**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

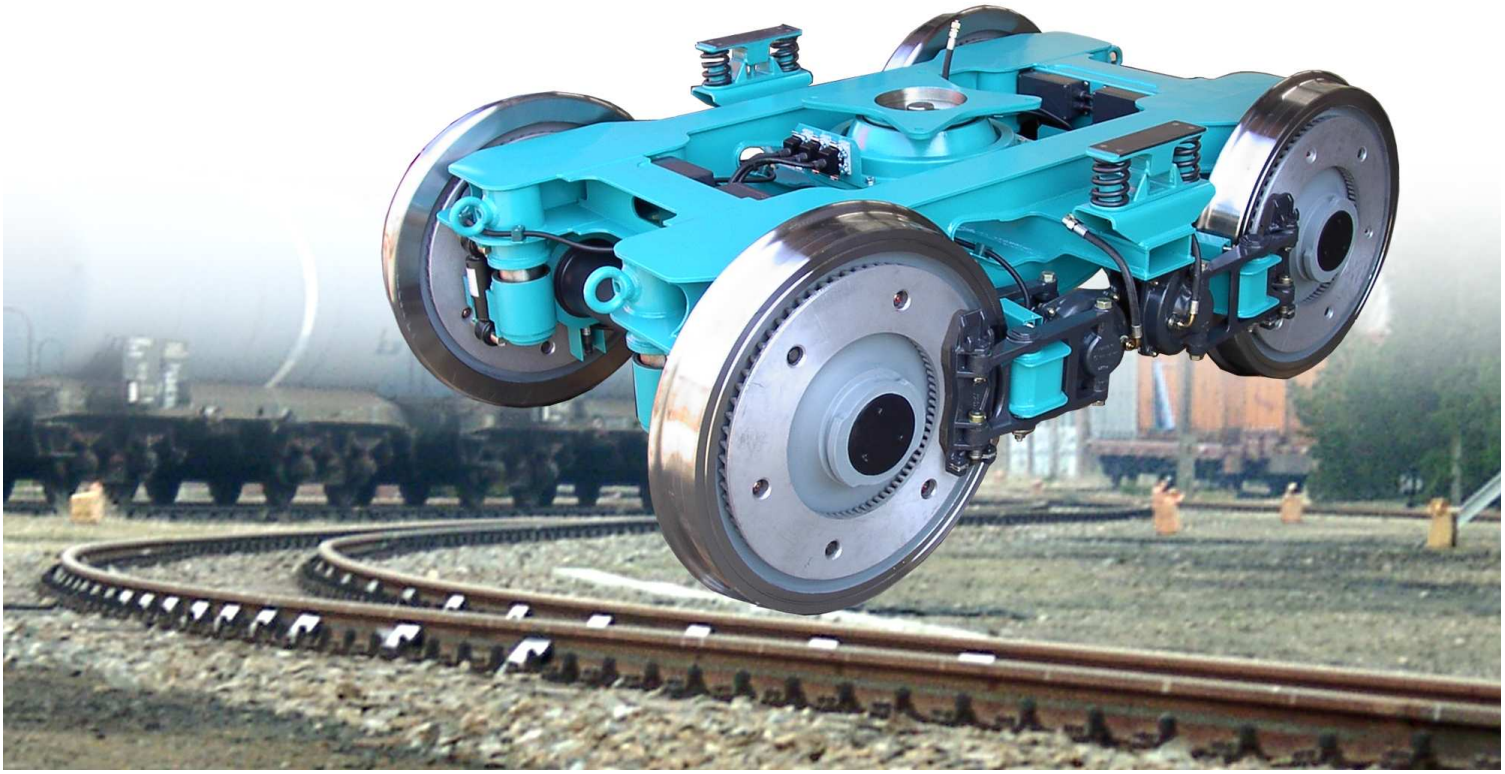
Fachgebiet Schienenfahrzeuge

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. 12/2004

# LEILA-DG
# Numerischer Nachweis der Entgleisungssicherheit



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

Stand: Juni 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 Modellierung** **3**

2.1 Fahrweg mit Gleisverwindung . . . . . 3

2.2 Fahrzeuge Kesselwagen + Taschenwagen T.4 mit LEILA-DG . . . . . 5

**3 Simulationsergebnisse** **8**

**4 Zusammenfassung und Fazit** **11**

**A Literaturverzeichnis** **13**

**B Grafische Darstellung der Simulationsrechnungen** **14**

B.1 Erläuterung zur grafischen Darstellung . . . . . 14

B.2 Ergebnisse Verwindungsfahrt Kesselwagen . . . . . 18

B.3 Ergebnisse Verwindungsfahrt Taschenwagen T4.1 . . . . . 34

| 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 |
| $e_0$ | Halber Meßkreisabstand | Rad/Schiene-Kontakt |
| $\mu_{rs}$ | 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 |
| $\Delta z_{rad}$ | Radanhebung | Rad/Schiene-Kontakt |
| $gp_{AL-DGy}$ | Laterales Spiel (gap) AL-Gehäuse - DG-Rahmen | Y25 Drehgestell |
| $\mu_{HK}$ | Reibungskoeffizient Halbkugelgelenk | Allg. Drehgestell-Parameter |
| $\mu_{GS}$ | Reibungskoeffizient Gleitstück | Allg. Drehgestell-Parameter |
| $r_{Ku}$ | Kugelradius der Drehpfanne | KE91 - Drehpfanne |
| $\mu_{HK}$ | 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 Entgleisungssicherheit 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 des LEILA-DG-Wagens inklusive der im Modell hinterlegten Kennlinien und Massen der einzelnen Komponenten etc. ist in KEUDEL [2] umfassend dargelegt.

## 1.2 Koordinatensystem

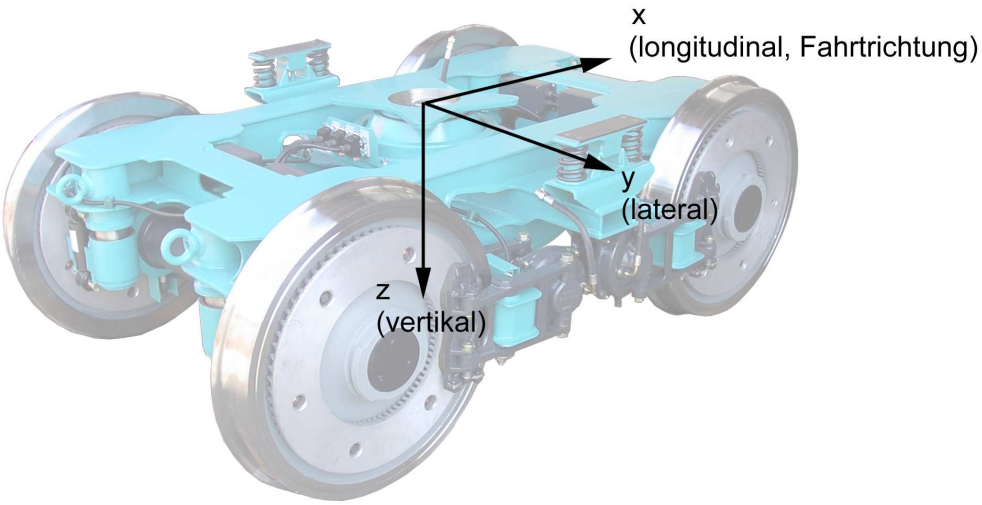



Abbildung 1.1: Allgemeines Koordinatensystem

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

# Modellierung

## 2.1 Fahrweg mit Gleisverwindung

Nach DIN PREN 14363 [3] respektive ORE B55/RP8 [4] ist die Entgleisungssicherheit eines Fahrzeugs durch eine langsame Fahrt über ein verwundenes Gleis nachzuweisen, wobei zunächst das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Radkraft Y/Q als Beurteilungsgröße herangezogen wird und bei etwaiger Grenzwertüberschreitung in zweiter Instanz die Radanhebung beurteilt wird.
Die Gleisverwindung ist dabei so bemessen, dass sie die im realen Schienennetz auftretenden Gleisneigungen sowie zusätzlich die zulässigen Fehler der Gleislage berücksichtigt. Diese Gleisgrenzverwindung ist abhängig vom Radstand im Drehgestell sowie dem Drehzapfenabstand und stellt somit eine fahrzeugindividuelle Größe dar.
Wie die Abbildung 2.1 zeigt, besteht die Trassierung des Versuchsgleises aus einem Geradenabschnitt, der nach einem Übergangsbogen in einen Vollbogen mit einem Bogenradius von $r_B = 150$ m übergeht. Dabei wird die bogenäußere Schiene während des Übergangsbogens zunächst in einer Rampe auf $u = 45$ mm überhöht. Im Vollbogen vollzieht sich die Gleisverwindung, indem die bogenäußere Schiene mit einer Neigung von $g = -3$ ‰ in eine negative Überhöhung von $u = -45$ mm überführt wird. In Abhängigkeit der Beschaffenheit der zu prüfenden Fahrzeuge müssen für das Drehgestell sowie den Fahrzeugaufbau nach DIN PREN 14363 [3] zusätzlich zur trassierten Steigung größere Verwindungen berücksichtigt werden.

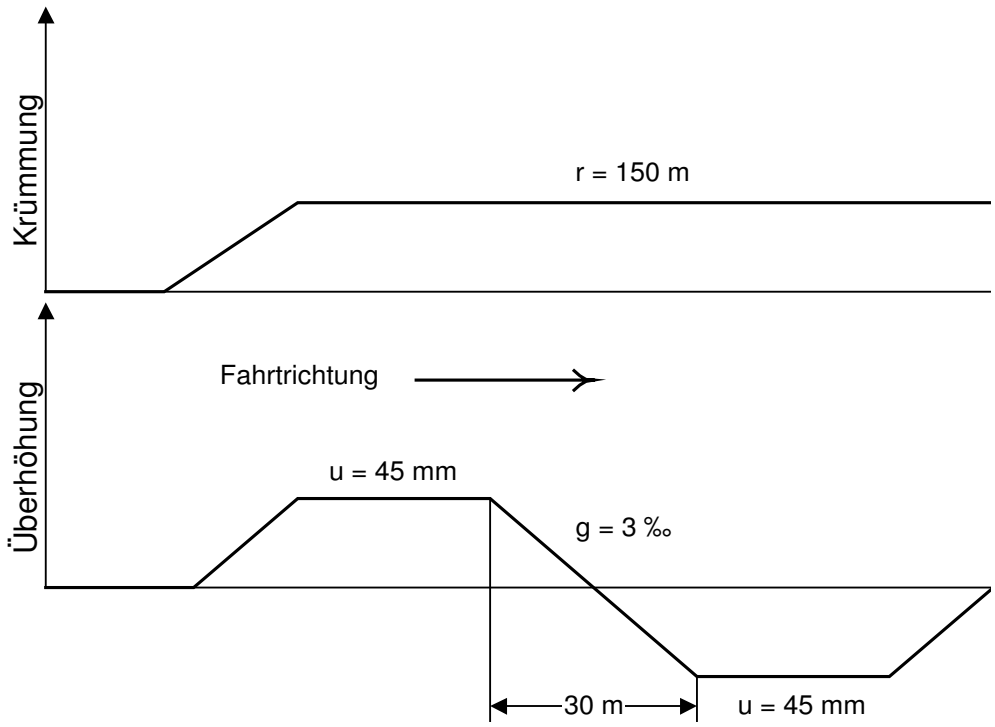



Abbildung 2.1: Trassierung der Gleisverwindung nach DIN PREN 14363 [3]

Für den Achsstand innerhalb des Drehgestells von $2a^{+} = 1.8$ m muss die Prüfverwindung des Drehgestells $g^{+}$ betragen:

$$g^{+}_{lim} = 7\,‰ \tag{2.1}$$

Auf Basis des Drehzapfenabstands des Kesselwagens (KEUDEL [2]) mit $2a^{*} = 11.46$ m gilt für die Prüfverwindung

$$g^{*}_{lim}(2a^{*} = 11.46) = \frac{20\,\mathrm{m}}{2a^{*}}\,‰ + 2.0\,‰ = 3.75\,‰ \tag{2.2}$$

sowie für den Taschenwagen T.4 (KEUDEL [2]) mit $2a^{*} = 11.2$ m

$$g^{*}_{lim}(2a^{*} = 14.2) = \frac{20\,\mathrm{m}}{2a^{*}}\,‰ + 2.0\,‰ = 3.4\,‰ \tag{2.3}$$

Da beim realen Prüfgleis die trassierte Steigung nicht an den jeweils zu prüfenden Wagen angeglichen werden kann, wird die Differenz der Verwindung durch entsprechende Beilagen in der Primär- und Sekundärfederung eingestellt (s. Abb. 2.2).

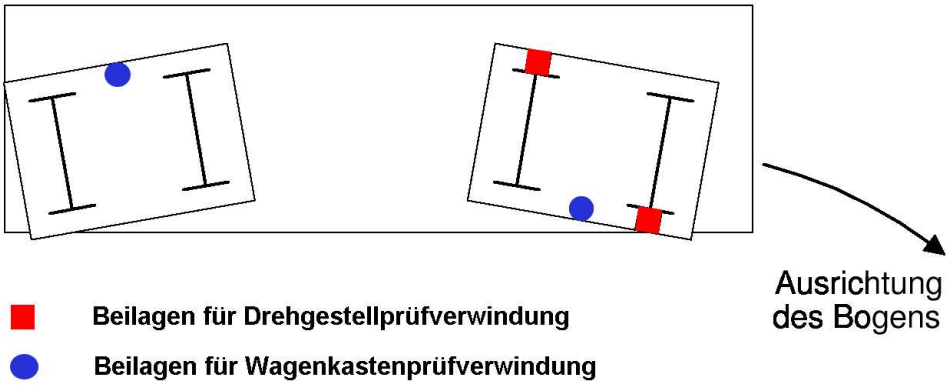



Abbildung 2.2: Anordnung der Beilagen für die Prüfverwindung nach DIN PREN 14363 [3]

## 2.2 Fahrzeuge Kesselwagen + Taschenwagen T.4 mit LEILA-DG

Die Auswahl der beiden Fahrzeugtypen (Kesselwagen mit starrer Struktur bei hohem Schwerpunkt und Taschenwagen mit vergleichsweise elastischer Struktur) sowie ihre Modellierung für die MKS-Software *MEDYNA* sind im Bericht KEUDEL [2] bereits detailliert erläutert. In diesem Abschnitt geht es ergänzend dazu um die Anpassung des Fahrzeugmodells in Hinblick auf den Entgleisungsnachweis nach DIN PREN 14363 [3].

Um die Prüfverwindung des Drehgestellrahmens von $g^{+}_{lim} = 7$ ‰ zu erreichen, werden an den in der Abbildung 2.2 gekennzeichneten Stellen Beilagen in der Primärfesselung berücksichtigt. Die Dicke $d^{+}$ der Beilagen errechnet sich nach DIN PREN 14363 [3] in Abhängigkeit vom Radsatzstand im Drehgestell $2a^{+}$, dem Querabstand der Primärfedern $2b^{+}$ sowie dem Querabstand der Radaufstandspunkte $2b_A$ zu

$$d^{+} = \frac{2a^{+}(g^{+} - g)}{2} \cdot \frac{2b^{+}}{2b_A} = 2.66\,\text{mm} \tag{2.4}$$

Um die fahrzeugindividuelle Prüfverwindung auf Grundlage des Drehzapfenabstand zu erreichen, sind an den in der Abbildung 2.2 gekennzeichneten Stellen Beilagen der Dicke $d^{*}$ in der Sekundärfesselung vorgesehen. Da mit der Konstruktion der Drehpfanne Güterwagen keine Sekundärfesselung im eigentlichen Sinne aufweisen, müssen auch diese Beilagen in der Primärfesselung installiert werden.

Die Dicke $d^*$ der Beilagen errechnet sich nach DIN PREN 14363 [3] in Abhängigkeit vom Drehzapfenabstand $2a^*$, dem Querabstand der Primärfedern $2b^+$ sowie dem Querabstand der Radaufstandspunkte $2b_A$ zu

$$d^* = \frac{2a^*\,(g^* - g)}{2} \cdot \frac{2b^+}{2b_A} \tag{2.5}$$

Für den Kesselwagen mit $2a^* = 11.46$ m ergibt sich die Beilagendicke $d^*$ zu 3.16 mm, für den Taschenwagen T.4 mit $2a^* = 14.20$ zu $d^* = 2.15$ mm.

Die zugrunde gelegten Daten sowie die sich je Primärfesselung summiert ergebenden Beilagendicken sind in der Abbildung 2.3 für den Kesselwagen sowie in der Abbildung 2.4 für den Taschenwagen noch einmal übersichtlich zusammengestellt.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Radsatzstand innerhalb eines Drehgestells | $2a^+$ | 1800 | mm | (analog Y25, standard) |
| Drezapfenabstand | $2a^*$ | 11460 | mm | |
| Querabstand der Primärfedern | $2b^+$ | 1110 | mm | |
| Querabstand der Sekundärfedern | $2b^*$ | 1110 | mm | (da keine eigentlioche Sekundärfederexistiert, muss die Verwindung in der Primärfederung aufgebracht werden, daher 2b+=2b*) |
| Querabstand der Radaufstandspunkte | $2b_A$ | 1500 | mm | (standard) |
| Referenz-Steigung der Verwindung des Gleises | $g^o$ | 3.0 | ‰ | DIN prEN 14363 |
| Steigung der Verwindung auf Radsatzabstandsbasis | $g^+$ | 7.0 | ‰ | DIN prEN 14363 |
| Steigung der Verwindung auf Fahrzeugkastenbasis | $g^*$ | 3.7 | ‰ | DIN prEN 14363 in Abhängigkeit 2a* |
| **Dicke der Beilagen für Drehgestellprüfverwindung** | **$d^+$** | **2.66** | **mm** | Formel nach prEN 14363 |
| **Dicke der Beilagen für Fahrzeugkastenverwindung** | **$d^*$** | **3.16** | **mm** | Formel nach prEN 14363 |

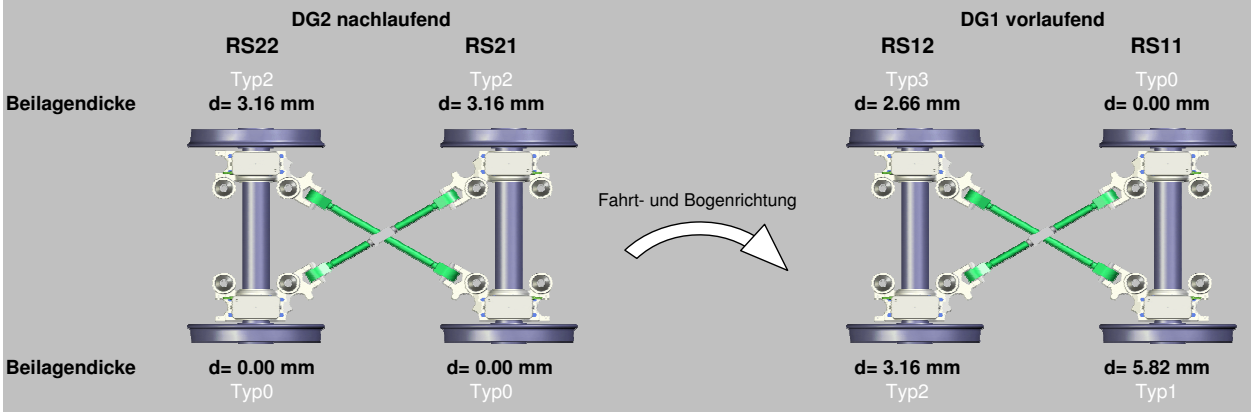



Abbildung 2.3: Beilagedicken nach PR EN14363 [3] für Kesselwagen $2a^*$=11.46m

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Radsatzstand innerhalb eines Drehgestells | $2a^+$ | 1800 | mm | (analog Y25, standard) |
| Drezapfenabstand | $2a^*$ | 14200 | mm | |
| Querabstand der Primärfedern | $2b^+$ | 1110 | mm | |
| Querabstand der Sekundärfedern | $2b^*$ | 1110 | mm | (da keine eigentlioche Sekundärfederexistiert, muss die Verwindung in der Primärfederung aufgebracht werden, daher 2b+=2b*) |
| Querabstand der Radaufstandspunkte | $2b_A$ | 1500 | mm | (standard) |
| Referenz-Steigung der Verwindung des Gleises | $g^o$ | 3.0 | ‰ | DIN prEN 14363 |
| Steigung der Verwindung auf Radsatzabstandsbasis | $g^+$ | 7.0 | ‰ | DIN prEN 14363 |
| Steigung der Verwindung auf Fahrzeugkastenbasis | $g^*$ | 3.4 | ‰ | DIN prEN 14363 in Abhängigkeit 2a* |
| **Dicke der Beilagen für Drehgestellprüfverwindung** | $d^+$ | **2.66** | **mm** | Formel nach prEN 14363 |
| **Dicke der Beilagen für Fahrzeugkastenverwindung** | $d^*$ | **2.15** | **mm** | Formel nach prEN 14363 |

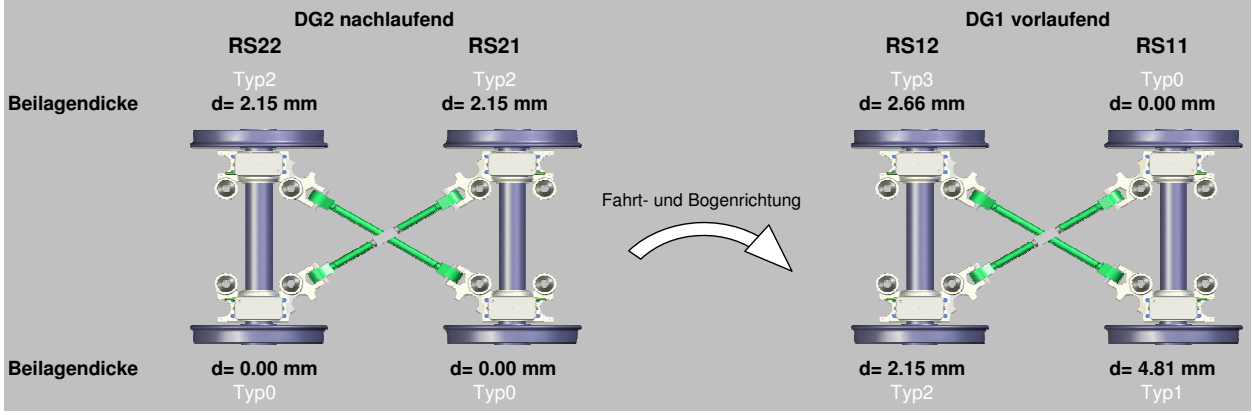



Abbildung 2.4: Beilagedicken nach PR EN14363 [3] für Taschenwagen 2a*=14.2m

# Kapitel 3

# Simulationsergebnisse

Um die Simulationsergebnisse zu beurteilen, sollen noch einmal kurz diejenigen relevanten Eingangsparameter zusammengestellt werden, die in Hinblick auf die Entgleisungssicherheit jeweils eine eher ungünstige Bedingung hervorrufen und somit eine Rechnung *„zur sicheren Seite“* ergeben.
Entsprechend der Forderung nach trockenen Rad/Schiene-Bedingungen (DIN PREN 14363 [3]) liegt den Simulationsrechnungen der hohe Reibbeiwert von $\mu_{rs}$= 0.5 zugrunde. Rad- und Schienenprofile werden in vorgegebener Trassierung eines 150m-Bogens (Abschnitt 2.1) bei radseitig S1002 auf 1/40 geneigter UIC60-Schiene belassen [2]. Aufgrund der Radführungskräfte ergibt sich dabei in aller Regel für das Leerfahrzeug der entgleisungskritischere Zustand, so dass die vorliegende Untersuchung auf das Leerfahrzeug fokussiert ist. Da die Steifigkeiten der Gummimetallelemente sich infolge von Alterung und Temperatureinflüssen deutlich ändern können, werden die Berechnungen einerseits für den Nennzustand sowie andererseits für eine jeweils verdoppelte Steifigkeit durchgeführt [2]. Während das Modell des Taschenwagens mit niedrigem Schwerpunkt aber großem Drehzapfenabstand den Wagen T 4.1 der HUPAC SA wiedergibt, beinhaltet das Modell des Kesselwagens zusätzlich zum vergleichsweise großen Drehzapfenabstand und einer starren Struktur auch noch einen hohen Schwerpunkt [2].

Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich im Anhang B (ab Seite 14) im Anschluss an eine Erläuterung zur Darstellungsweise.
Entsprechend dem Detaillierungsgrad des Simulationsmodells werden je Rechenlauf eine Vielzahl von Ergebnisdaten erzeugt, die aufgrund ihrer Menge nicht alle in diesem Bericht dargestellt werden können. Für den Fall des leeren Taschenwagens bei Gumminennsteifigkeit findet sich im Abschnitt B.3.1 (ab Seite 34) exemplarisch eine umfangreichere Ausgabe, während für die anderen Rechenvarianten im wesentlichen nur die in Hinblick auf die Entgleisungssicherheit relevanten Ergebnisse wiedergegeben sind.

Für den Kesselwagen (B.2 (ab Seite 18)) wie auch den Taschenwagen (B.3 (ab Seite 34)) verlagern sich die schienenseitigen Berührlagen mit dem Übergangsbogen bogenaußen in den Bereich der Fahrkante, während sie bogeninnen erwartungsgemäß auf dem Schienenkopf verbleiben (Abb. B.4 (Seite 19), B.9 (Seite 24), B.14 (Seite 29), B.19 (Seite 35), B.59 (Seite 75), B.64 (Seite 80) ). Für beide Wagen ergeben sich bedingt durch die Beilagen (Abb. 2.3 (Seite 6) und 2.4 (Seite 7)) bereits statisch ungleiche Radaufstandskräfte (Q-Kräfte) (Abb. B.5 (Seite 20), B.10 (Seite 25), B.15 (Seite 30), B.21 (Seite 37), B.60 (Seite 76), B.65 (Seite 81) ) respektive ungleiche Federwege der Primärfesselung (Abb. B.38 (Seite 54), B.39, B.40 ). Wie erwartet und durch die Beilagen absichtlich provoziert, erfährt das vorlaufende bogenäußere Rad im Bereich der Gleisverwindung (zwischen 60 und 90 m) in allen Rechenläufen die größte Radentlastung und ist somit planmäßig das entgleisungskritischste Rad. Dabei bewirkt die Bogenfahrt in Verbindung mit der Gleisverwindung eine Wankbewegung des Wagenkastens, die sich in einem nahezu kontinuierlichen Wechsel der Radlastverteilung auswirkt.
Die Entgleisungssicherheit ist nach DIN PREN 14363 [3] anhand des Verhältnisses von Y/Q-Kraft sowie als zusätzliches Kriterium durch den Wert der Radsatzanhebung nachzuweisen:

$$\frac{Y}{Q} \overset{!}{\leq} 1.2 \tag{3.1}$$

$$´z_{rad} \overset{!}{\leq} 5mm \tag{3.2}$$

Trotz des großen Drehzapfenabstands, des hohen Rad/Schiene-Reibbeiwerts sowie der starren Kesselstruktur zeigen die Simulationsergebnisse bei Gummi-Nennsteifigkeit einen

deutlich unkritischen Verlauf (Abb. B.6 (Seite 21), B.23 (Seite 39) ). Auch die Radanhebung verbleibt mit Werten bei maximal 1 mm deutlich unter dem Grenzwert von 5 mm (Abb. B.7 (Seite 22), B.24 (Seite 40) ).

Mit der Beladung des Fahrzeugs nimmt die Q-Kraft gegenüber der Y-Kraft deutlich mehr zu, so dass sich für das 90t-Fahrzeug noch einmal verminderte Werte für Y/Q ergeben (Abb. B.16 (Seite 31) ).

Auch bei einer im schlimmsten Fall angenommenen Verdopplung der Gummisteifigkeiten zeigen die Ergebnisse der Simulation für den Taschenwagen noch eine Einhaltung von Y/Q sowie eine Radanhebung von unter 4 mm (Abb. B.61 (Seite 77), B.62 ).

Sofern die elastischen Eigenschaften der Fahrzeugstruktur dabei vernachlässigt würden und der Fahrzeugaufbau als starrer Körper modelliert wird, erschöpfen die Ergebnisse für Y/Q zwar nur kurzzeitig den Grenzwert von 1.2 (Abb. B.66 (Seite 82) ), die Radanhebung des bogenäußeren Rades steigt jedoch über die Länge mehrerer Radumdrehungen auf über 9 mm an (Abb. B.67 (Seite 83) ), was sich nach der Erfahrung bisheriger Berechnungen in der Simulation als tatsächlich entgleisungskritisch auswirken kann. Dies unterstreicht eindrücklich die Notwendigkeit, die elastischen Eigenschaften der Taschenwagenstruktur in der Simulation zu berücksichtigen [2].

Für den gewählten Kesselwagen zeigen die Simulationsergebnisse bei verdoppelter Gummisteifigkeit im Bereich maximaler Gleisverwindung ein geringes Überschreiten des Grenzwertes von Y/Q (Abb. B.11 (Seite 26) ). Die in zweiter Instanz zu betrachtende Radanhebung verläuft aber mit unter 5 mm durchweg unkritisch (Abb. B.12 (Seite 27) ), so dass auch für diese Konstellation nach DIN PREN 14363 [3] Entgleisungssicherheit gegeben ist.

# Kapitel 4

# Zusammenfassung und Fazit

Ausgehend von der Fragestellung nach der Entgleisungssicherheit 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 aufgrund seiner als extrem einzustufenden Eigenschaften für einen 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.

Bei normaler Betriebsweise in Gummi-Nennsteifigkeit erweisen sich die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Entgleisungssicherheit für beide Fahrzeuge als gänzlich unbedenklich. Bei einer im schlimmsten Fall angenommenen Verdopplung der Gummisteifigkeit infolge von Temperatur und Alterung halten die Ergebnisse für den Taschenwagen T4.1 noch immer alle Grenzwerte vollumfänglich ein, während für den Kesselwagen erst die in zweiter Instanz betrachtete Radanhebung den numerischen Nachweis der Entgleisungssicherheit erbringt.

Als Fazit dieser Untersuchung lässt sich somit formulieren, dass die beiden exemplarisch untersuchten Fahrzeuge sich in der Simulation bei vorausgesetzter Bauteilgleichheit bis zu einer Verdopplung der Gummisteifigkeiten nach DIN PREN 14363 [3] als entgleisungssicher erweisen.

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

[4] ORE: *Entgleisungsicherheit von Güterwagen in Gleisverwindungen*. Technischer Bericht B55/RP8 (Schlussbericht), ORE - Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, Utrecht, April 1983.

# 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.

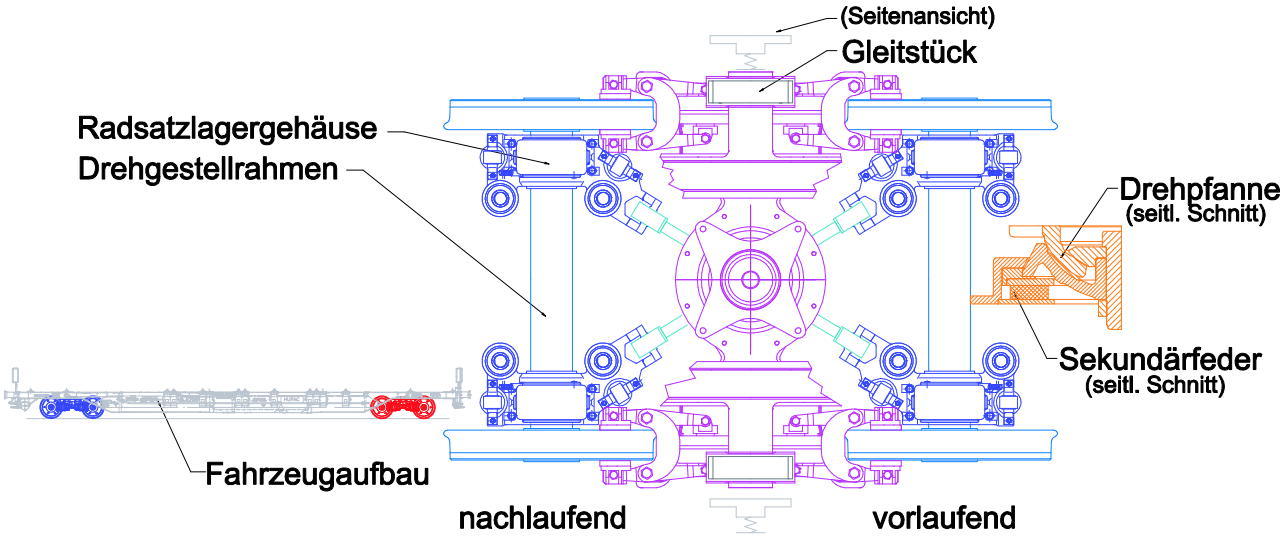



Abbildung B.1: Piktogramm des Drehgestells sowie des Fahrzeugaufbaus

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.

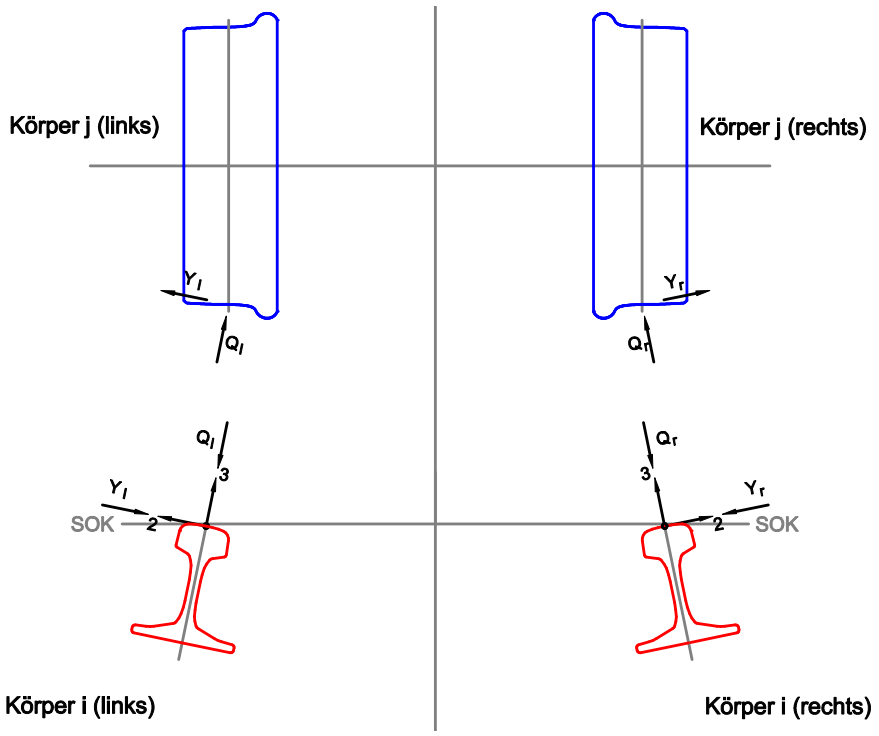



Abbildung B.2: Ausrichtung von Q- und Y-Kraft

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 $\underline{\vec{\varepsilon}}^{ia}$ 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 $\underline{\vec{\varepsilon}}^{ia}$ 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.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.

