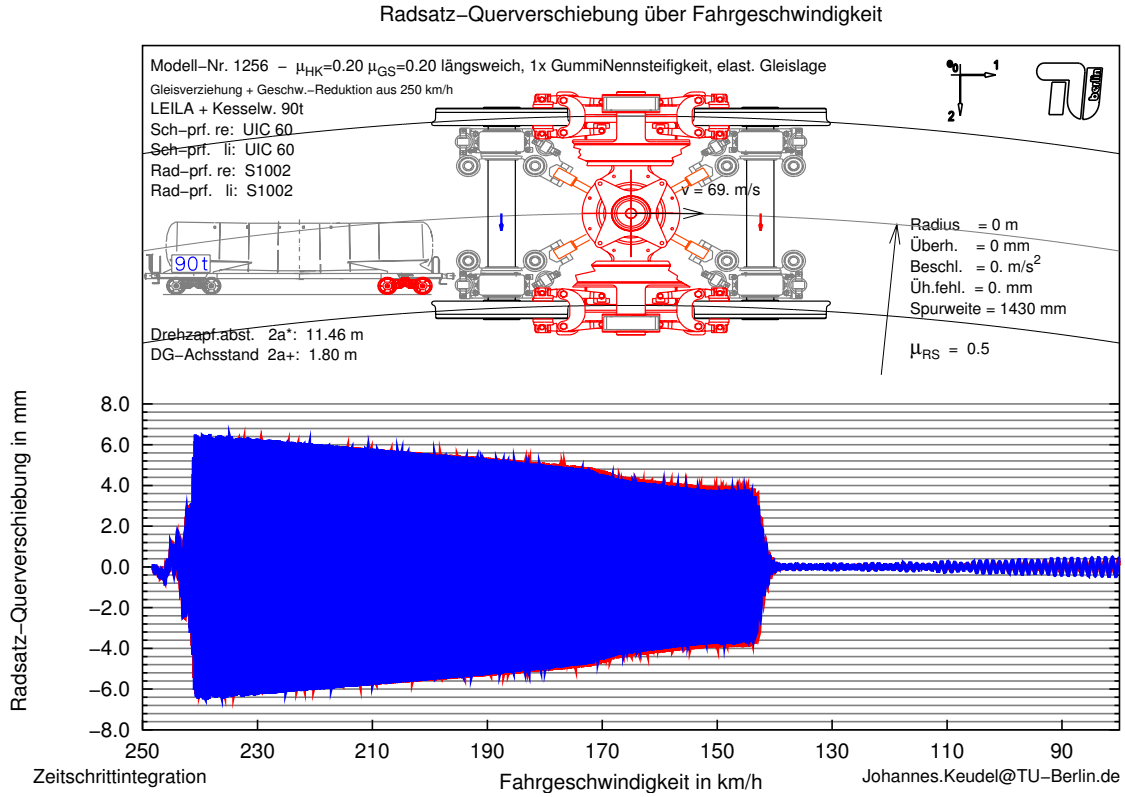


Abbildung B.20: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



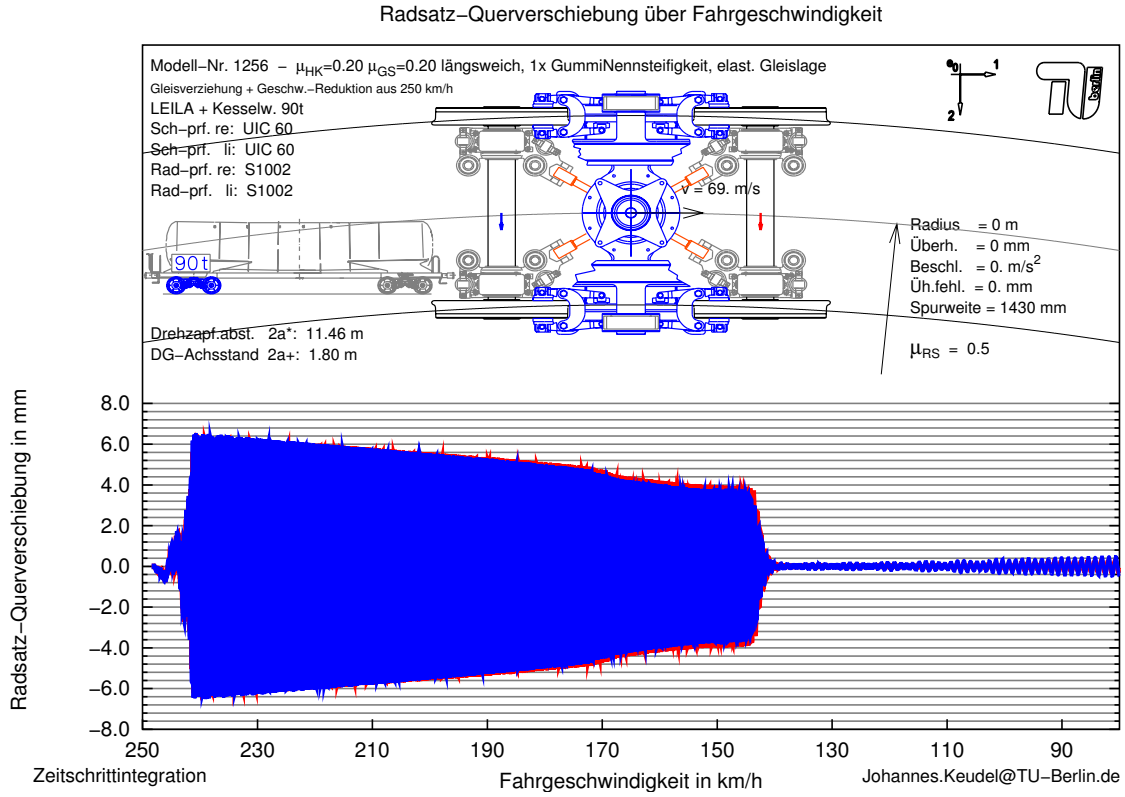
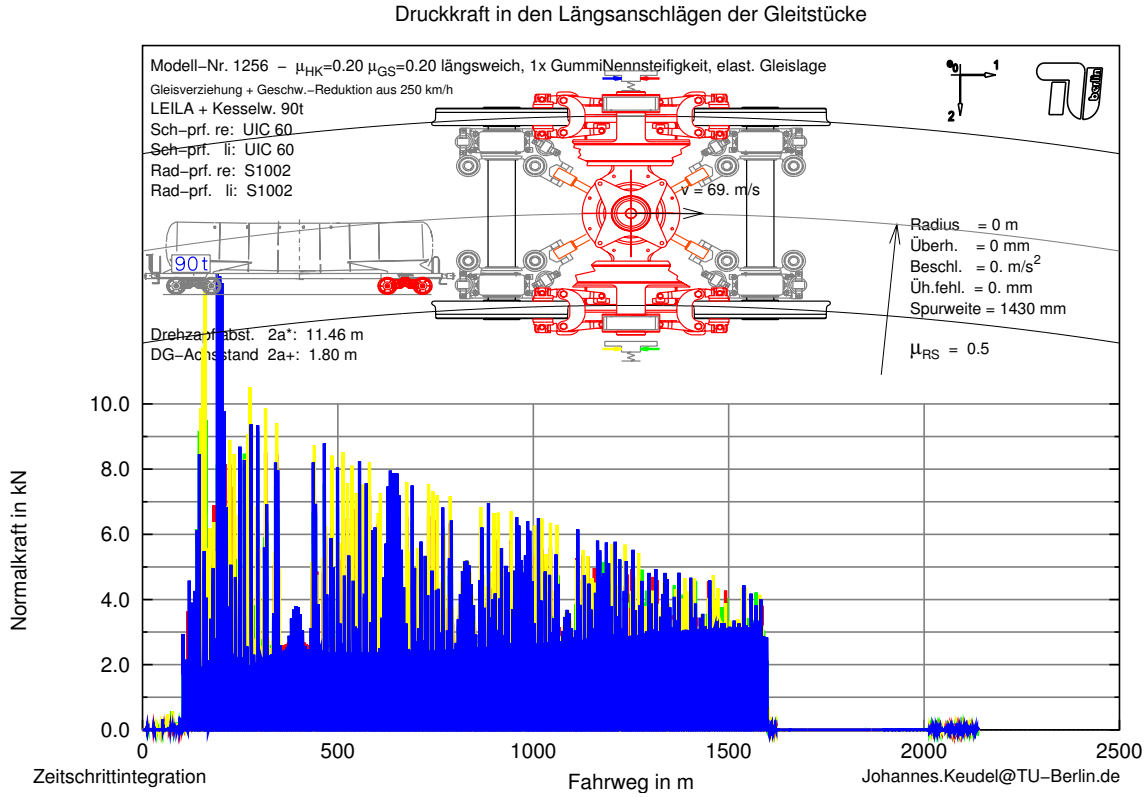


Abbildung B.21: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



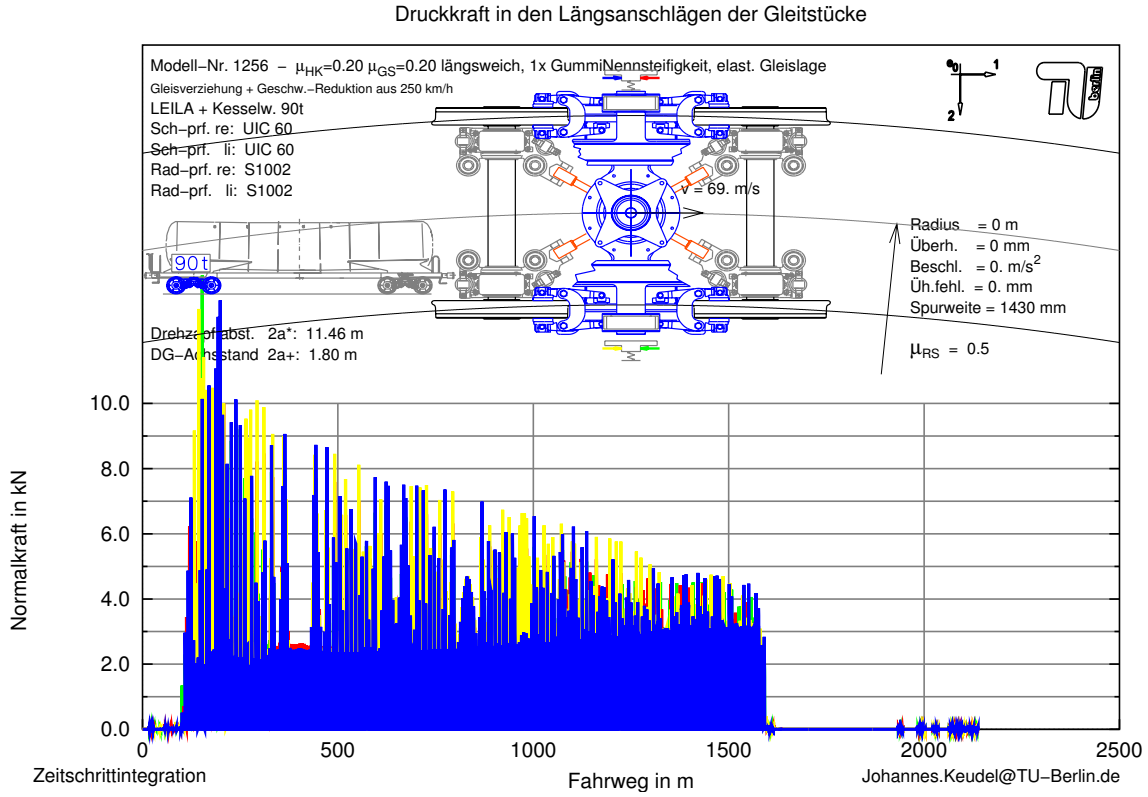
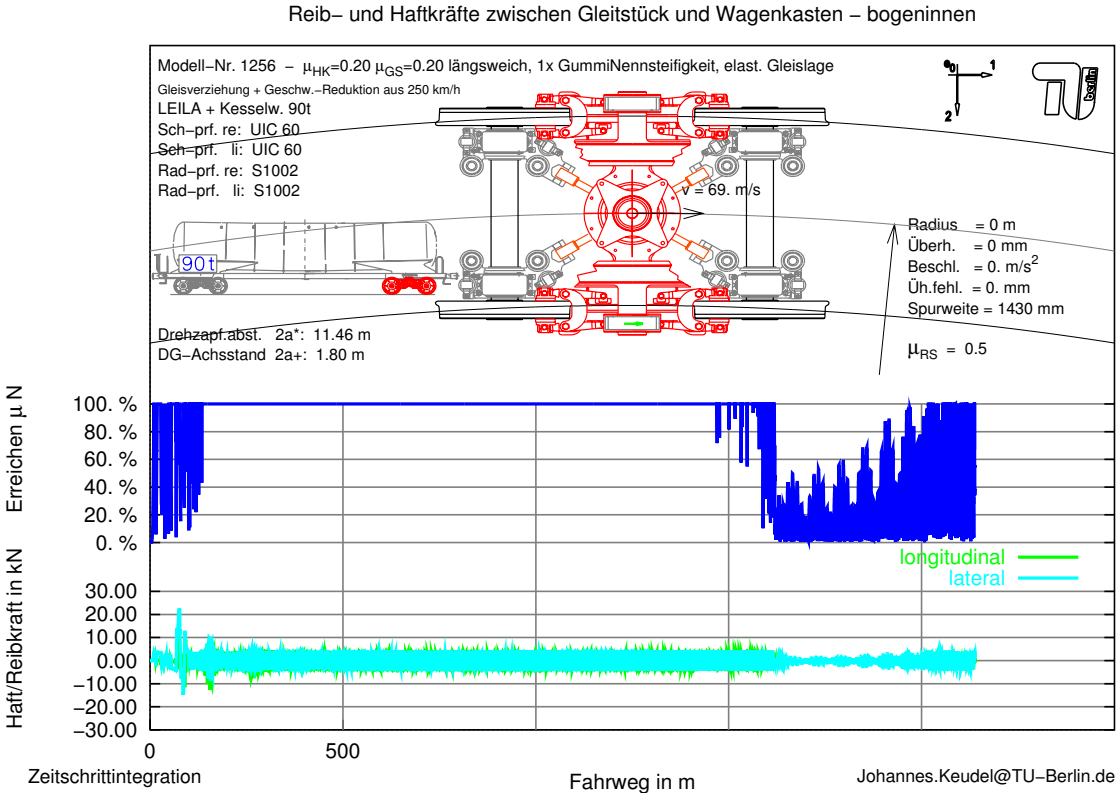


Abbildung B.22: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



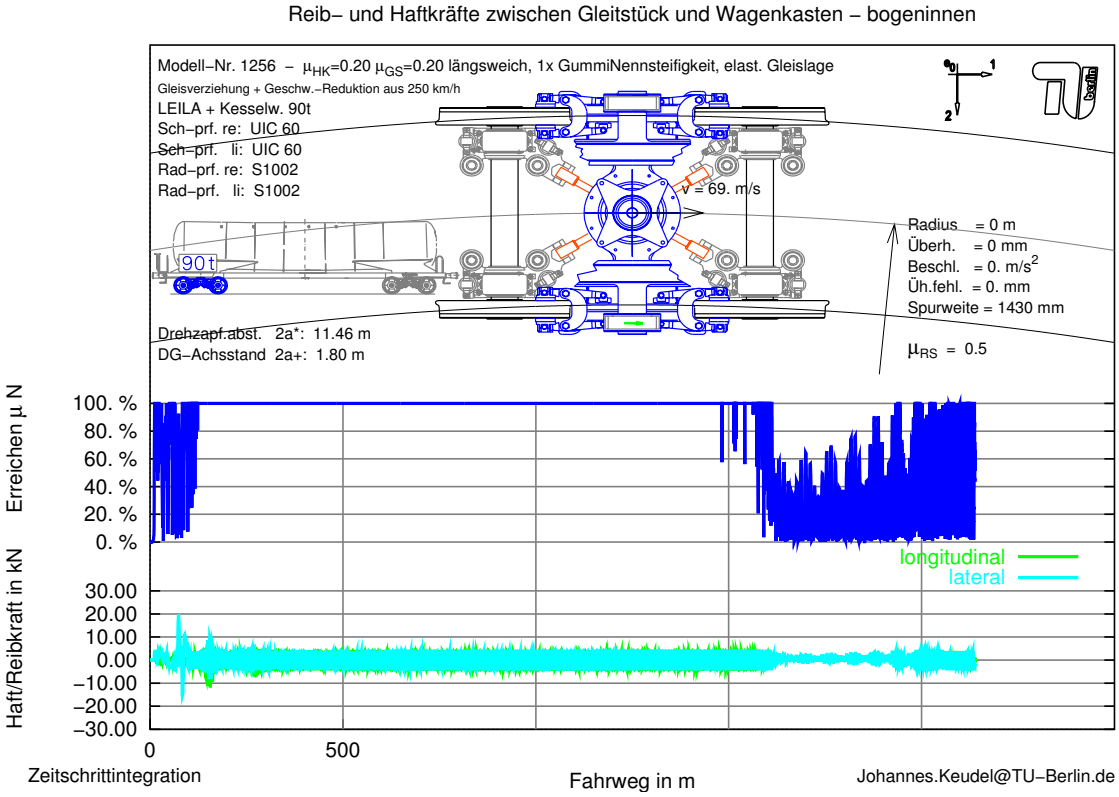
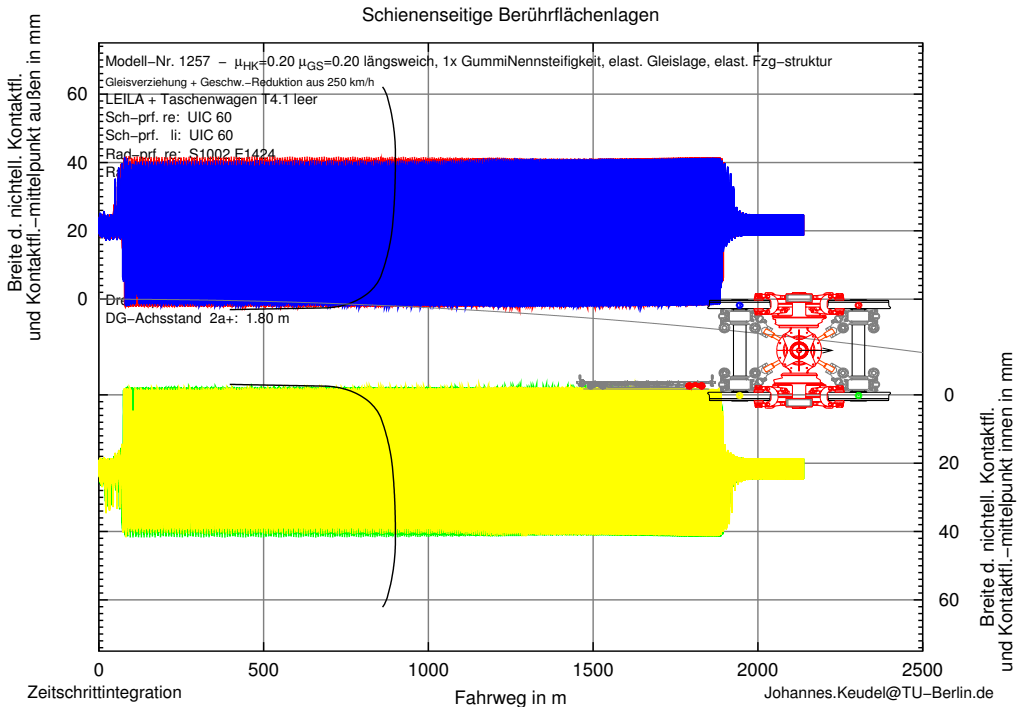


Abbildung B.23: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, starre Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3 Ergebnisse Taschenwagen T4.1