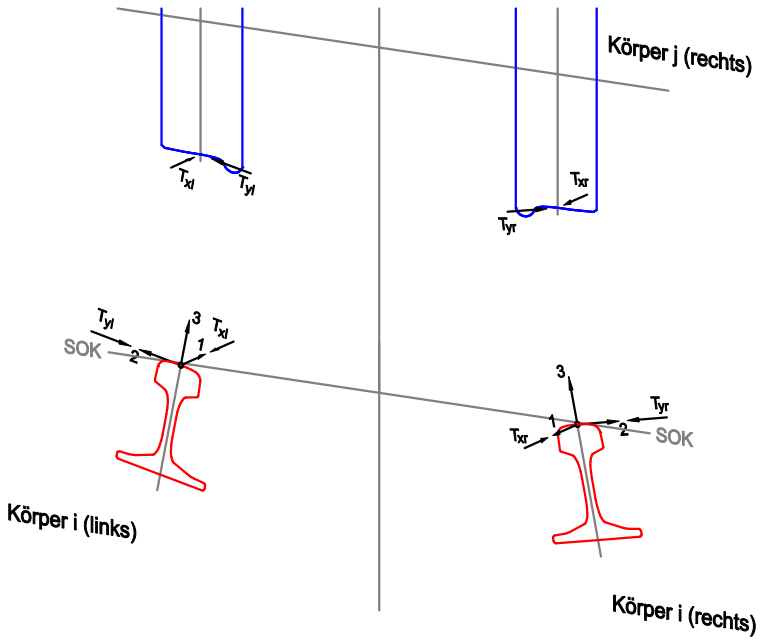



Abbildung B.3: Ausrichtung der Schlupfkräfte

- **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 Verwindungsfahrt Kesselwagen

## B.2.1 Kesselwagen 22t - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm

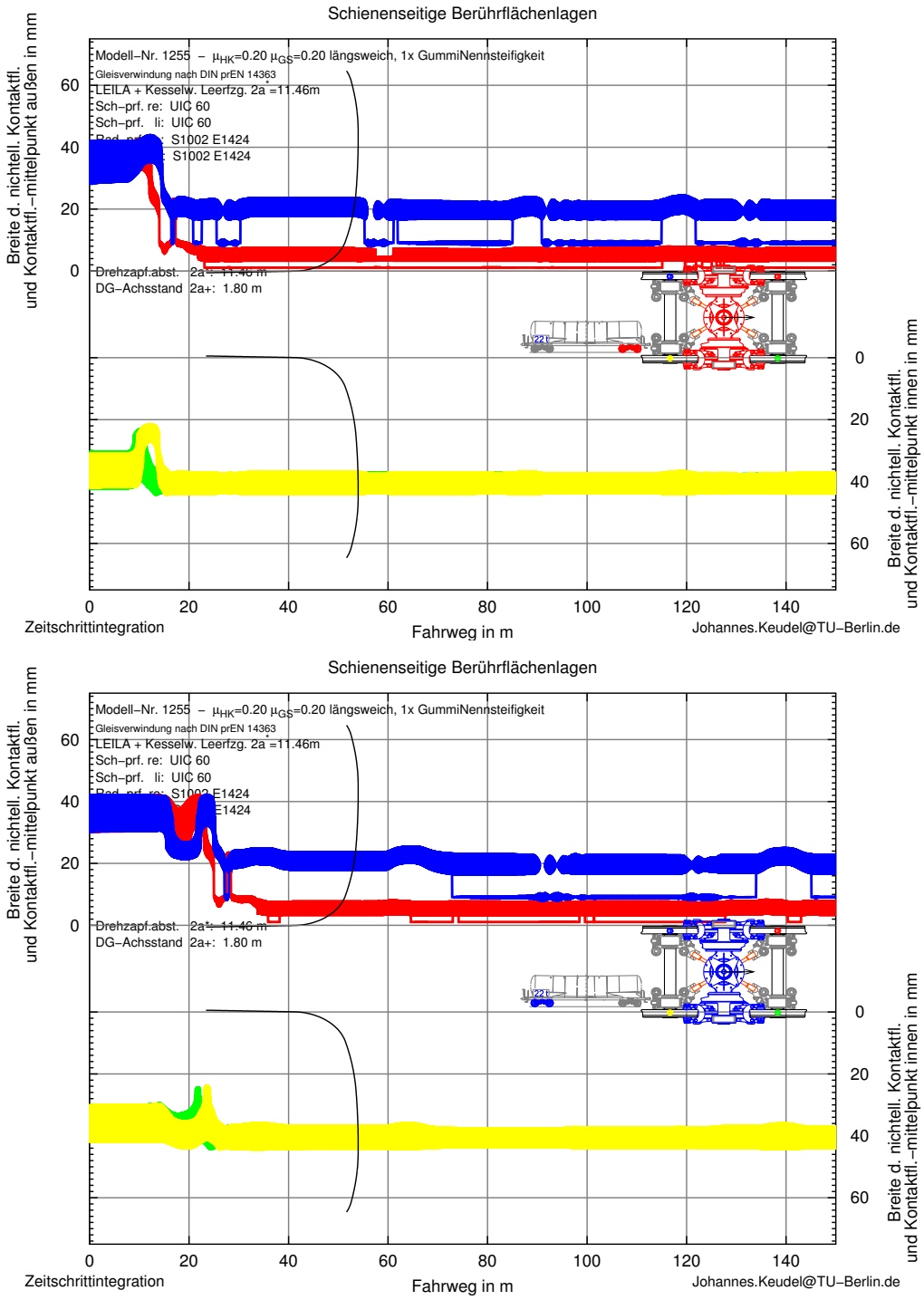
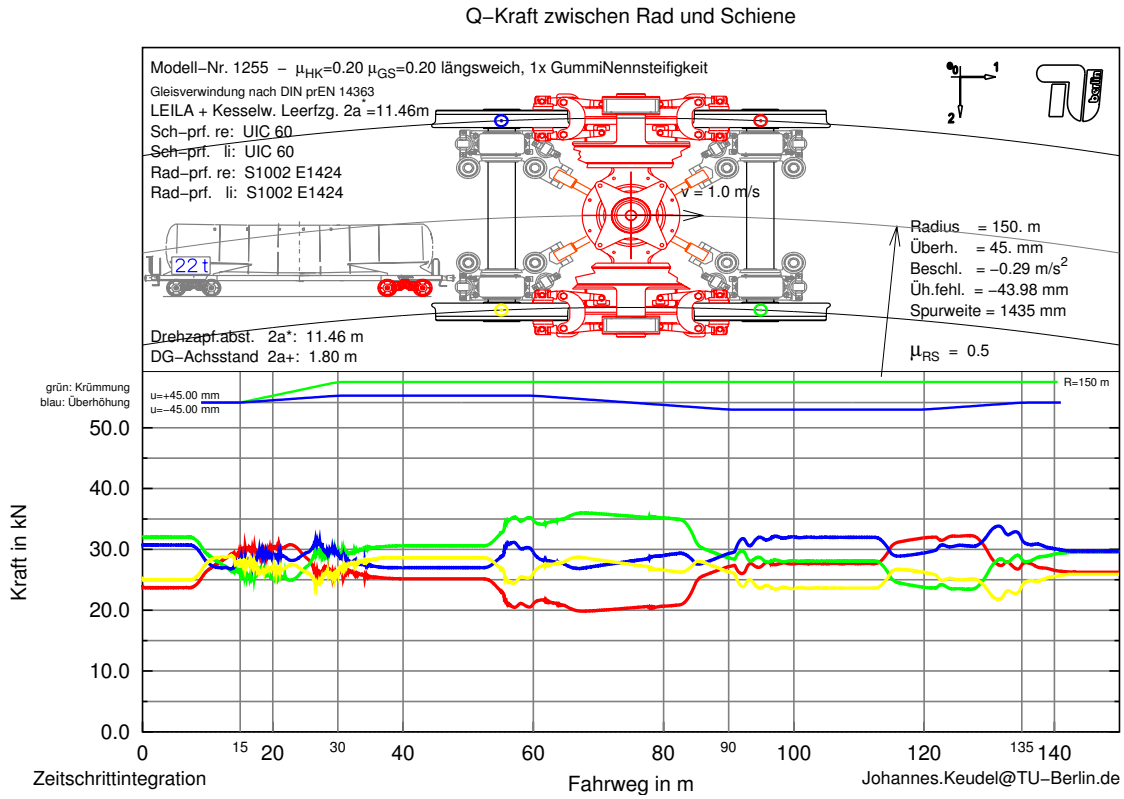



Abbildung B.4: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



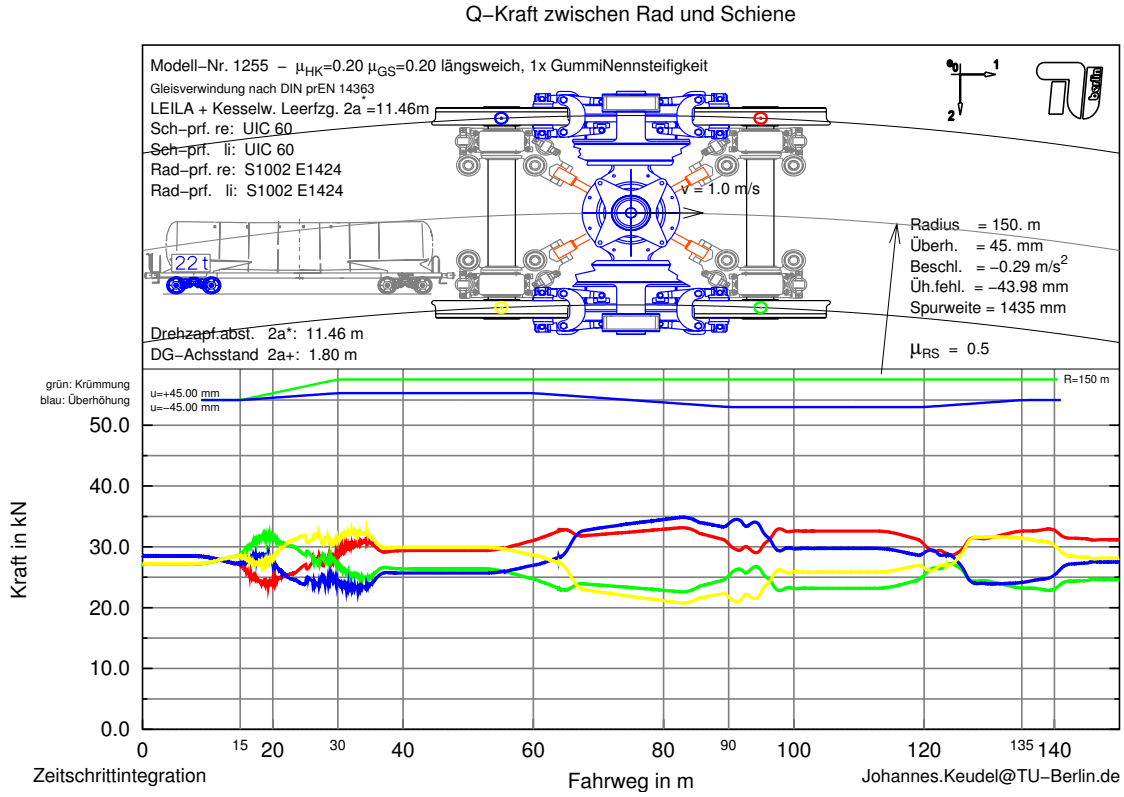
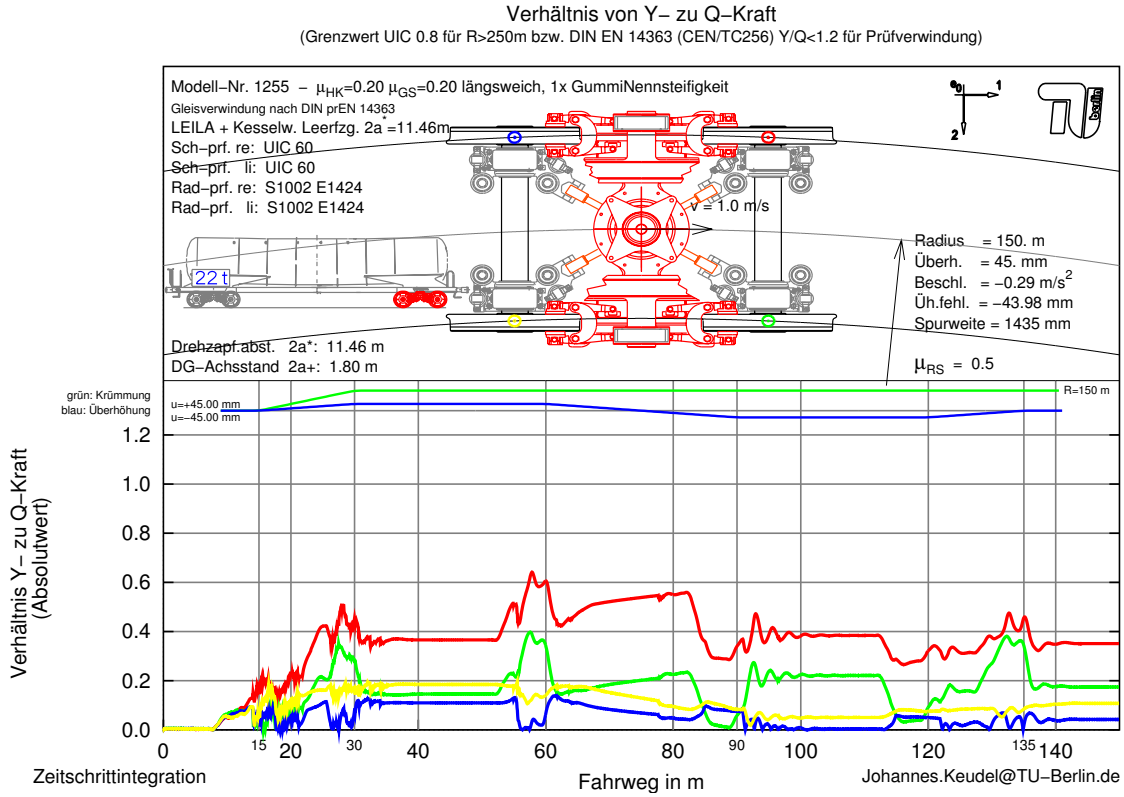




Abbildung B.5: Q-Kraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



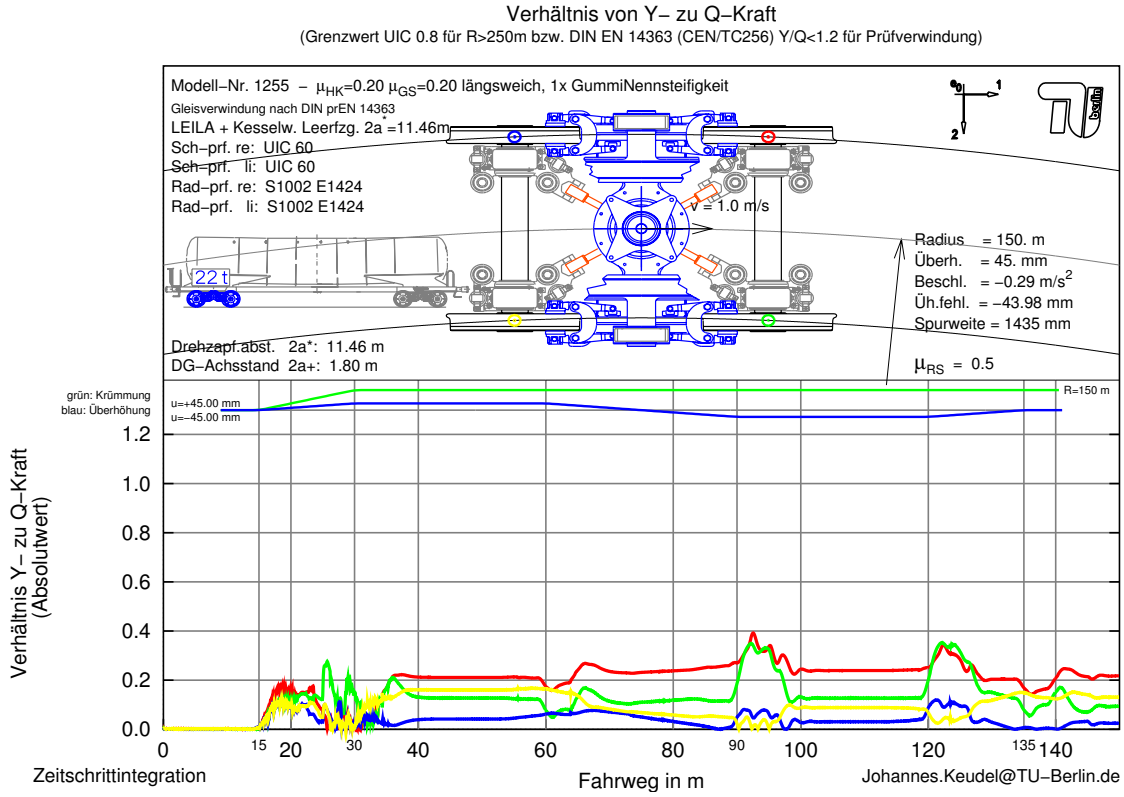
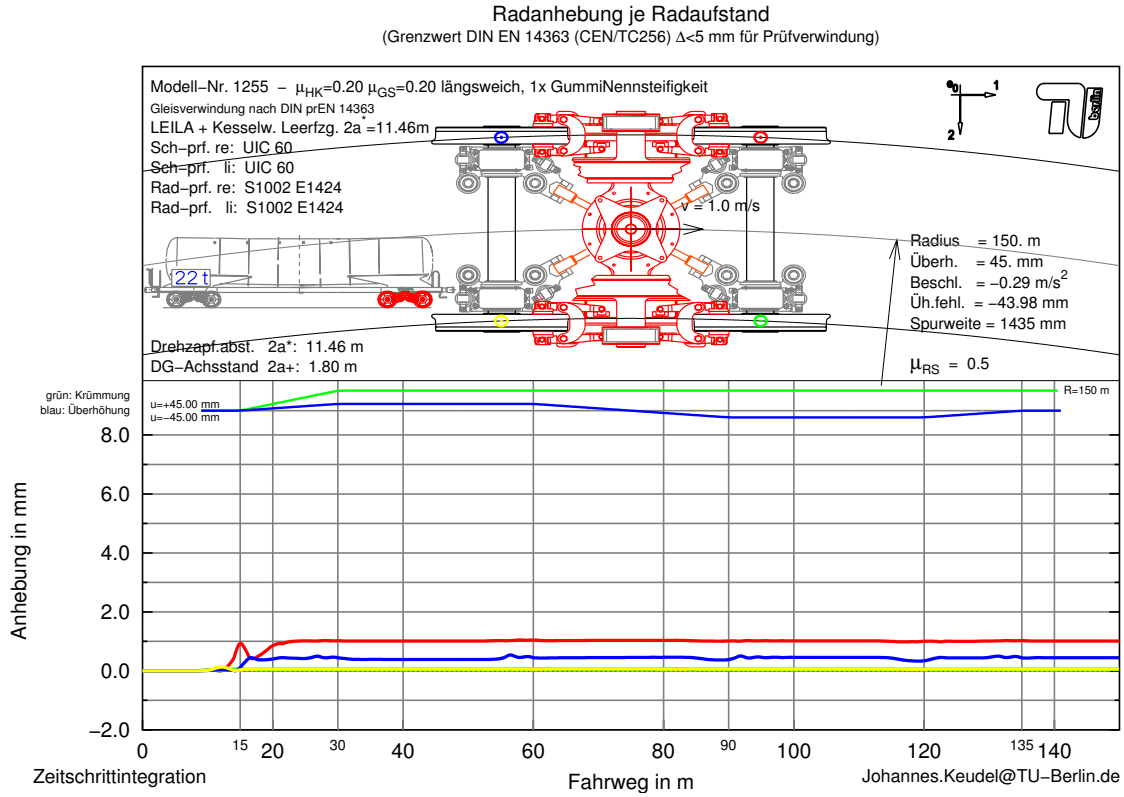




Abbildung B.6: Y/Q - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



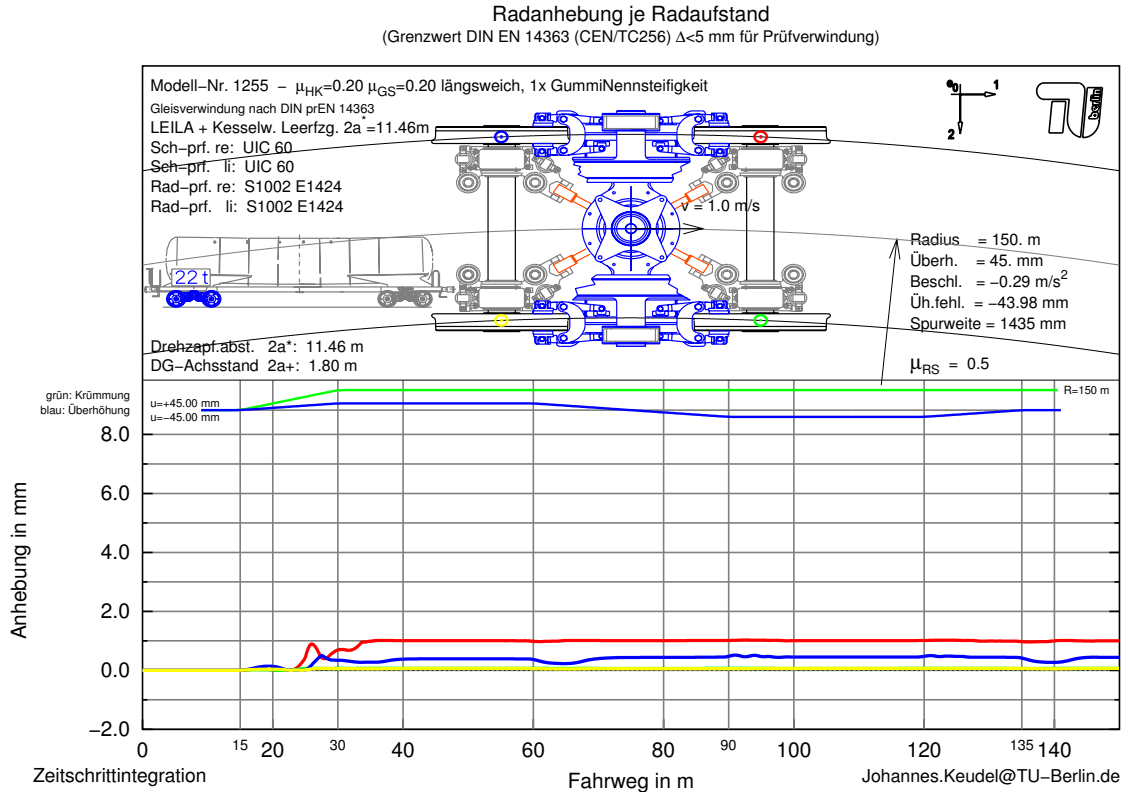
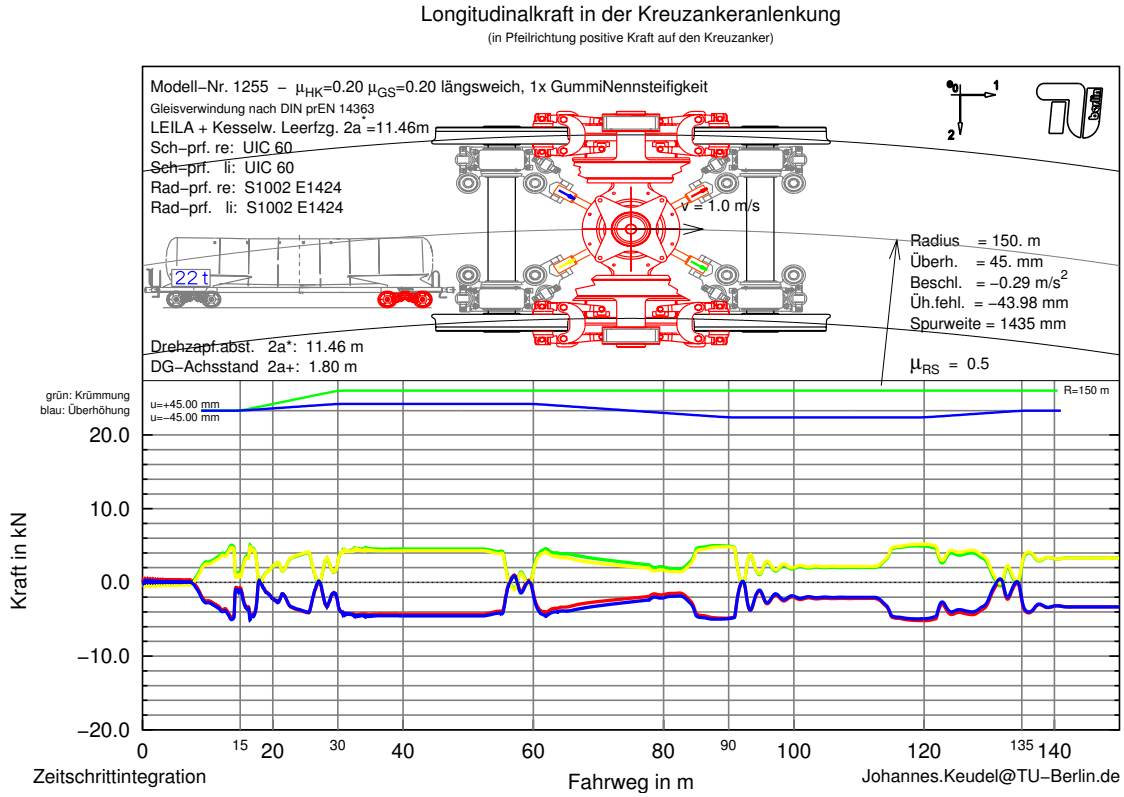




Abbildung B.7: Radanhebung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



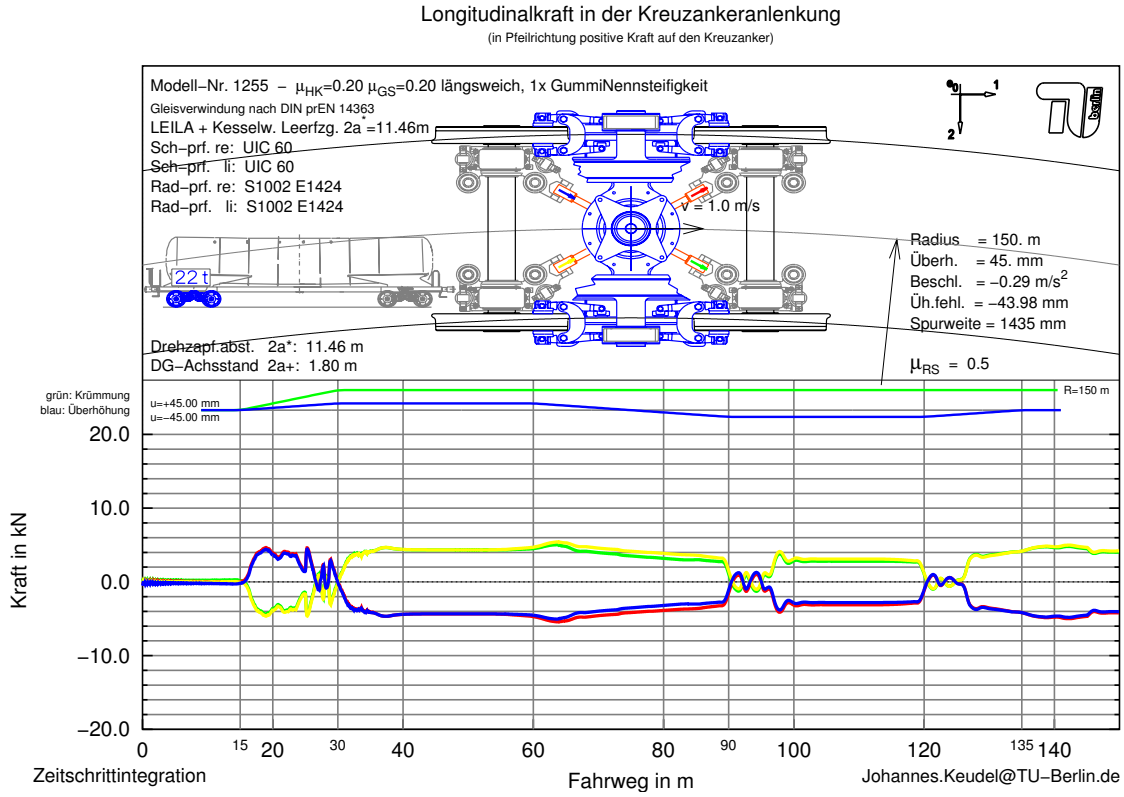
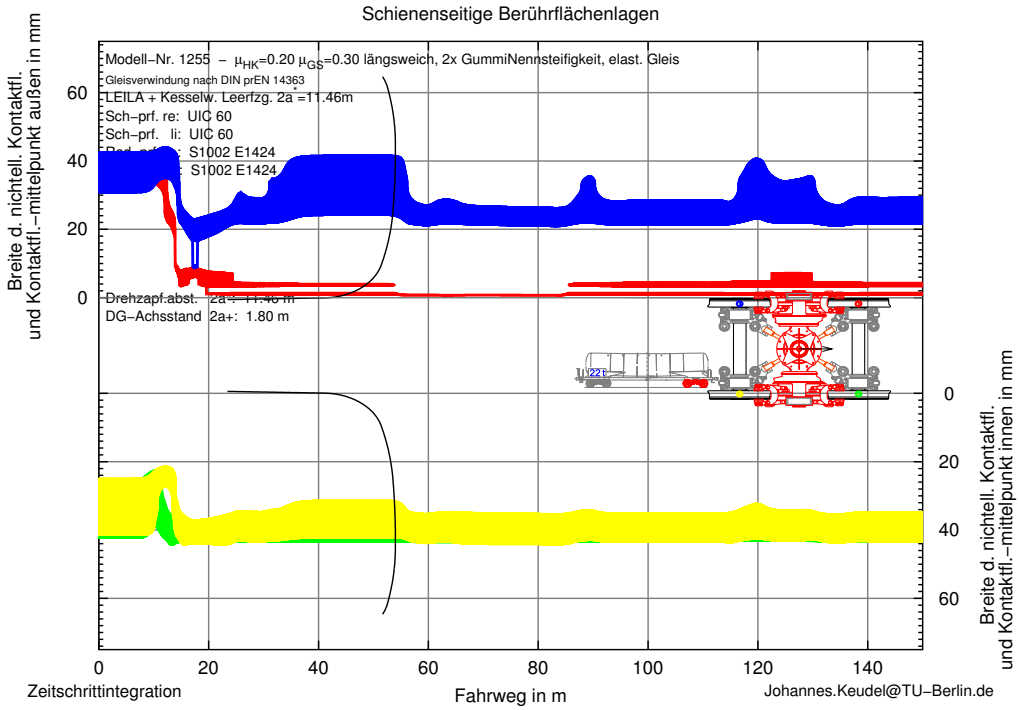




Abbildung B.8: Kreuzankerlängskraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45

## B.2.2 Kesselwagen 22t - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm



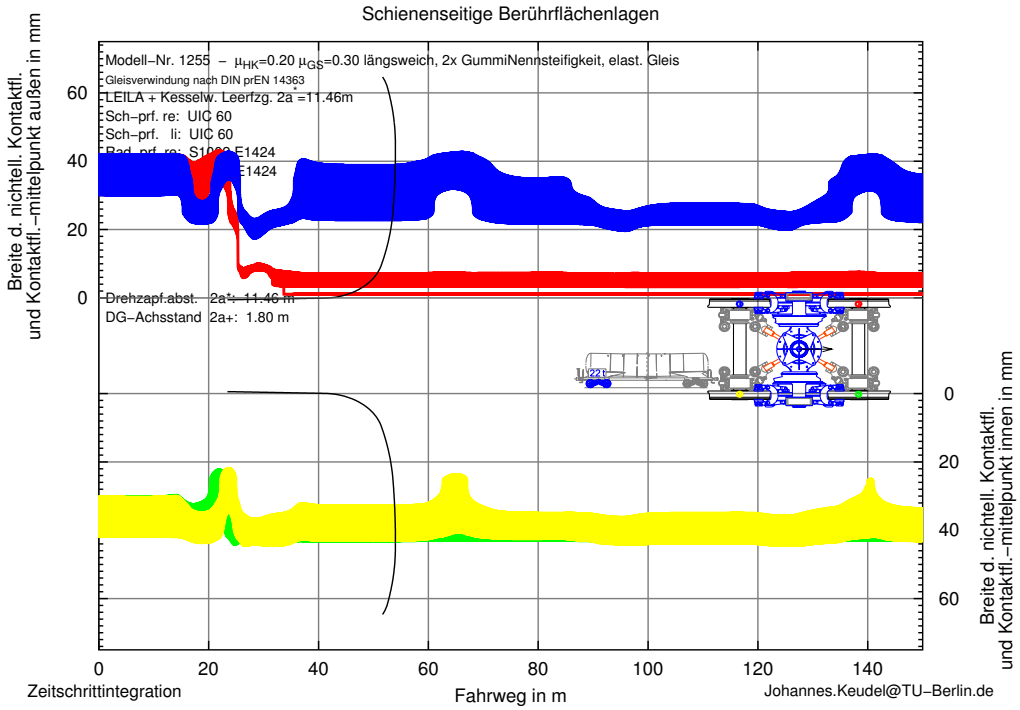
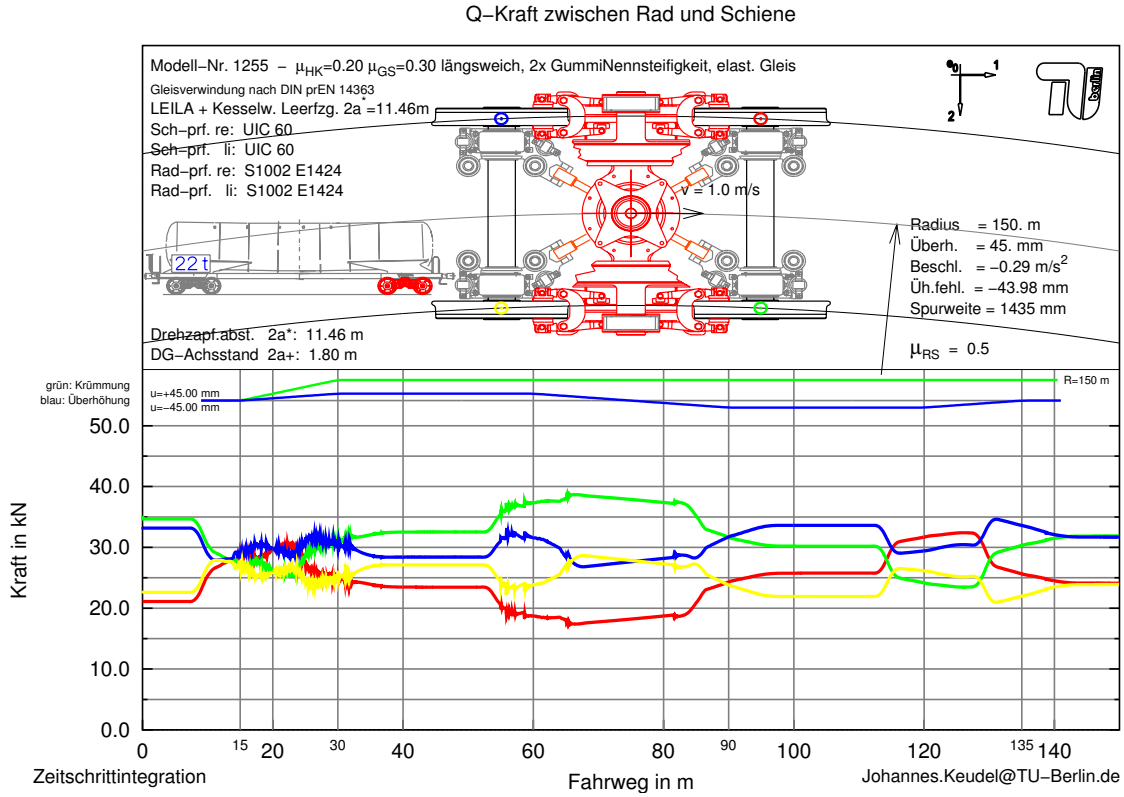




Abbildung B.9: Schienenberührlagen - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



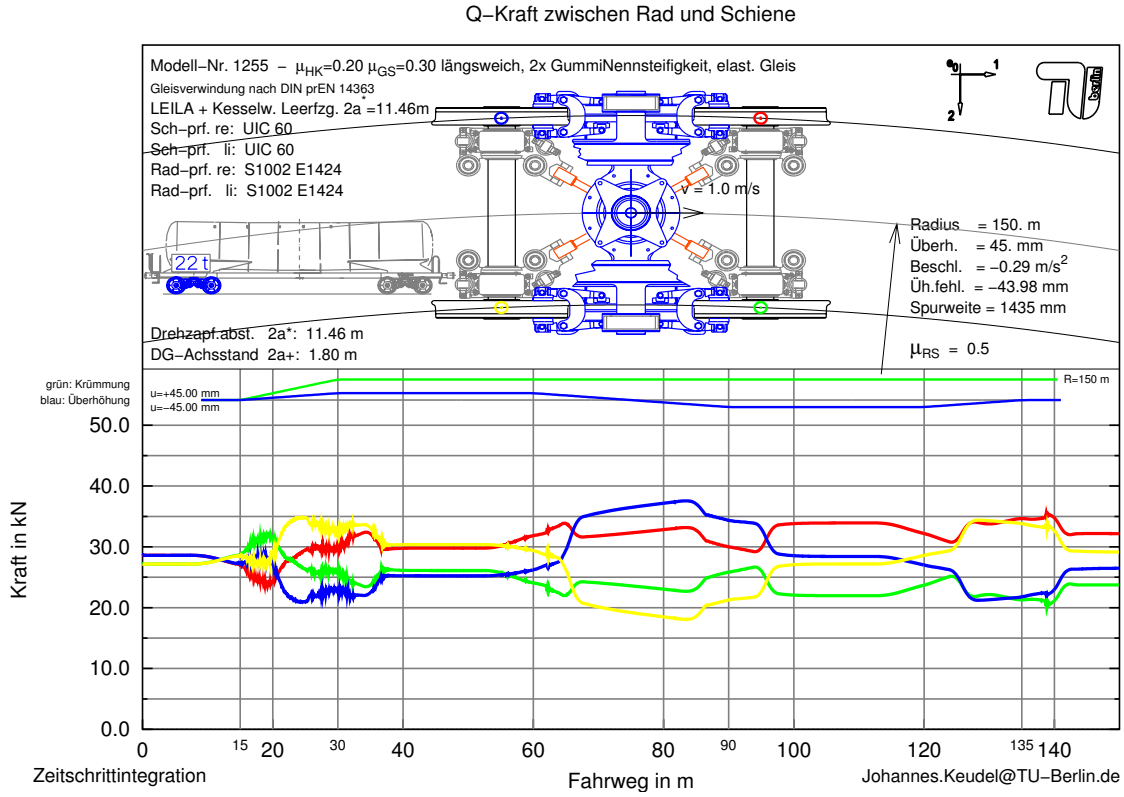
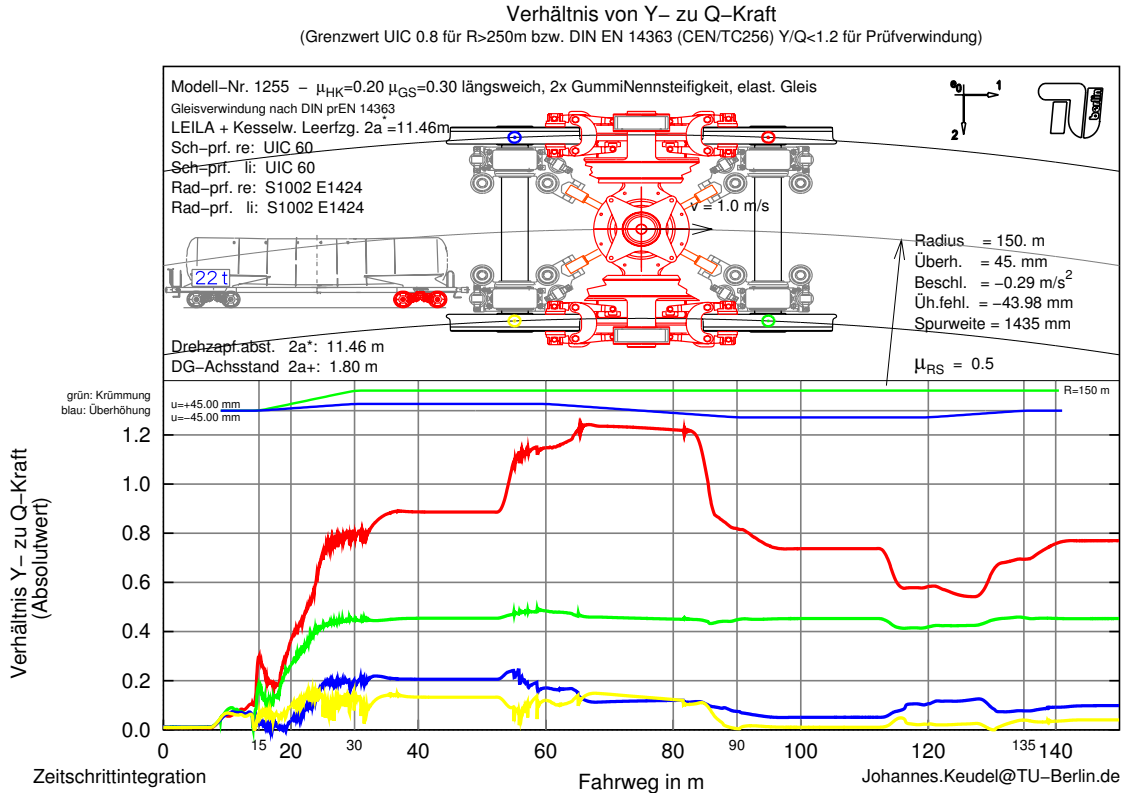




Abbildung B.10: Q-Kraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



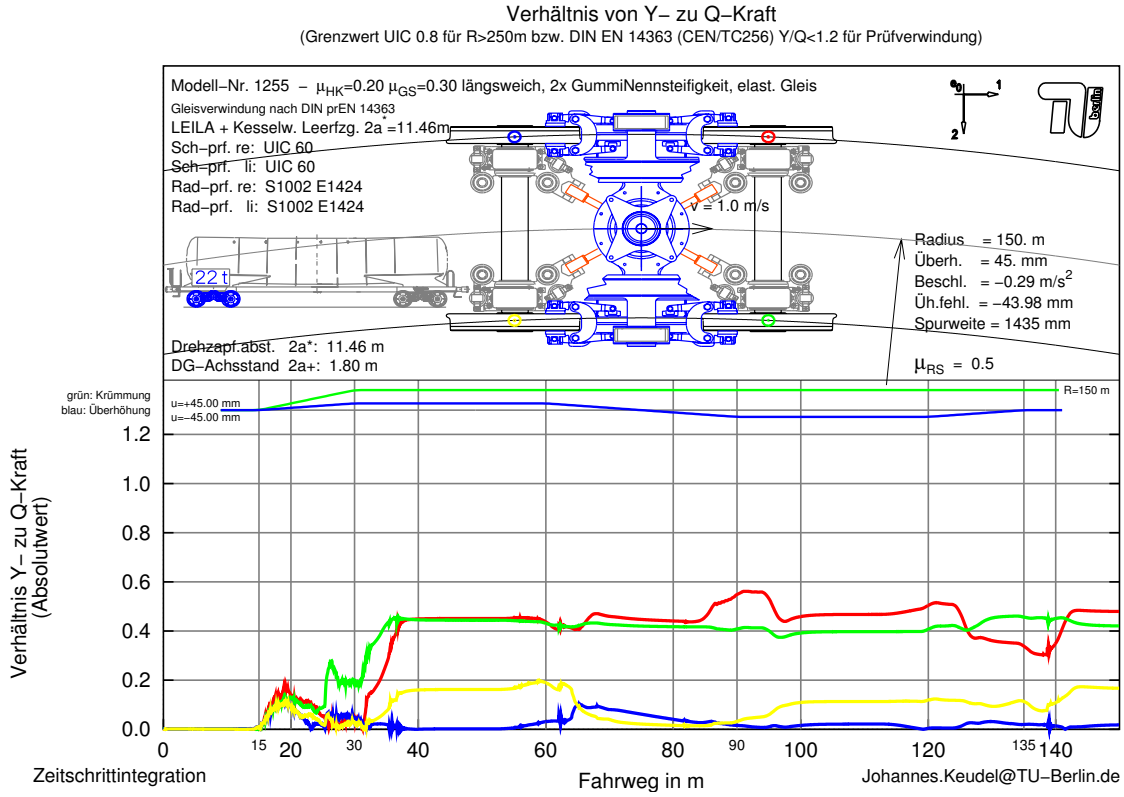
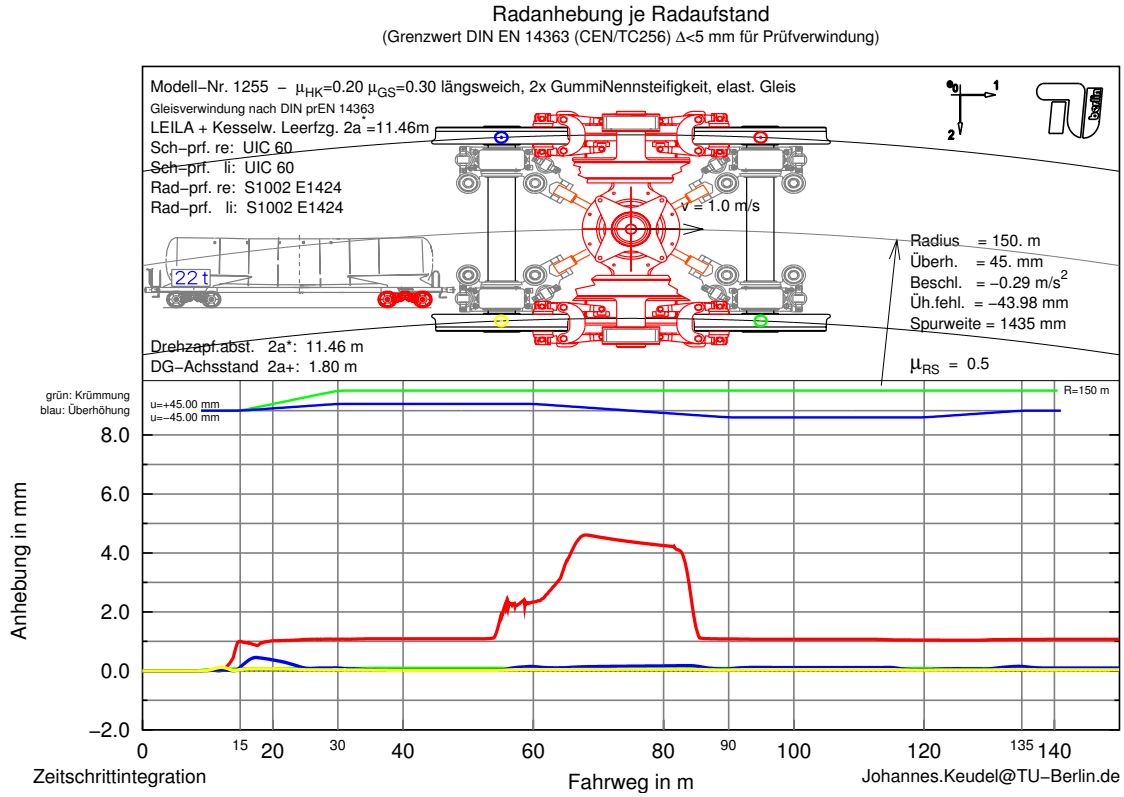




Abbildung B.11: Y/Q - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



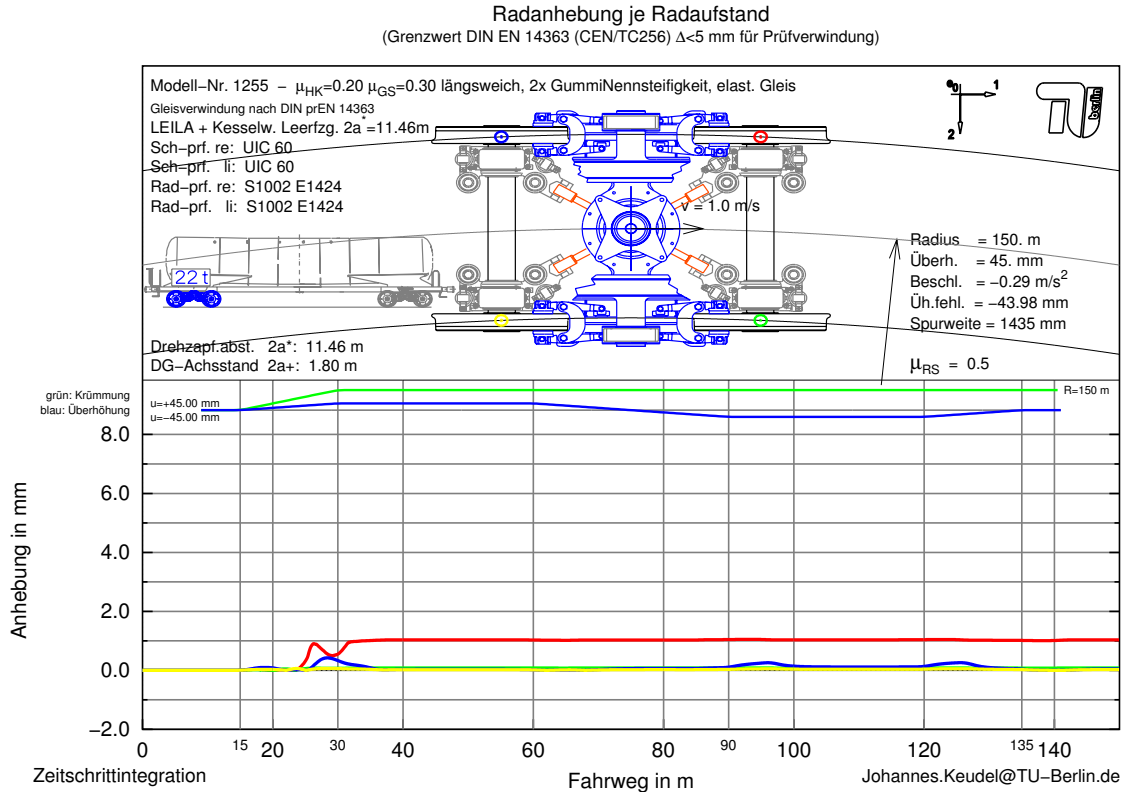
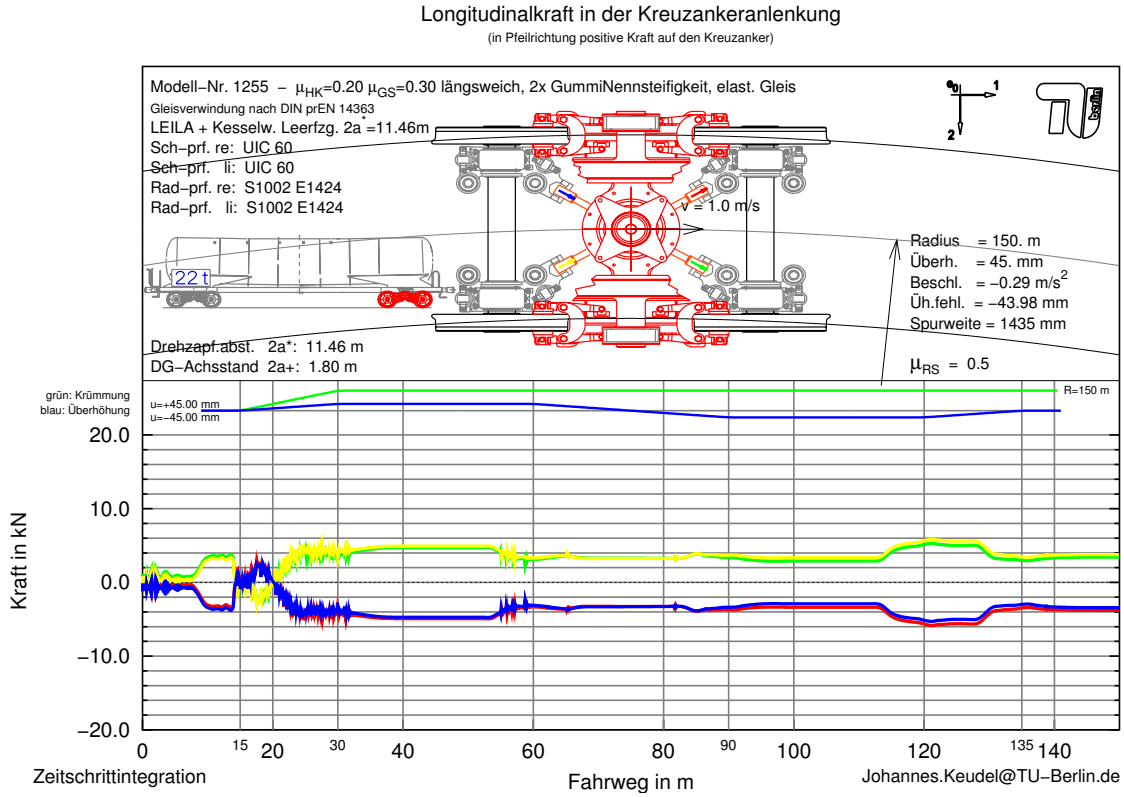




Abbildung B.12: Radanhebung - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



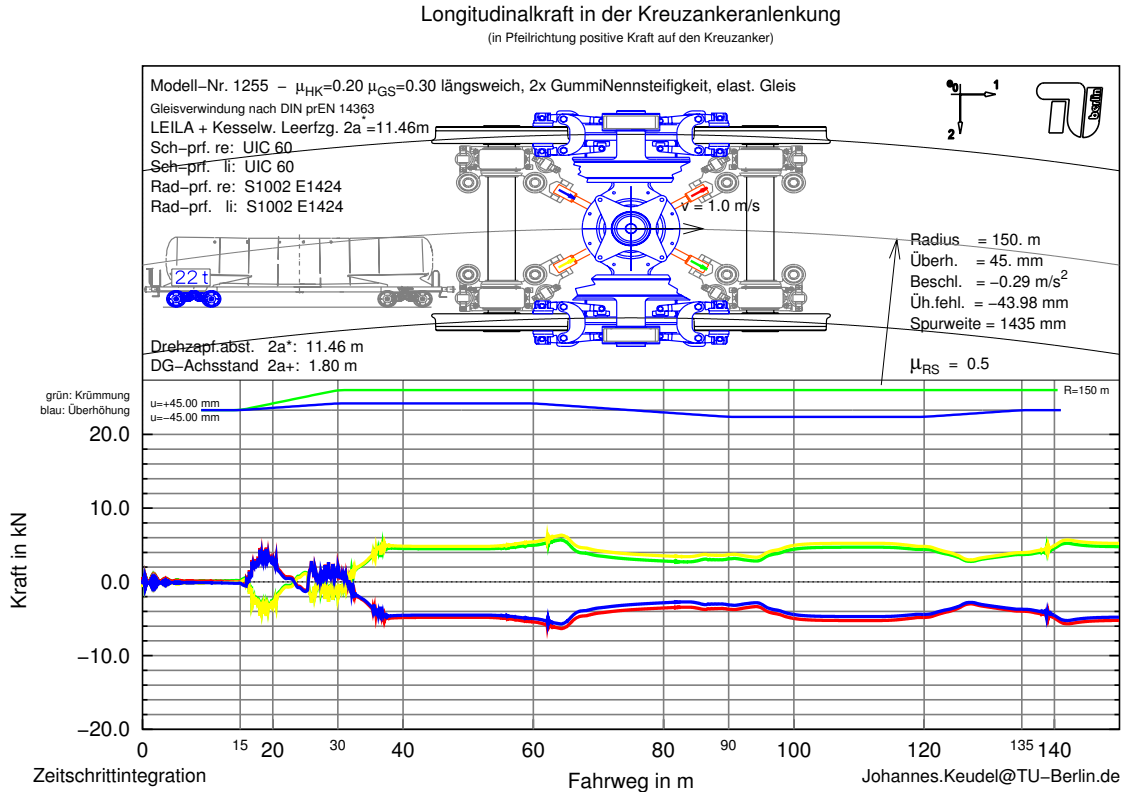
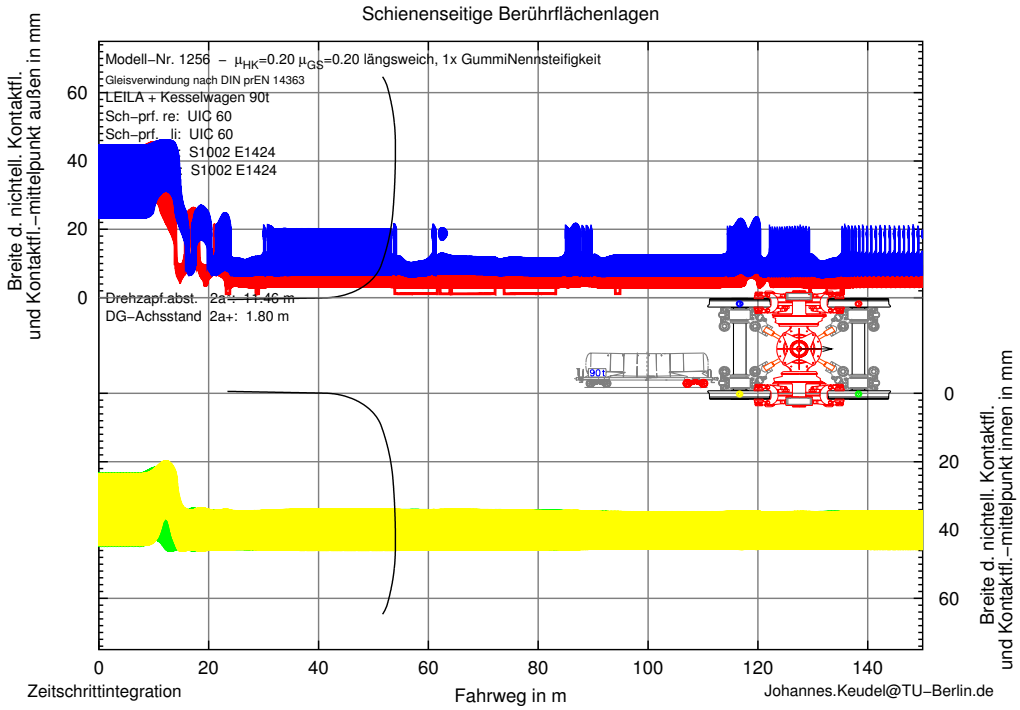




Abbildung B.13: Kreuzankerlängskraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45

## B.2.3 Kesselwagen 90t - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm



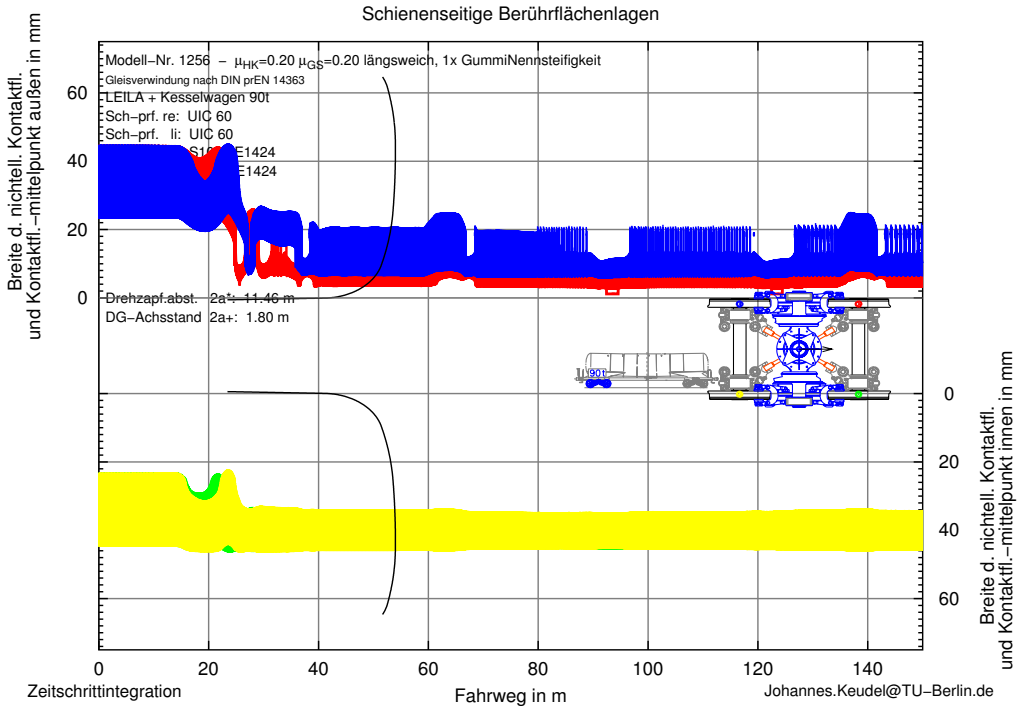
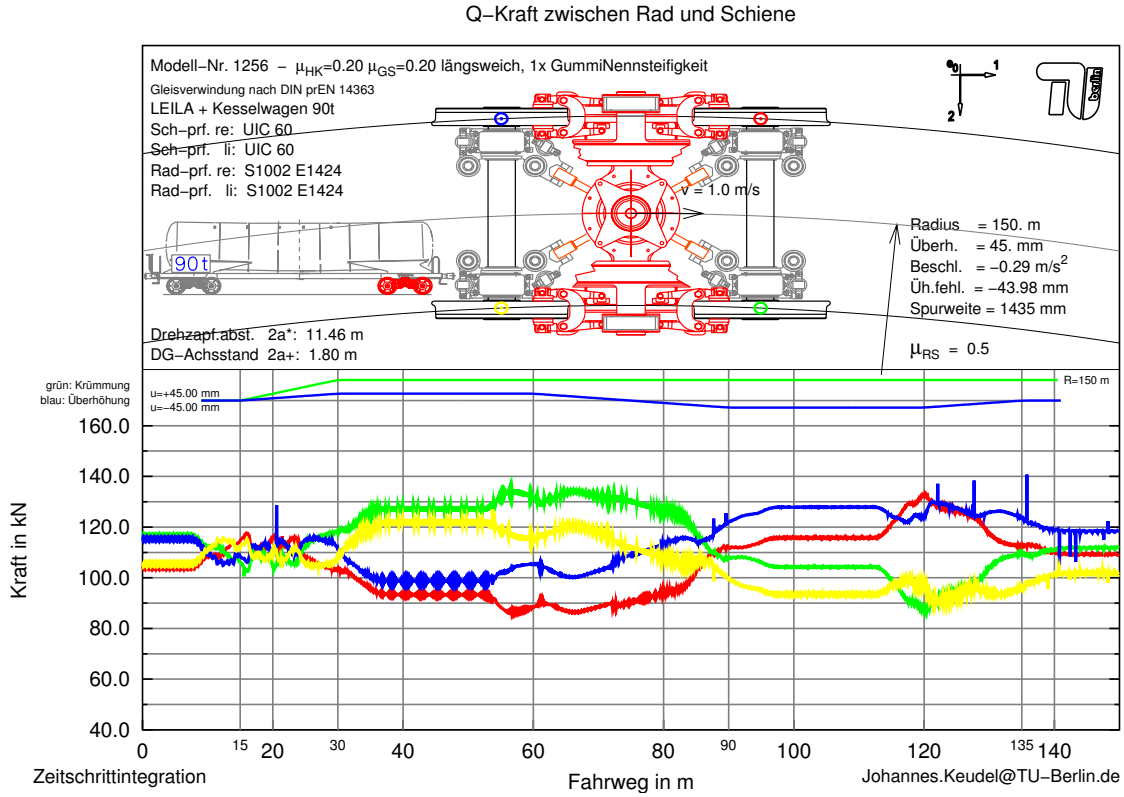




Abbildung B.14: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



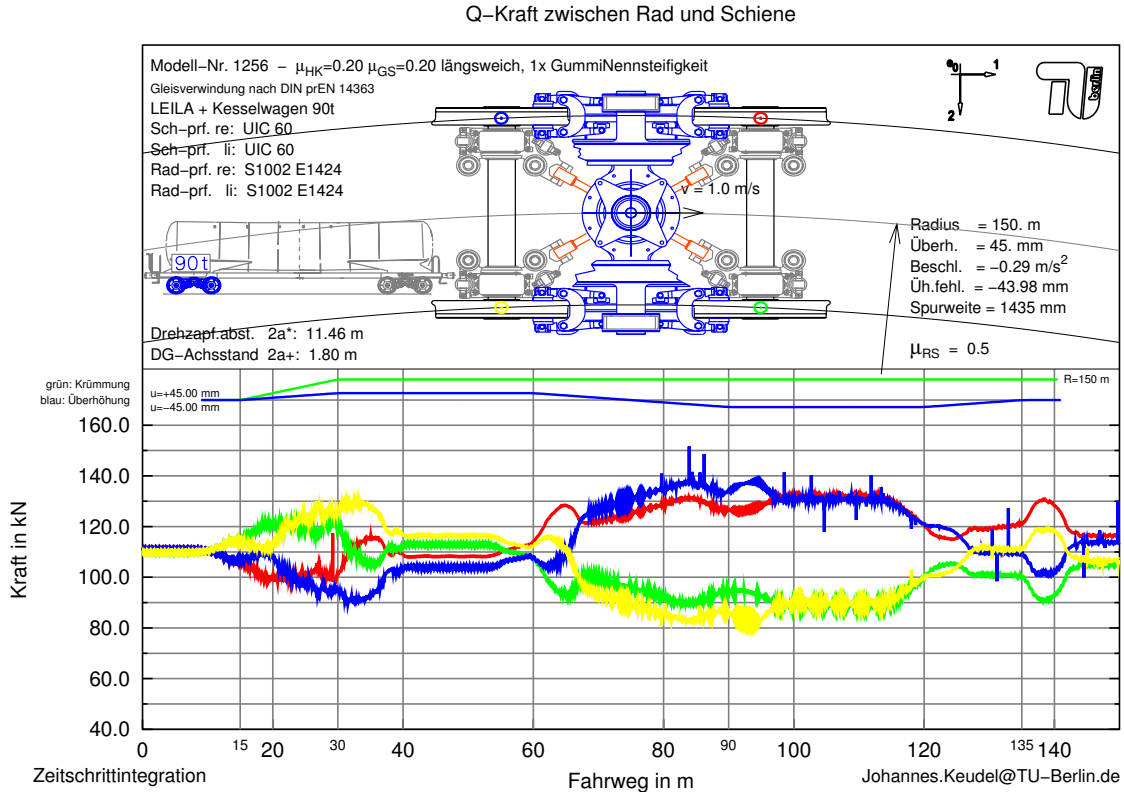
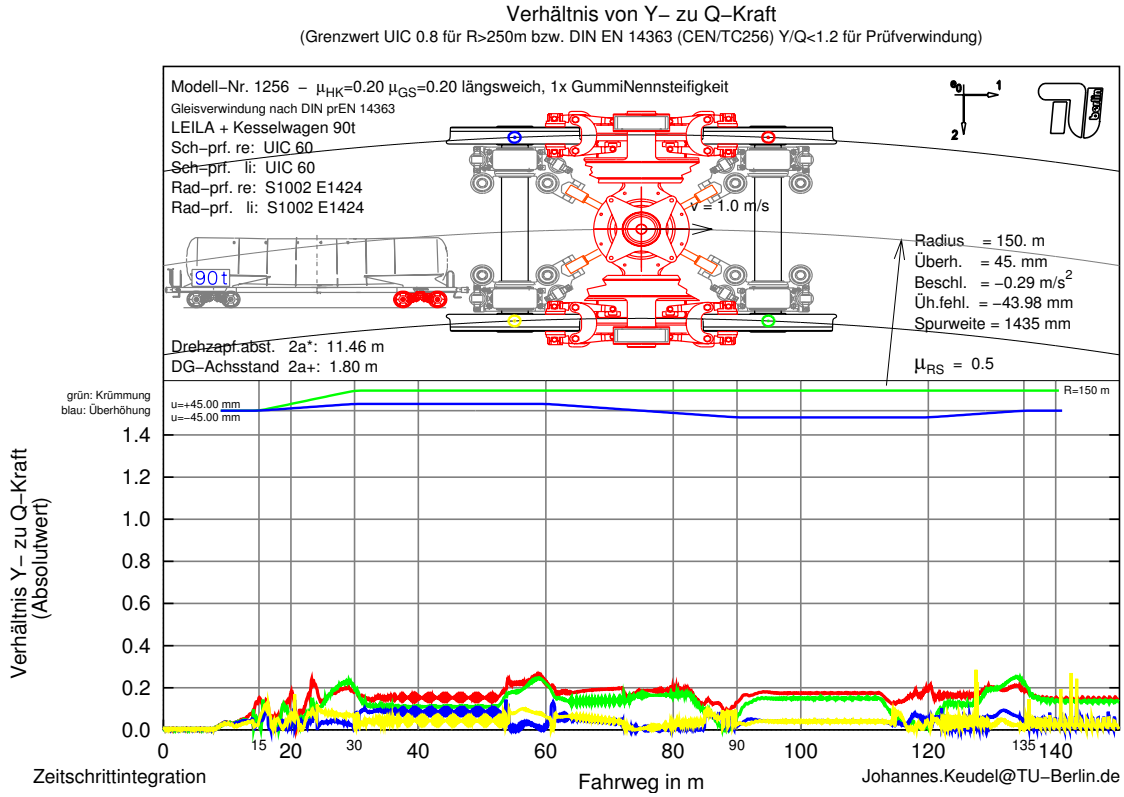