B.3.1 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5



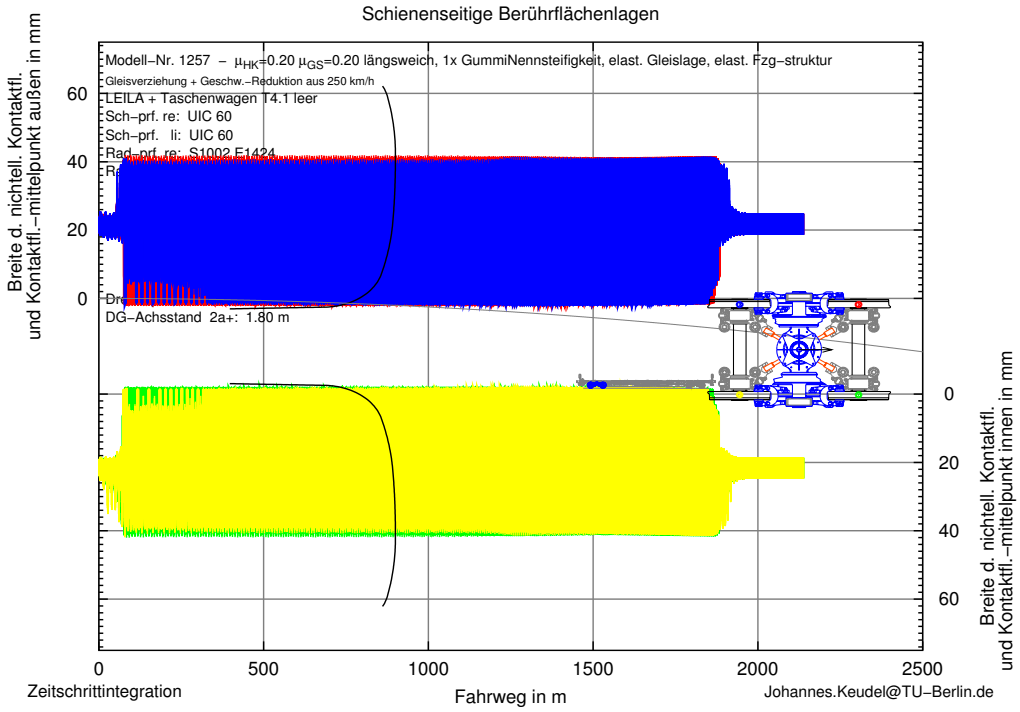
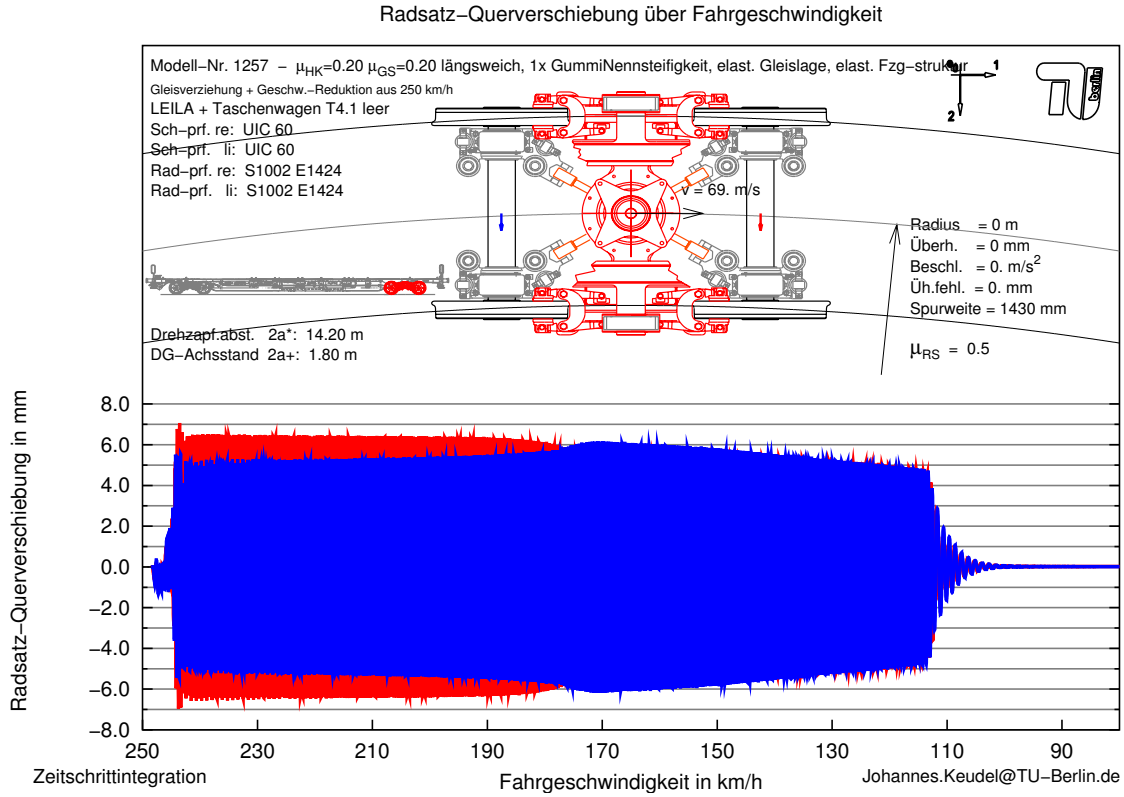


Abbildung B.24: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



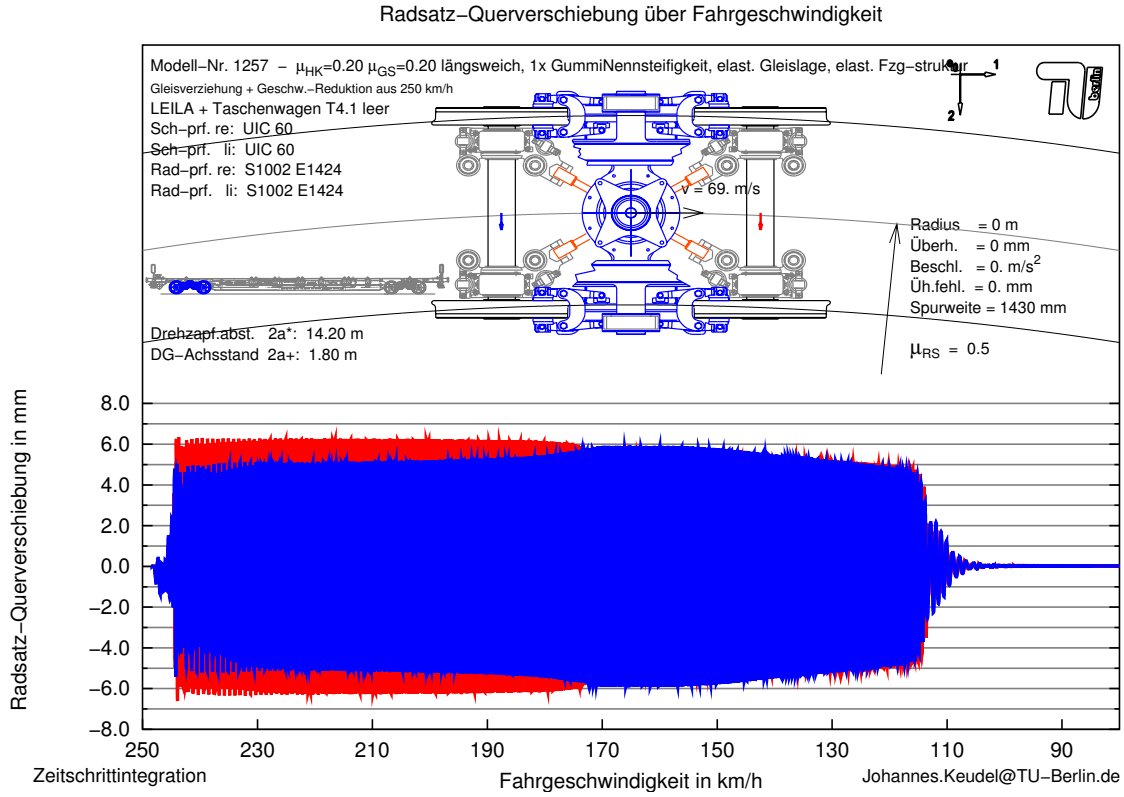
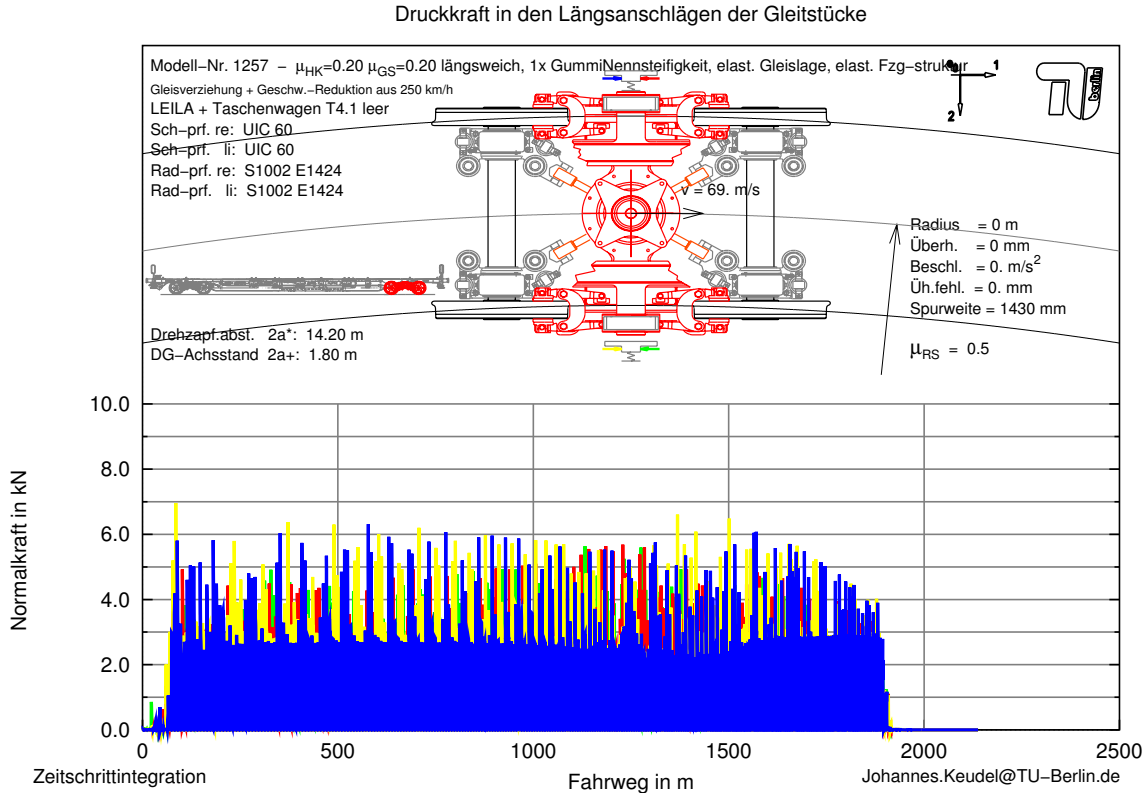


Abbildung B.25: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



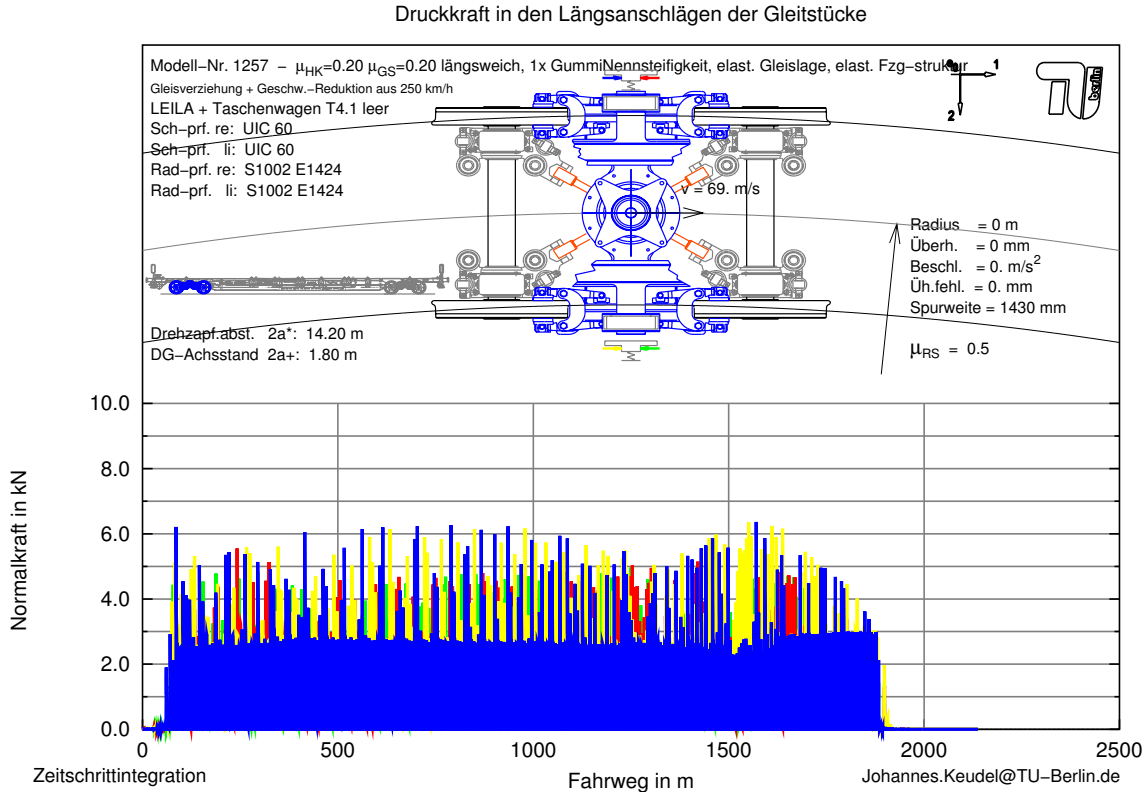
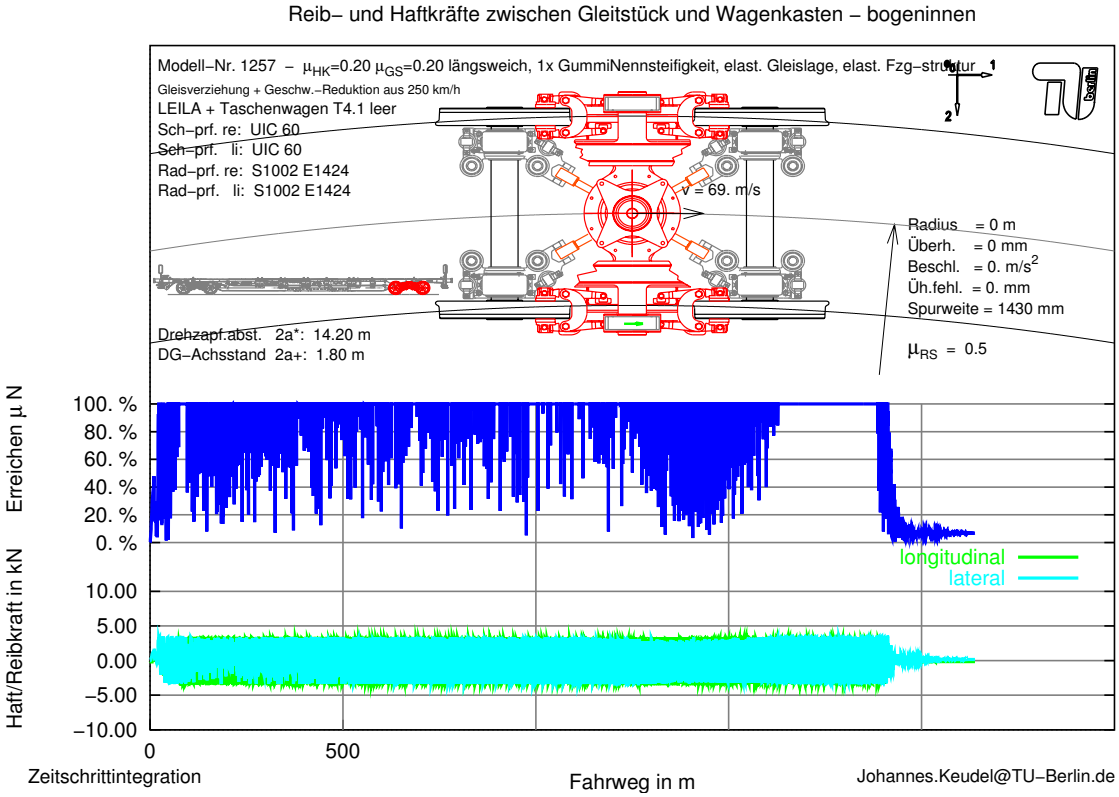


Abbildung B.26: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



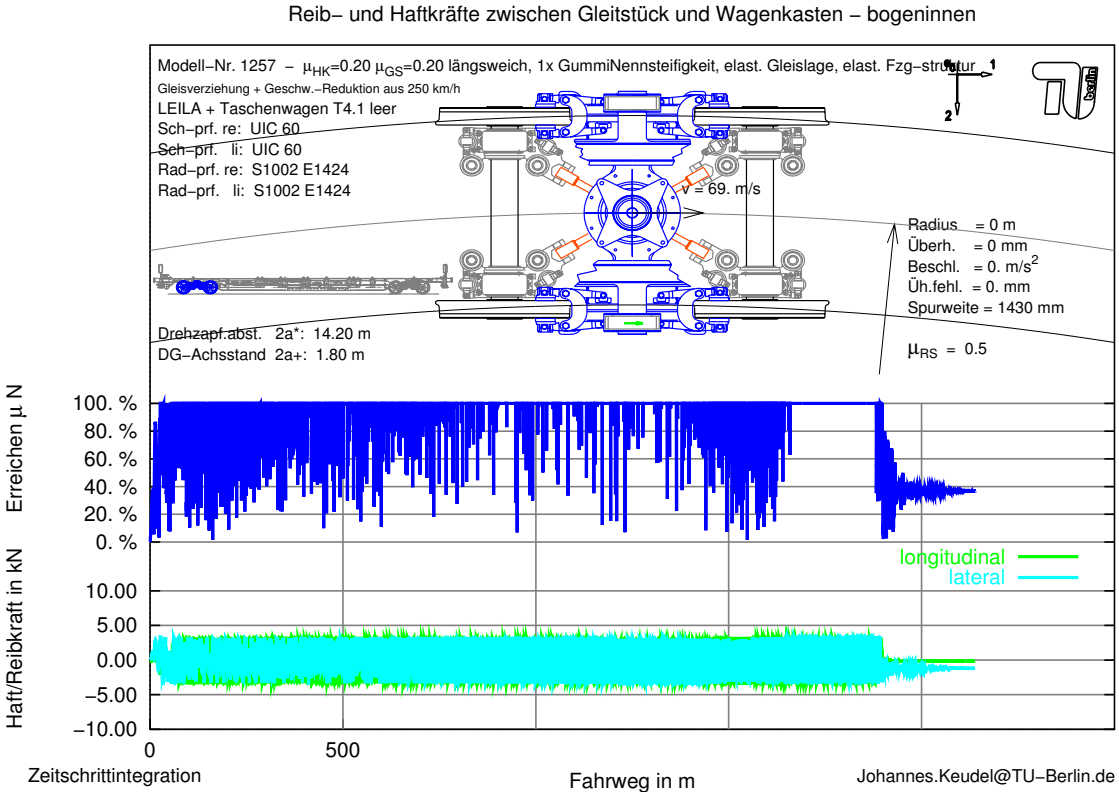
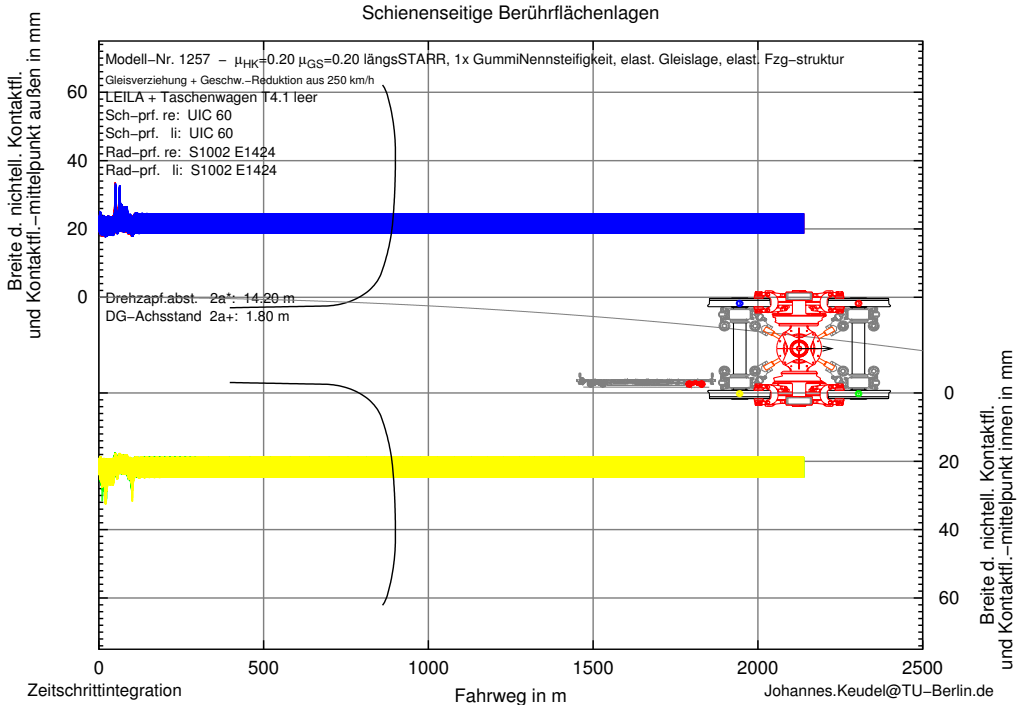


Abbildung B.27: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.2 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5