Abbildung B.15: Q-Kraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



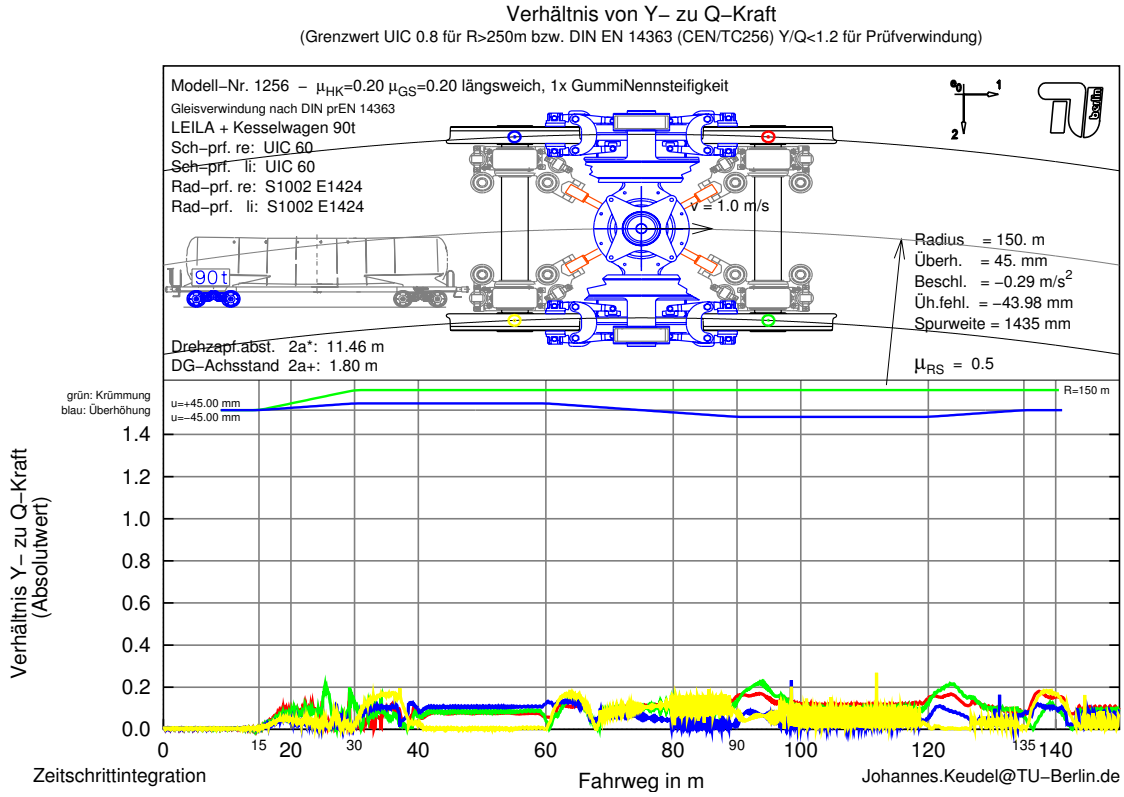
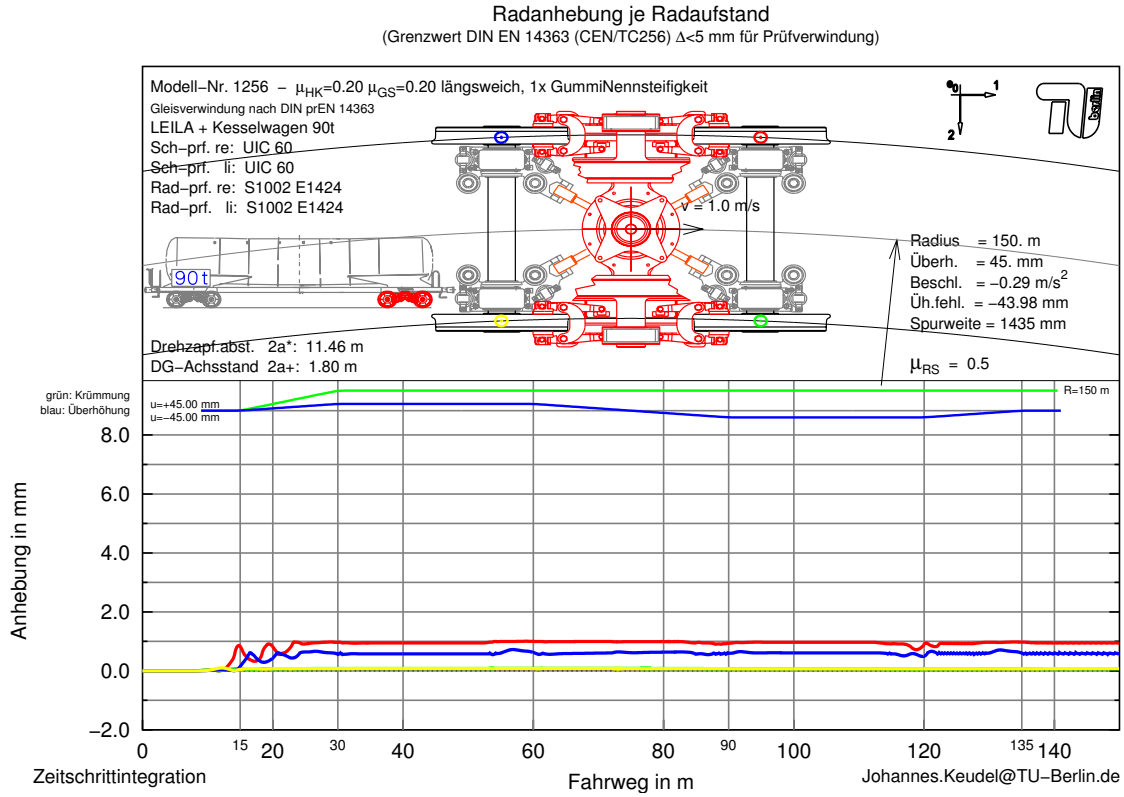




Abbildung B.16: Y/Q - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



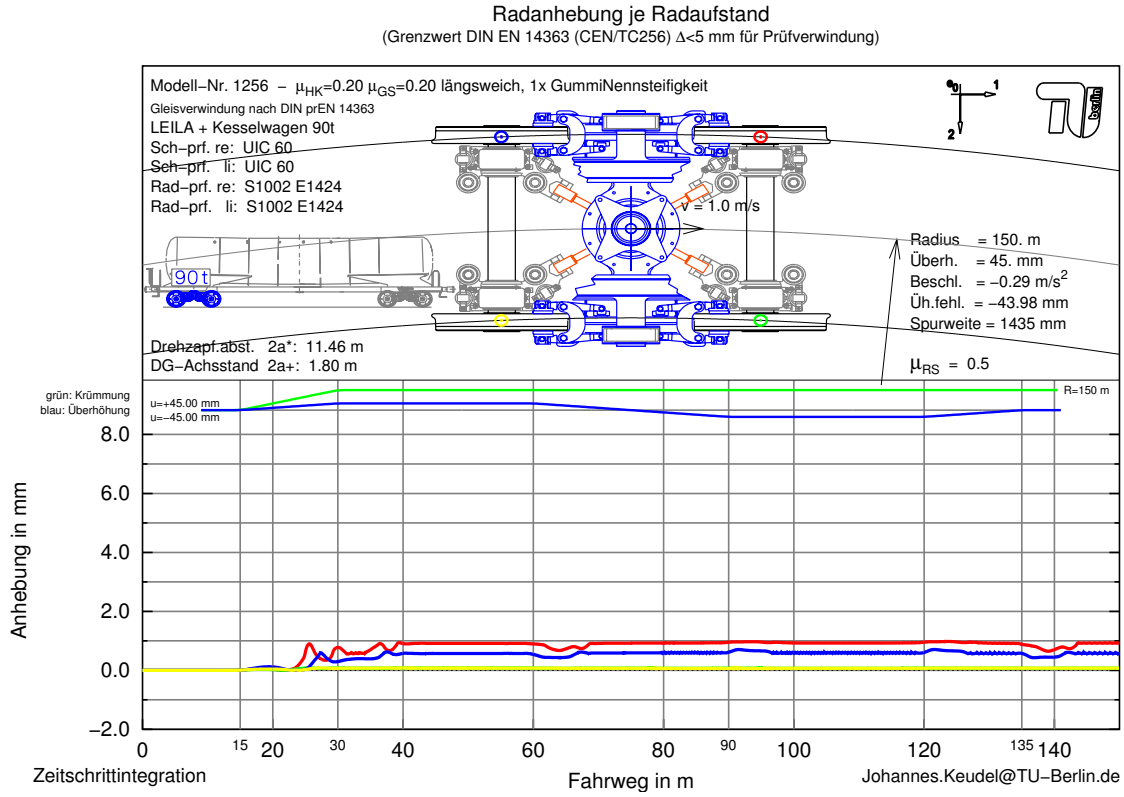
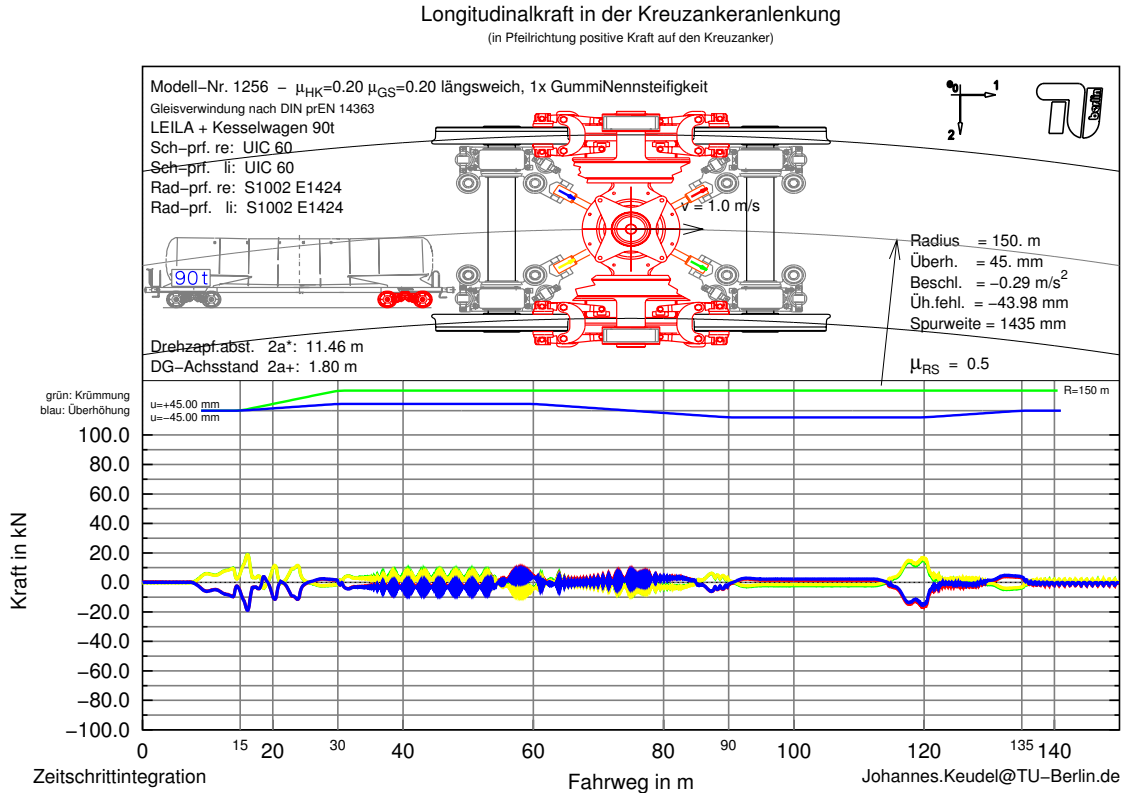




Abbildung B.17: Radanhebung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



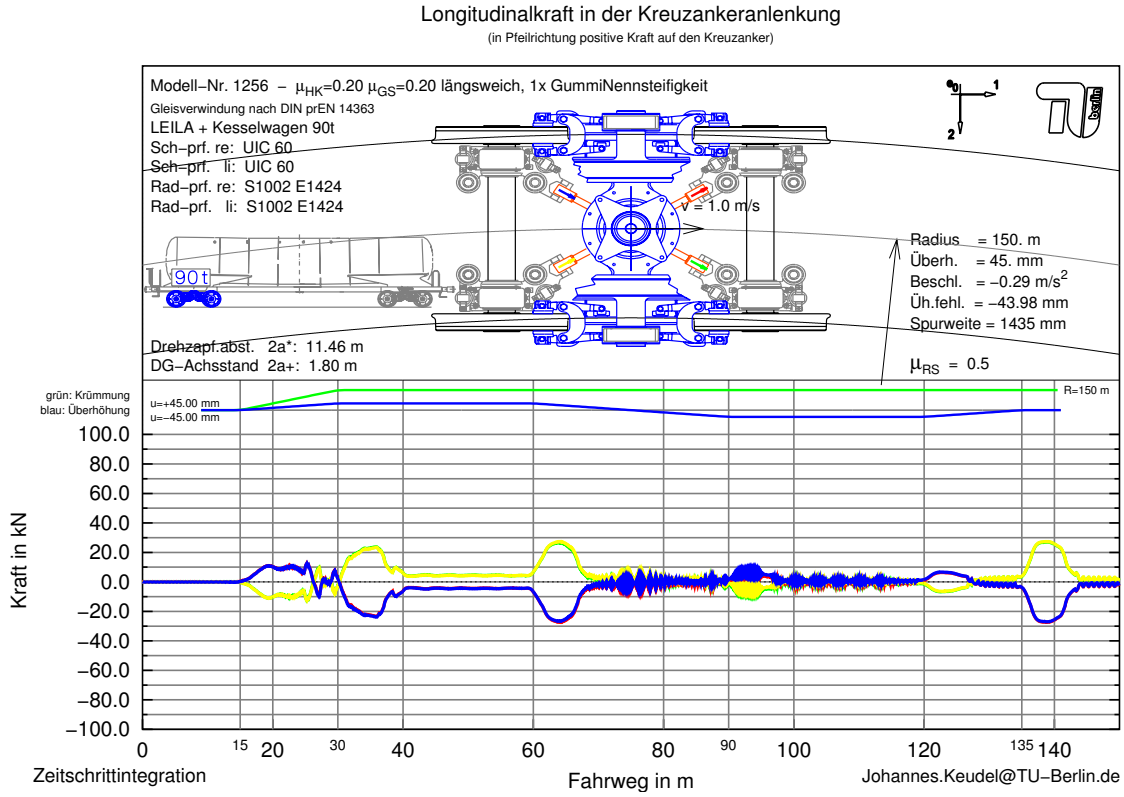
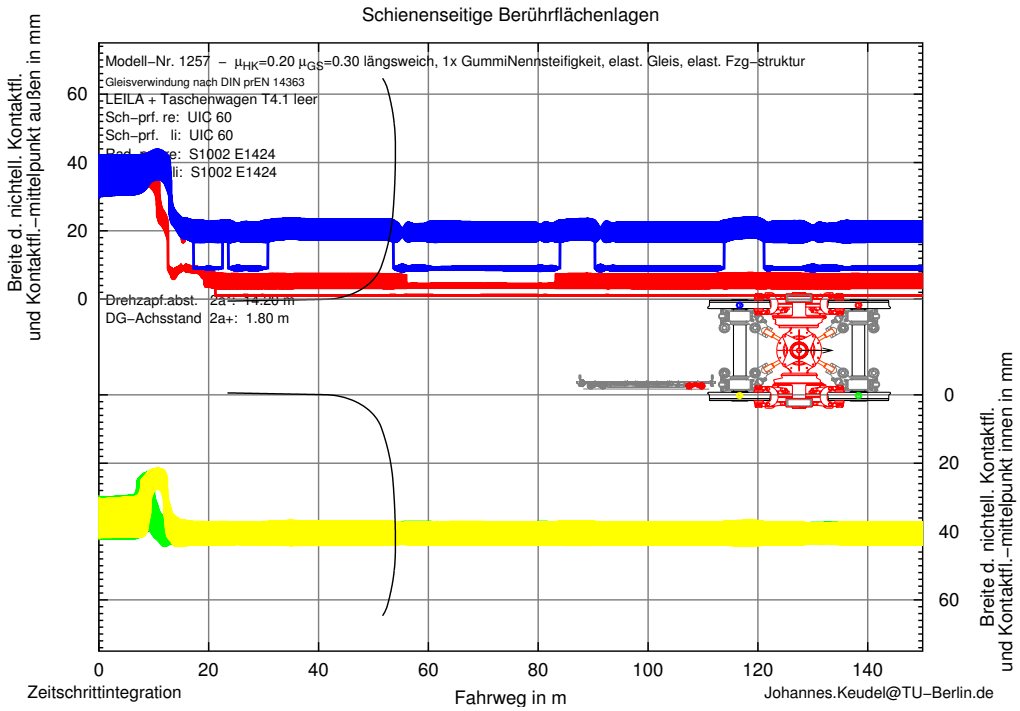




Abbildung B.18: Kreuzankerlängskraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.2 längsweich, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45

# B.3 Ergebnisse Verwindungsfahrt Taschenwagen T4.1

## B.3.1 Taschenwagen T4.1 21.4t - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm



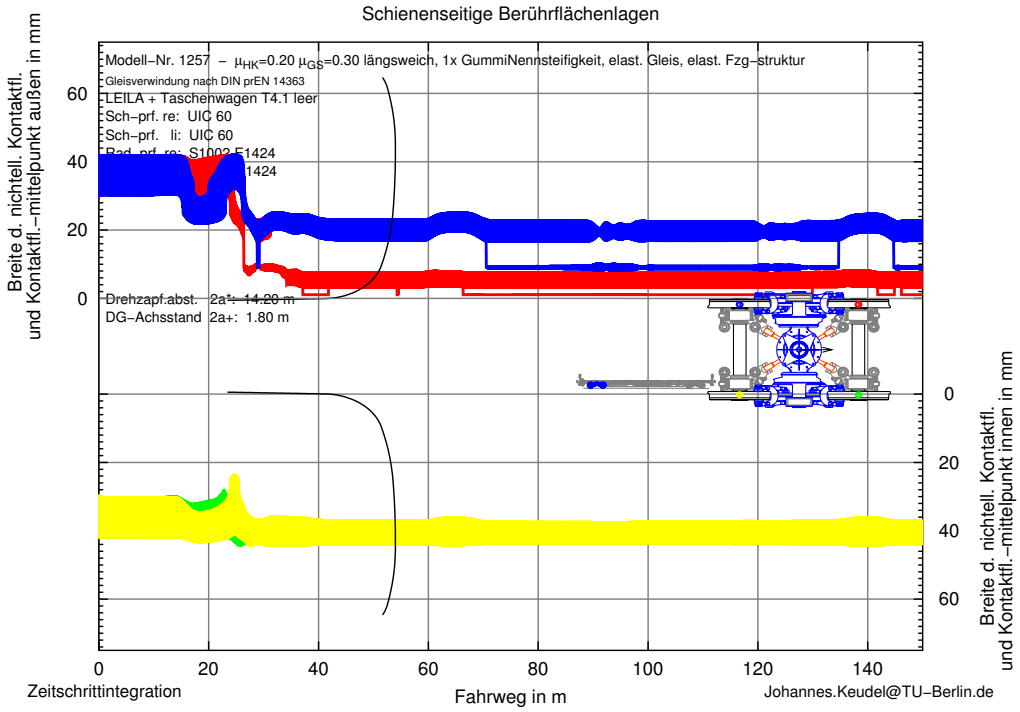
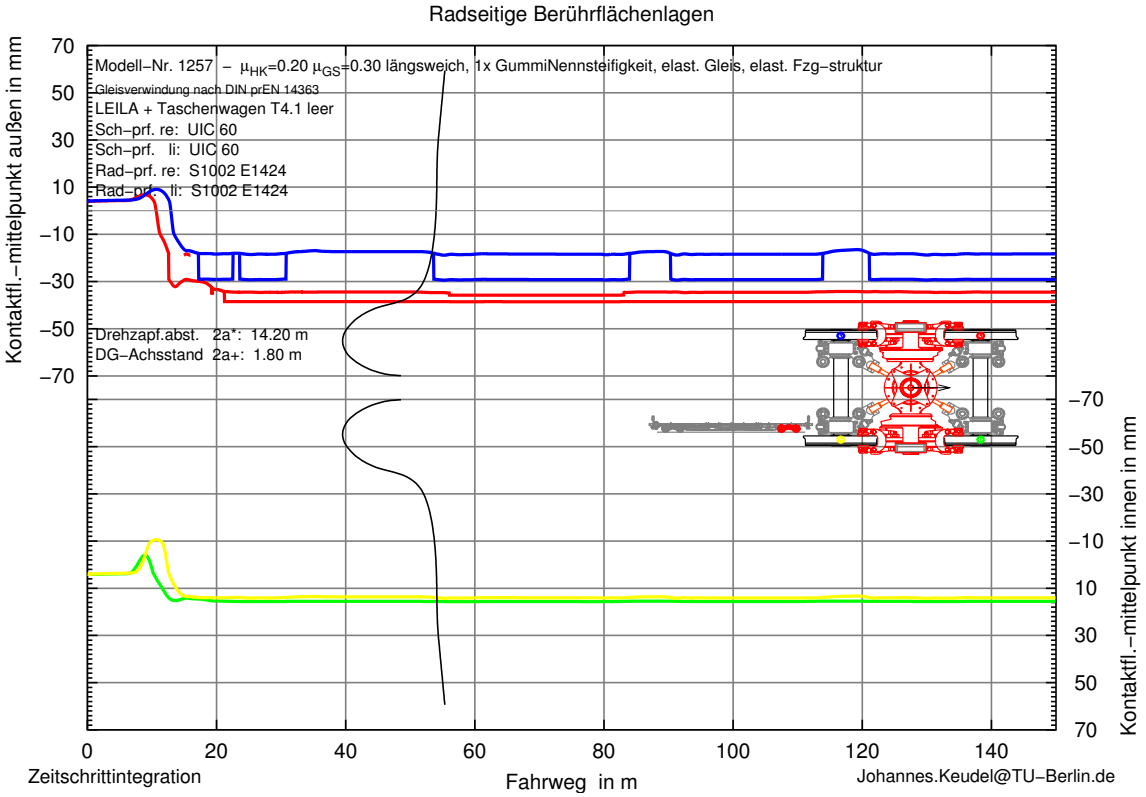




Abbildung B.19: Schienenberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



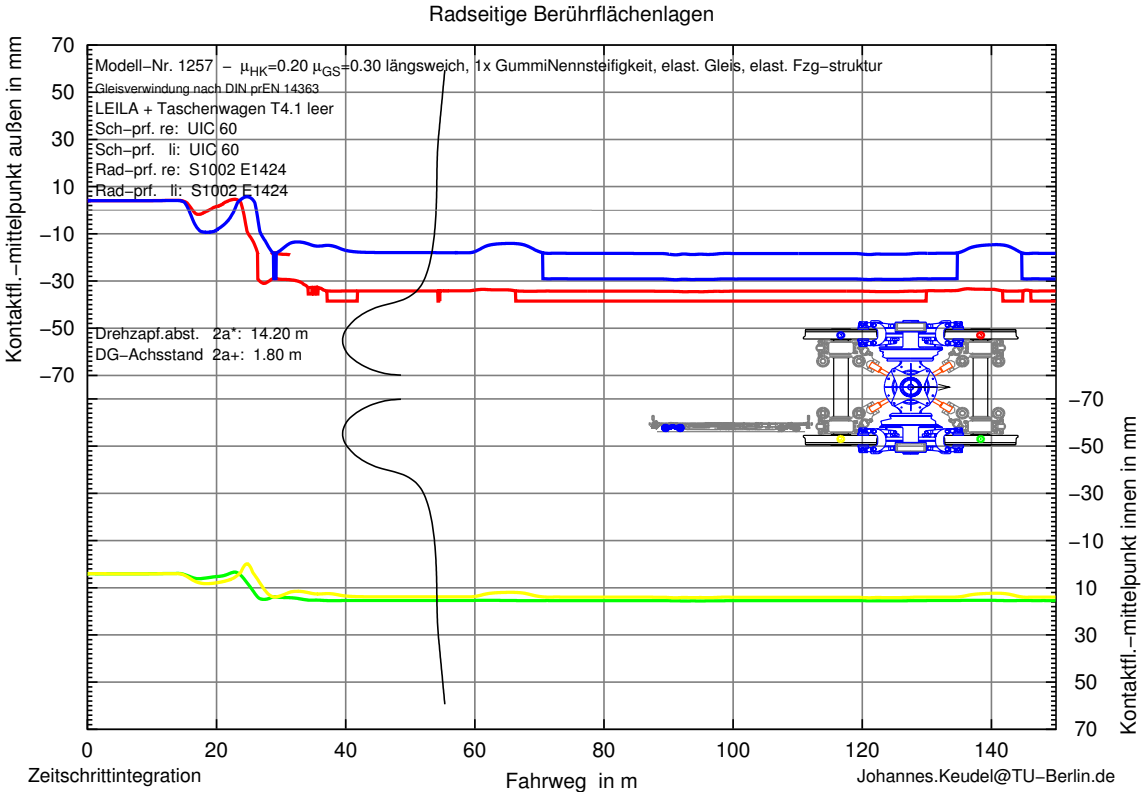
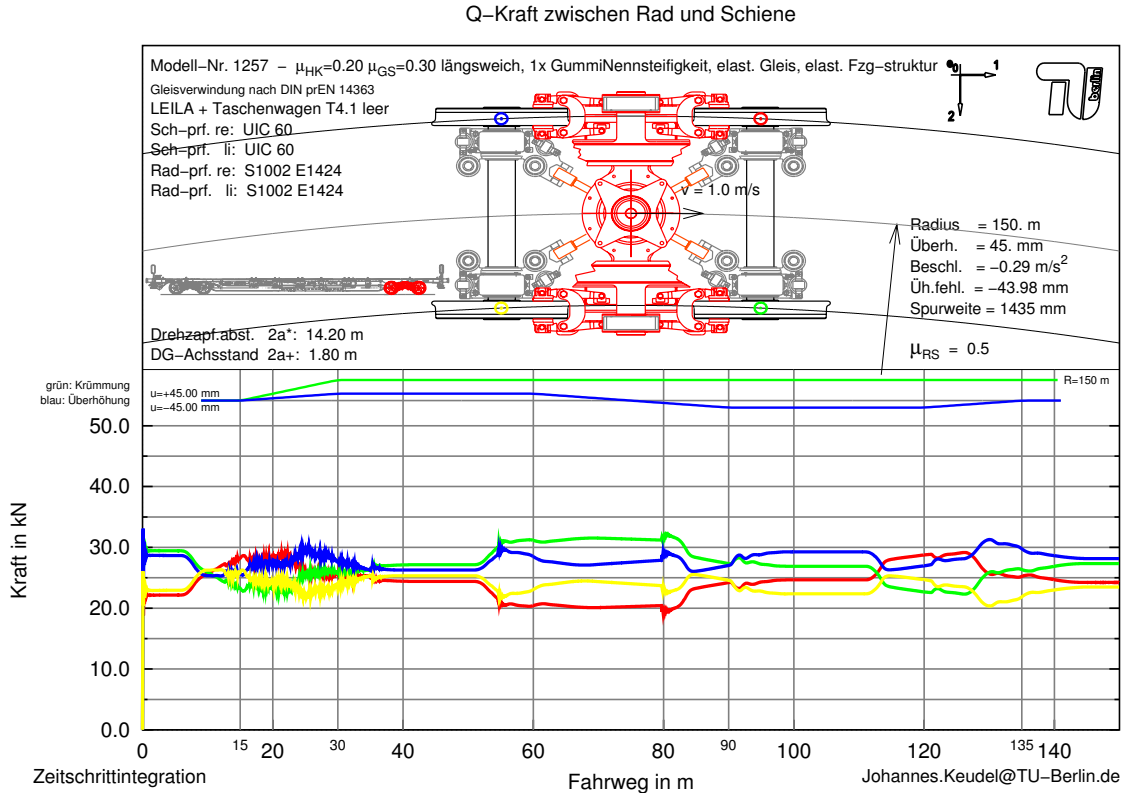




Abbildung B.20: Radberührlagen - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



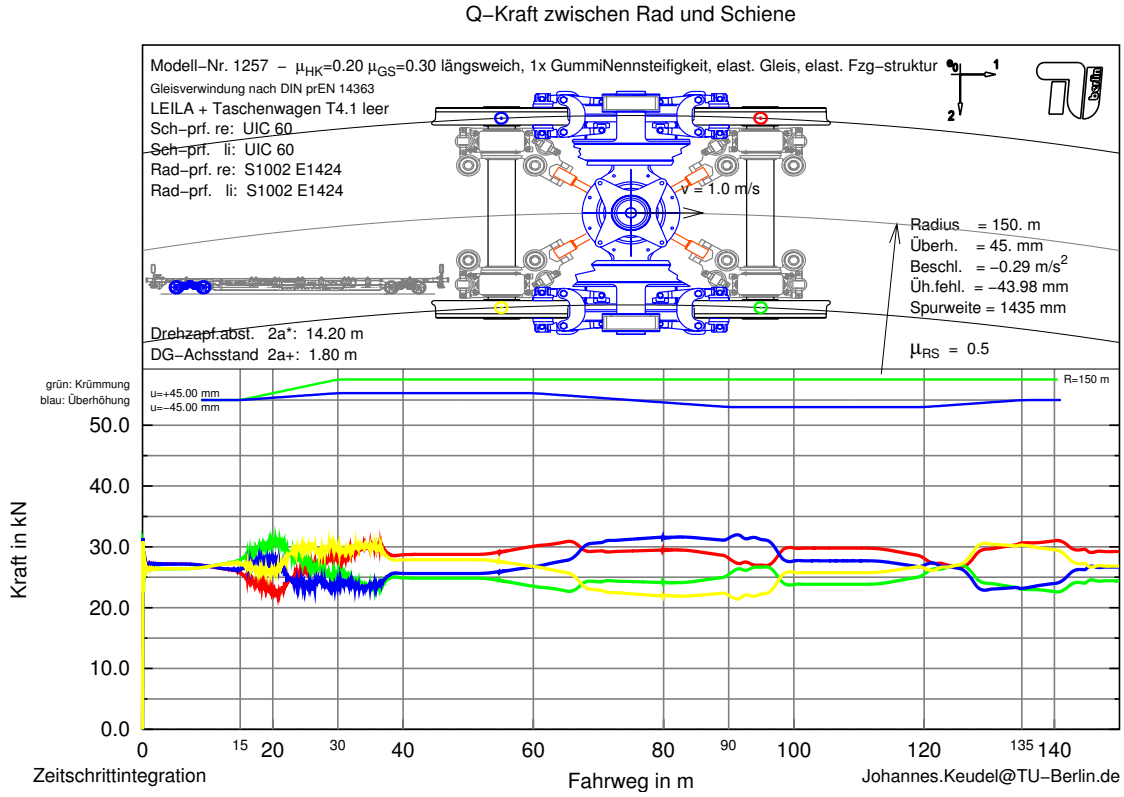
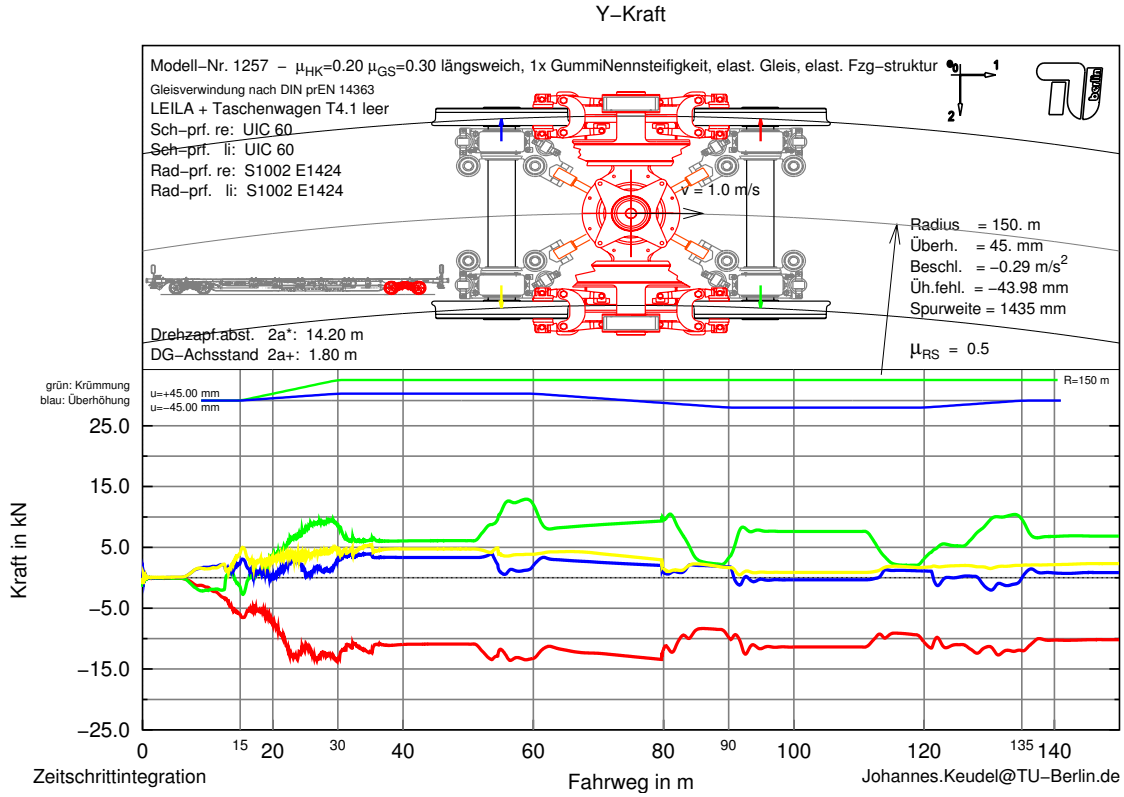