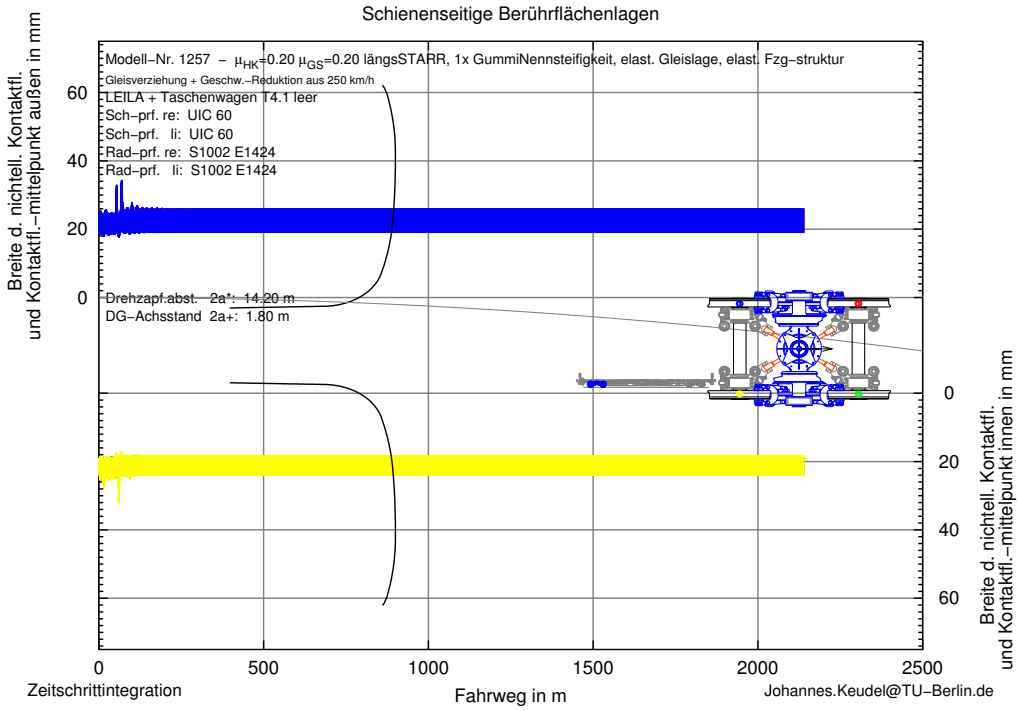
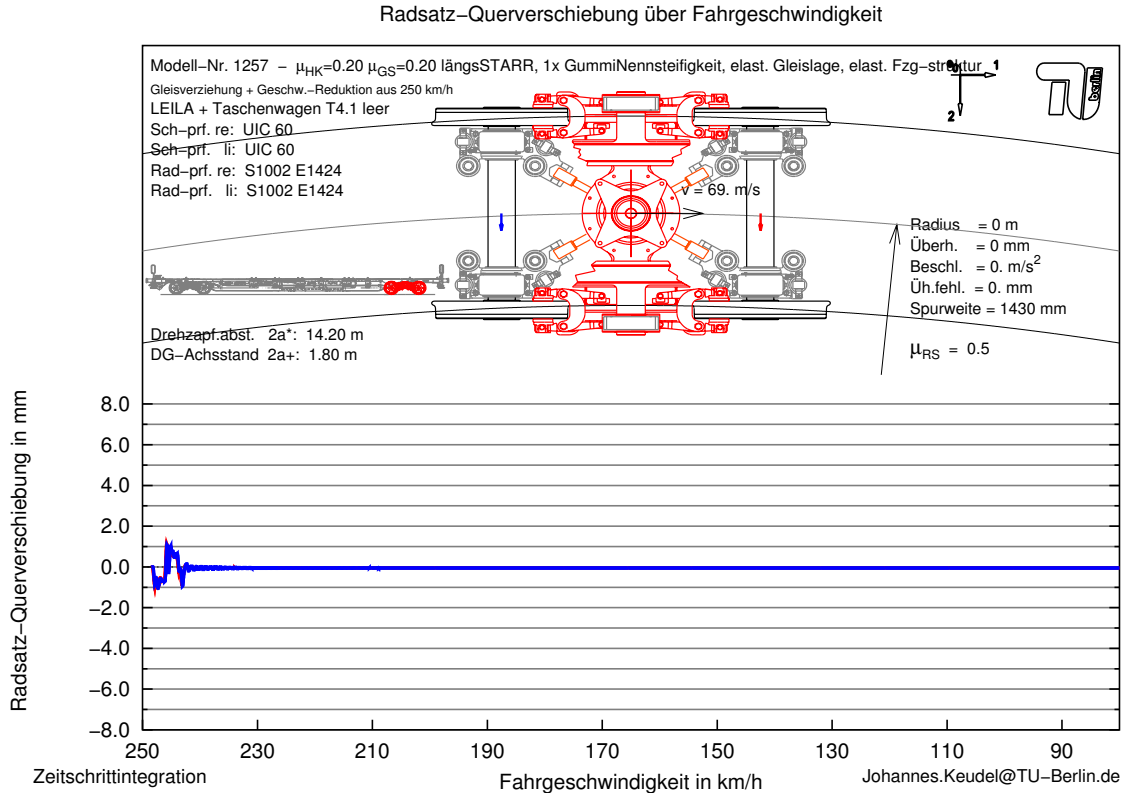


Abbildung B.28: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



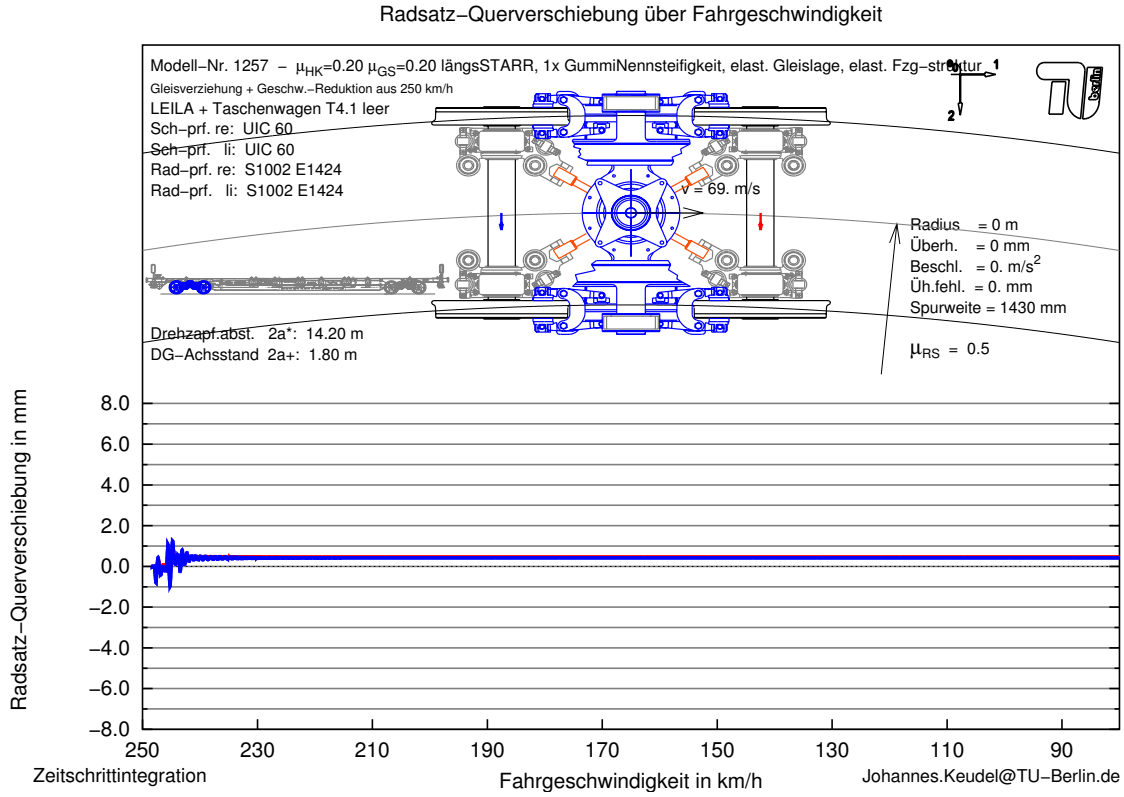
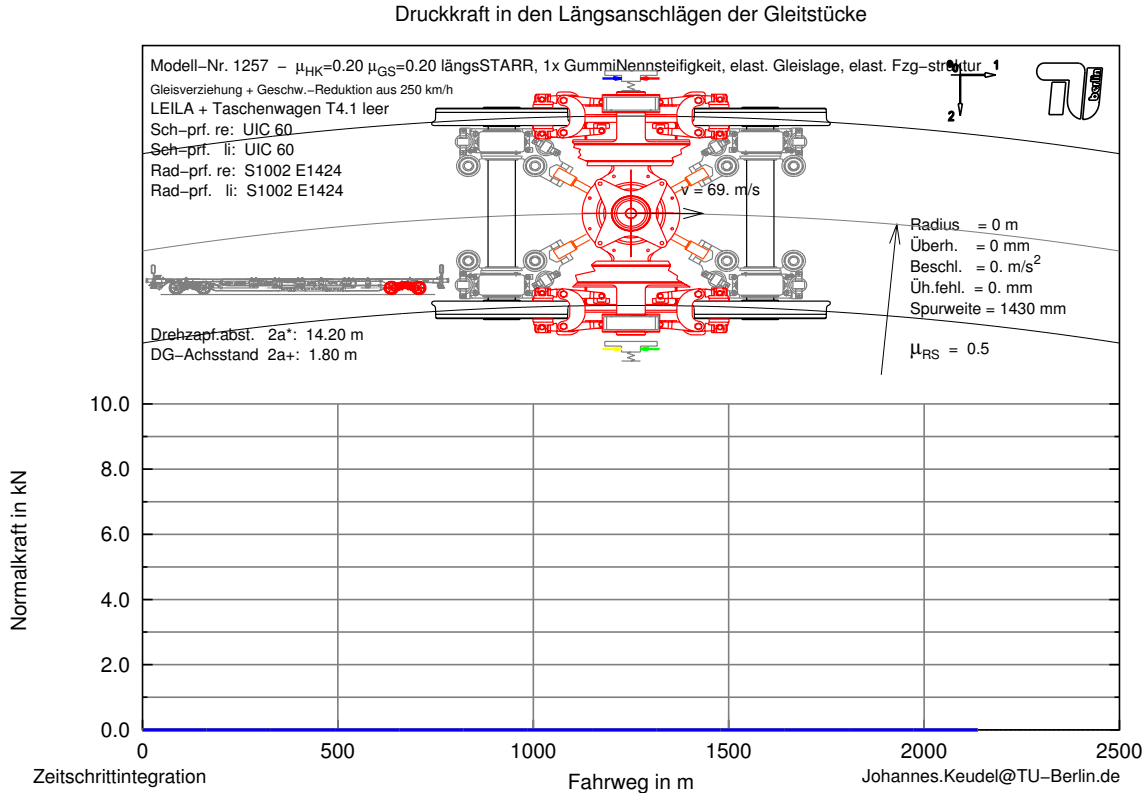


Abbildung B.29: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



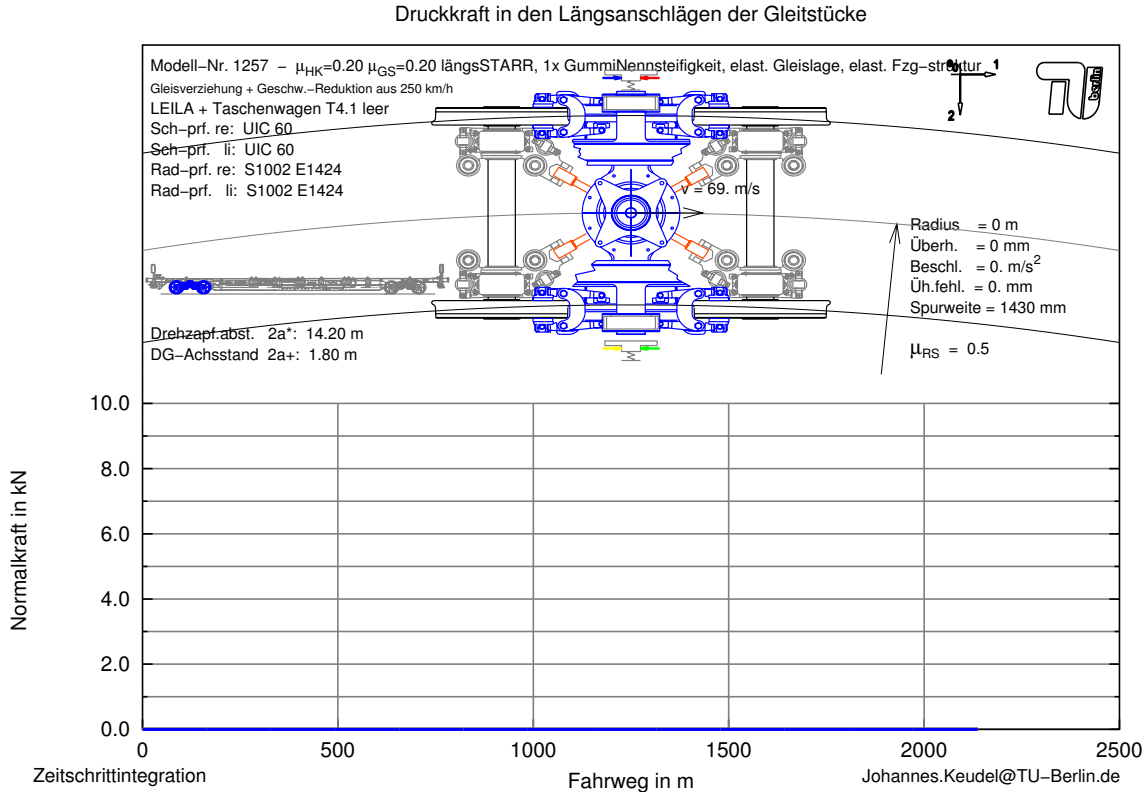
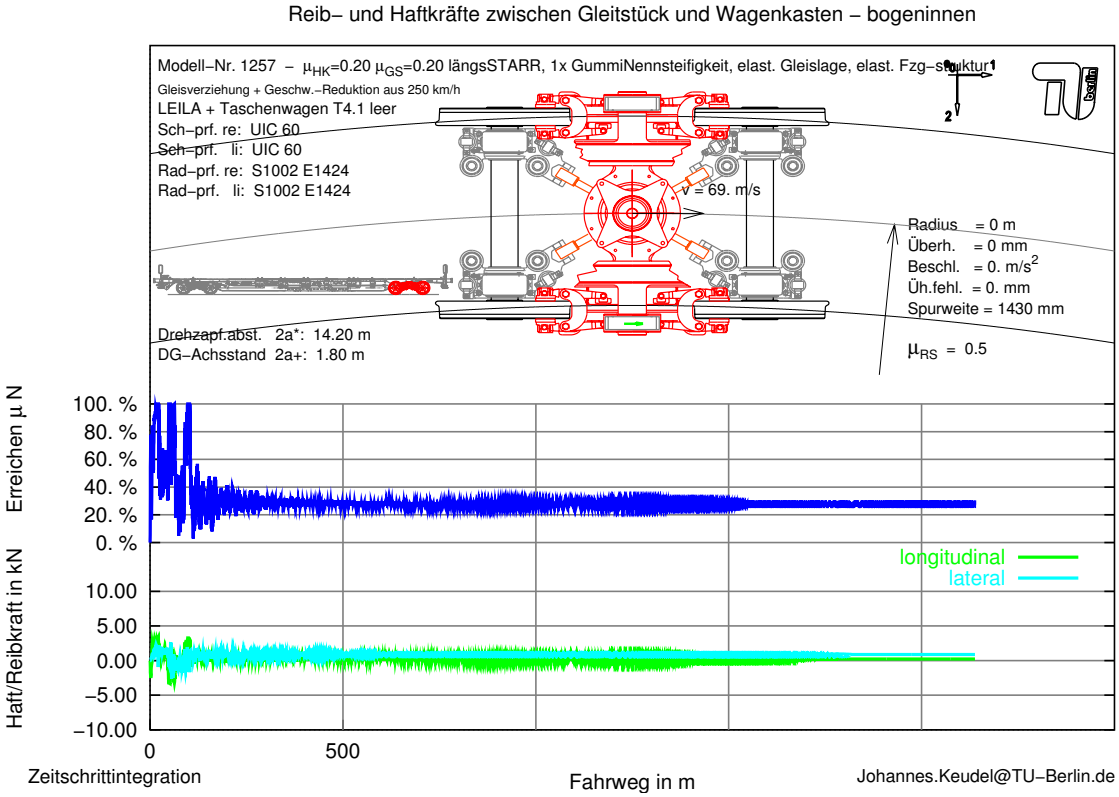


Abbildung B.30: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



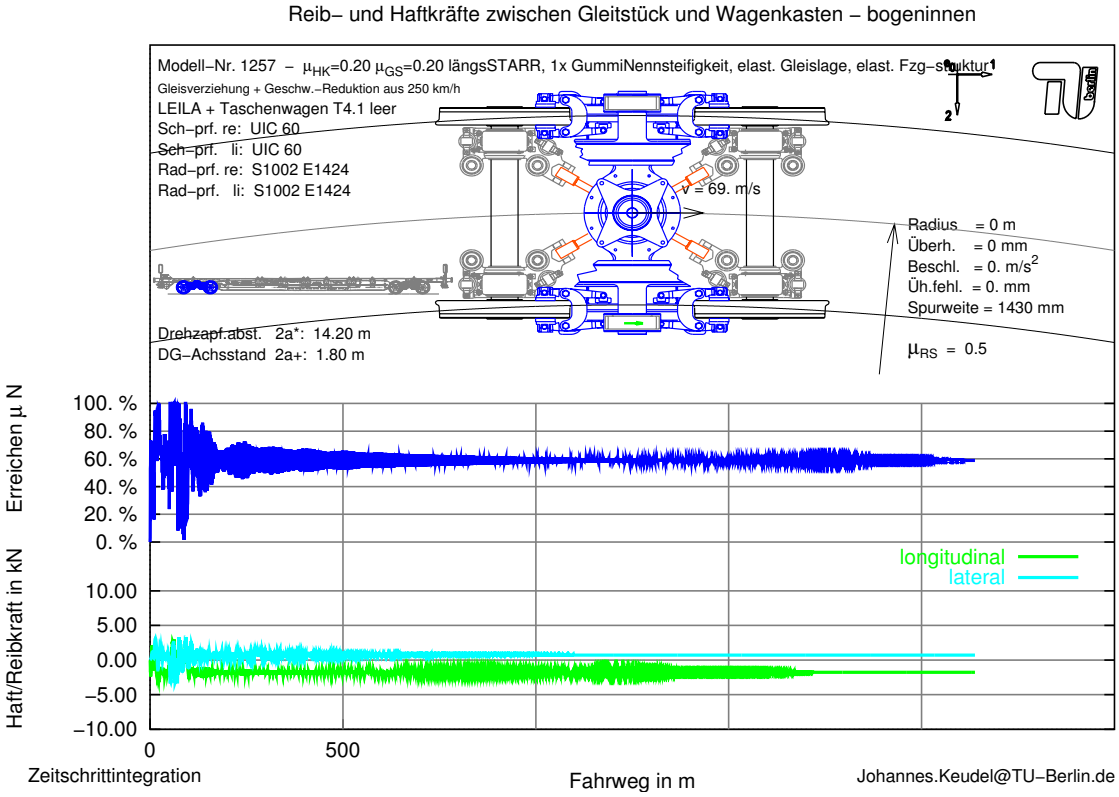
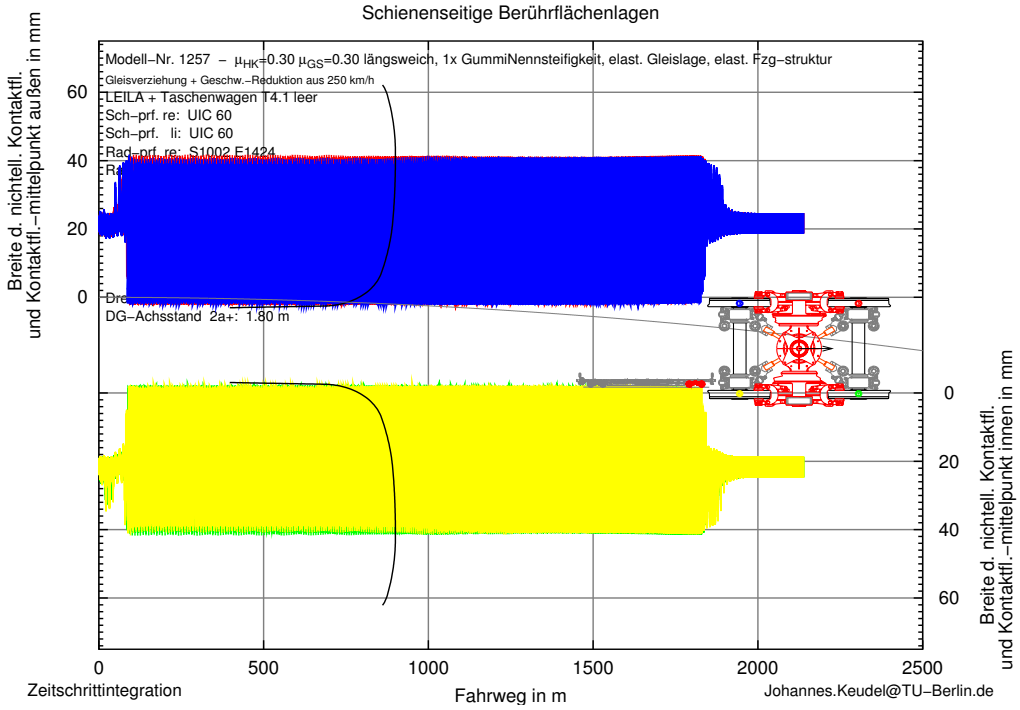


Abbildung B.31: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsstarr, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.3 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5



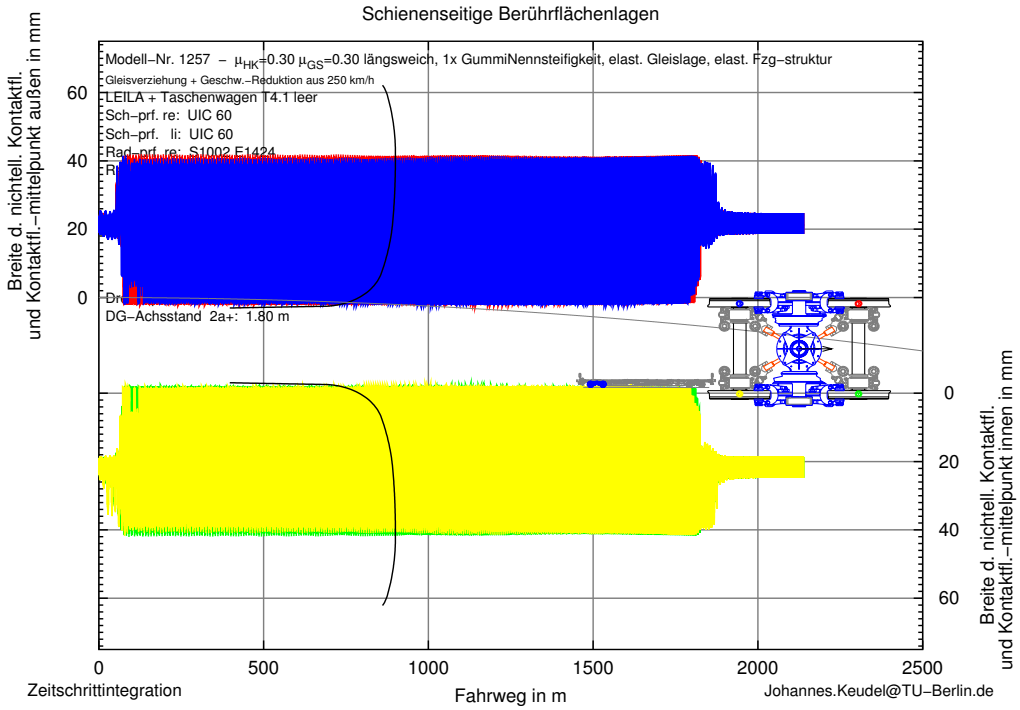
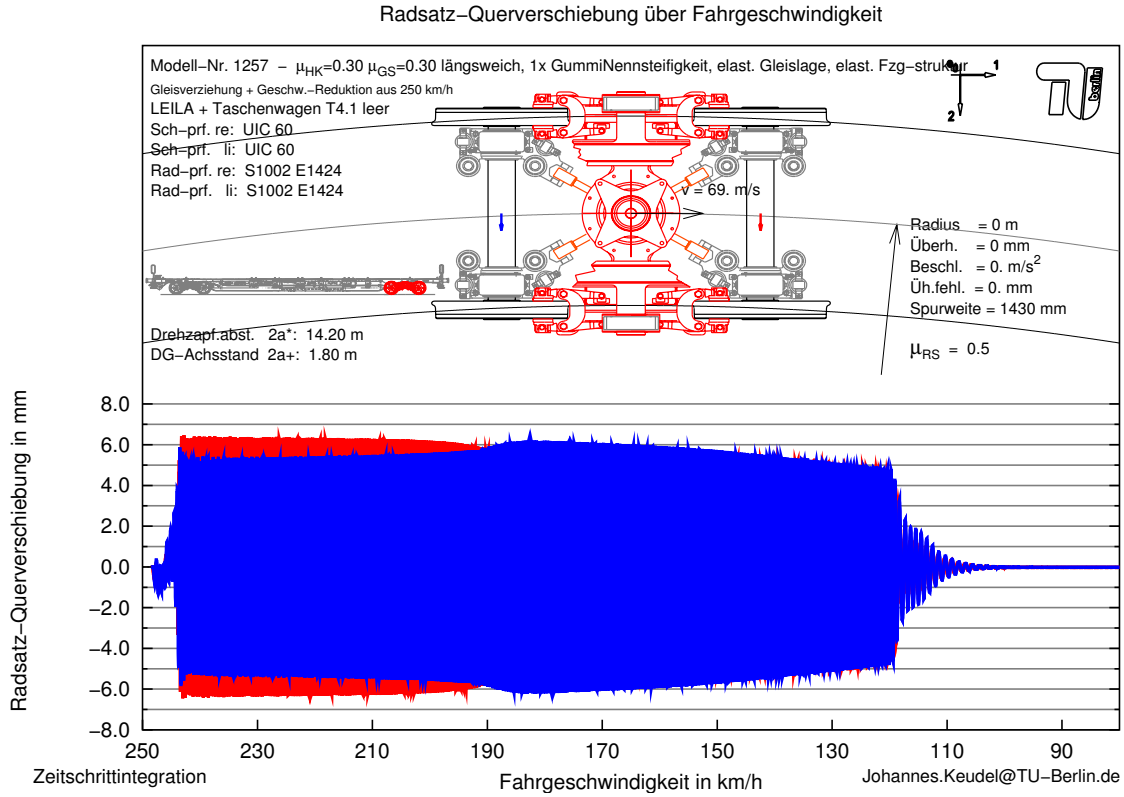


Abbildung B.32: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



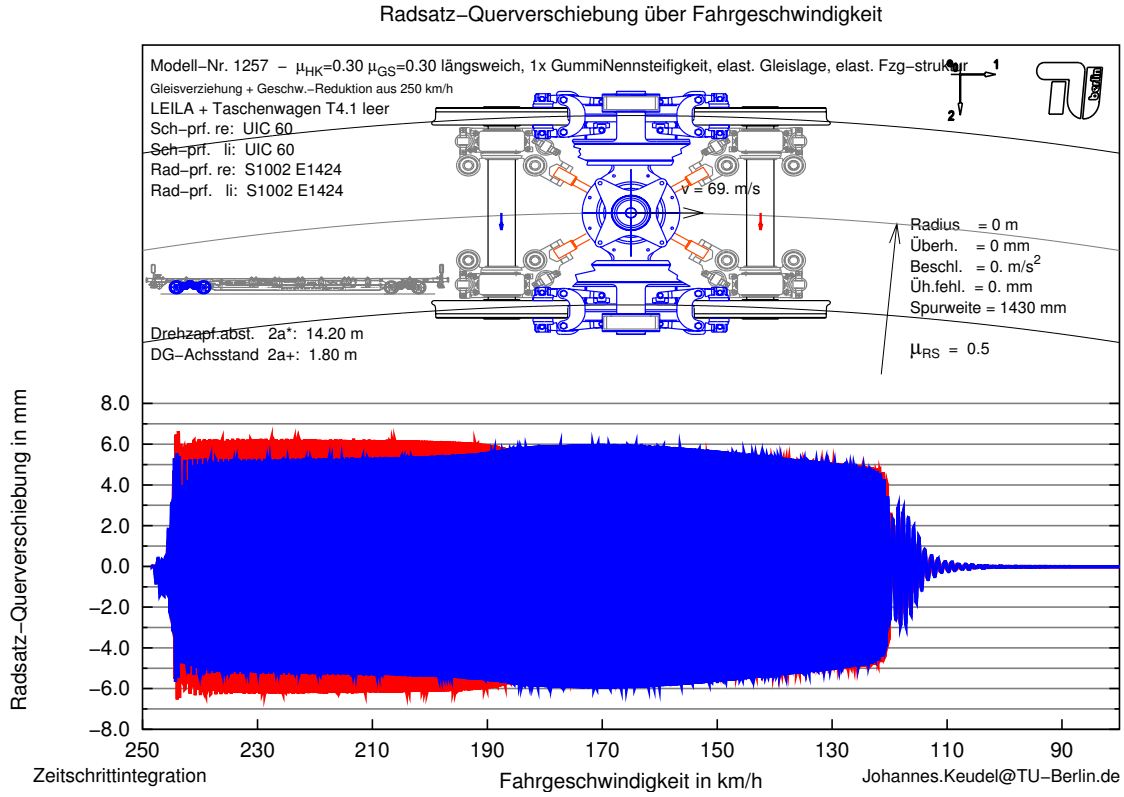
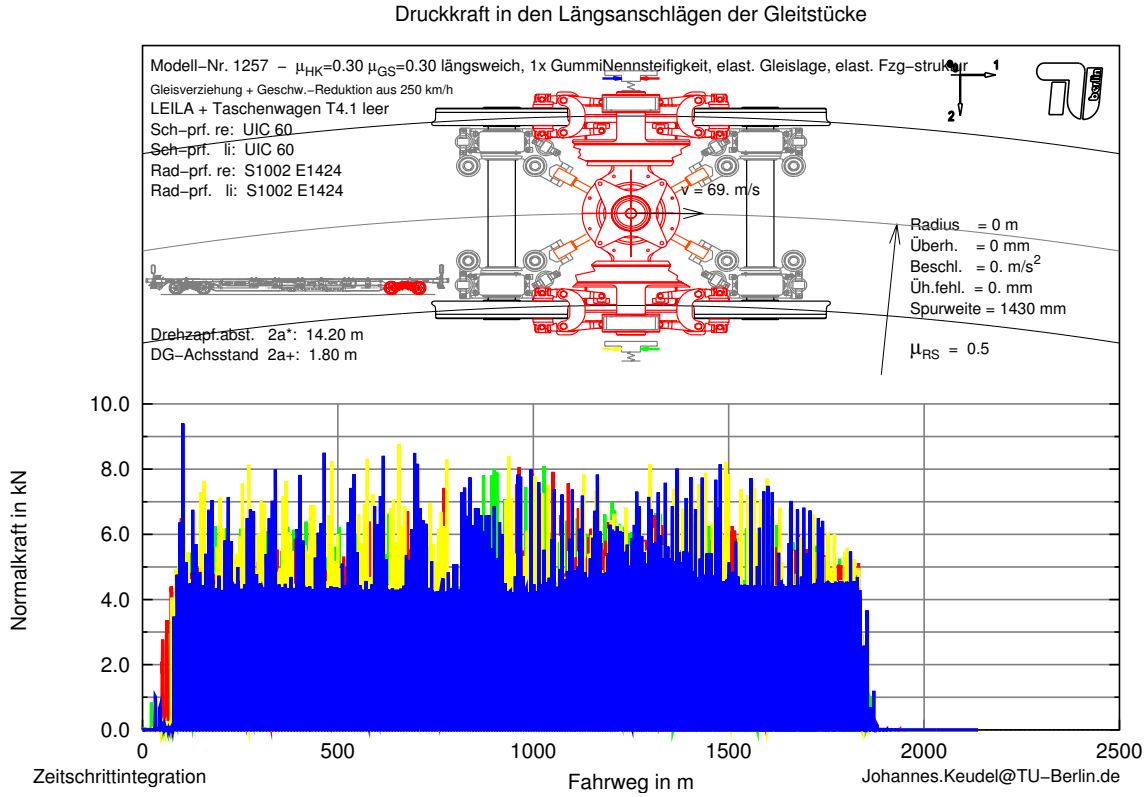


Abbildung B.33: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



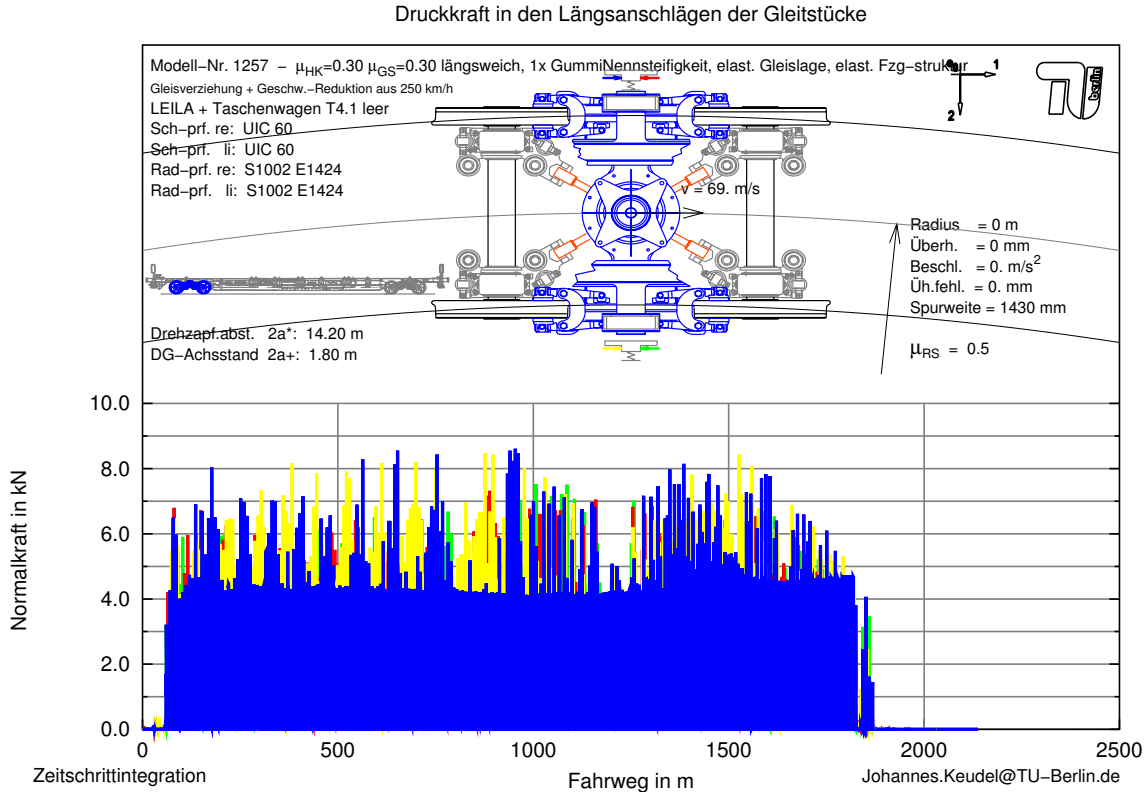
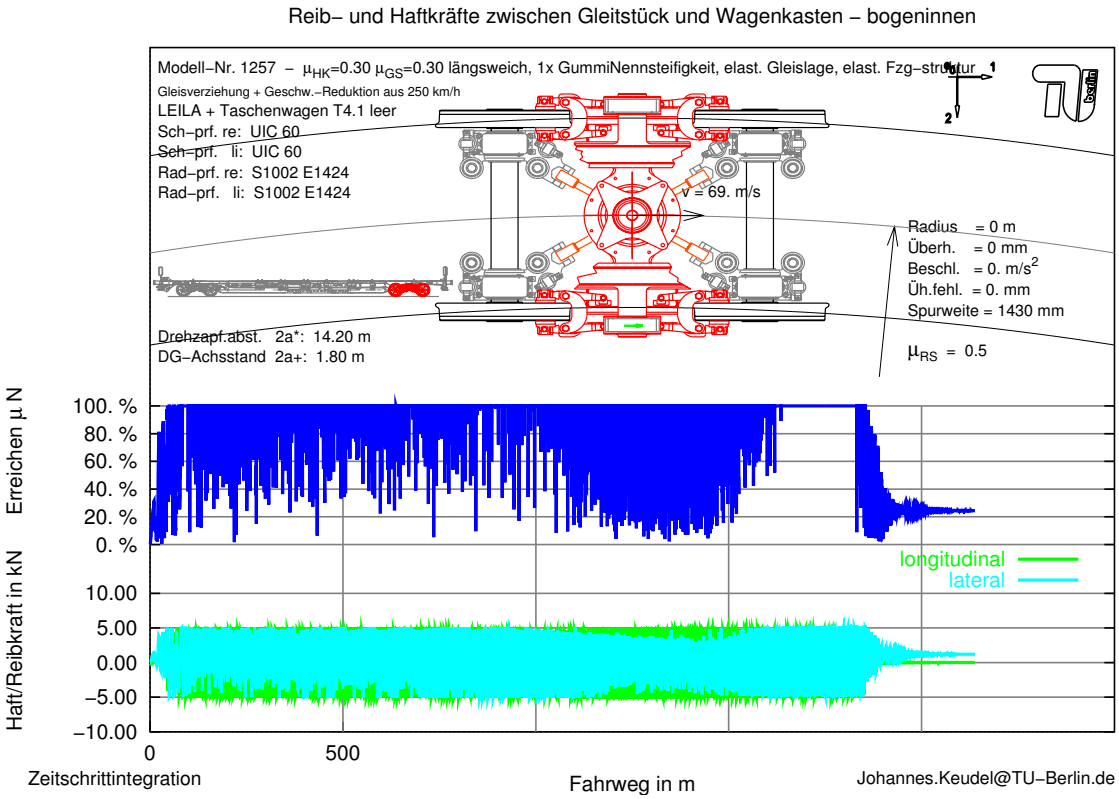


Abbildung B.34: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



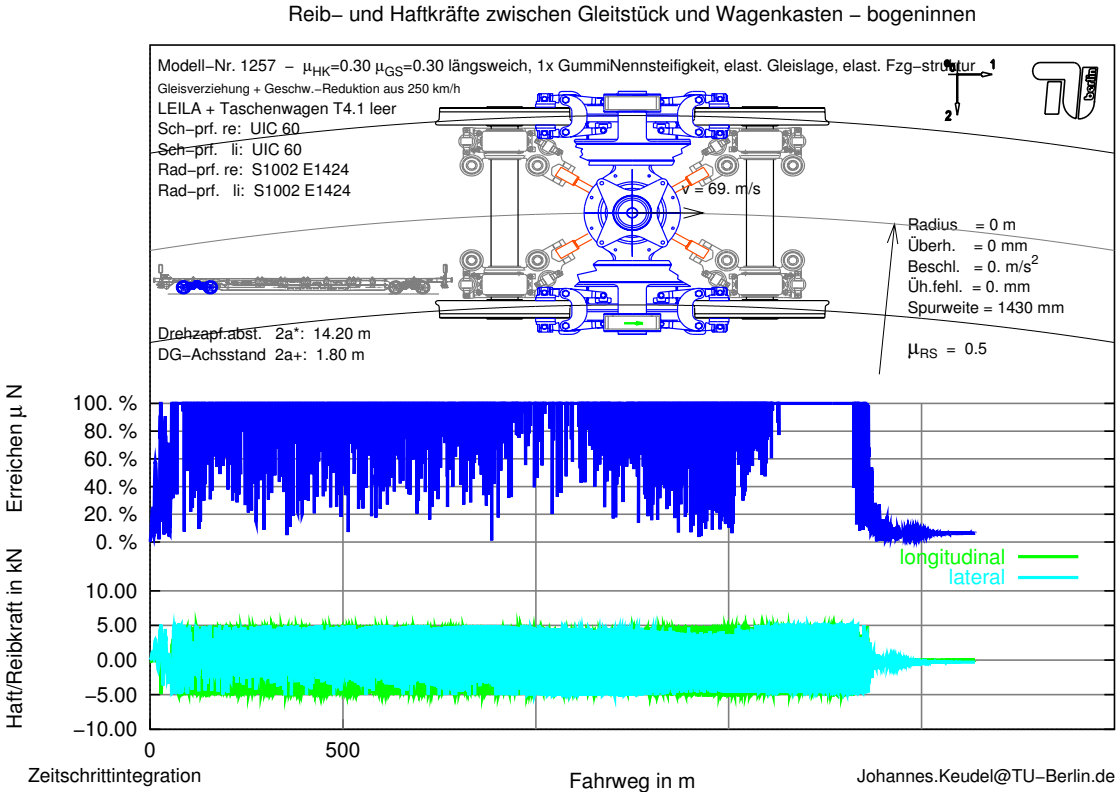


Abbildung B.35: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsweich, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.4 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