Abbildung B.21: Q-Kraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



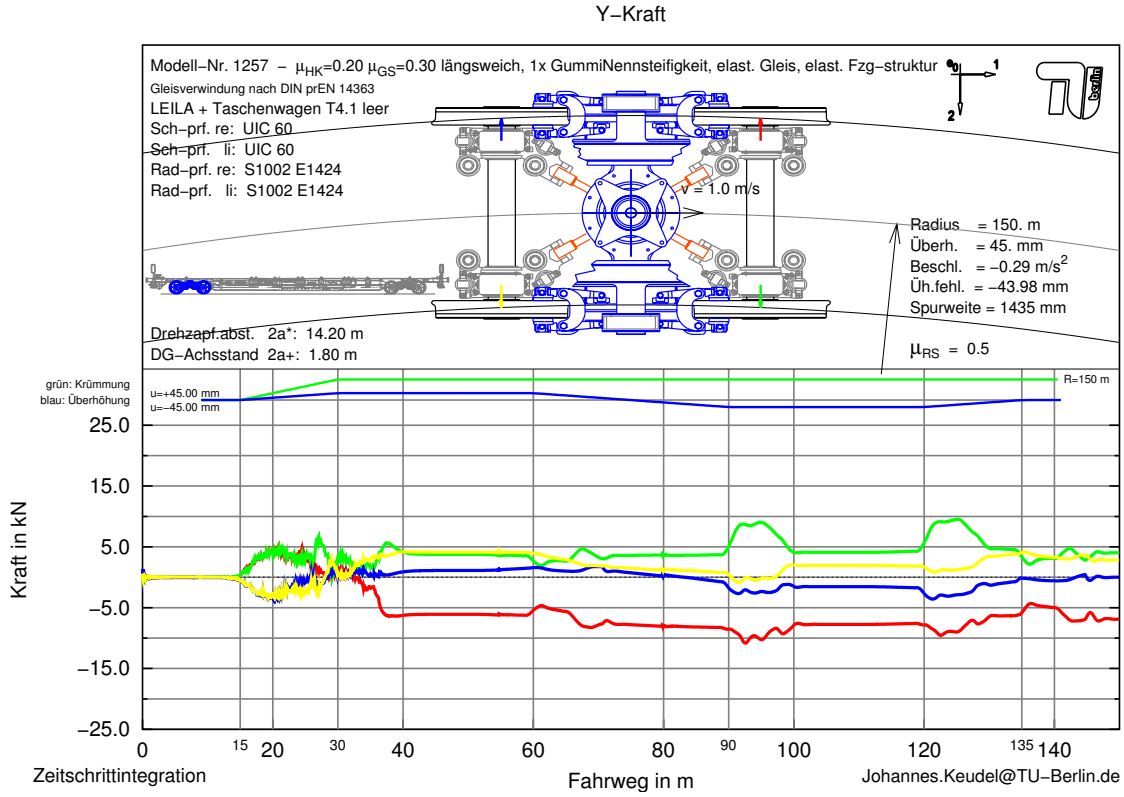
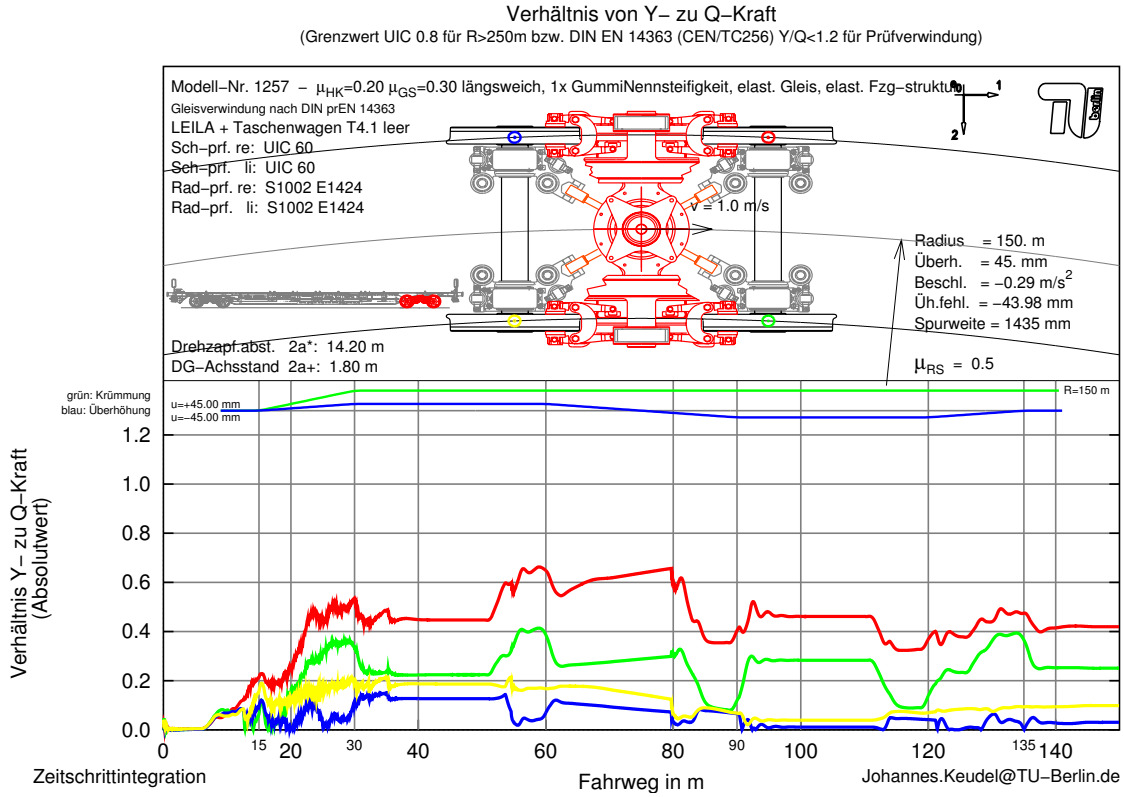




Abbildung B.22: Y-Kraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



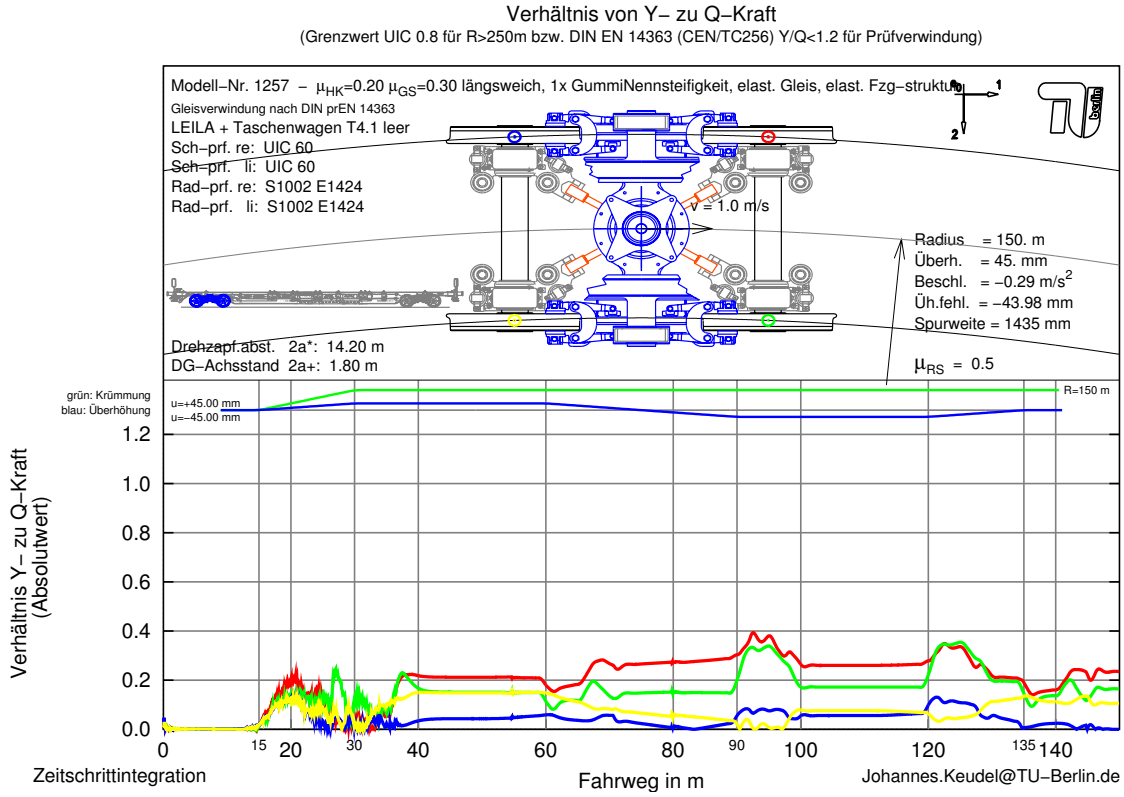
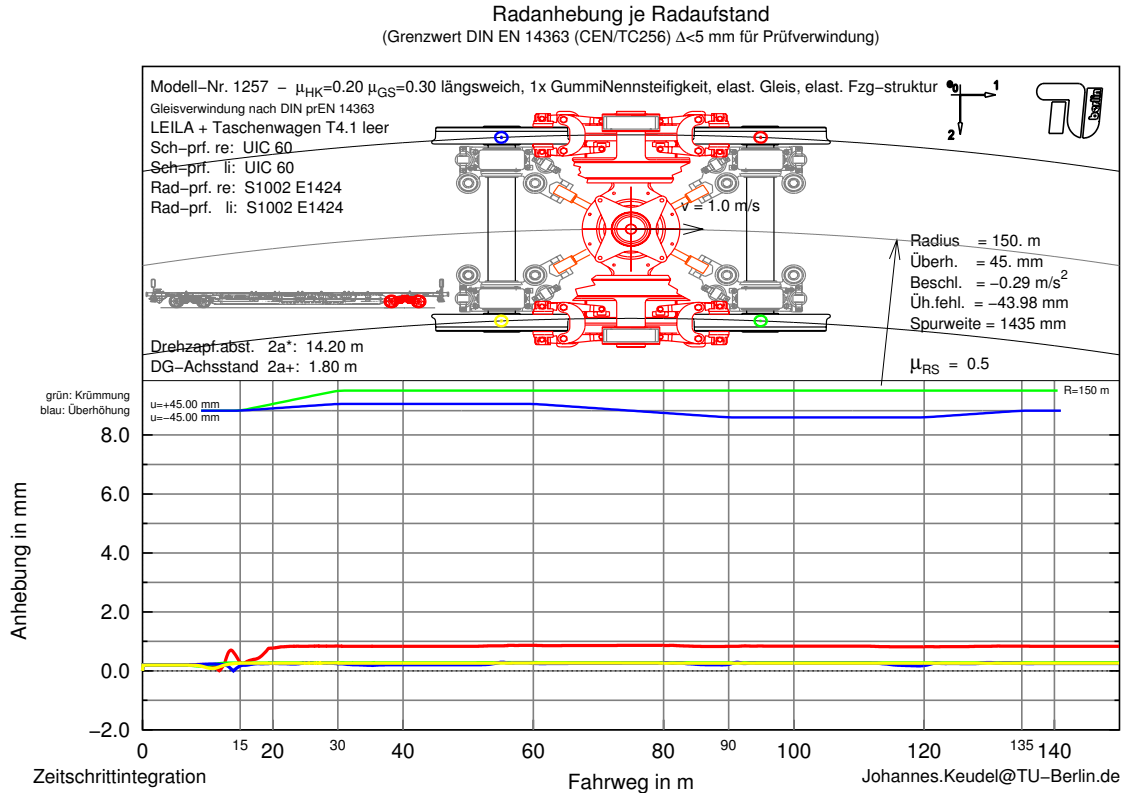




Abbildung B.23: Y/Q - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



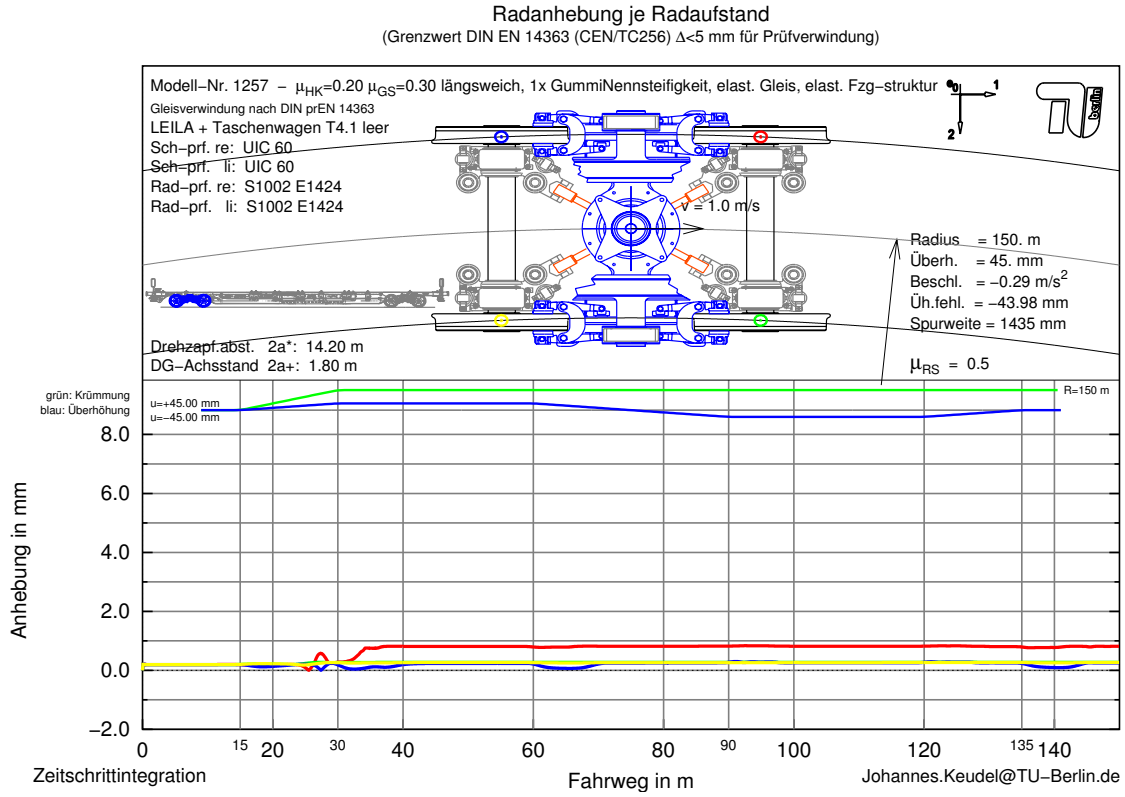
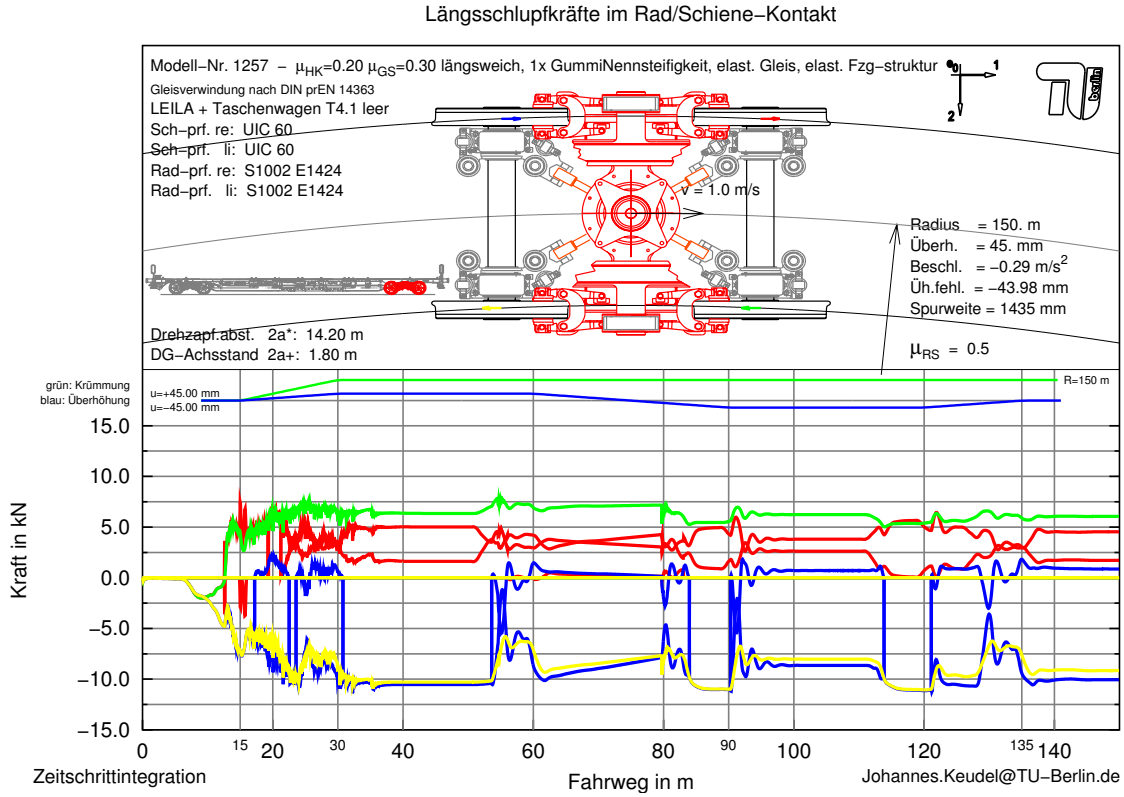




Abbildung B.24: Radanhebung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



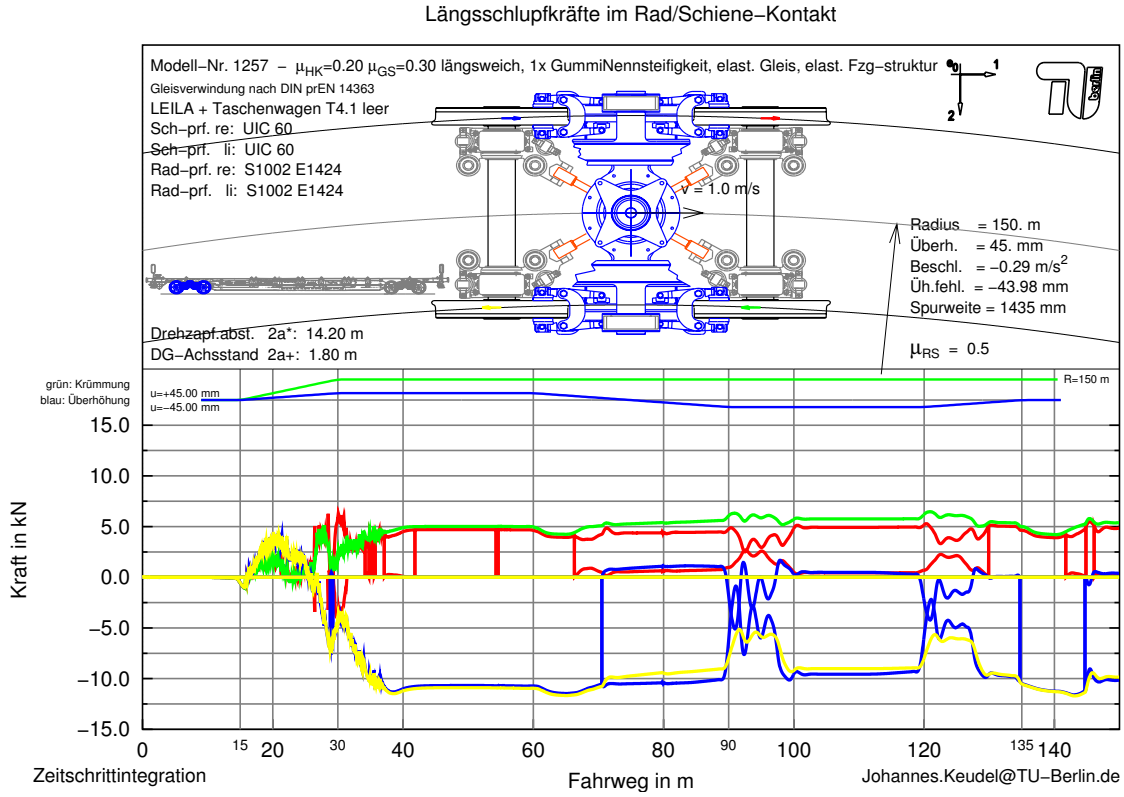
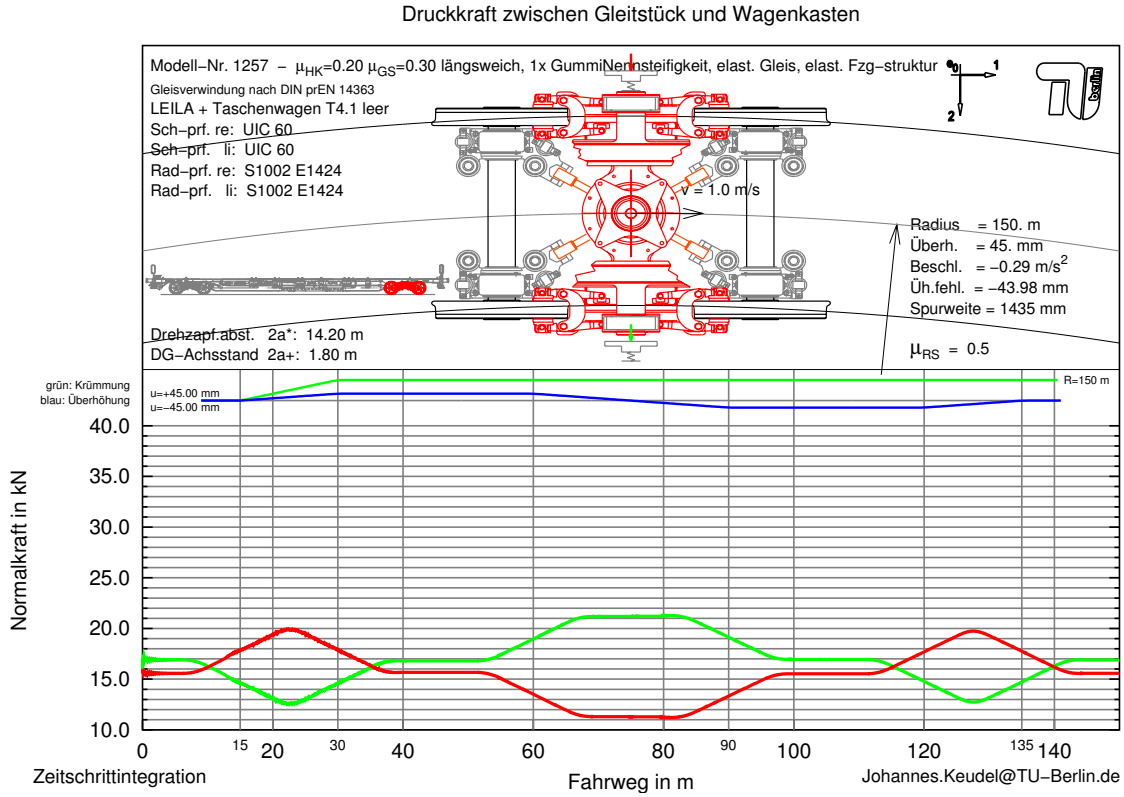




Abbildung B.25: Längsschlupfkraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



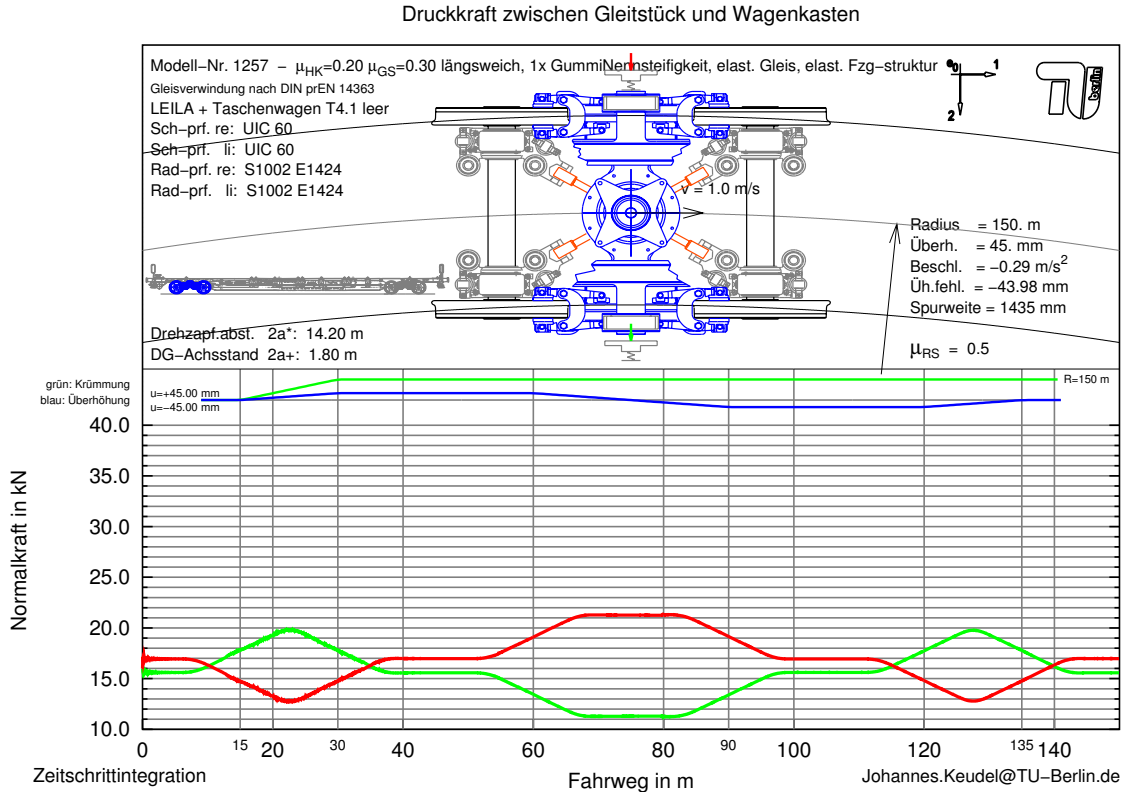
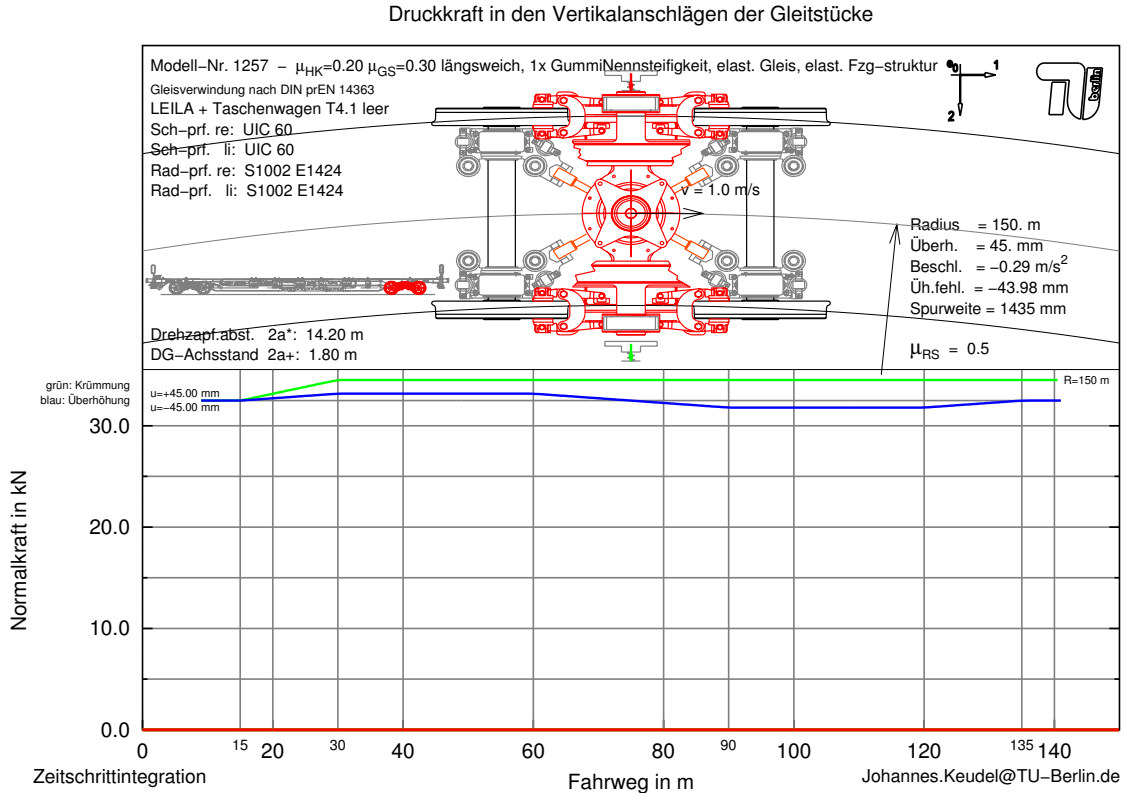




Abbildung B.26: Normalkraft zw. Wagenkasten u. Gleitstück - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



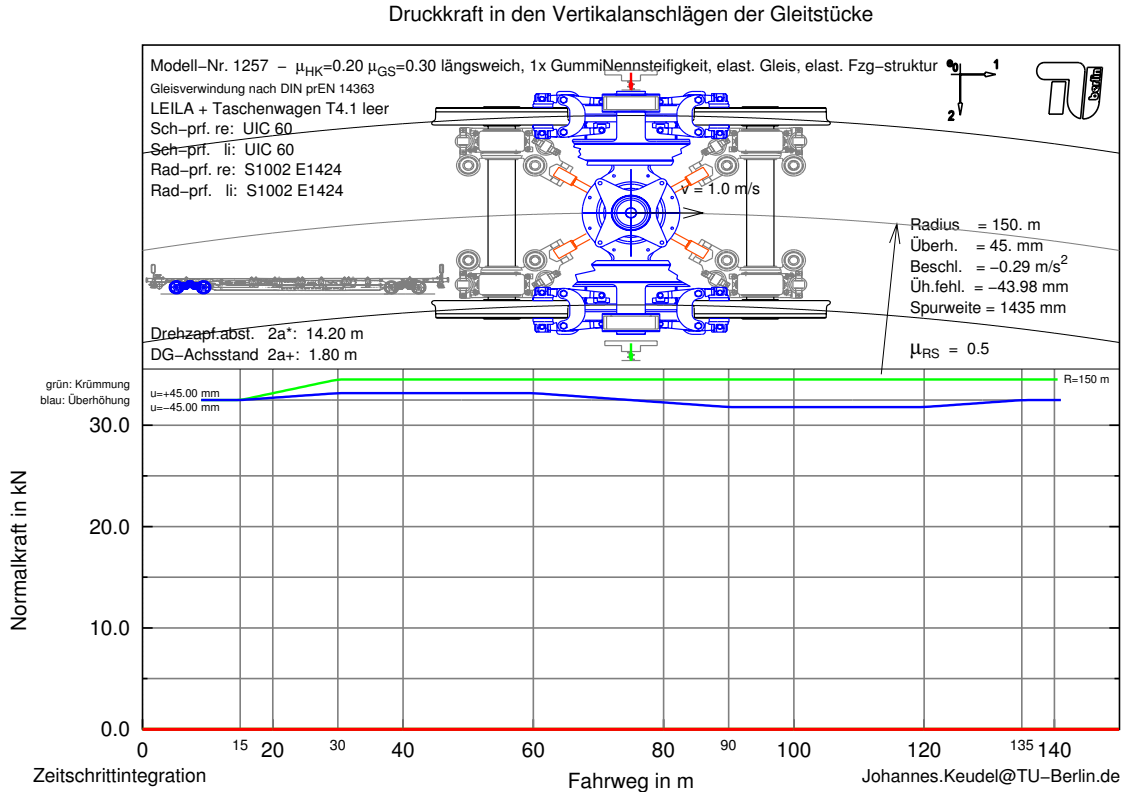
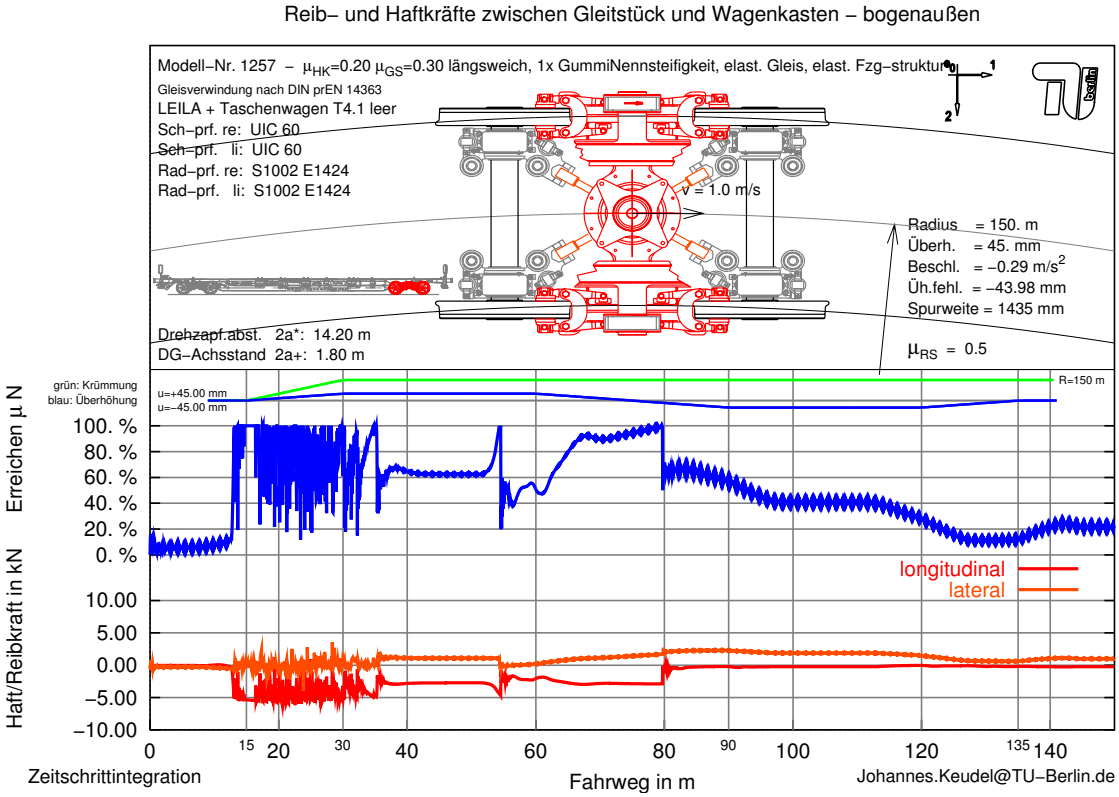




Abbildung B.27: Normalkraft im vertikalen Anschlag der Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