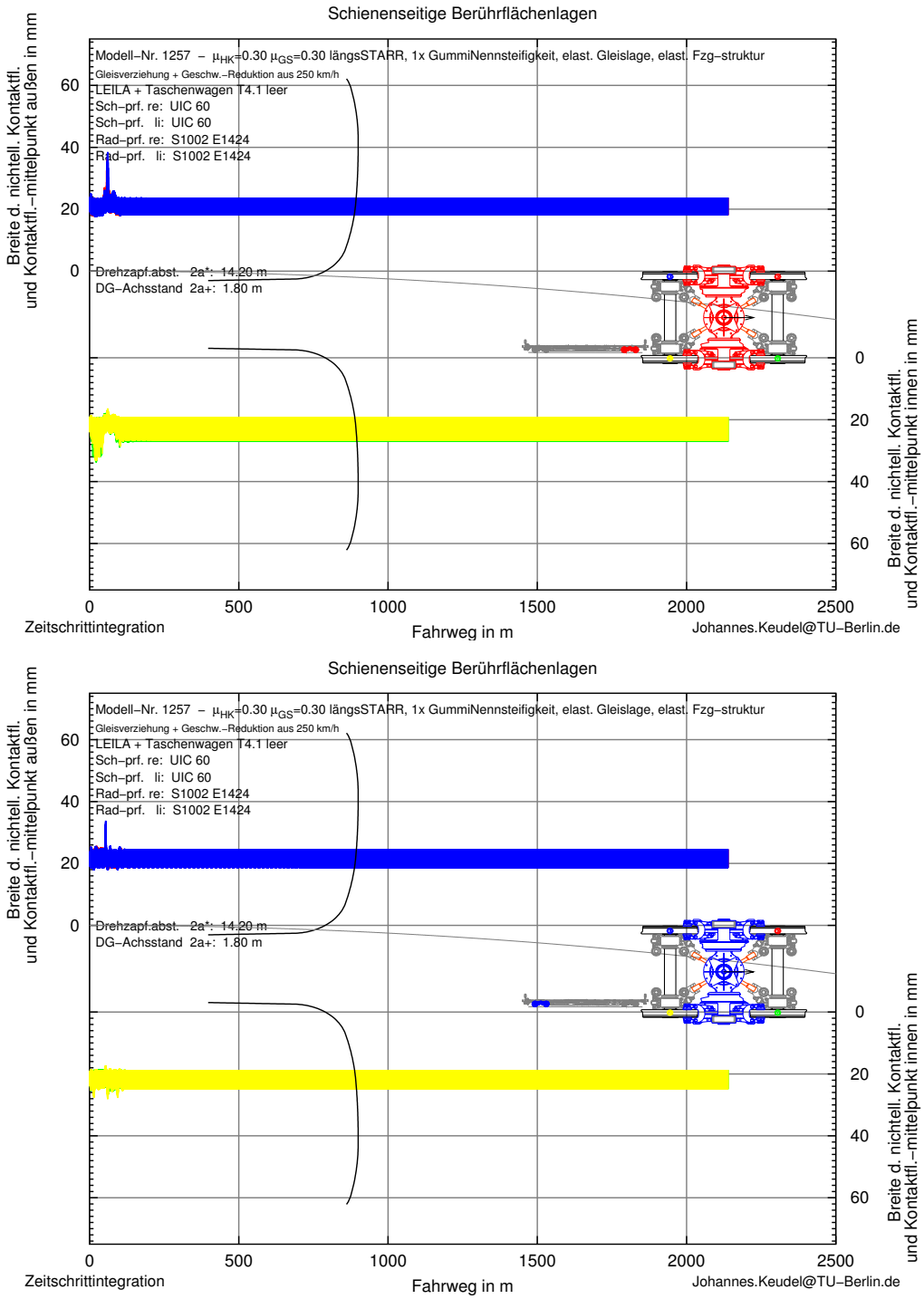
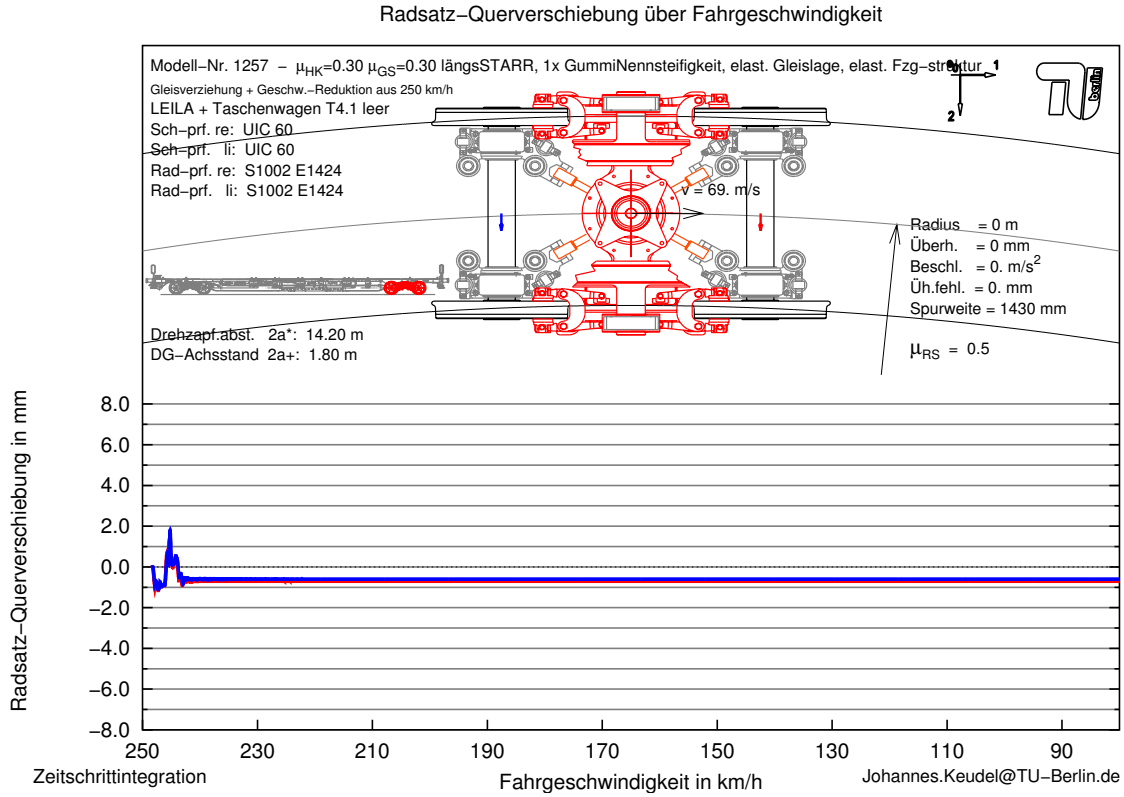


Abbildung B.36: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



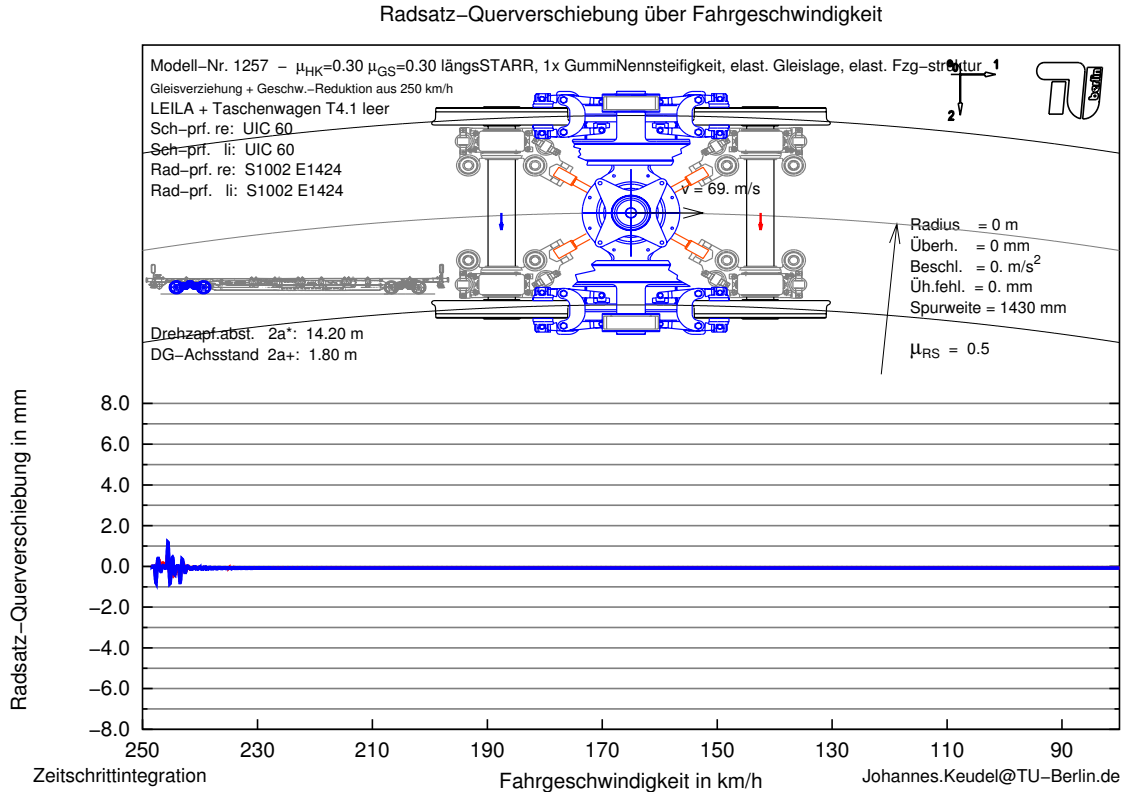
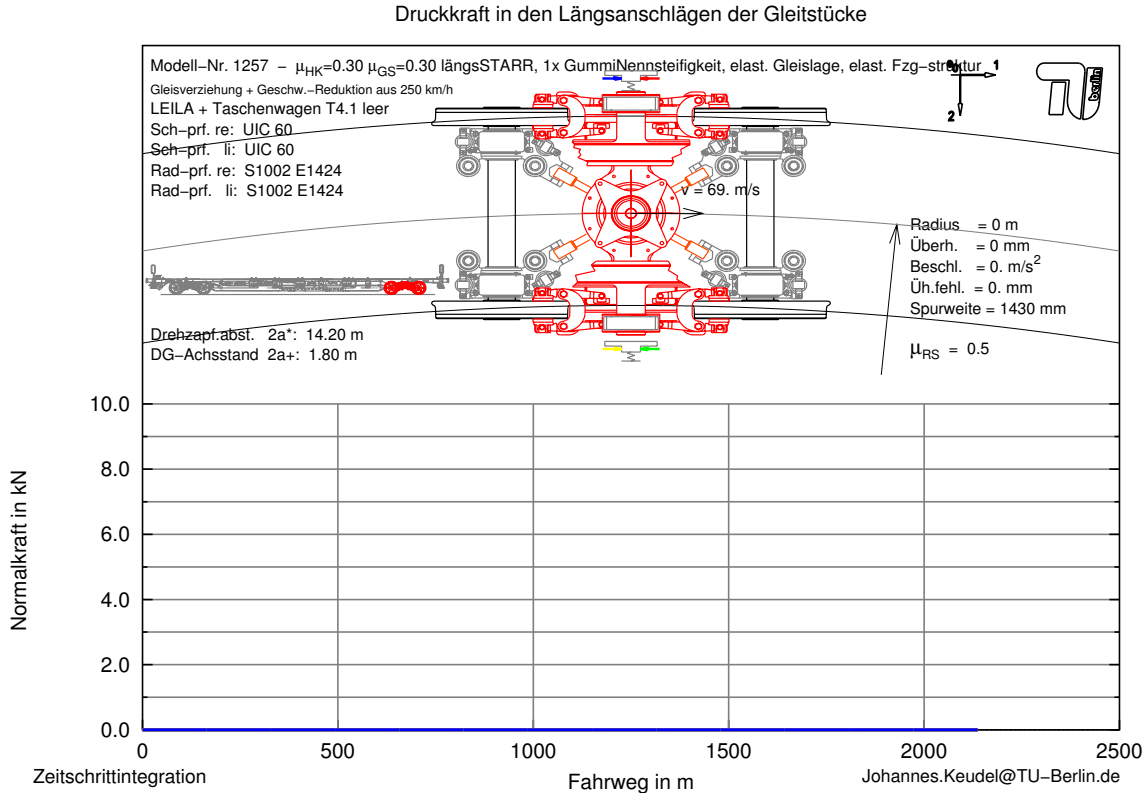


Abbildung B.37: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



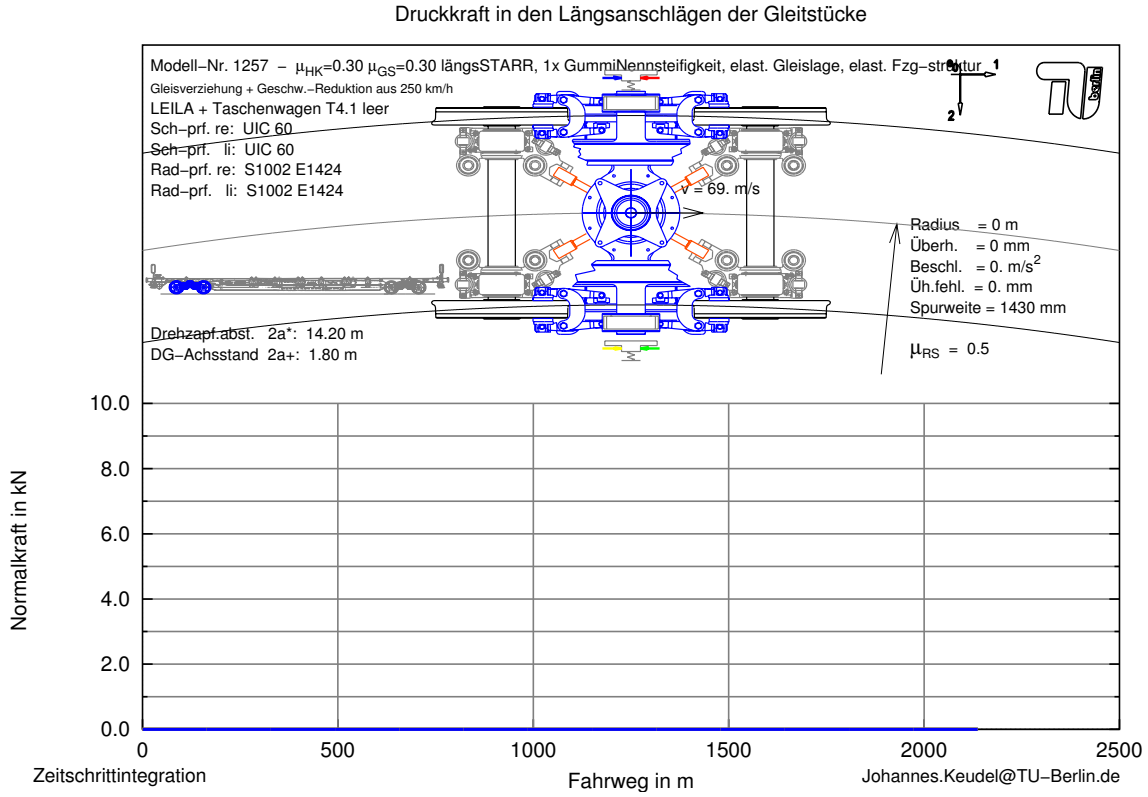
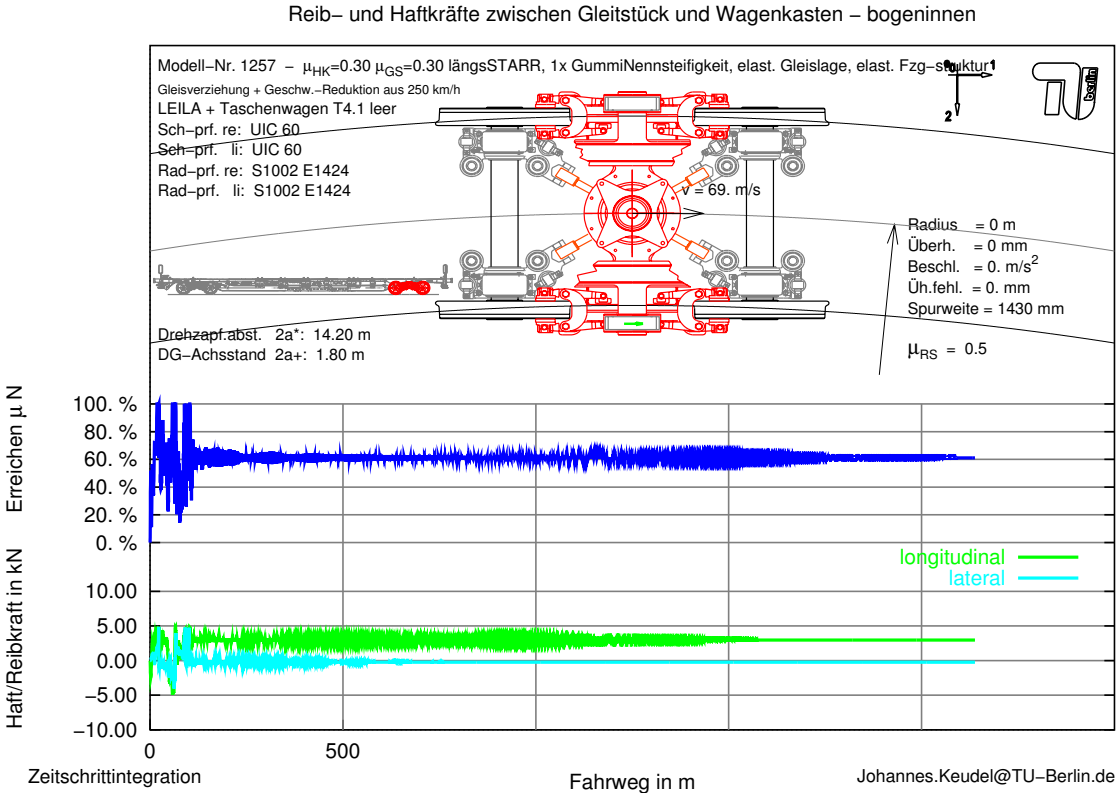


Abbildung B.38: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



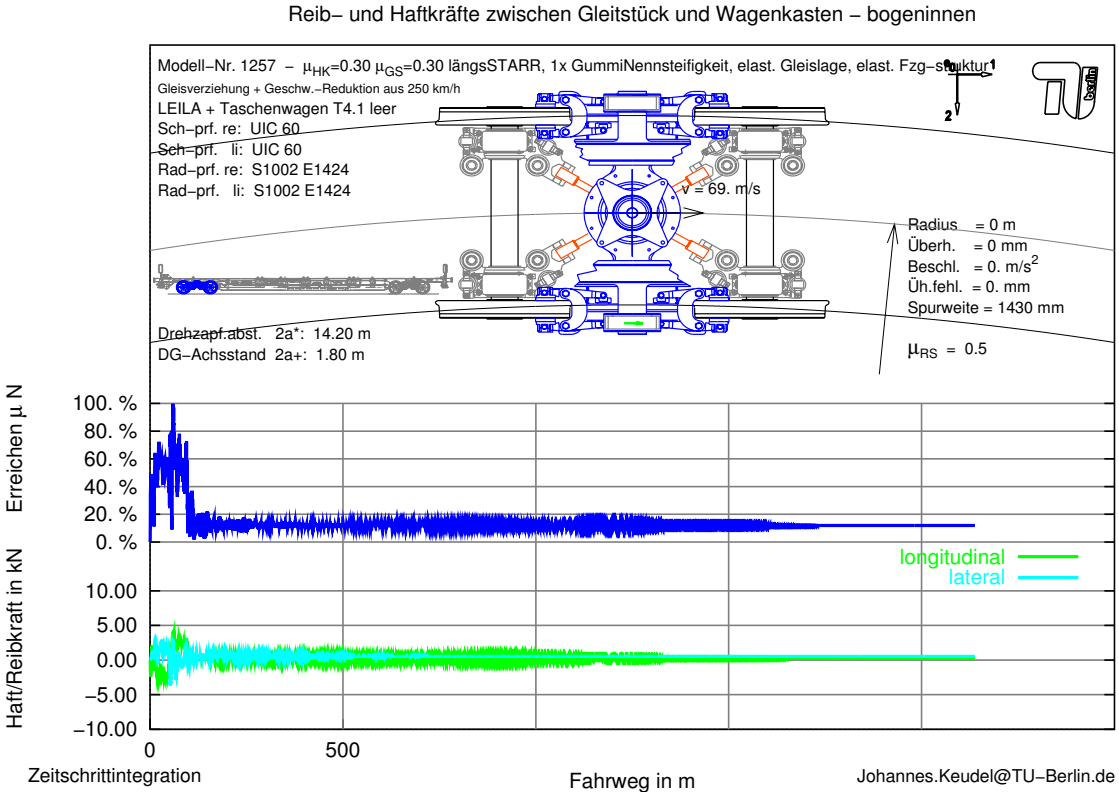


Abbildung B.39: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.5 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{HK}= 0.4, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

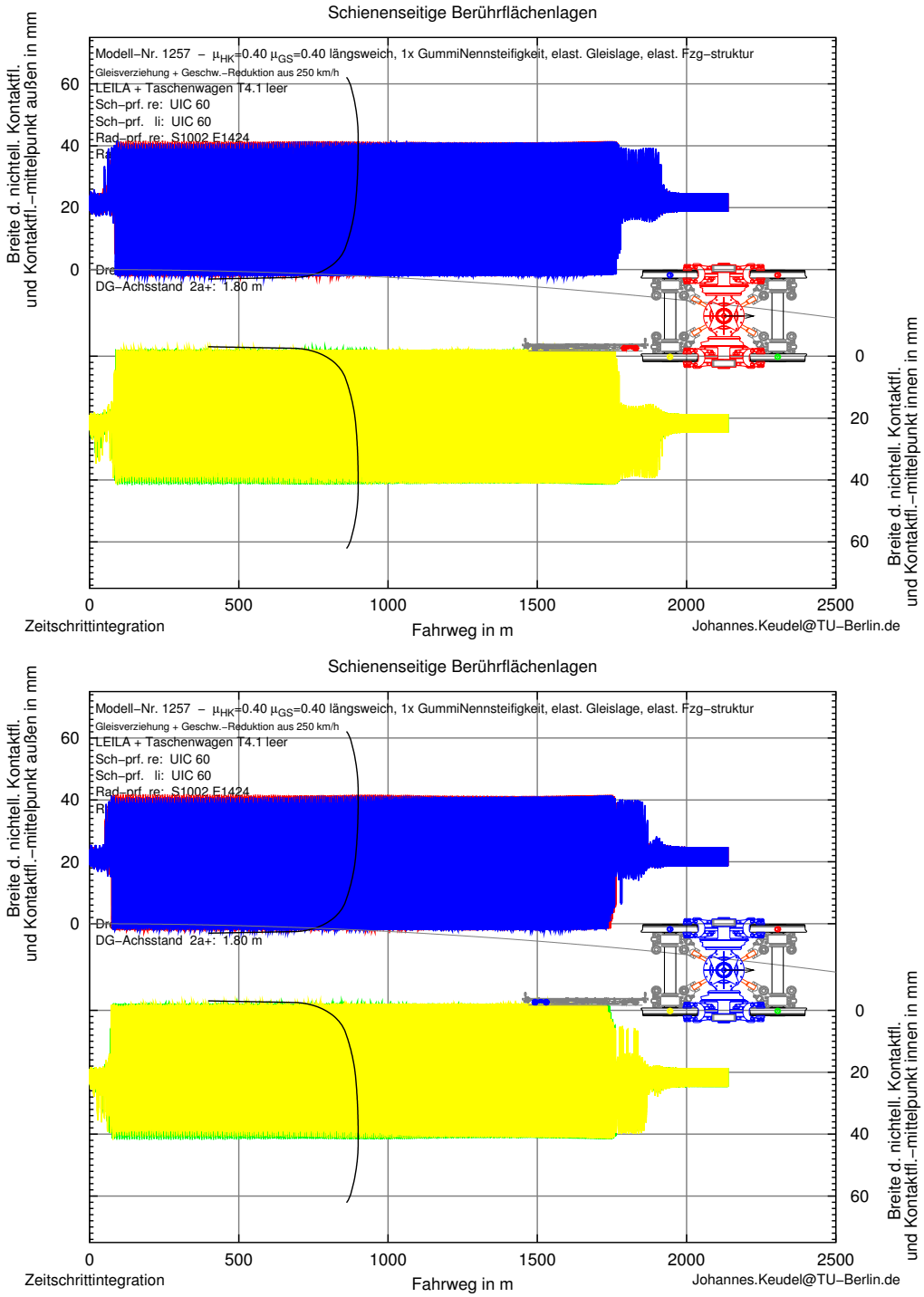
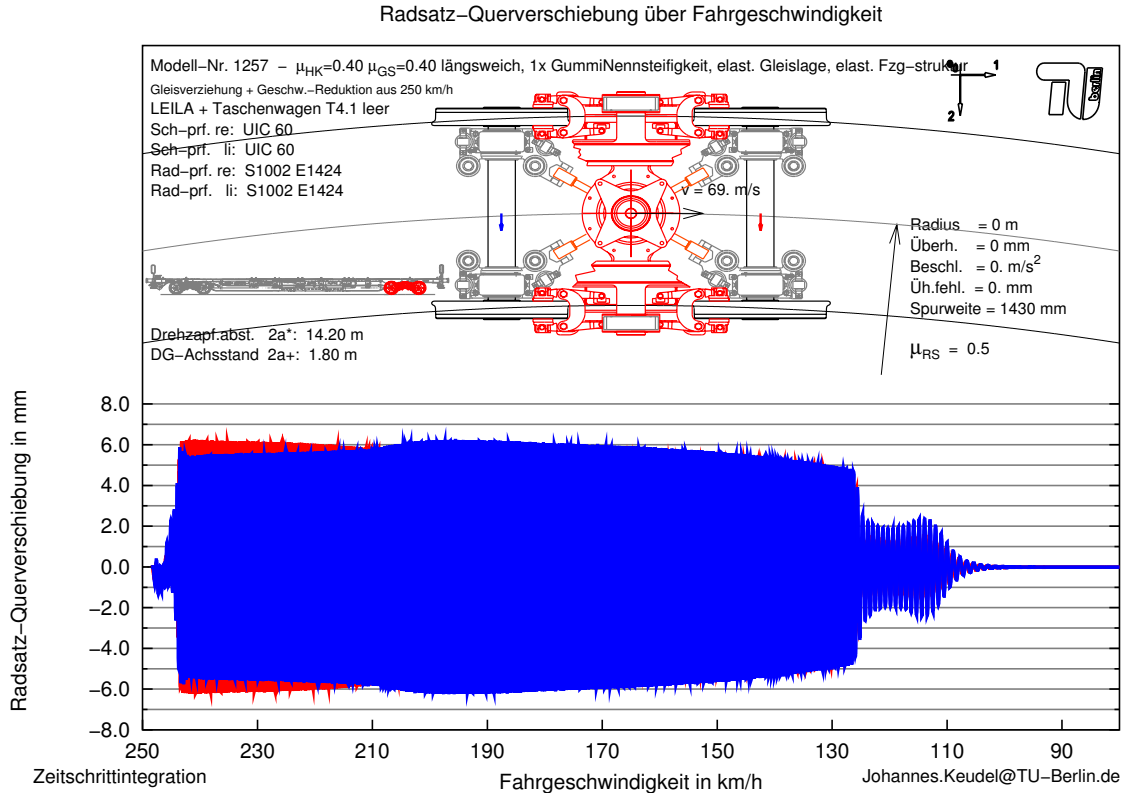


Abbildung B.40: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{HK}= 0.4, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



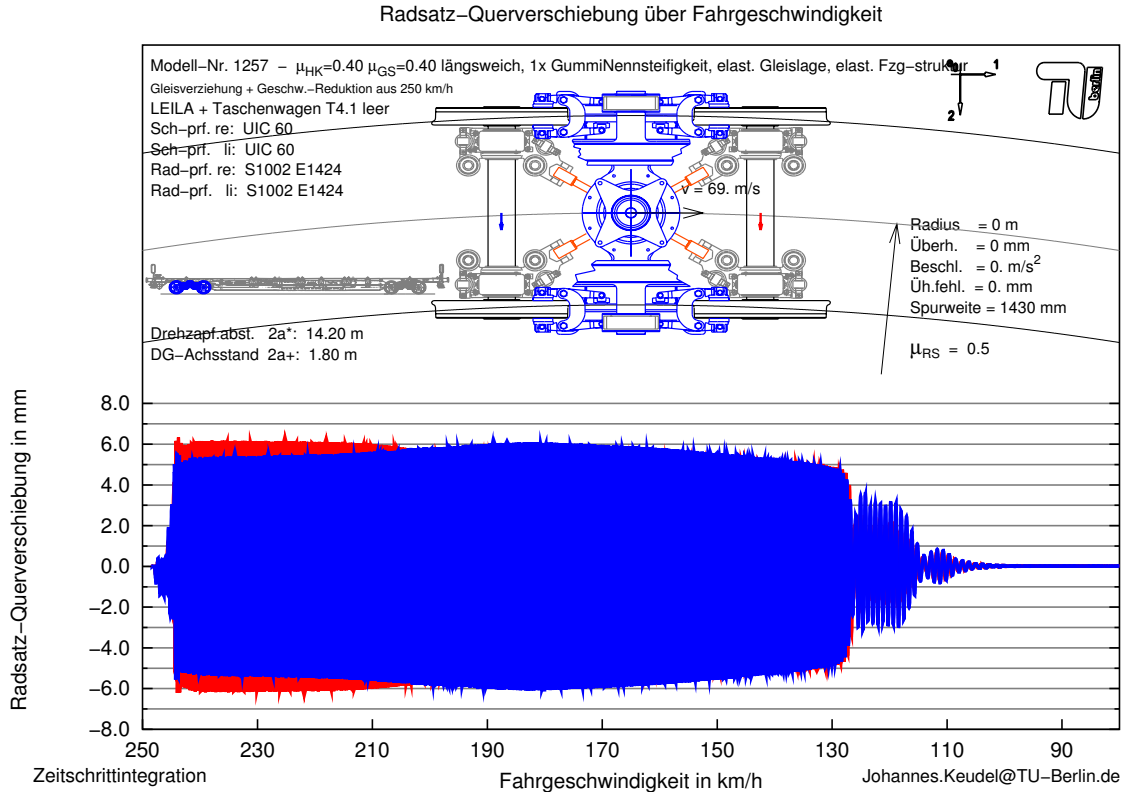
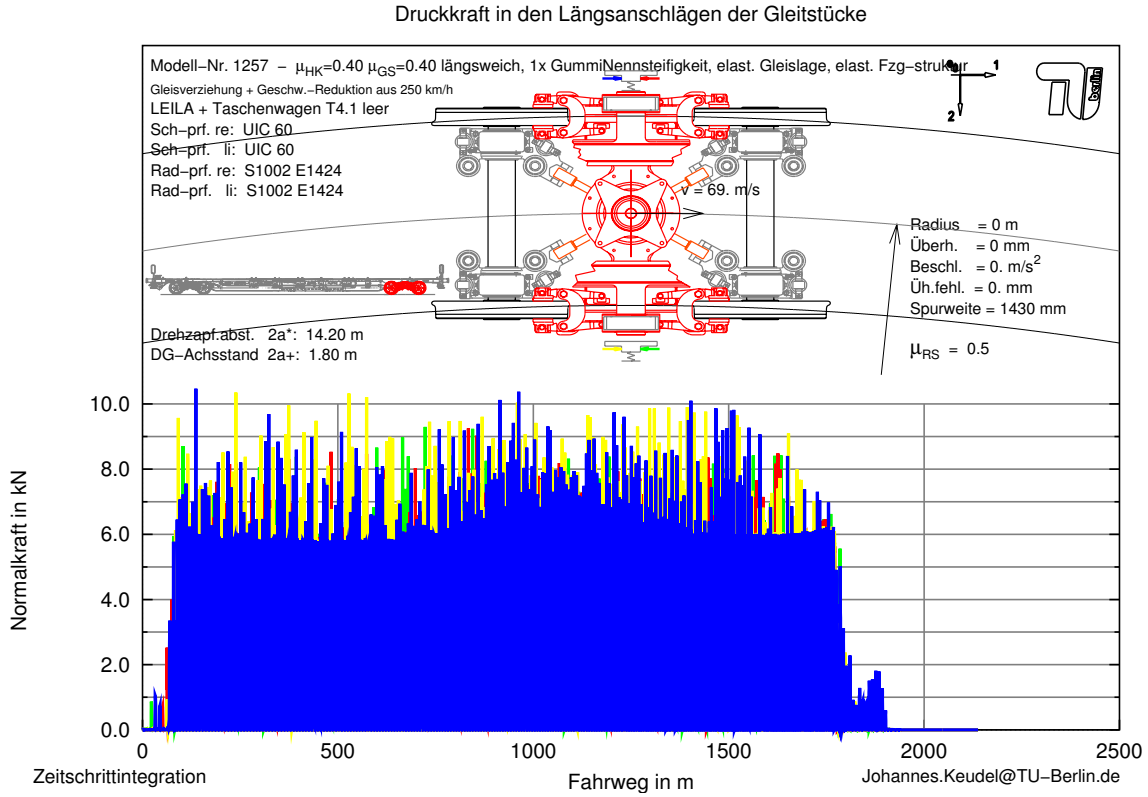


Abbildung B.41: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{HK}= 0.4, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



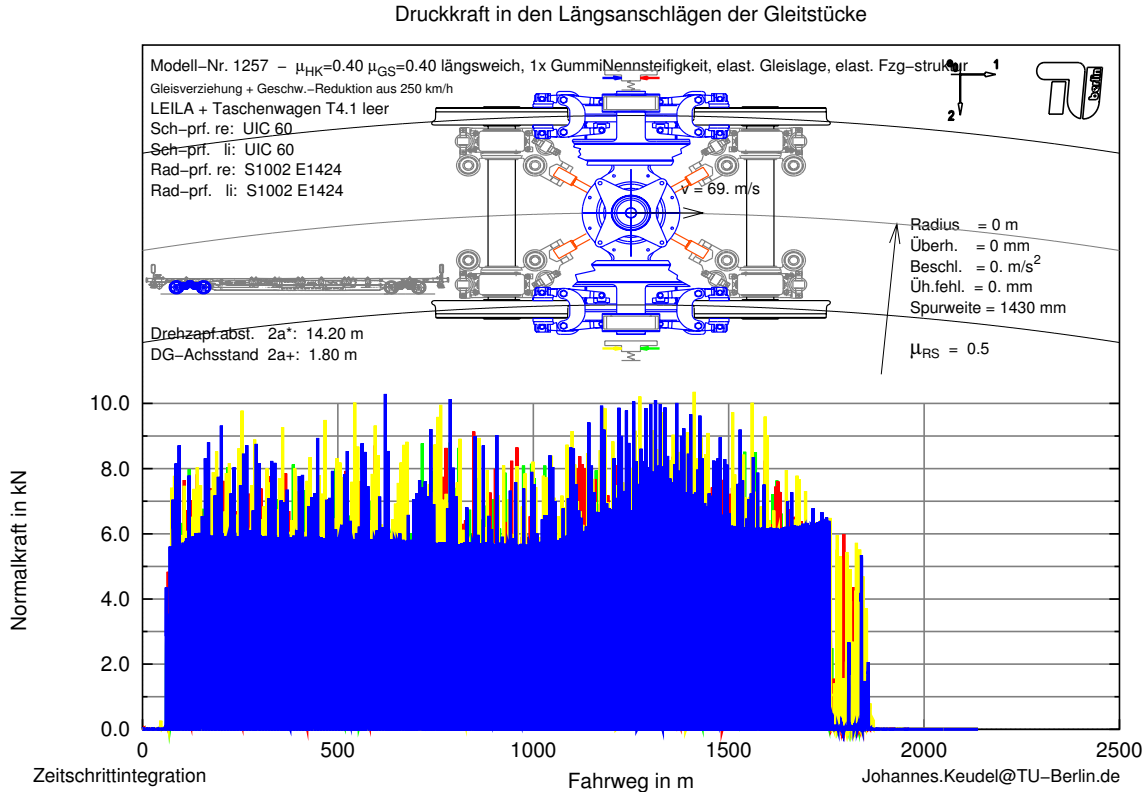
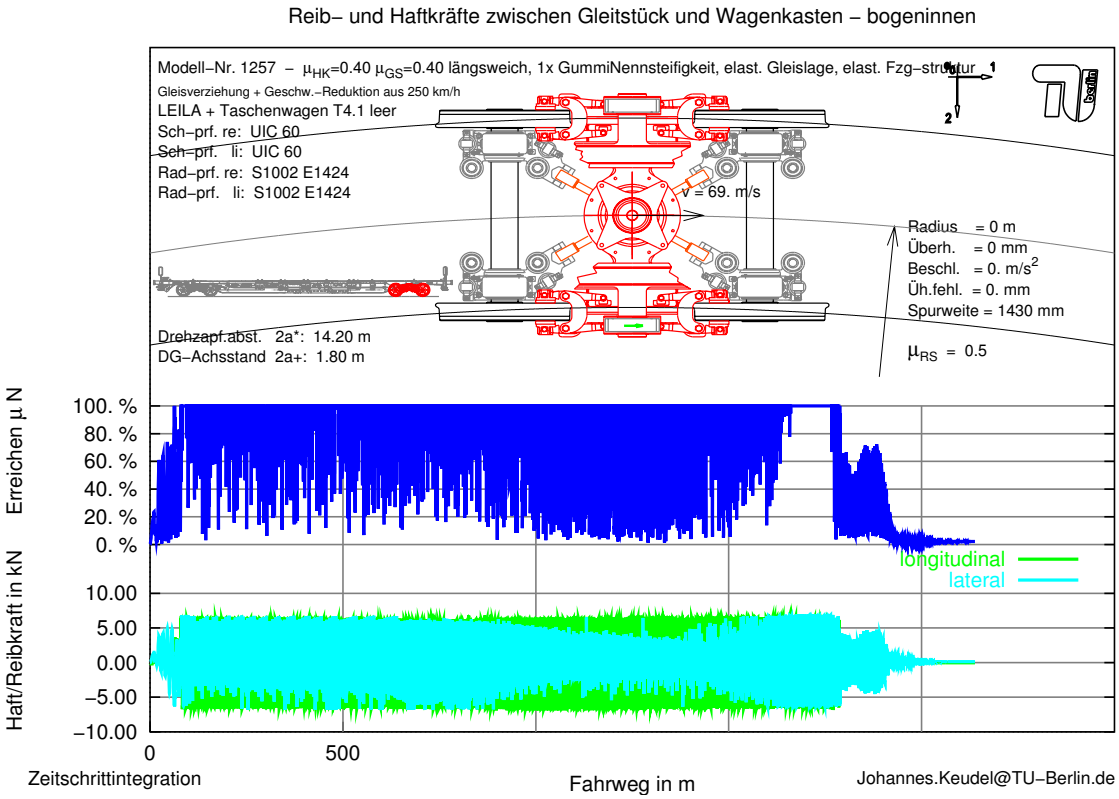


Abbildung B.42: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{HK}= 0.4, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



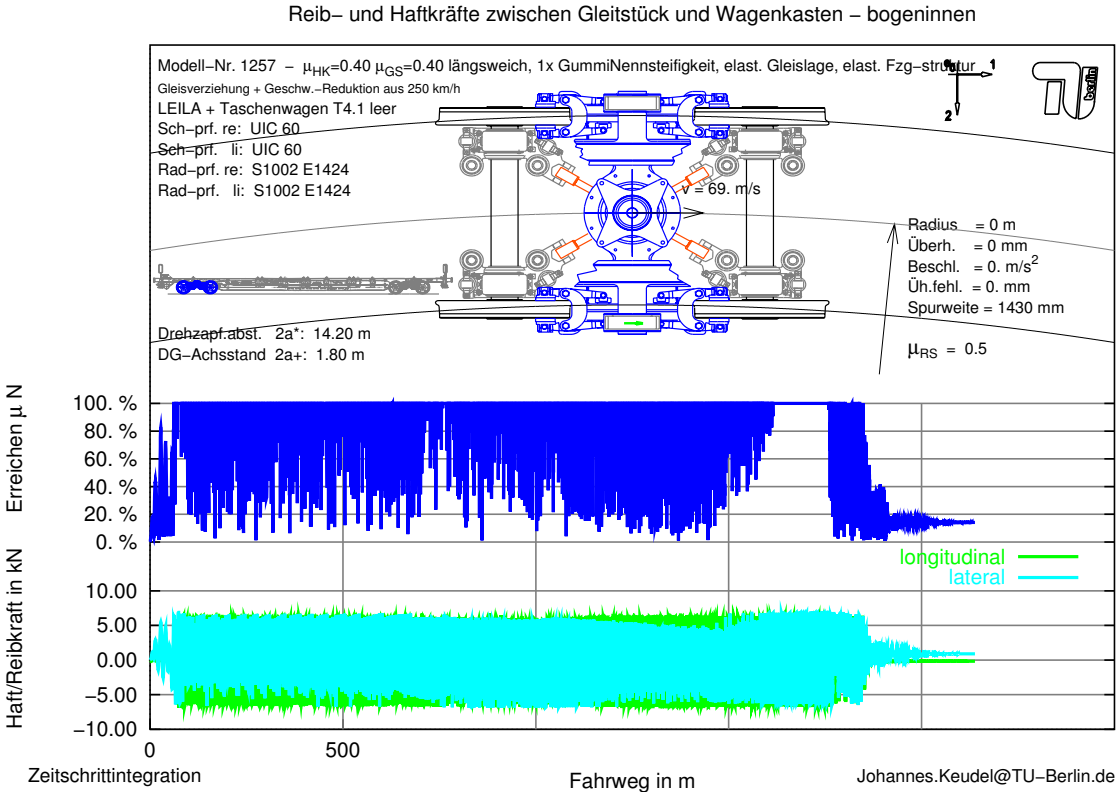


Abbildung B.43: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{HK}= 0.4, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.6 Taschenwagen T4.1 21.4t - 1.2x Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.5