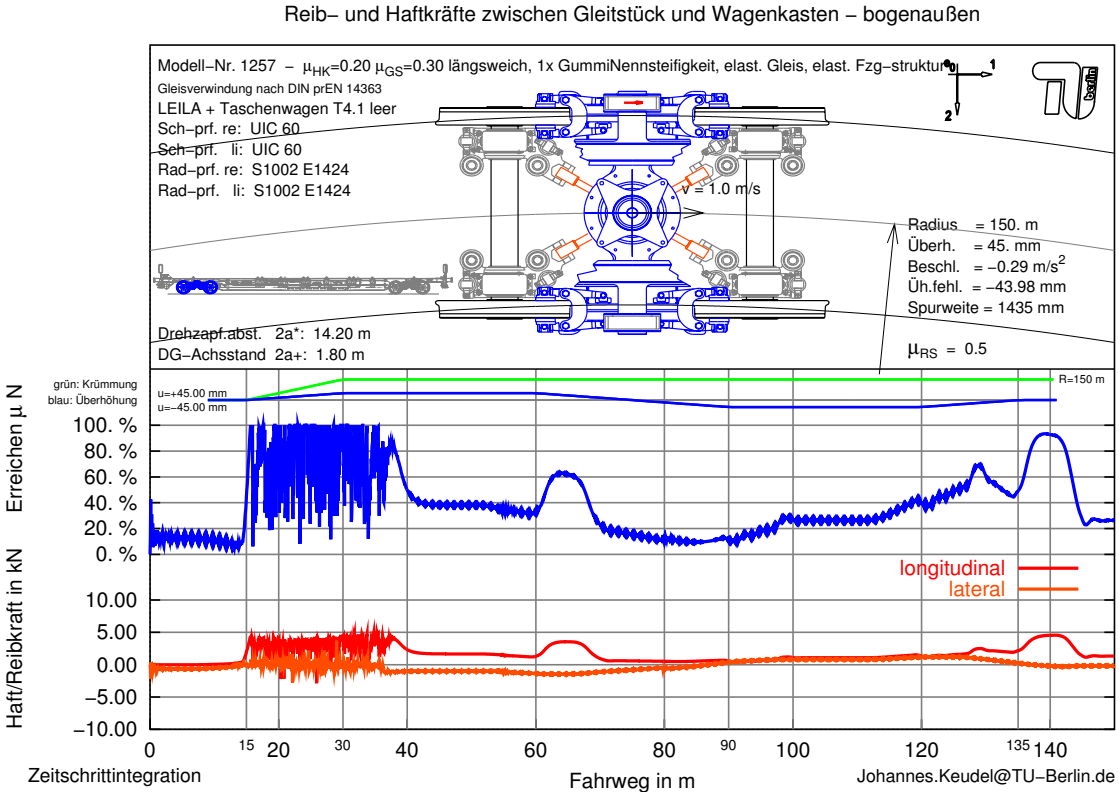
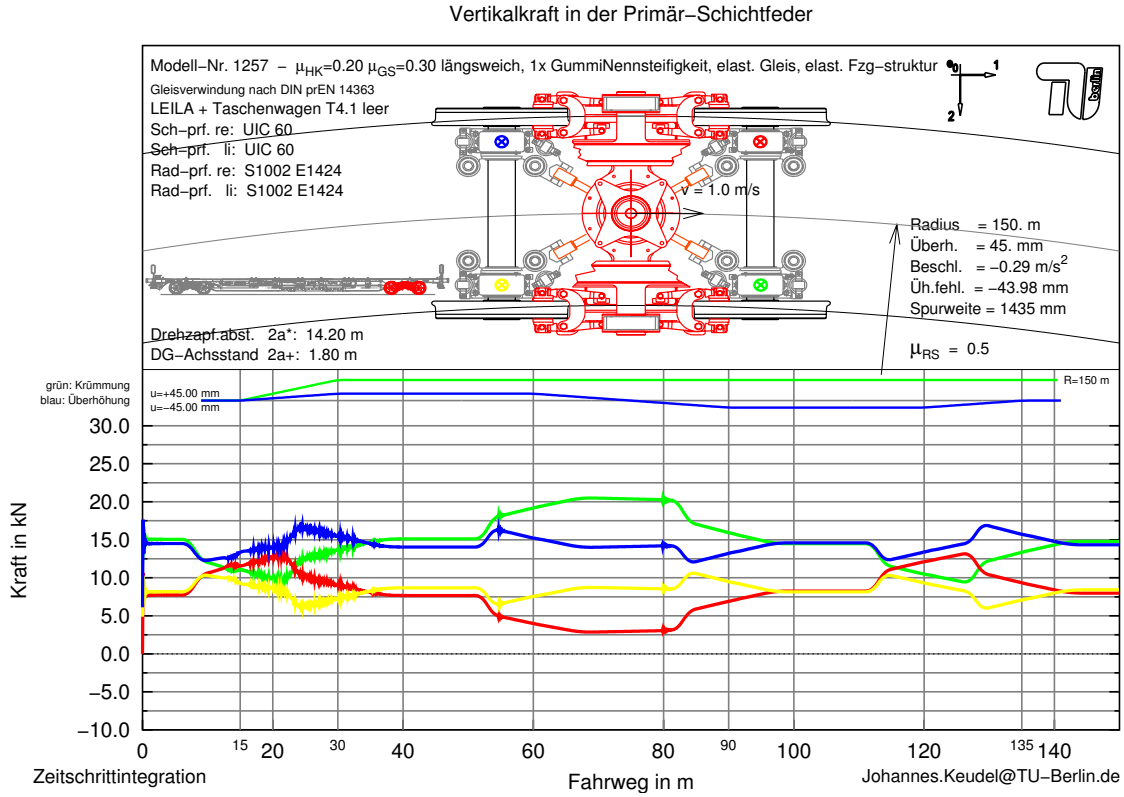




Abbildung B.28: Haft- und Gleitreibungskräfte der bogenäußeren Gleitstücke - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



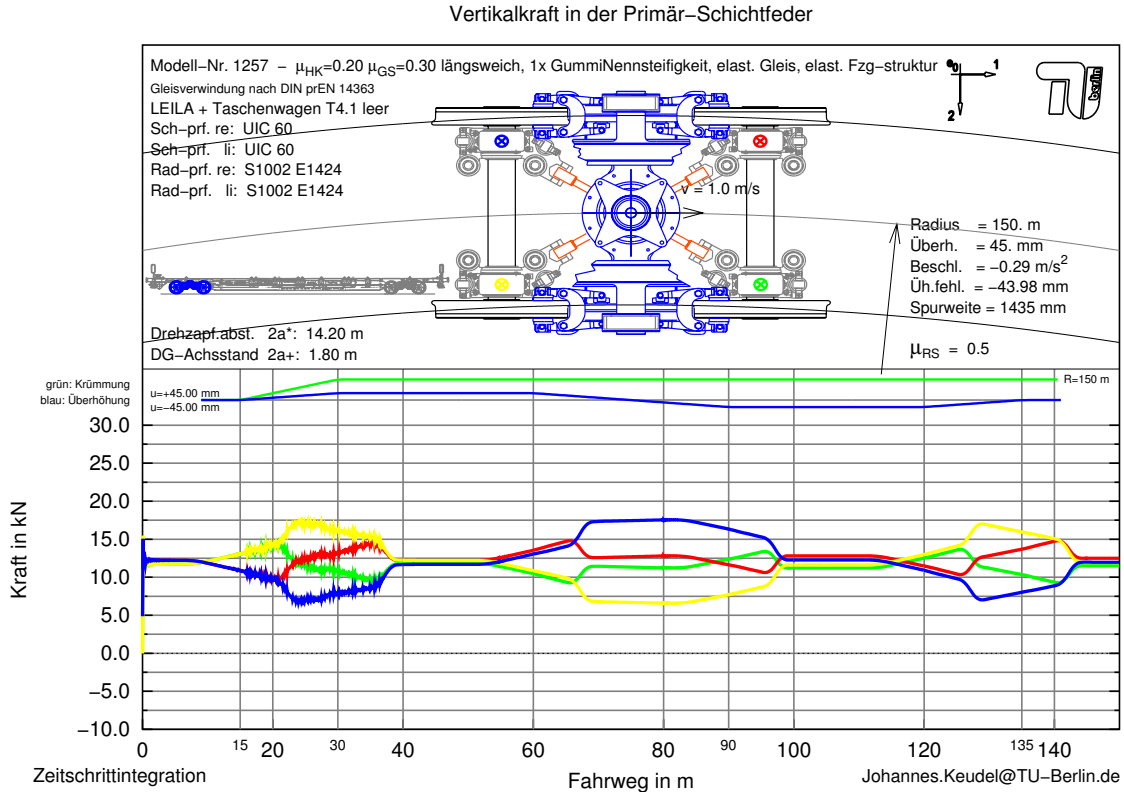
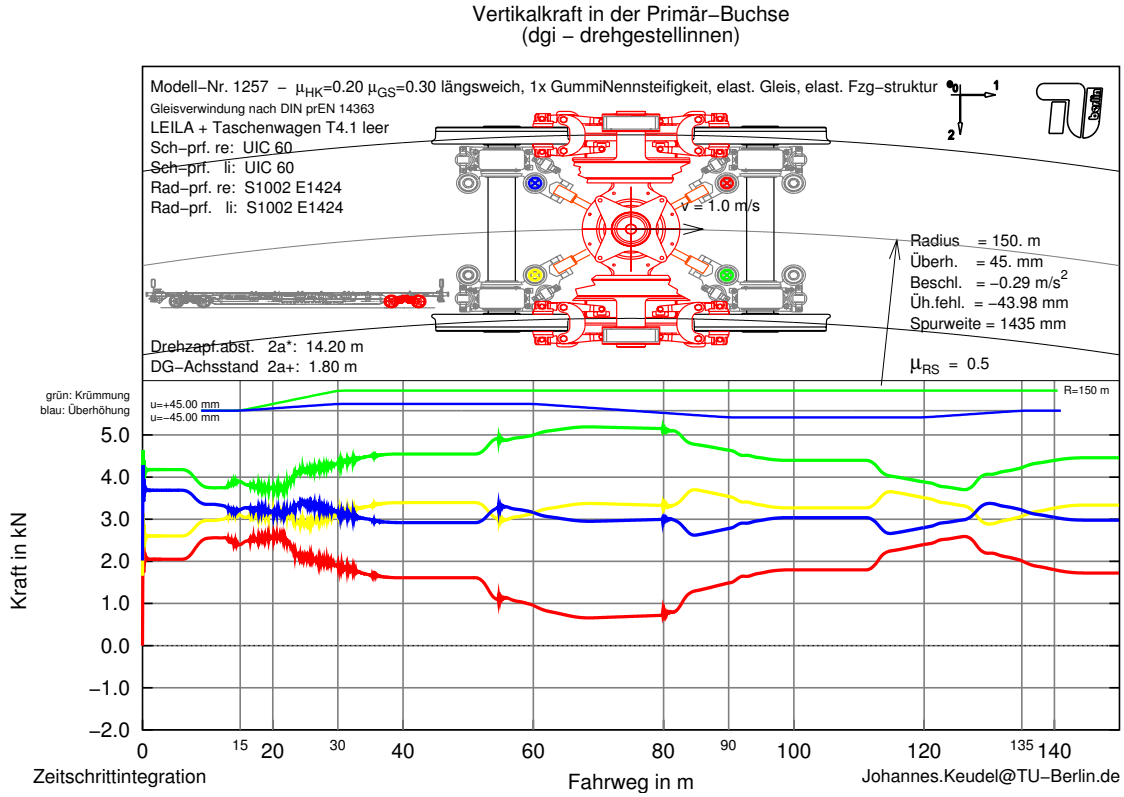




Abbildung B.29: Vertikalkraft je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



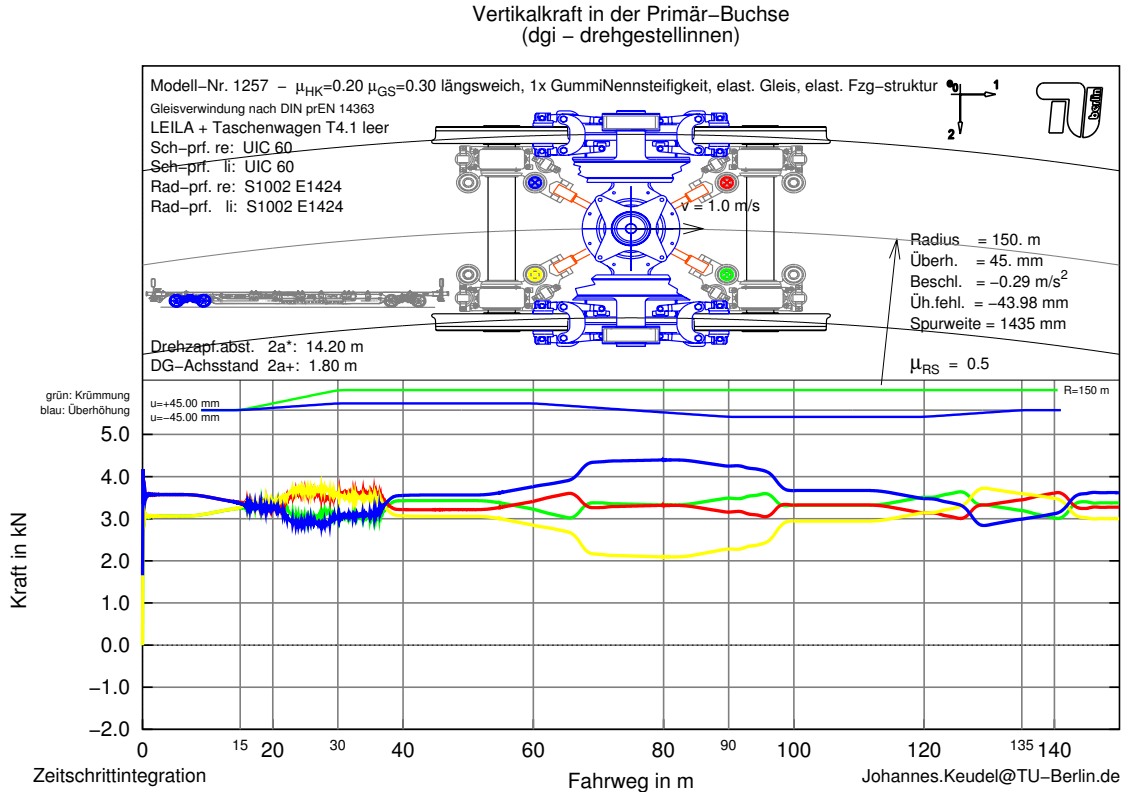
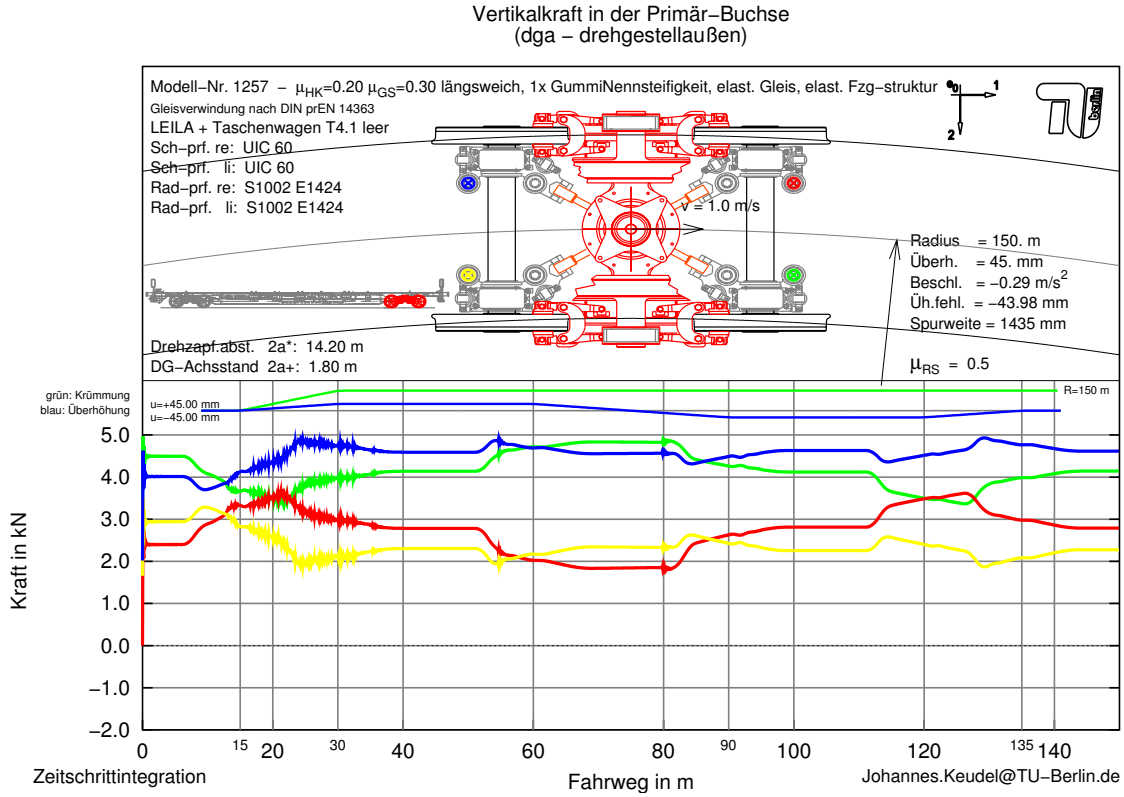




Abbildung B.30: Vertikalkraft je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



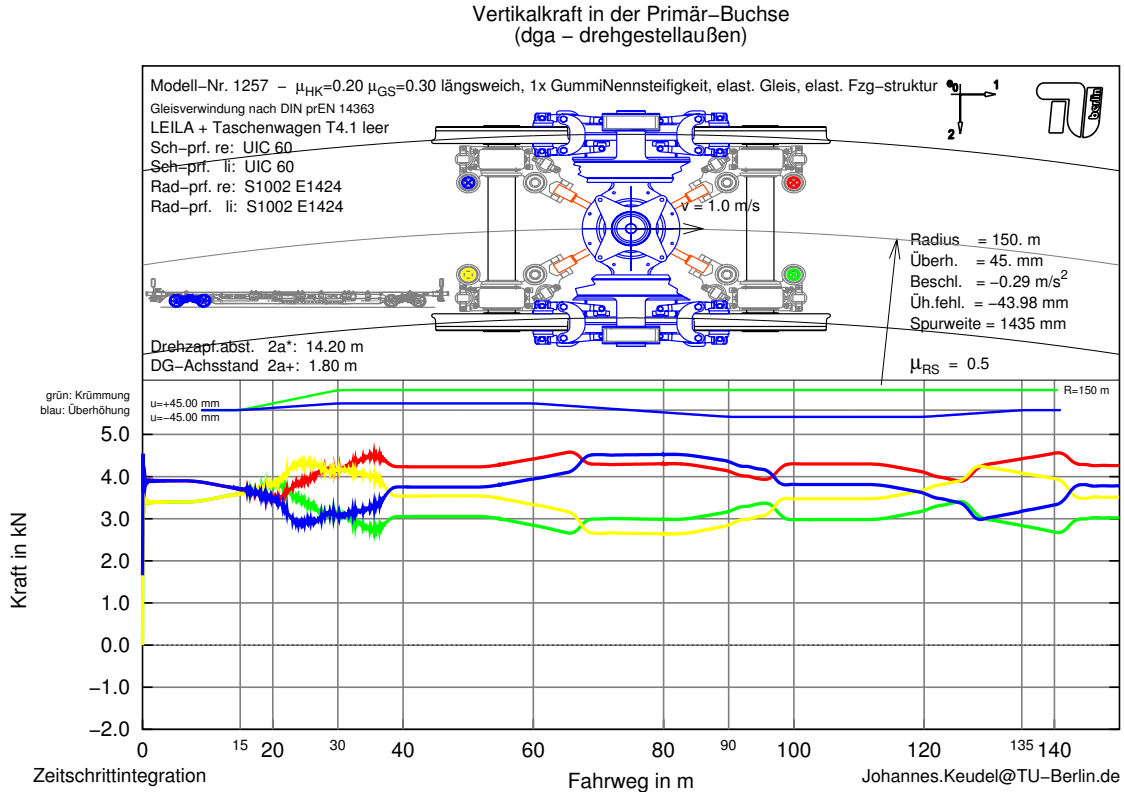
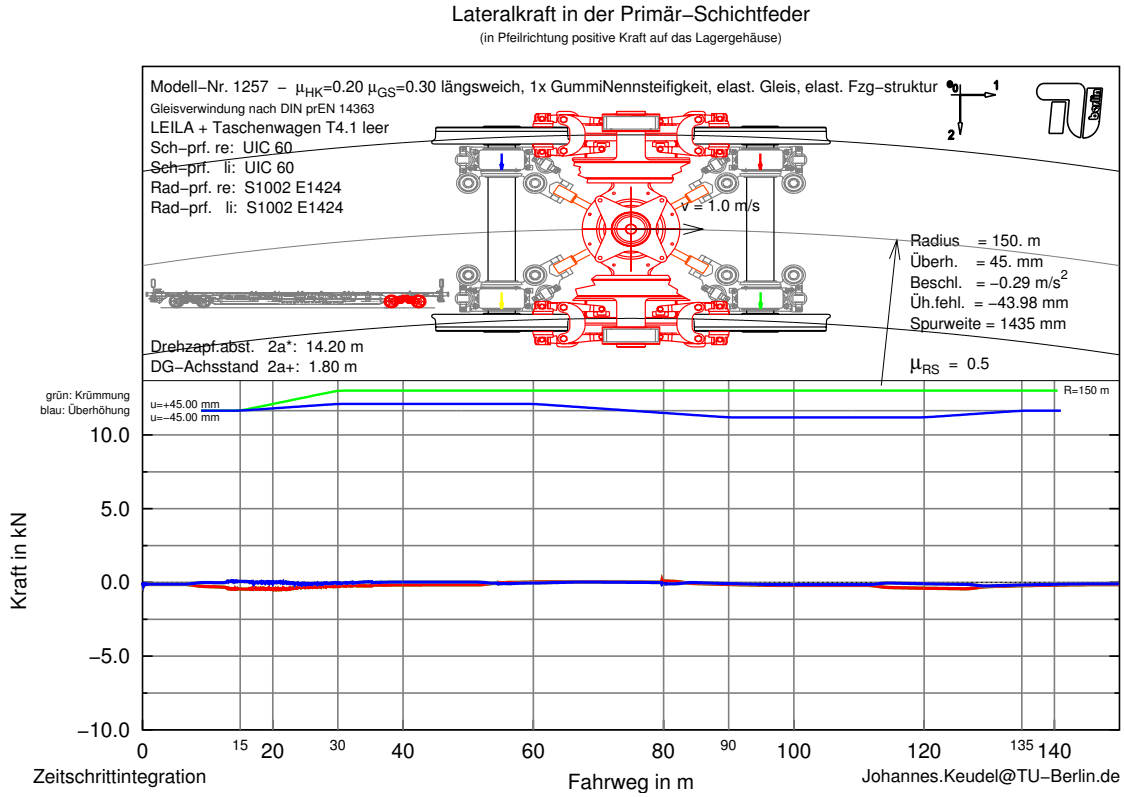




Abbildung B.31: Vertikalkraft je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



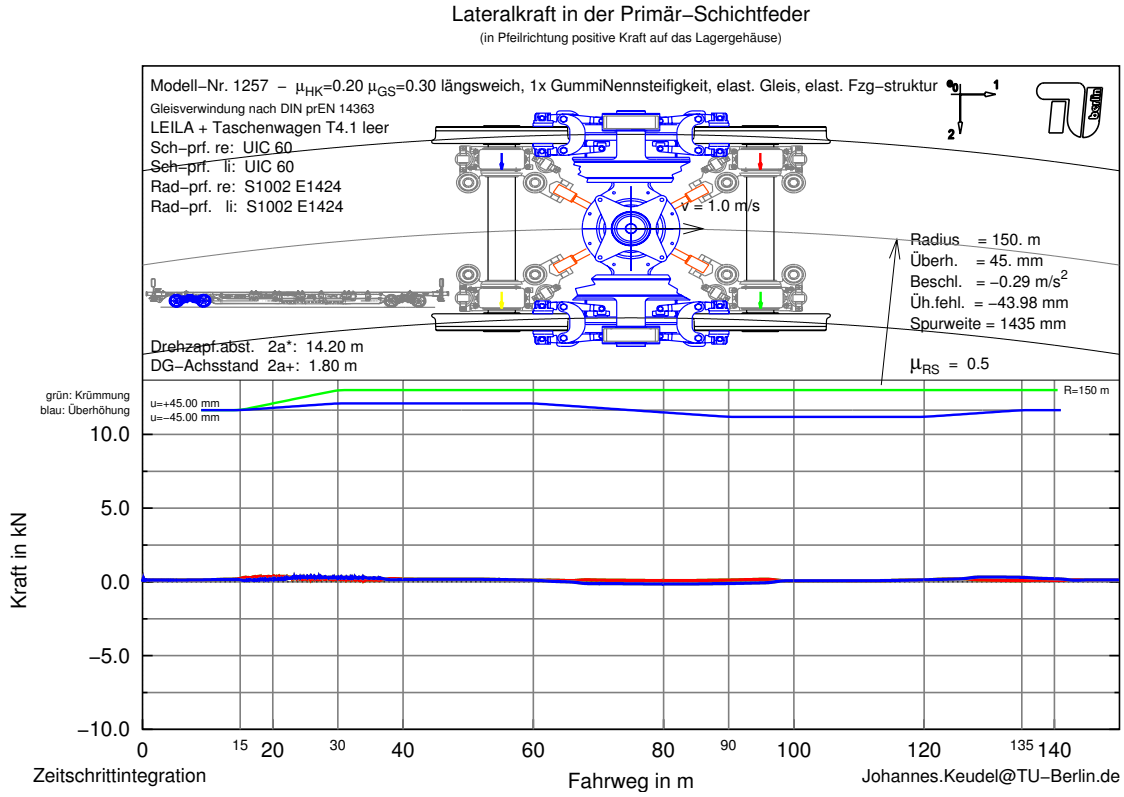
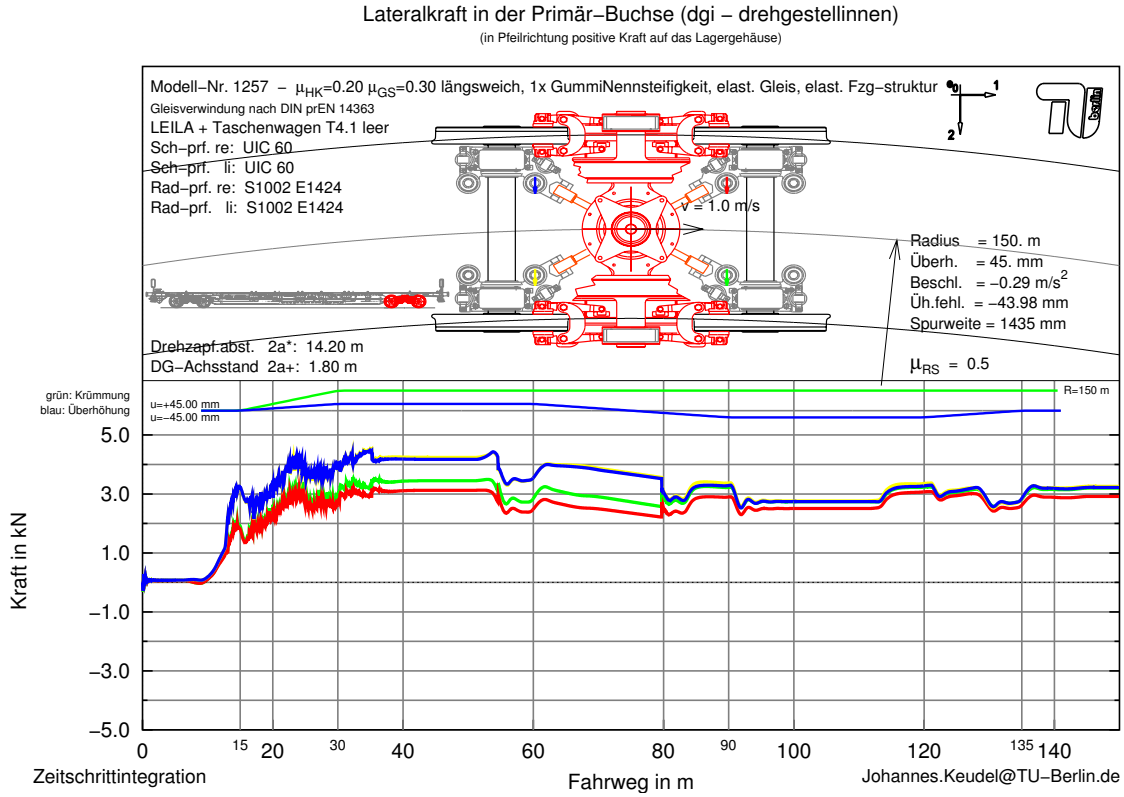




Abbildung B.32: Lateralkraft je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



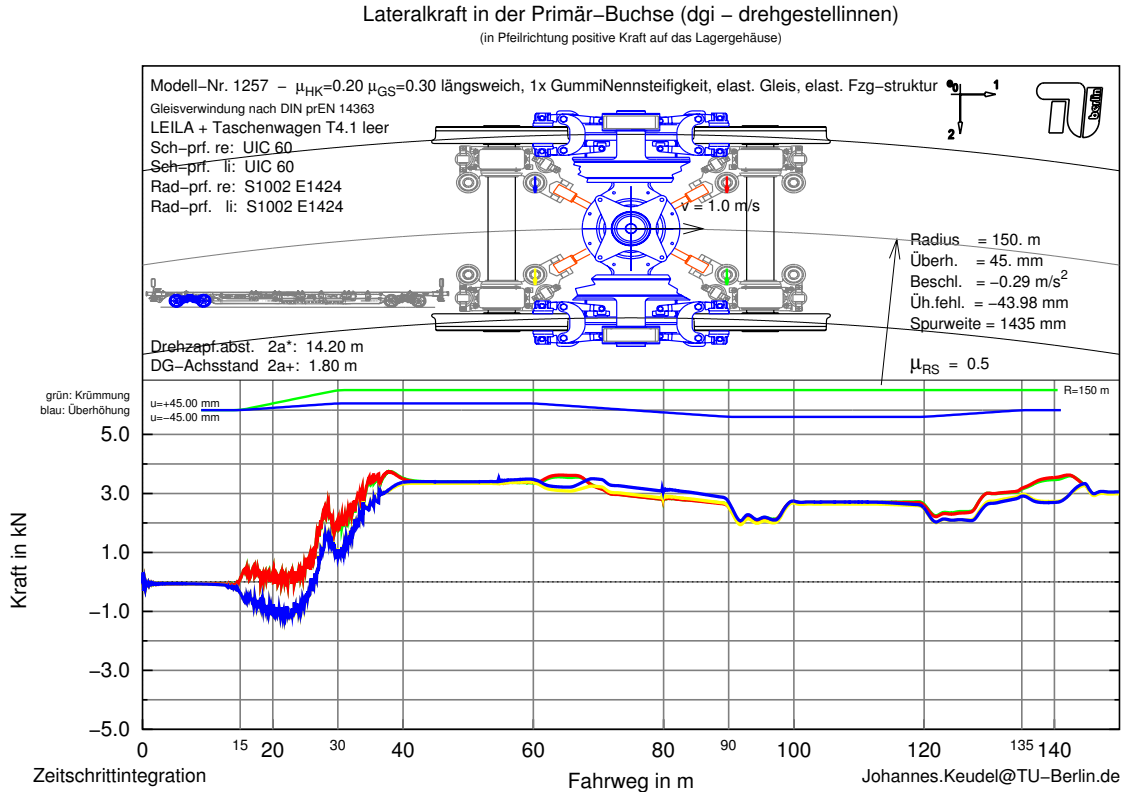
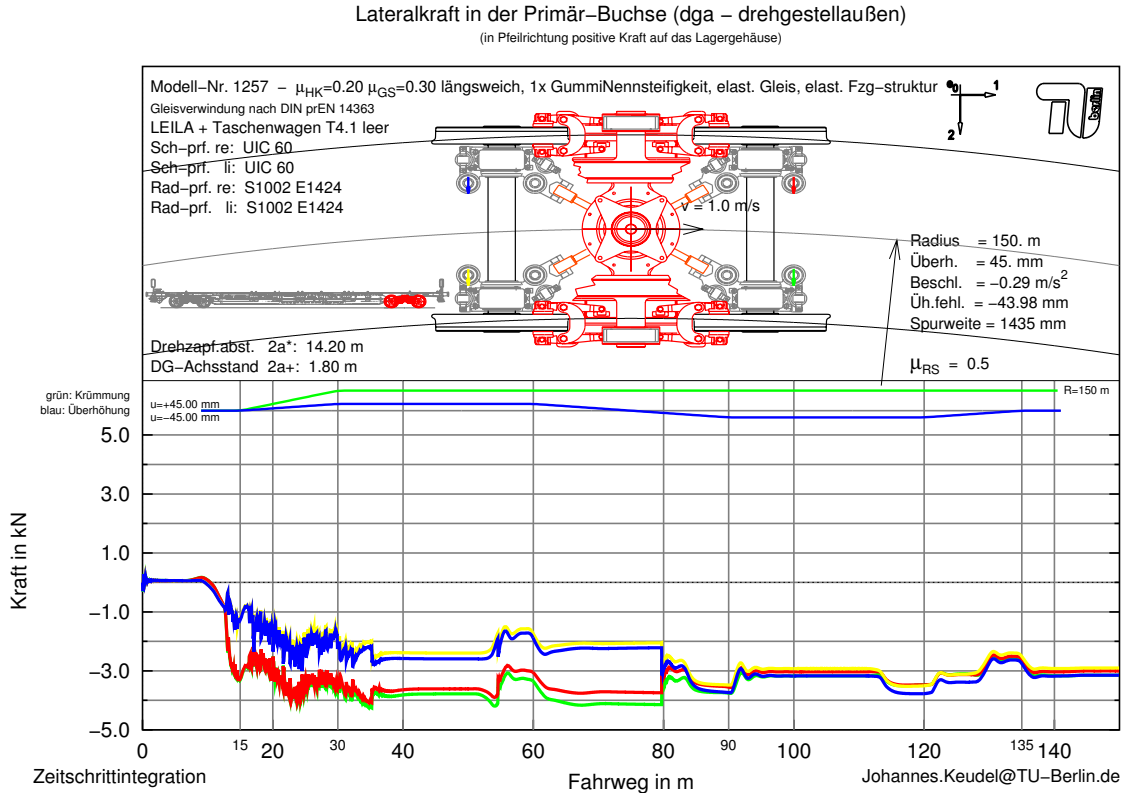




Abbildung B.33: Lateralkraft je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