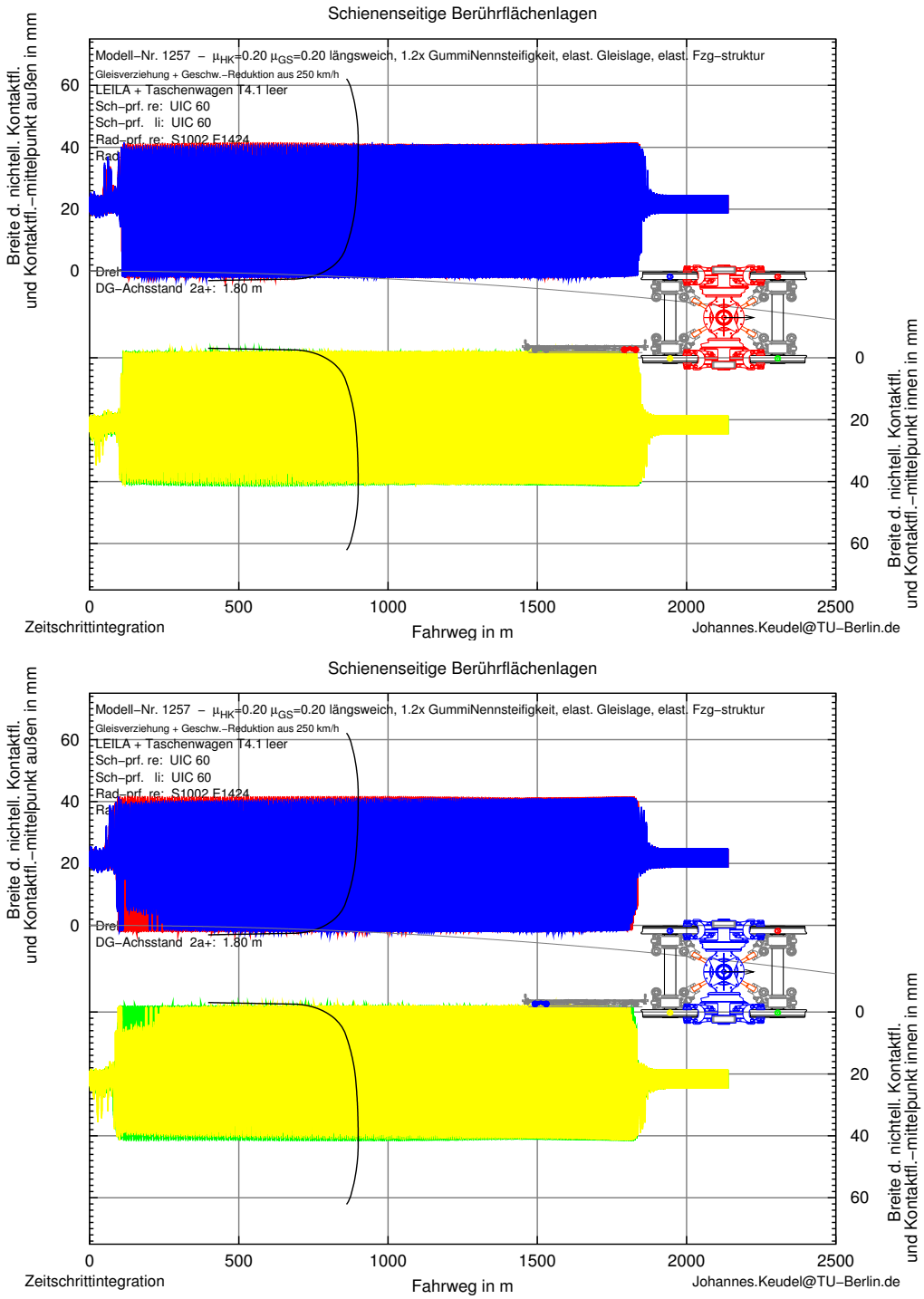
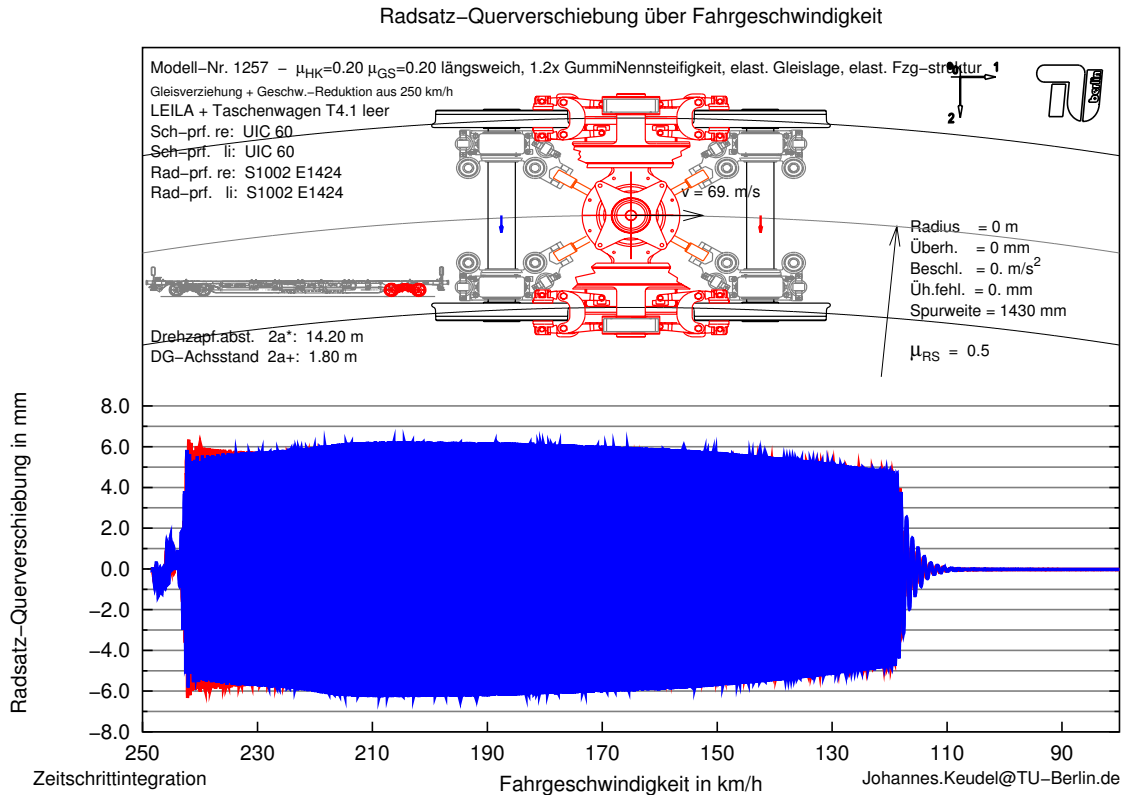


Abbildung B.44: Schienenberührlagen - 1.2x Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



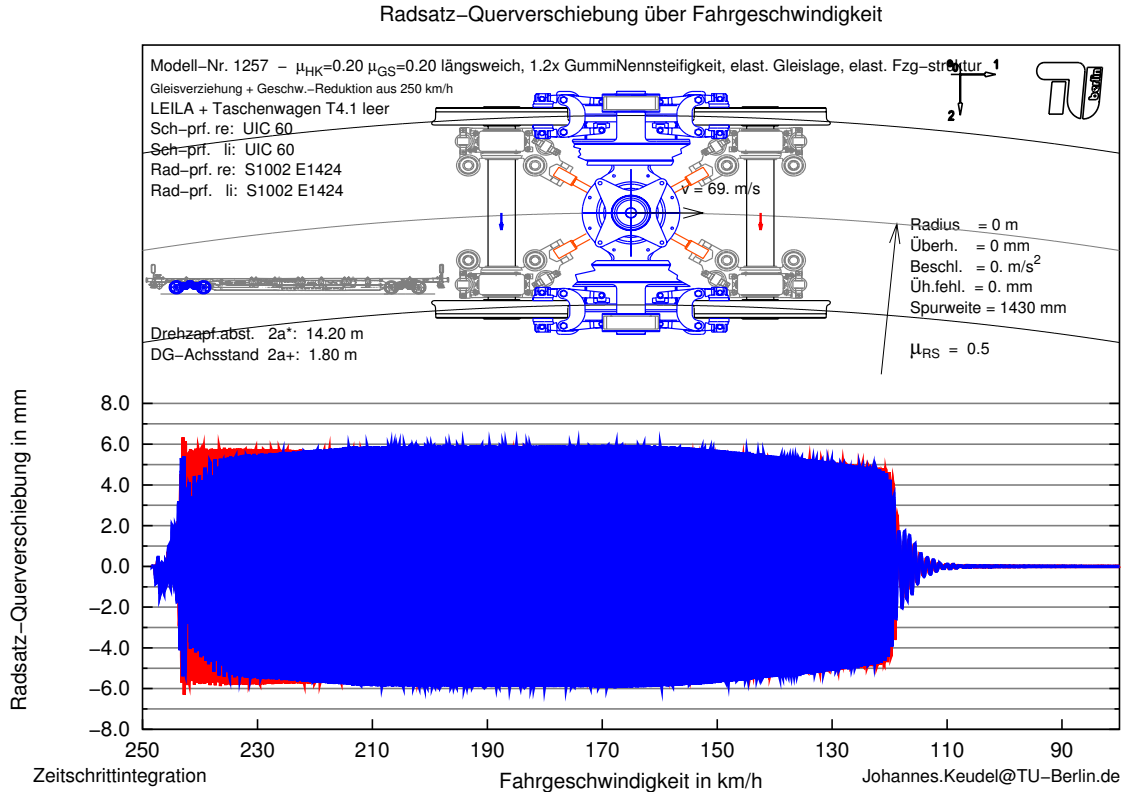
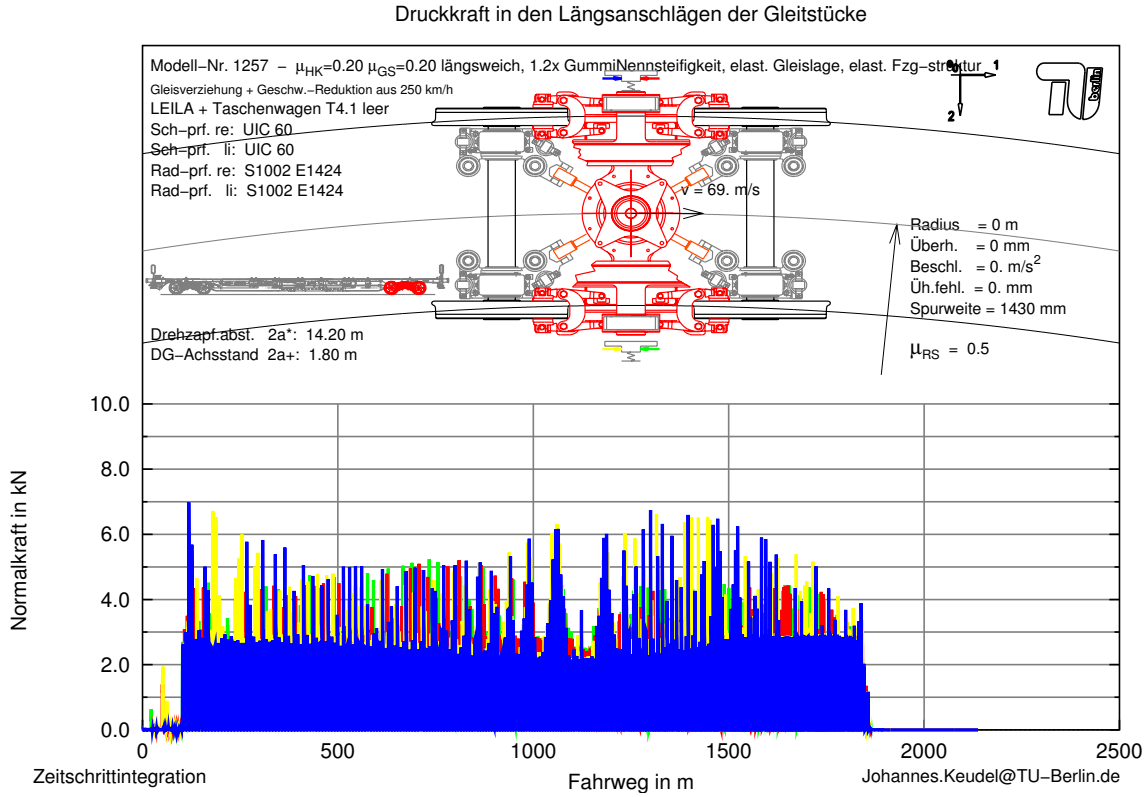


Abbildung B.45: RS-Querverschieb. über Geschw. - 1.2x Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



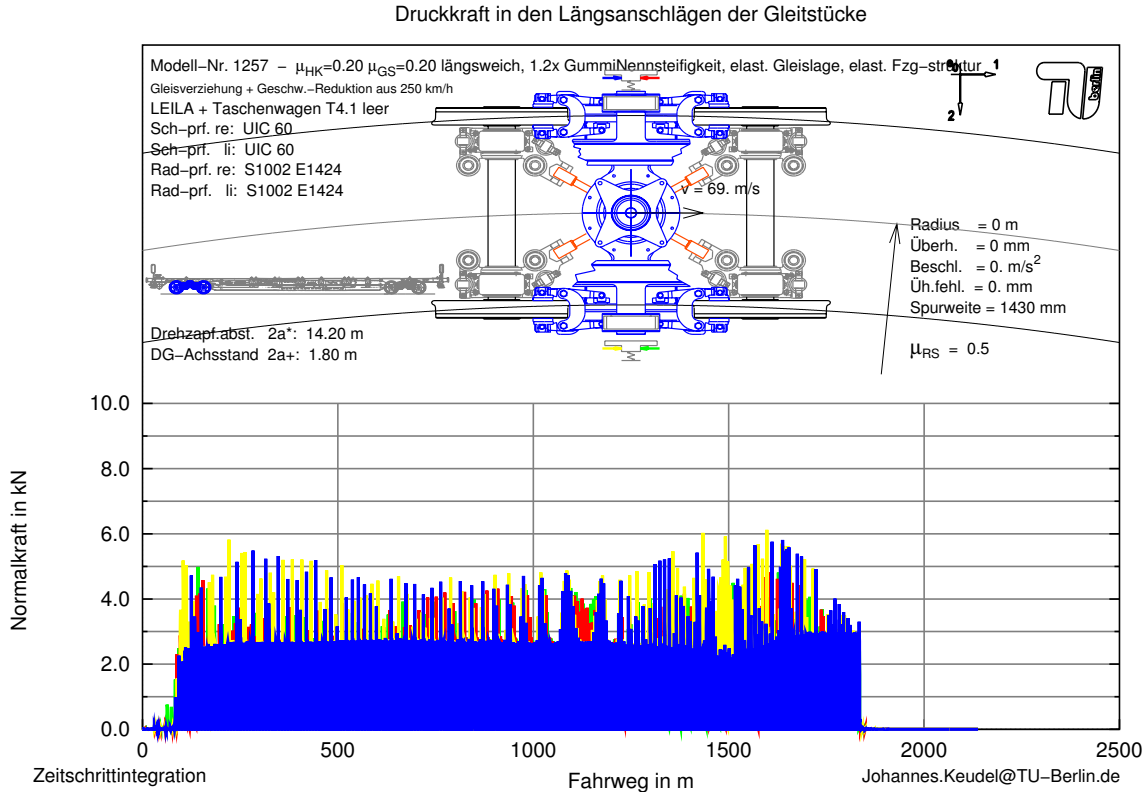
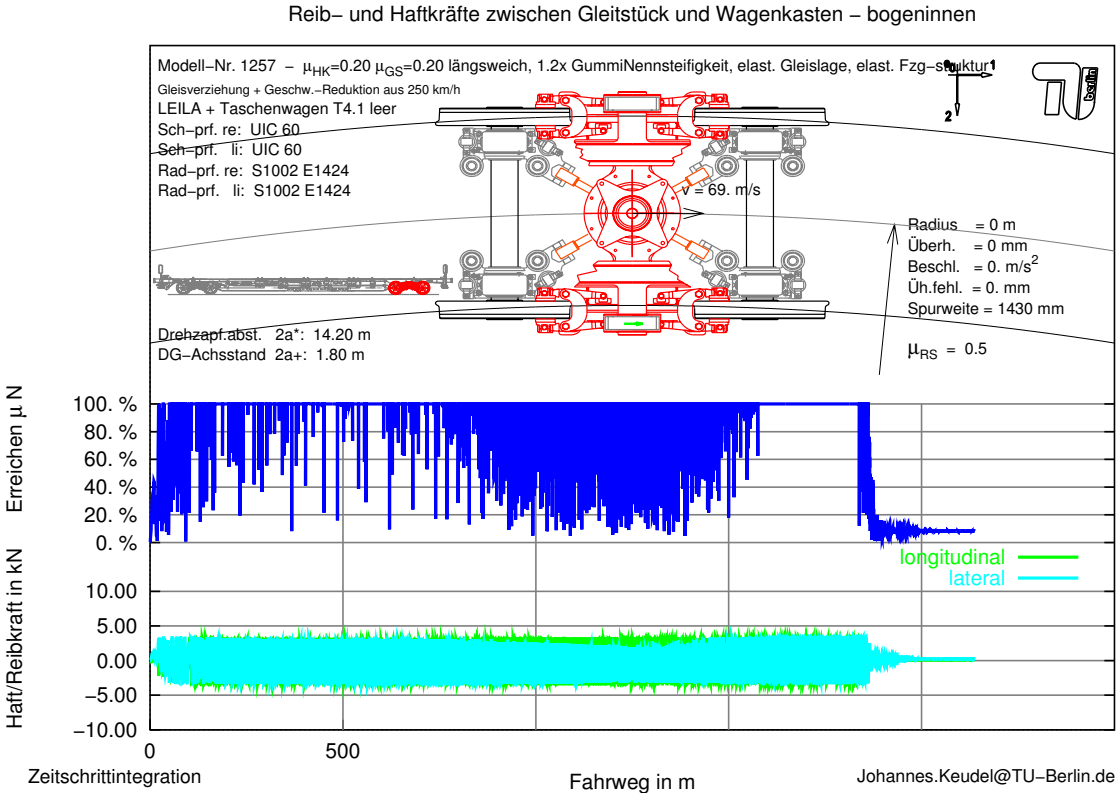


Abbildung B.46: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - 1.2x Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm



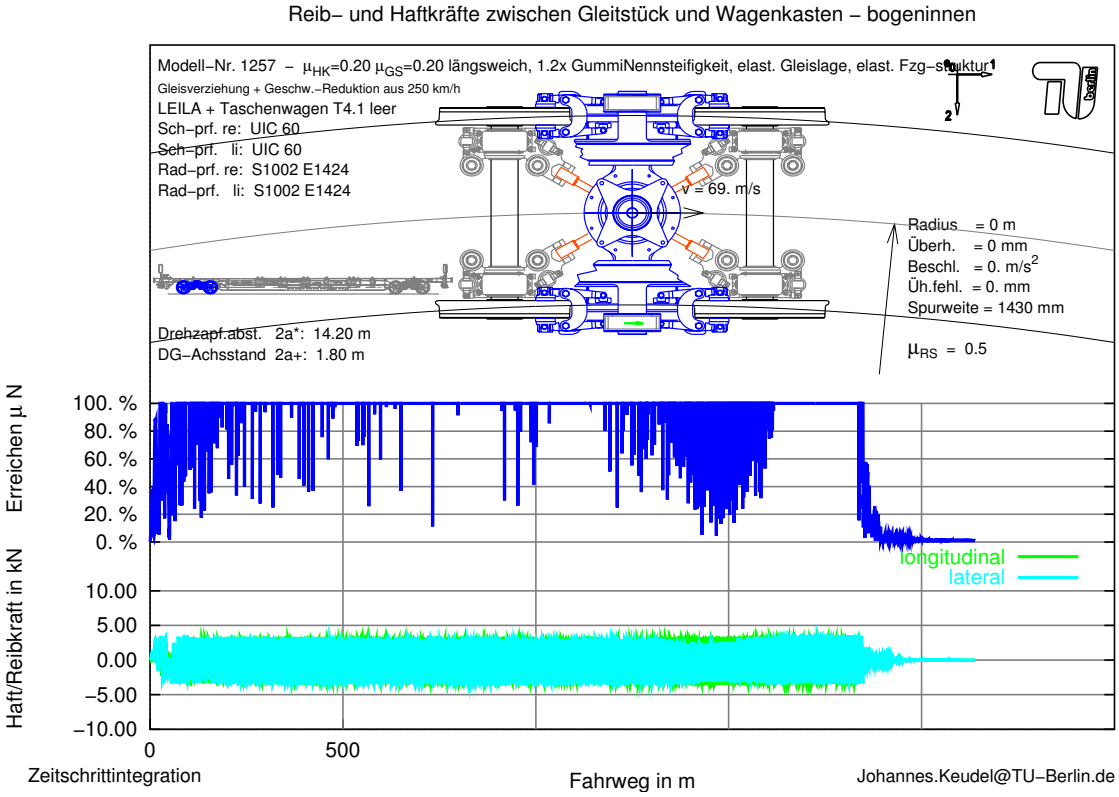


Abbildung B.47: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - 1.2x Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.2 längsweich, μ_{HK}= 0.2, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.5 R=—m v=70m/s uh=–mm

B.3.7 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 μ_{rs}=0.2

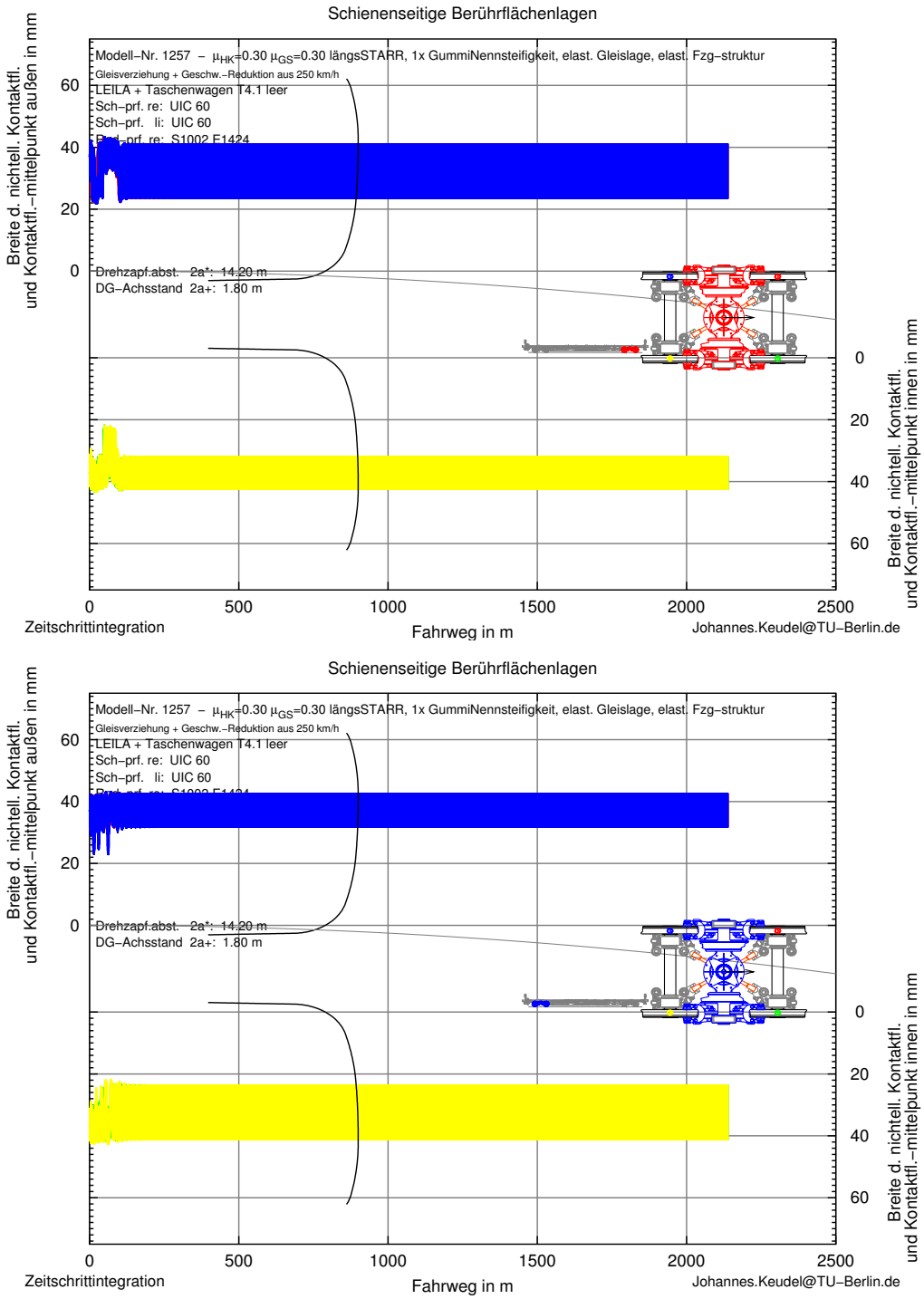
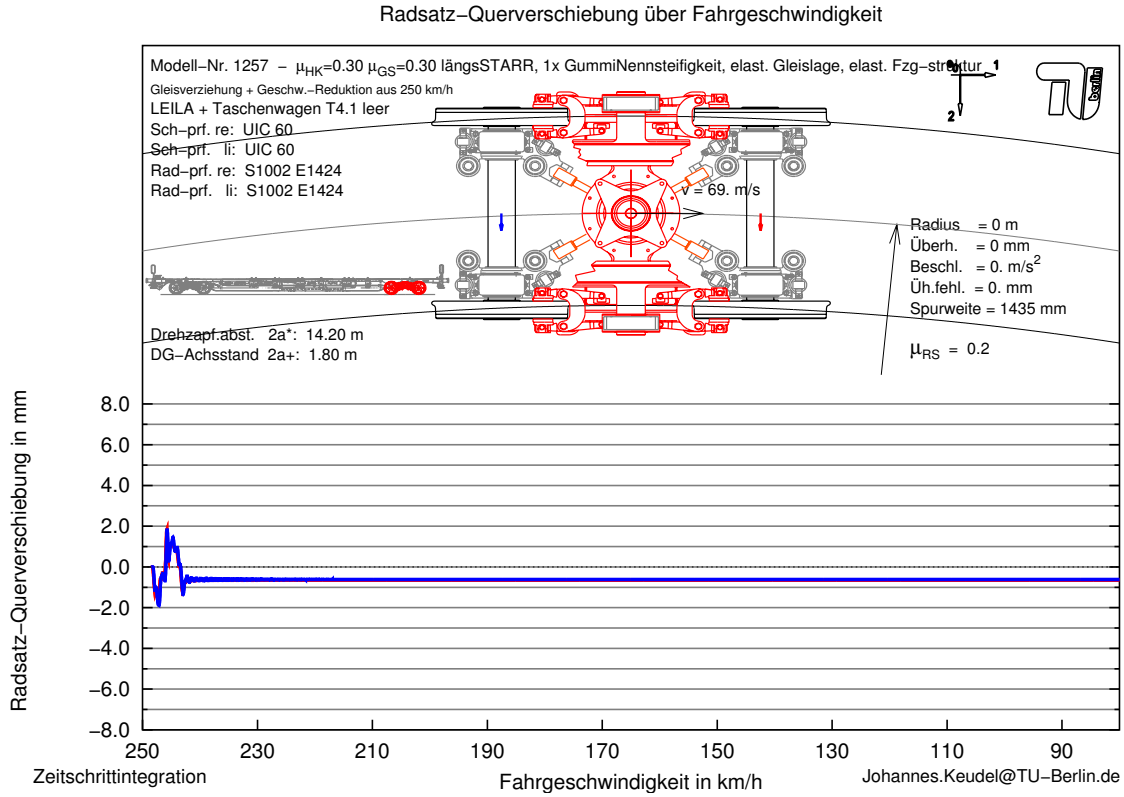


Abbildung B.48: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.2 R=—m v=70m/s uh=–mm



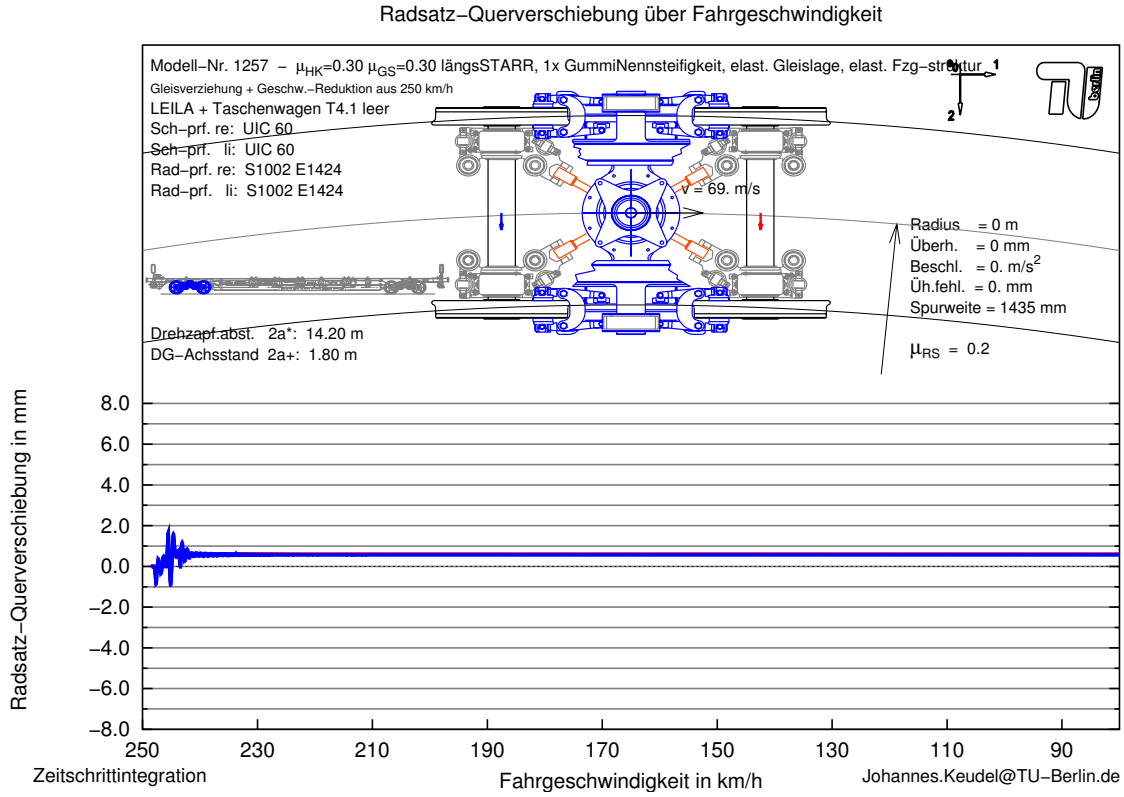
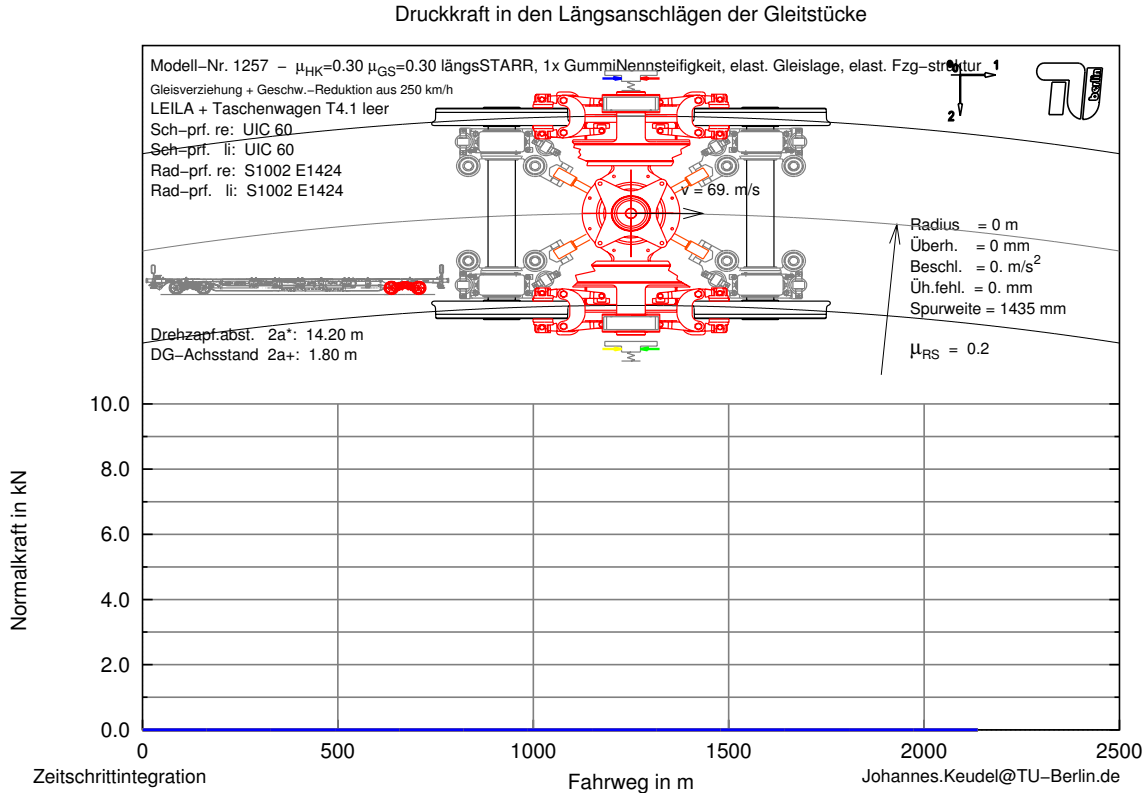


Abbildung B.49: RS-Querverschieb. über Geschw. - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.2 R=—m v=70m/s uh=–mm



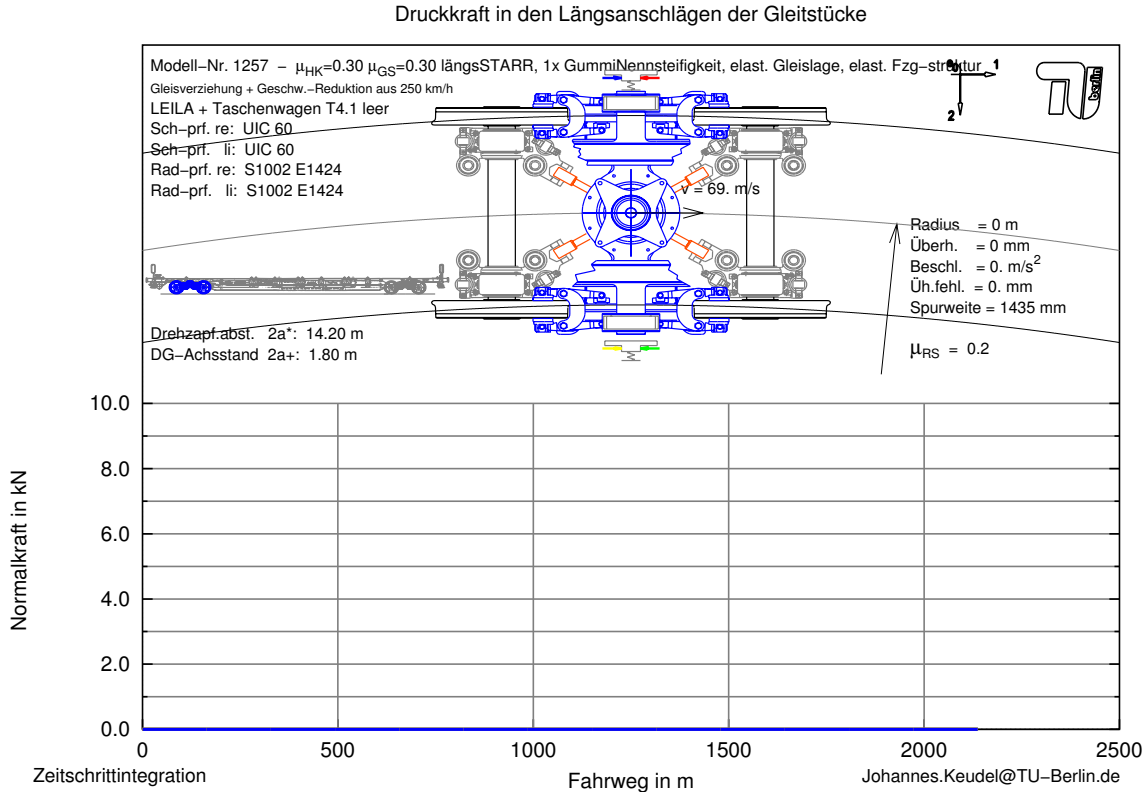
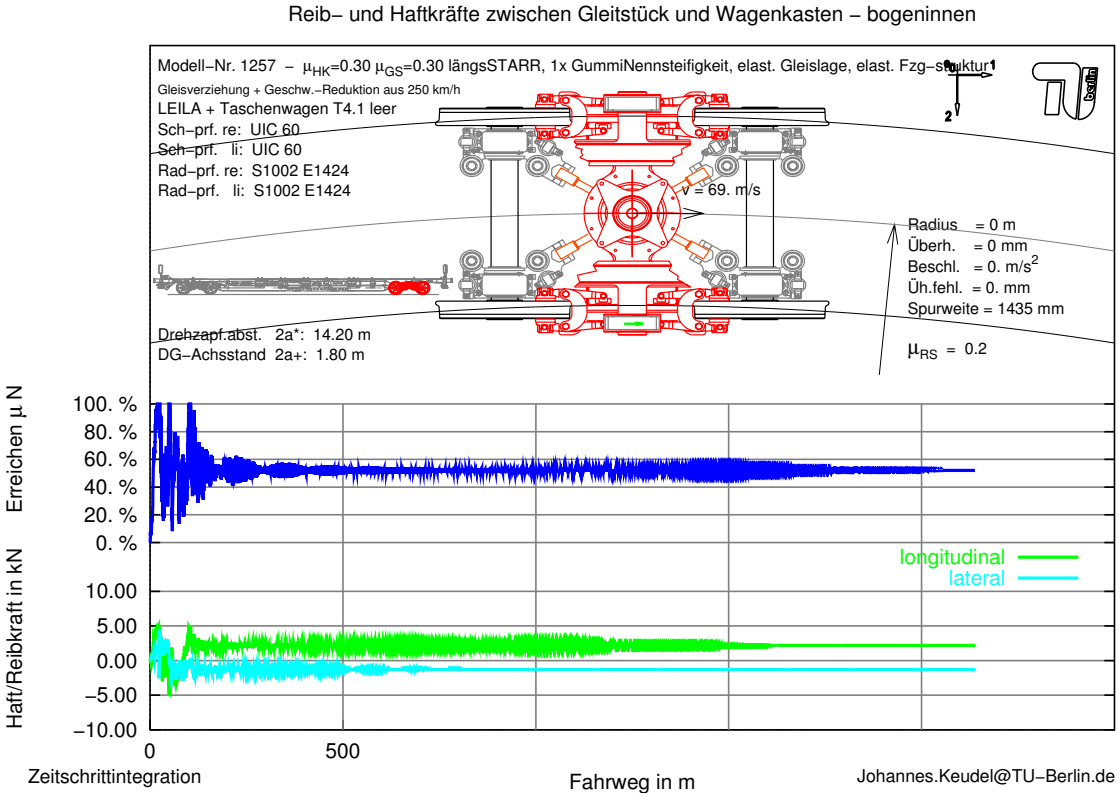


Abbildung B.50: Normalkraft im Längsanschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.2 R=—m v=70m/s uh=–mm



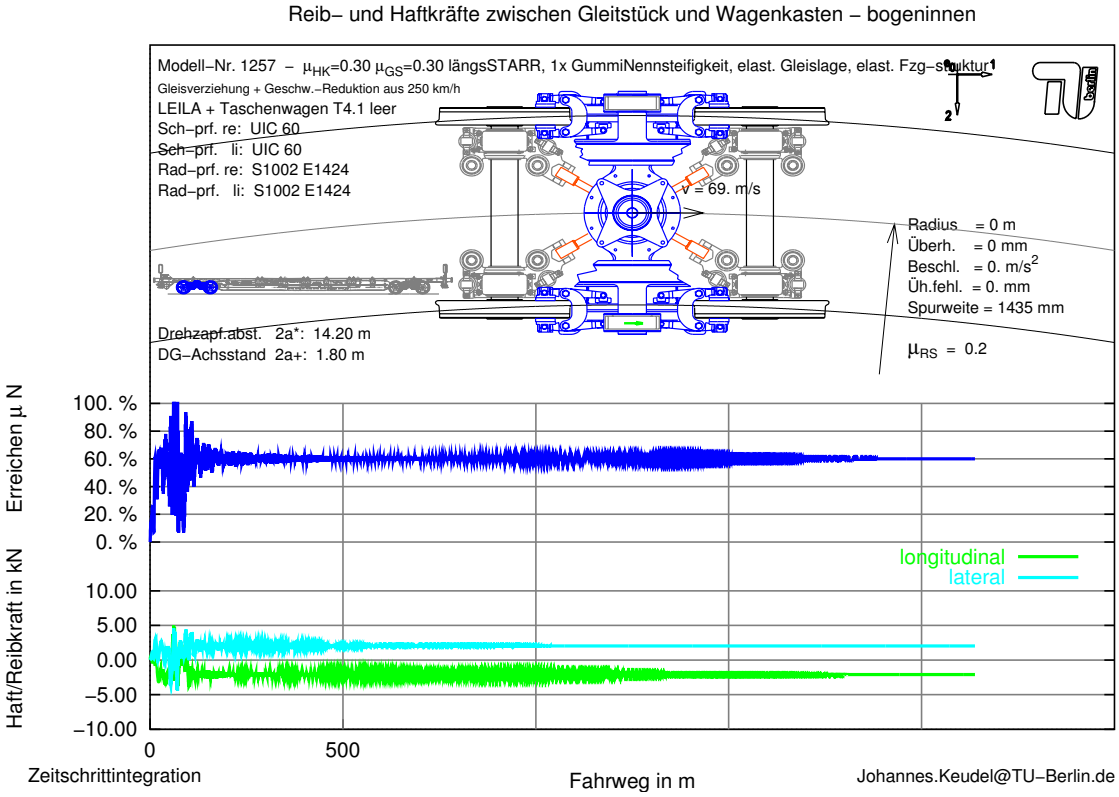


Abbildung B.51: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogeninneren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, μ_{GS}= 0.3 längsstarr, μ_{HK}= 0.3, elast. Wagenstruktur - μ_{rs}=0.2 R=—m v=70m/s uh=–mm