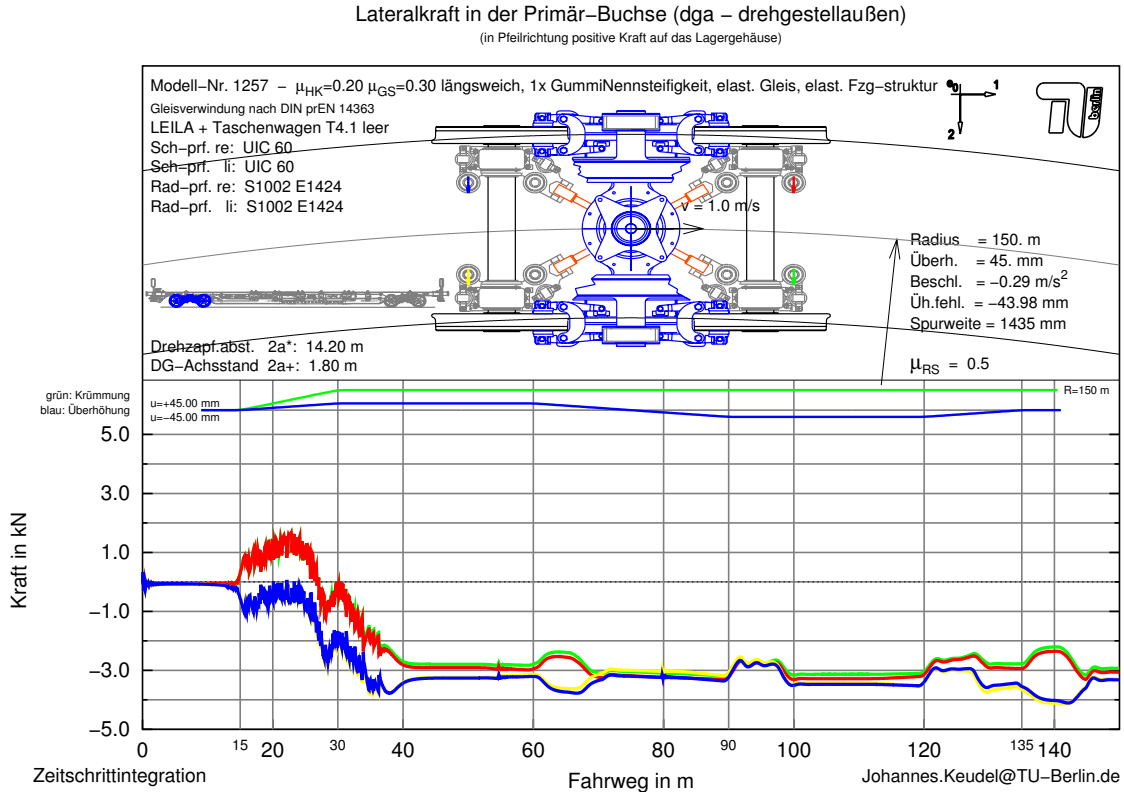
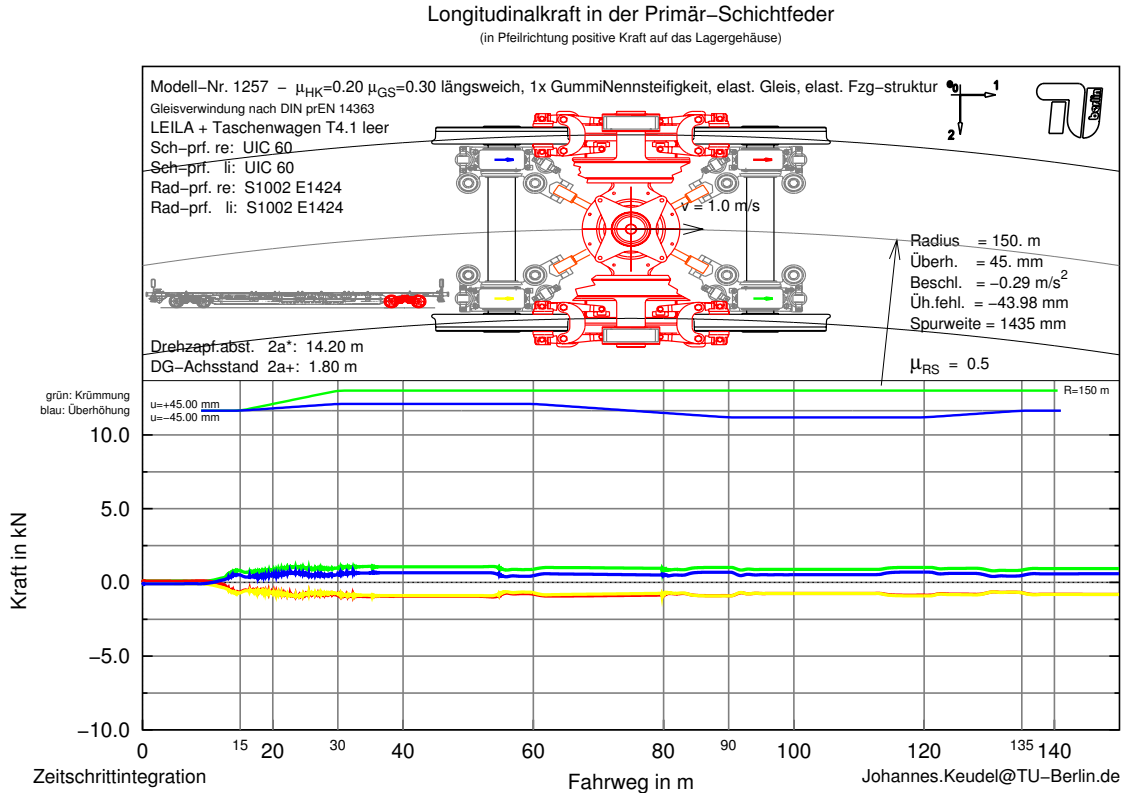




Abbildung B.34: Lateralkraft je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



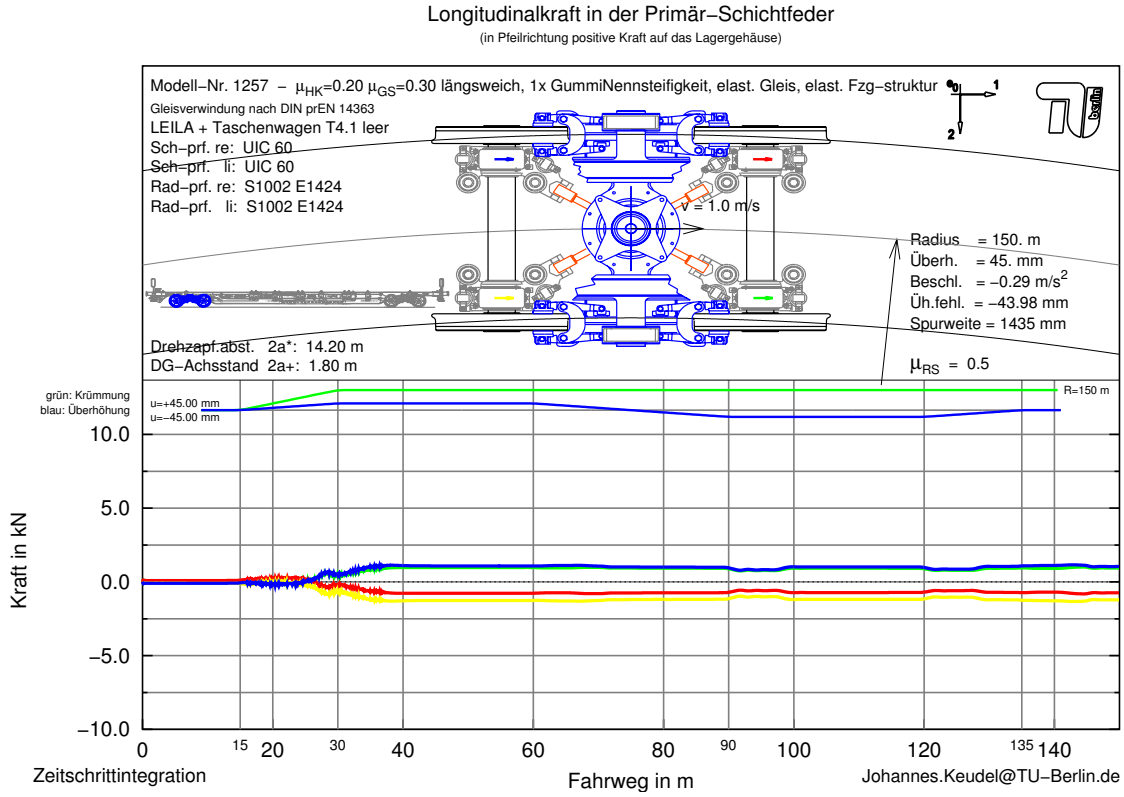
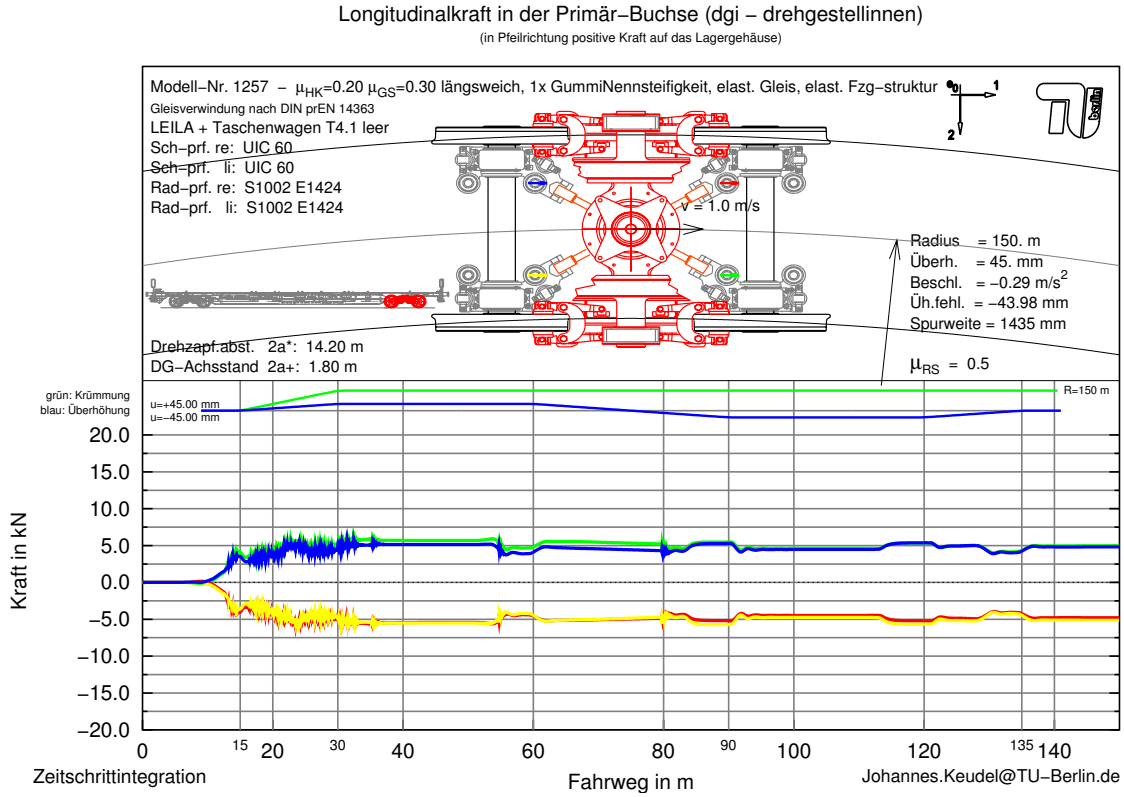




Abbildung B.35: Longitudinalkraft je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



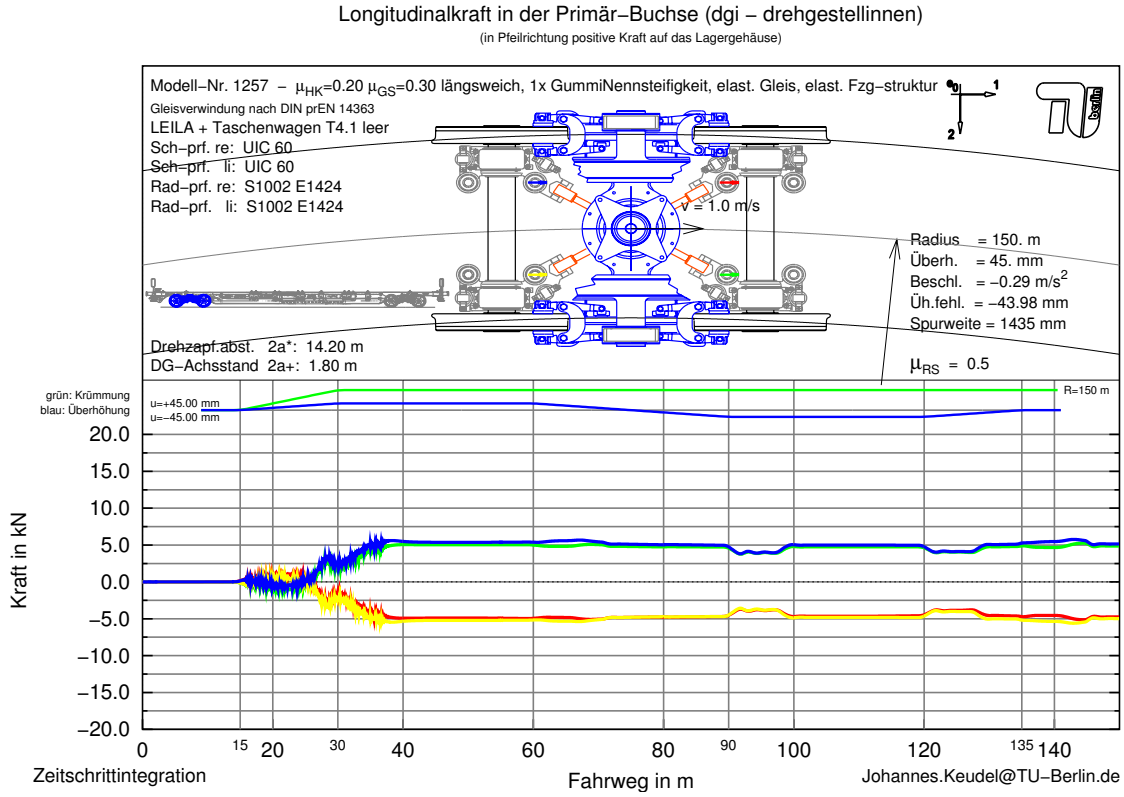
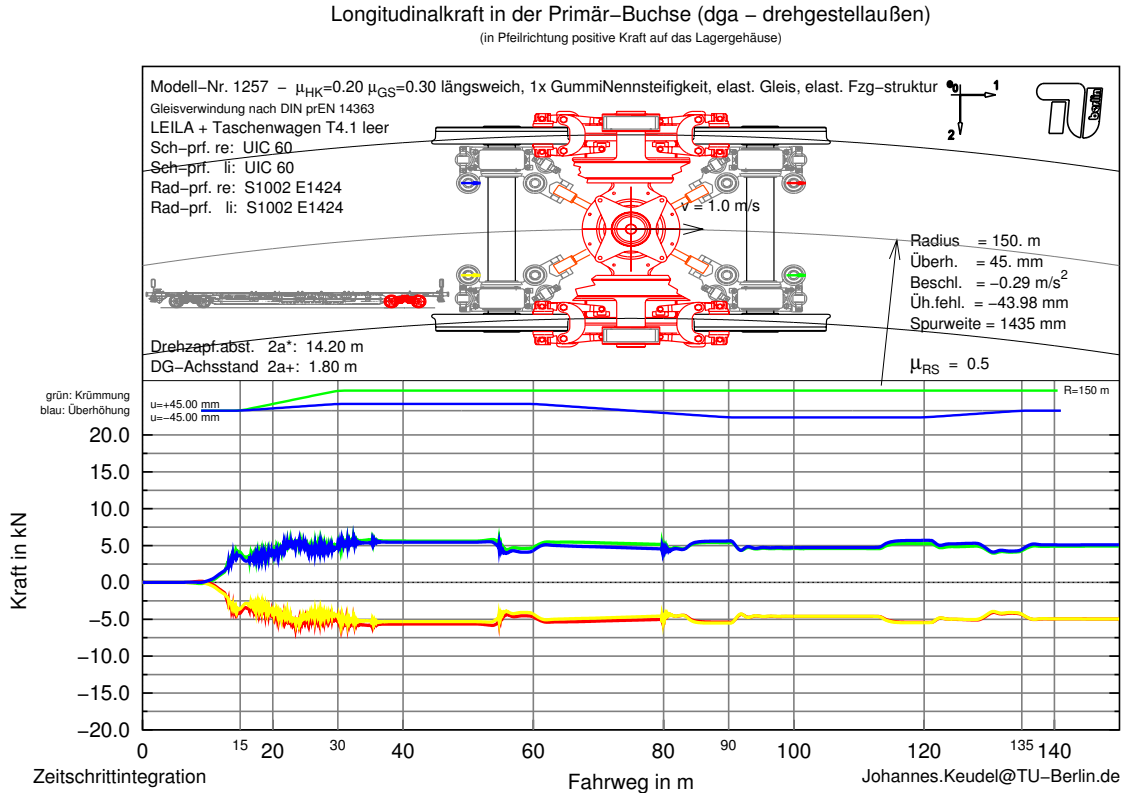




Abbildung B.36: Longitudinalkraft je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



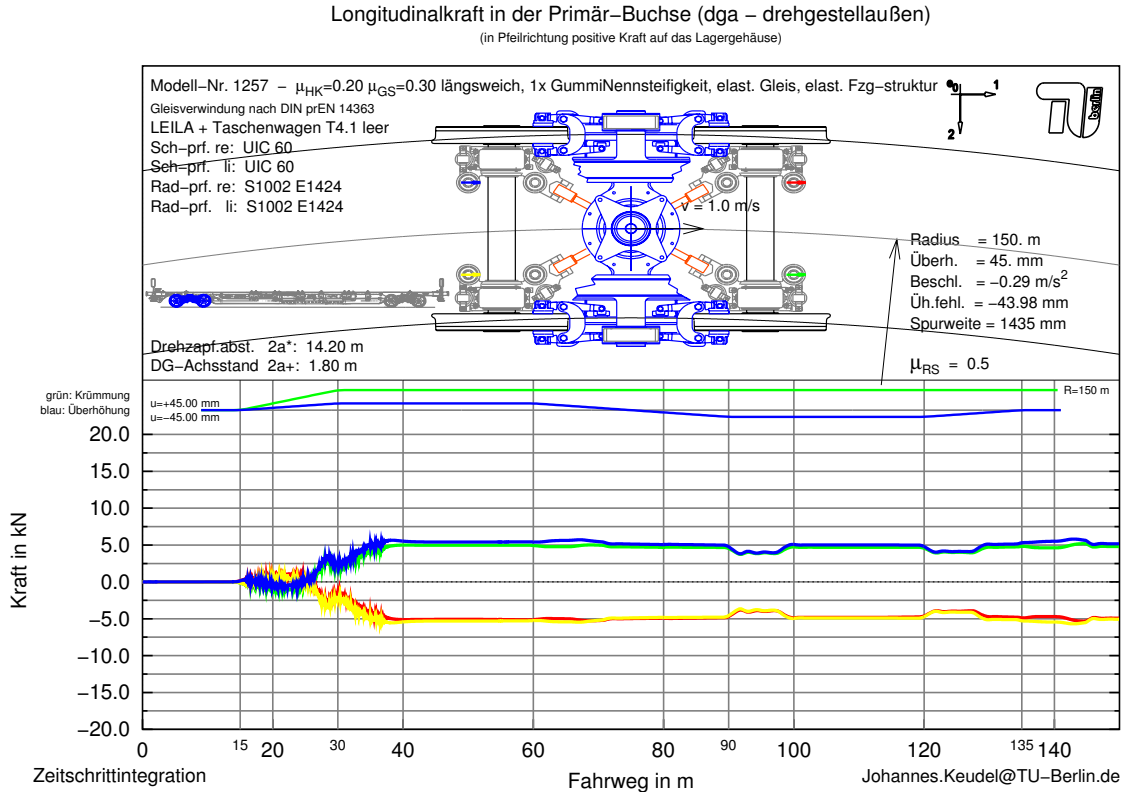
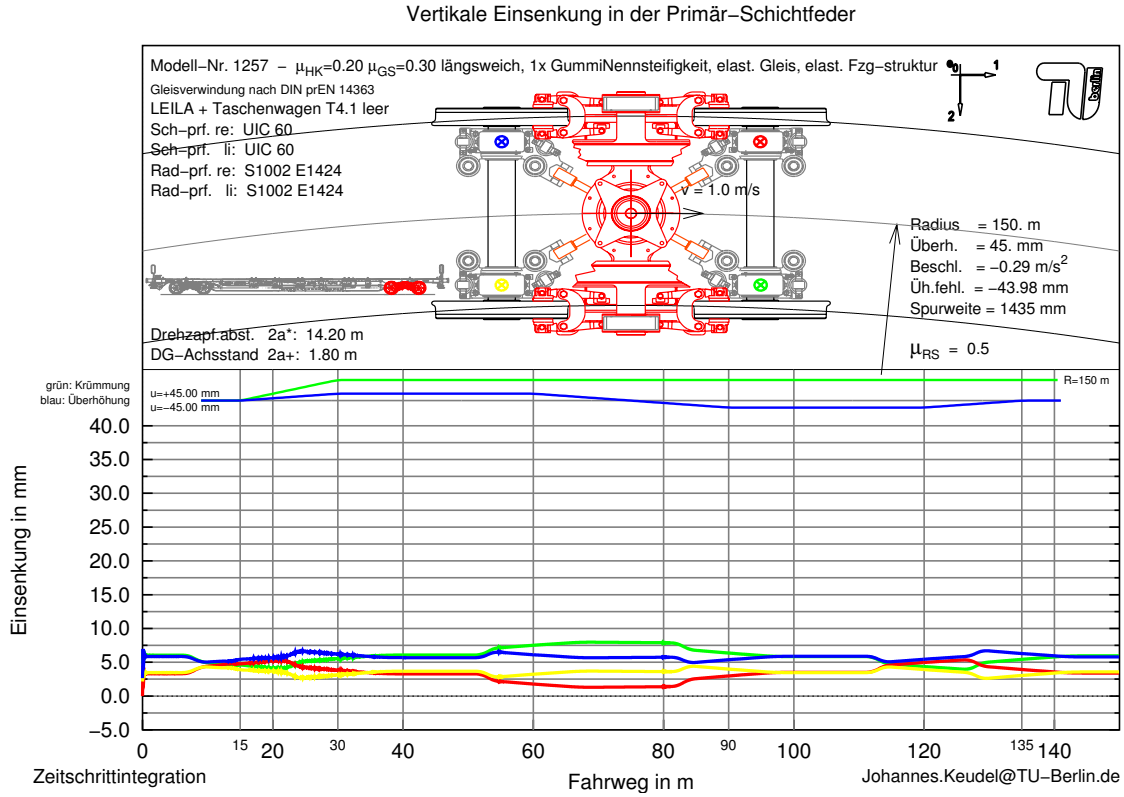




Abbildung B.37: Longitudinalkraft je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



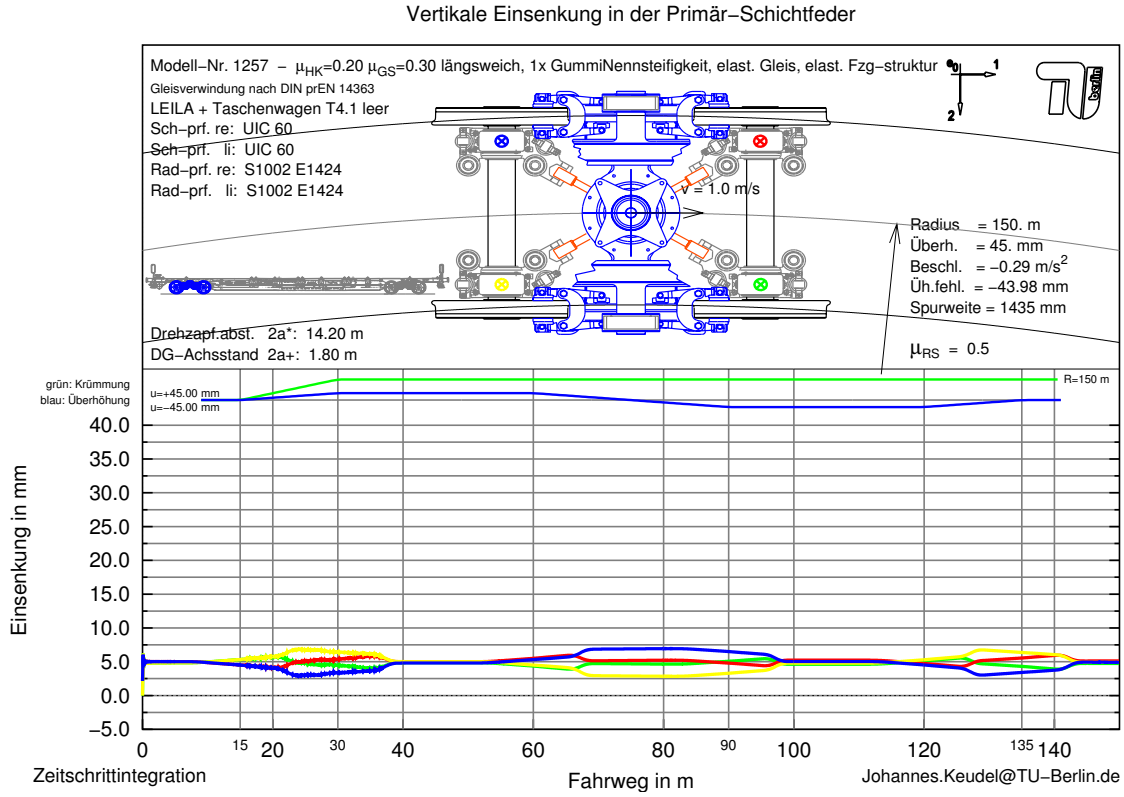
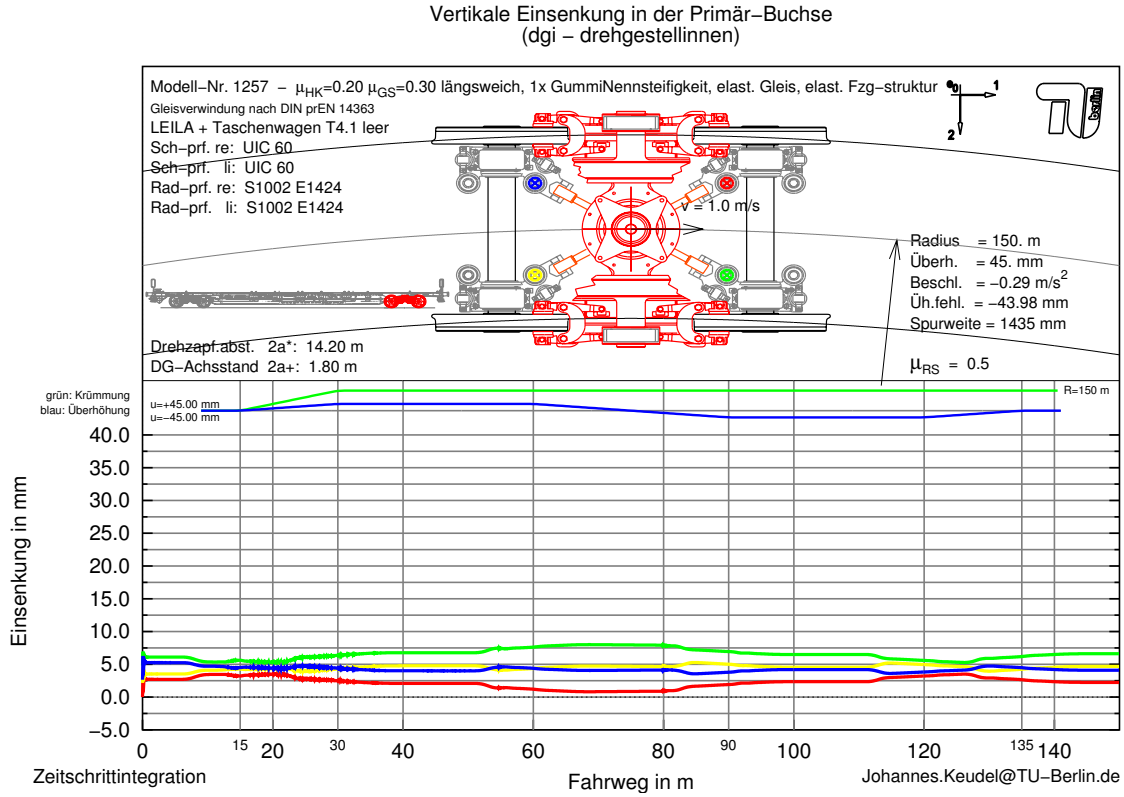




Abbildung B.38: Vertikaleinsenkung je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



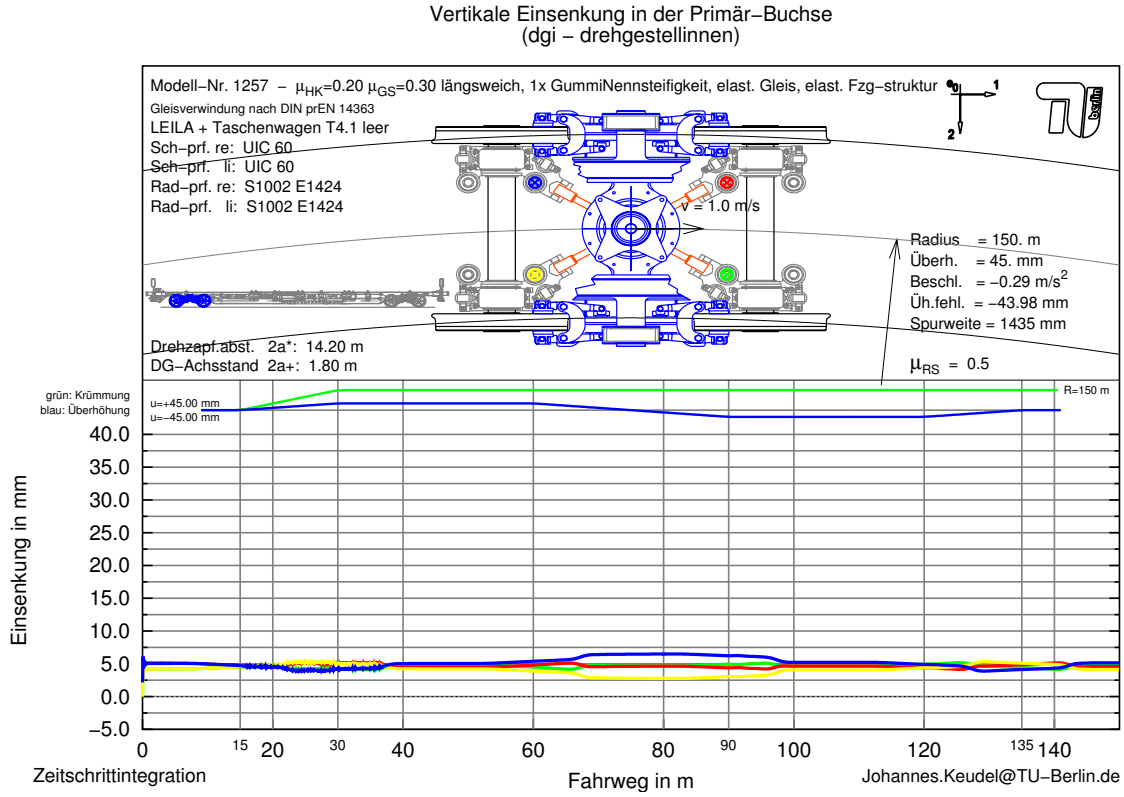
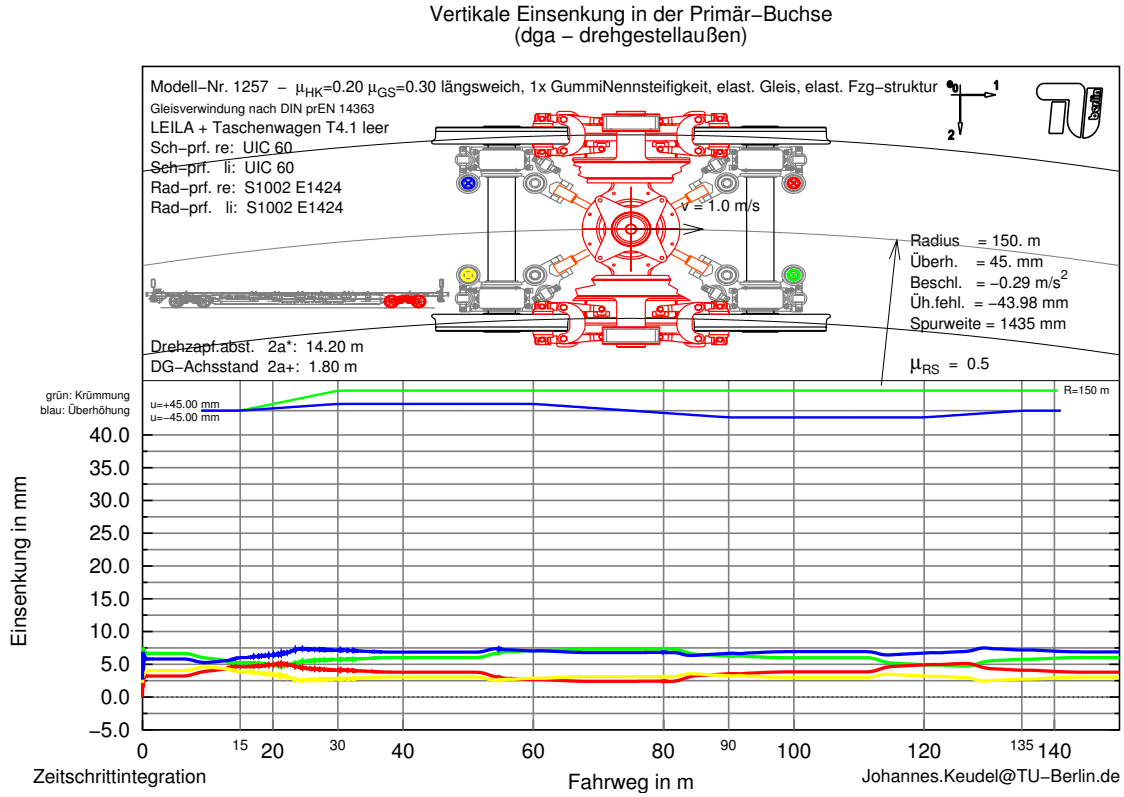




Abbildung B.39: Vertikaleinsenkung je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



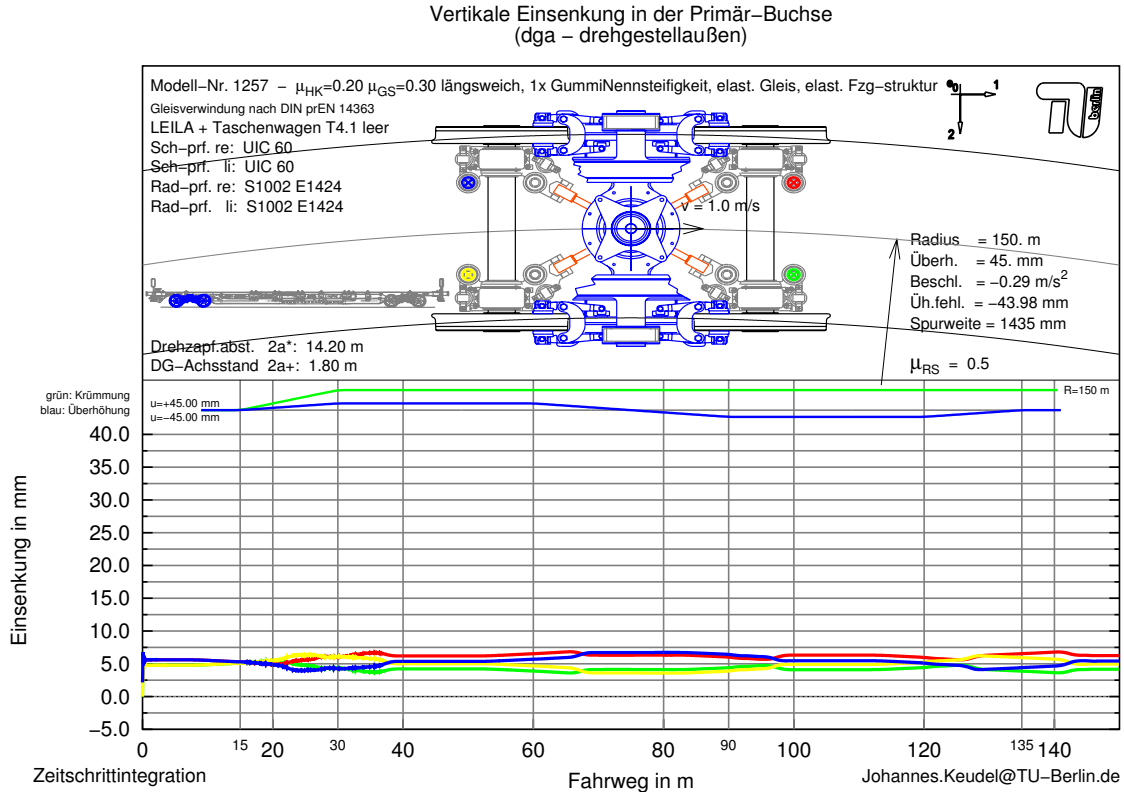
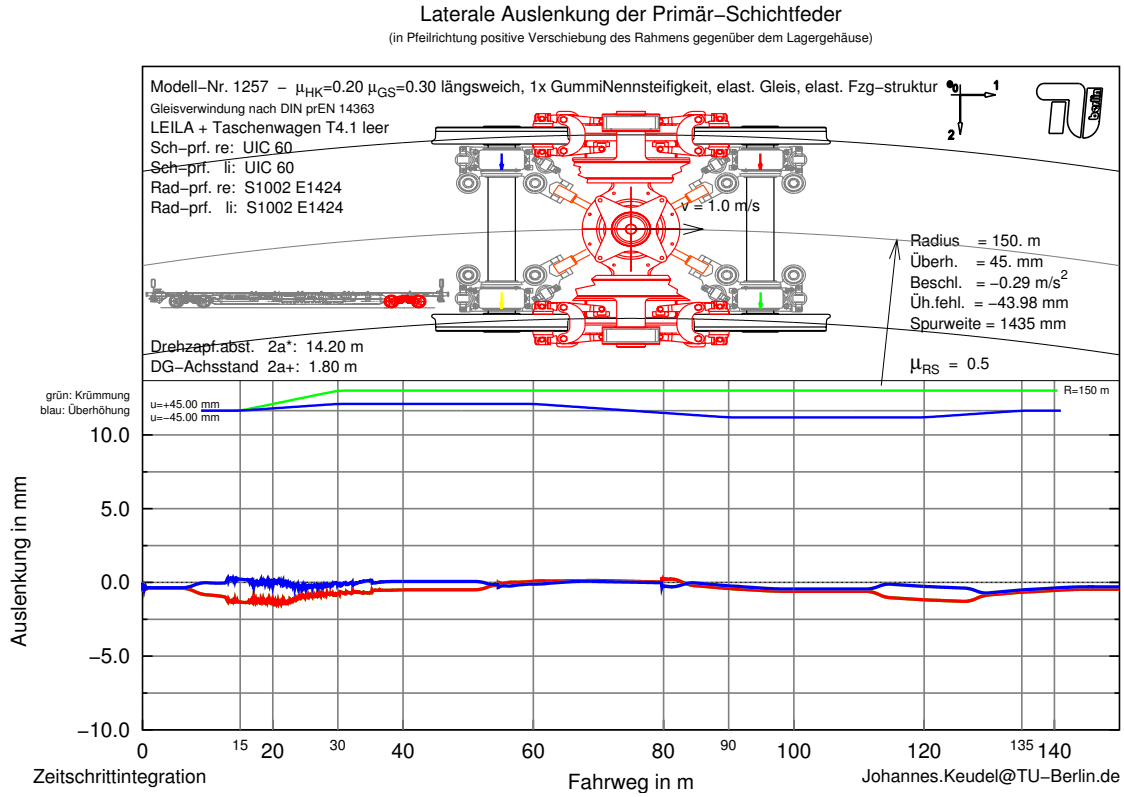




Abbildung B.40: Vertikaleinsenkung je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



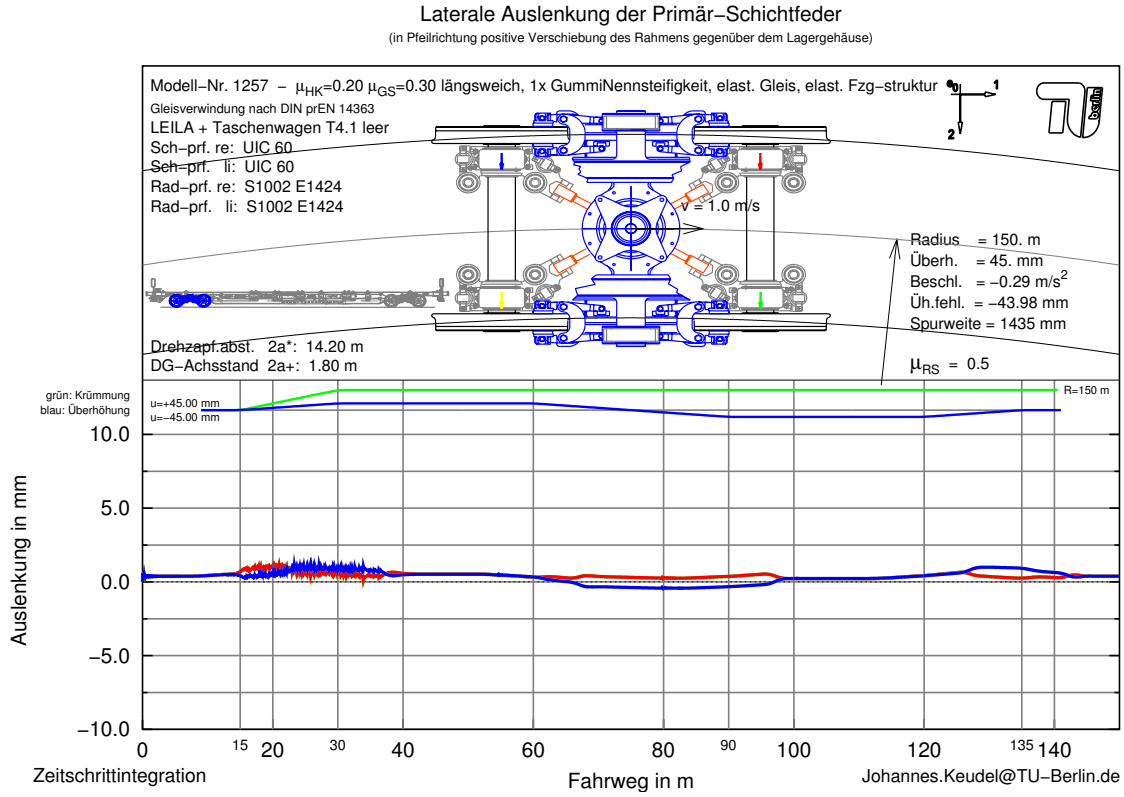
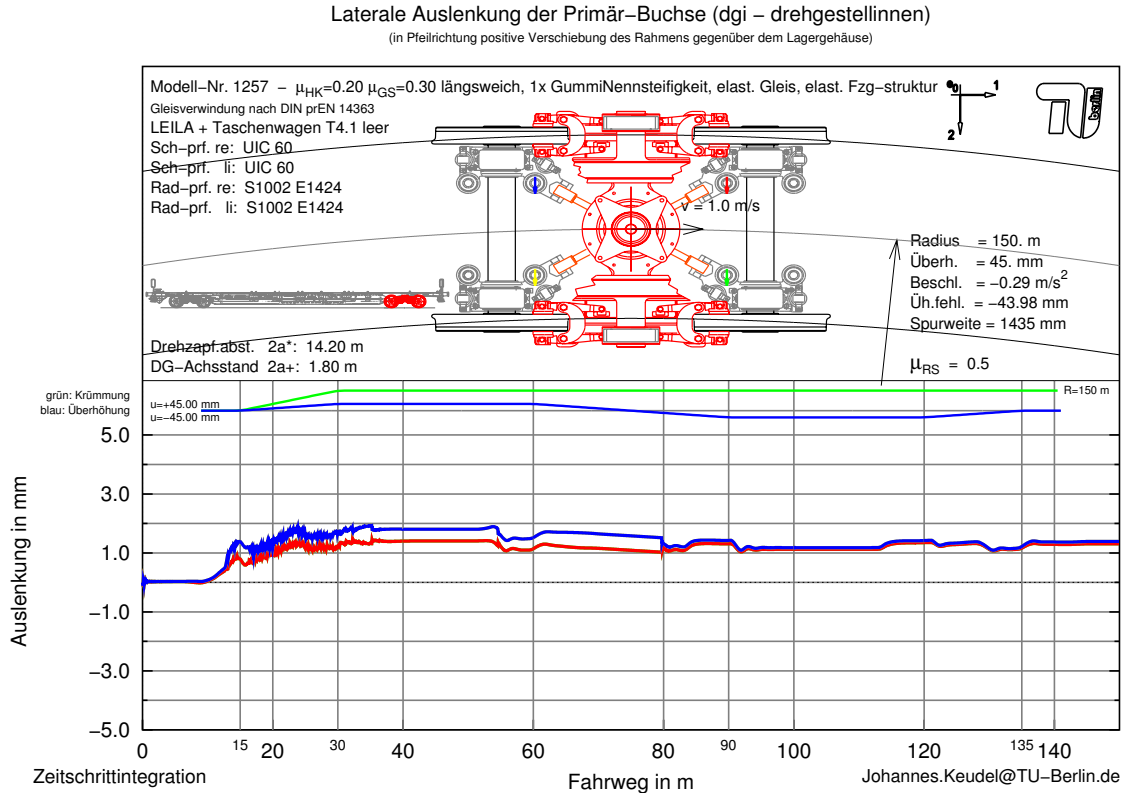




Abbildung B.41: Lateralauslenkung je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



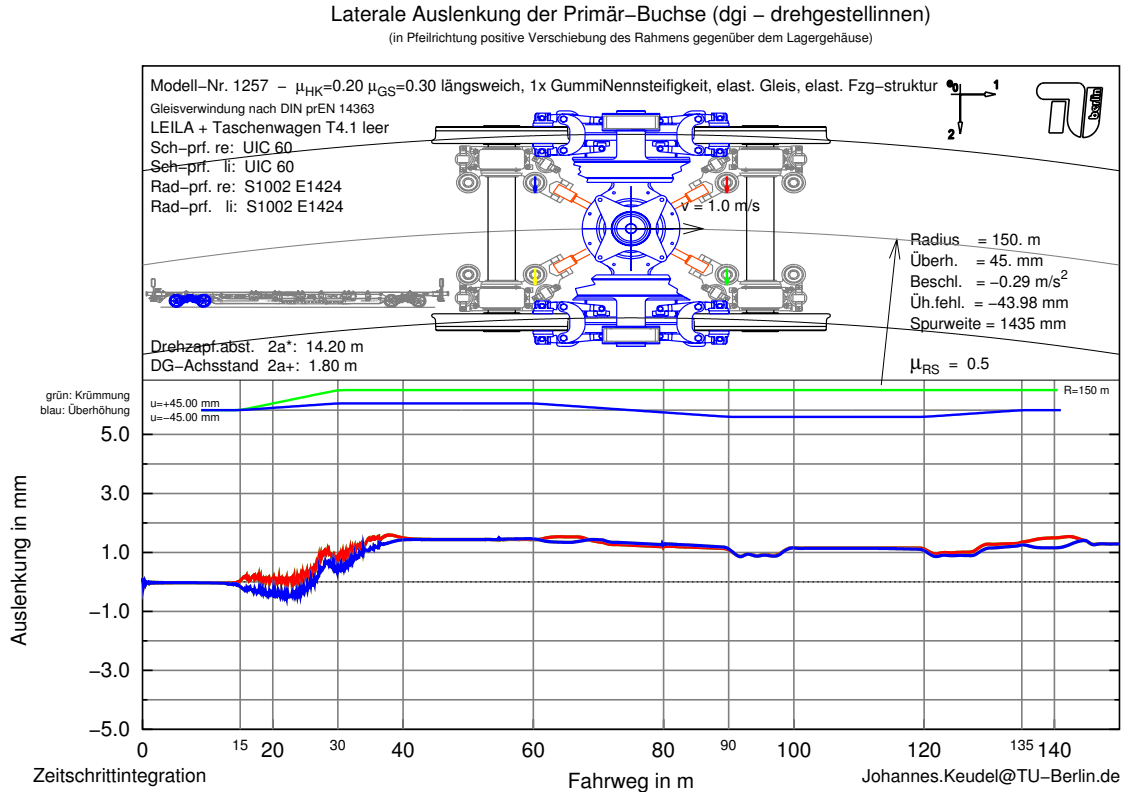
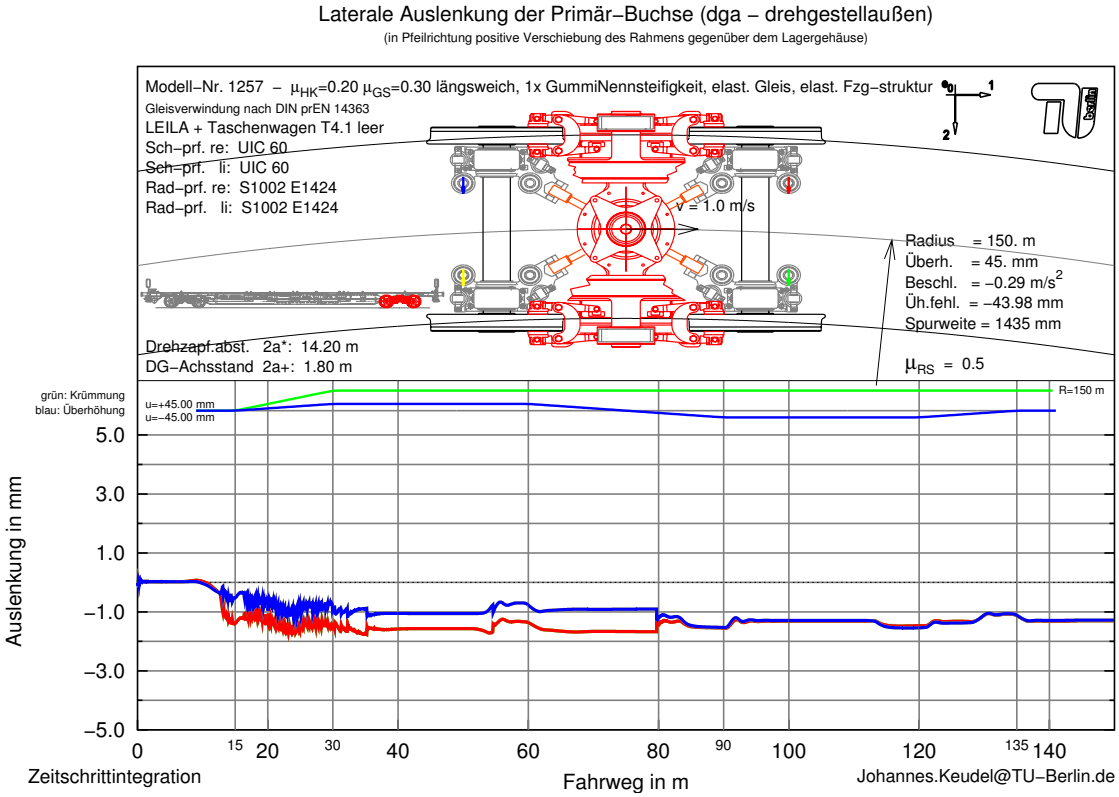




Abbildung B.42: Lateralauslenkung je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



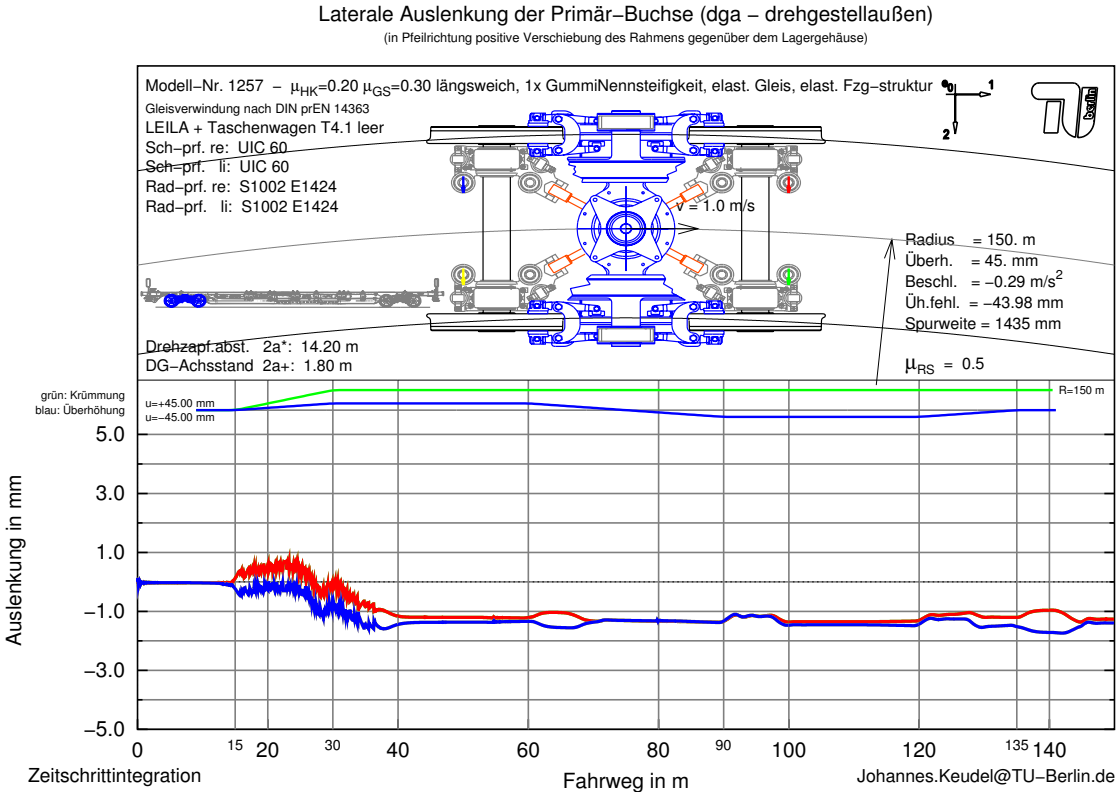
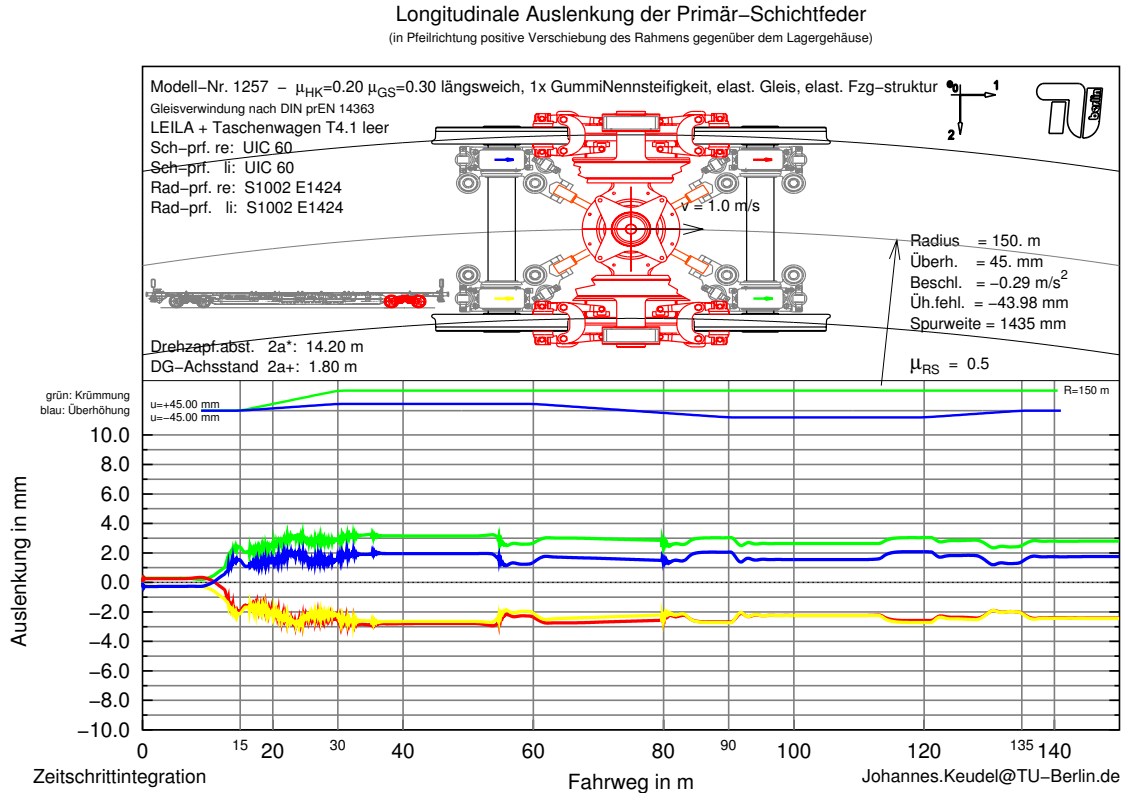




Abbildung B.43: Lateralauslenkung je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



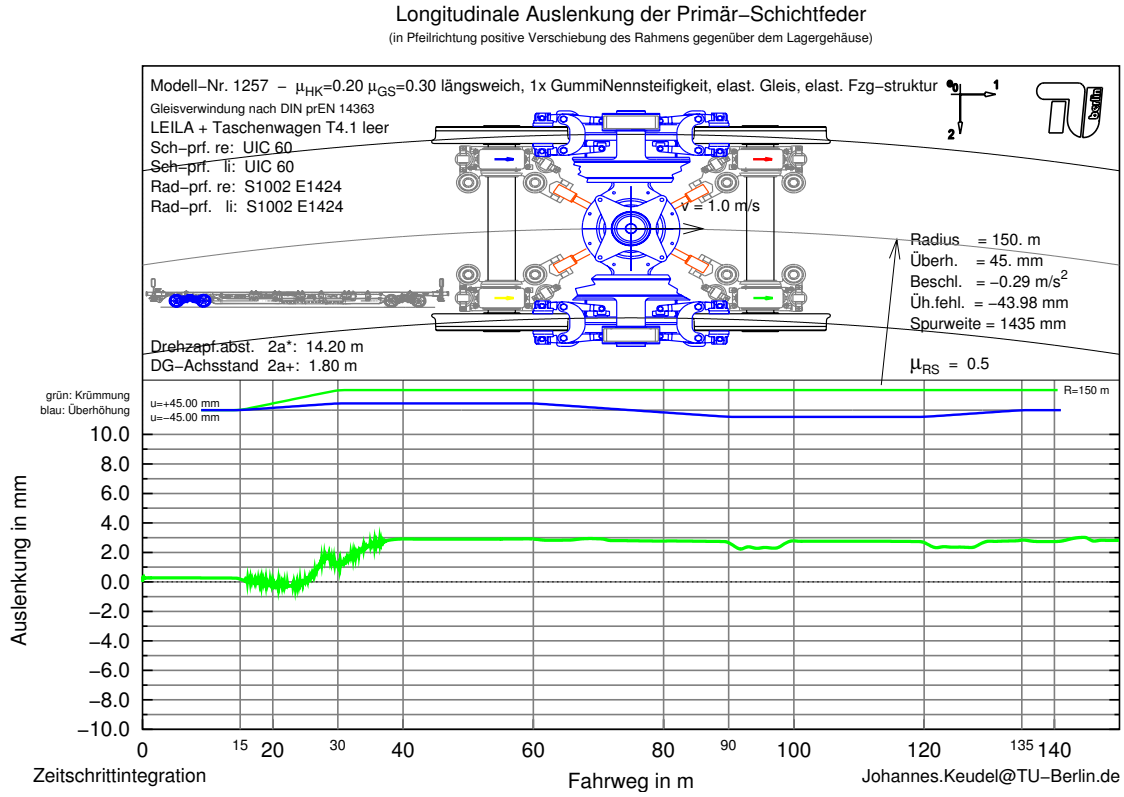
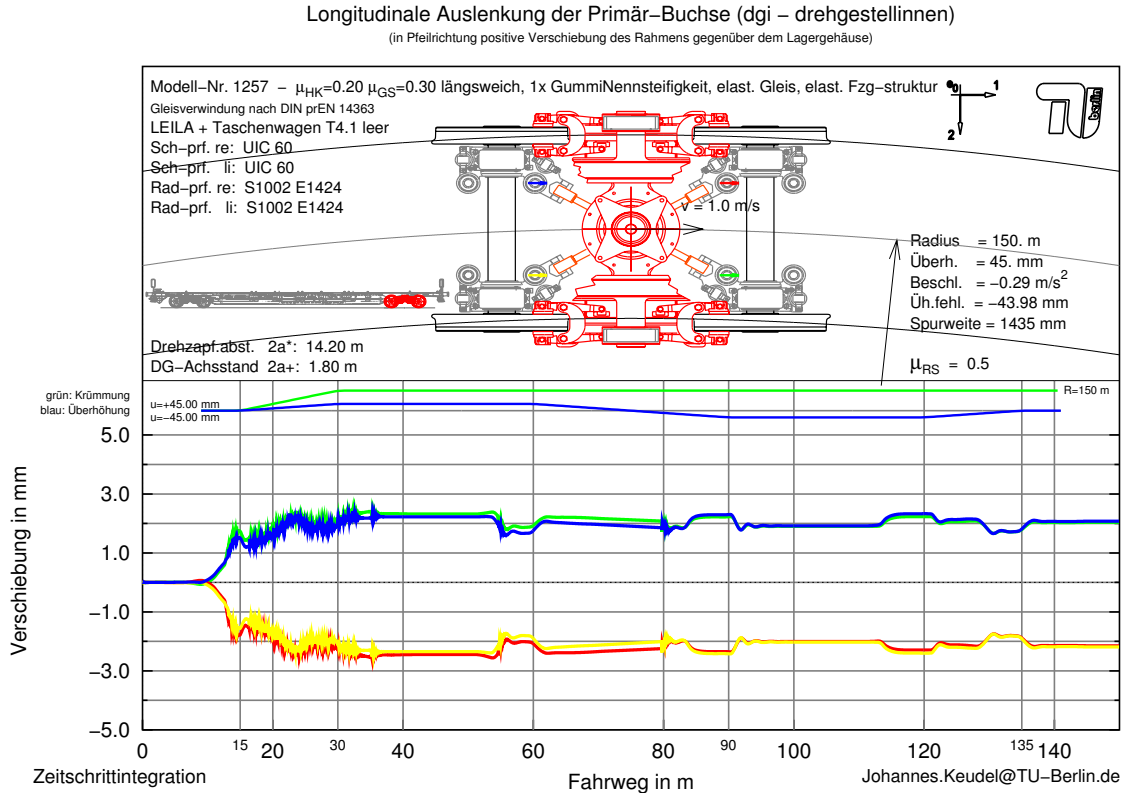




Abbildung B.44: Longitudinalauslenkung je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



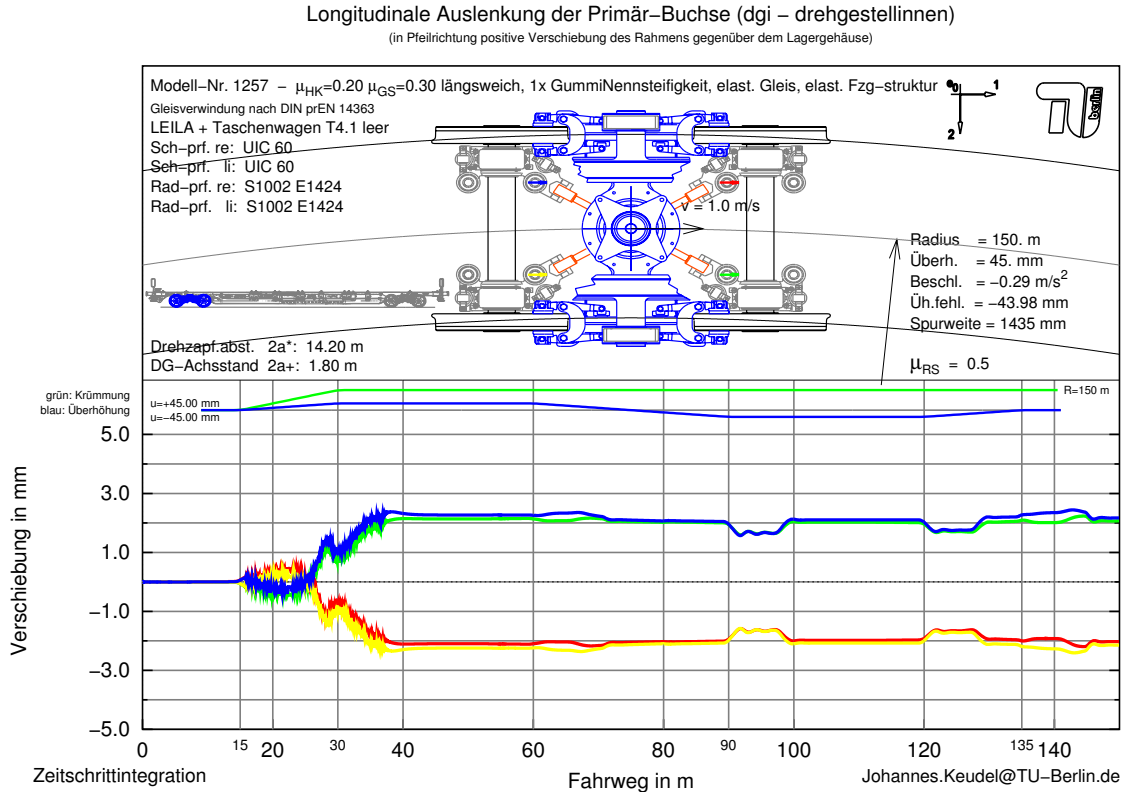
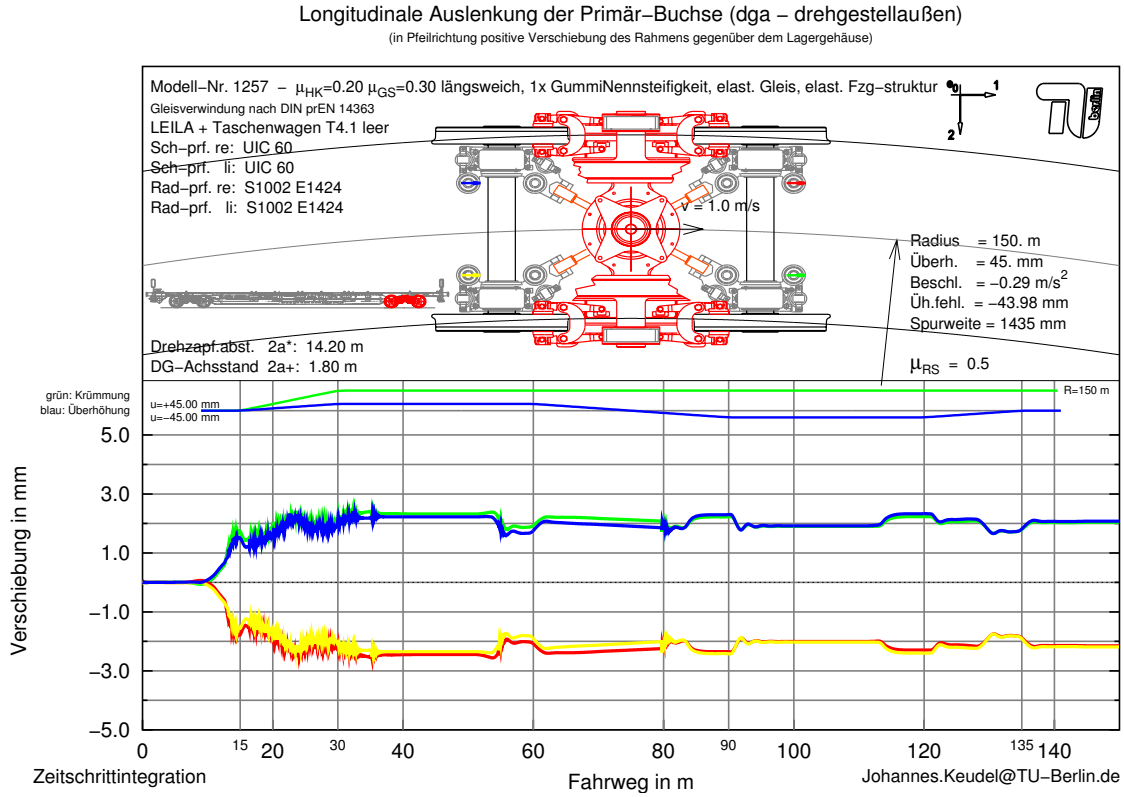




Abbildung B.45: Longitudinalauslenkung je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



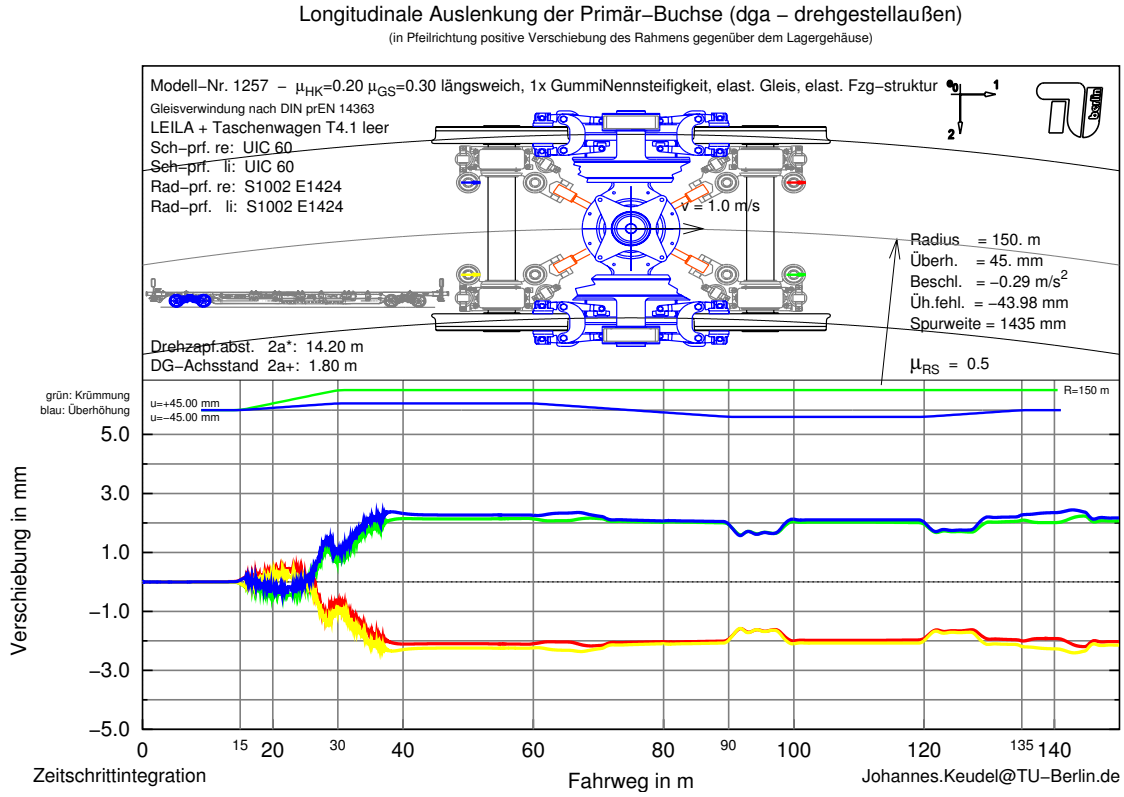
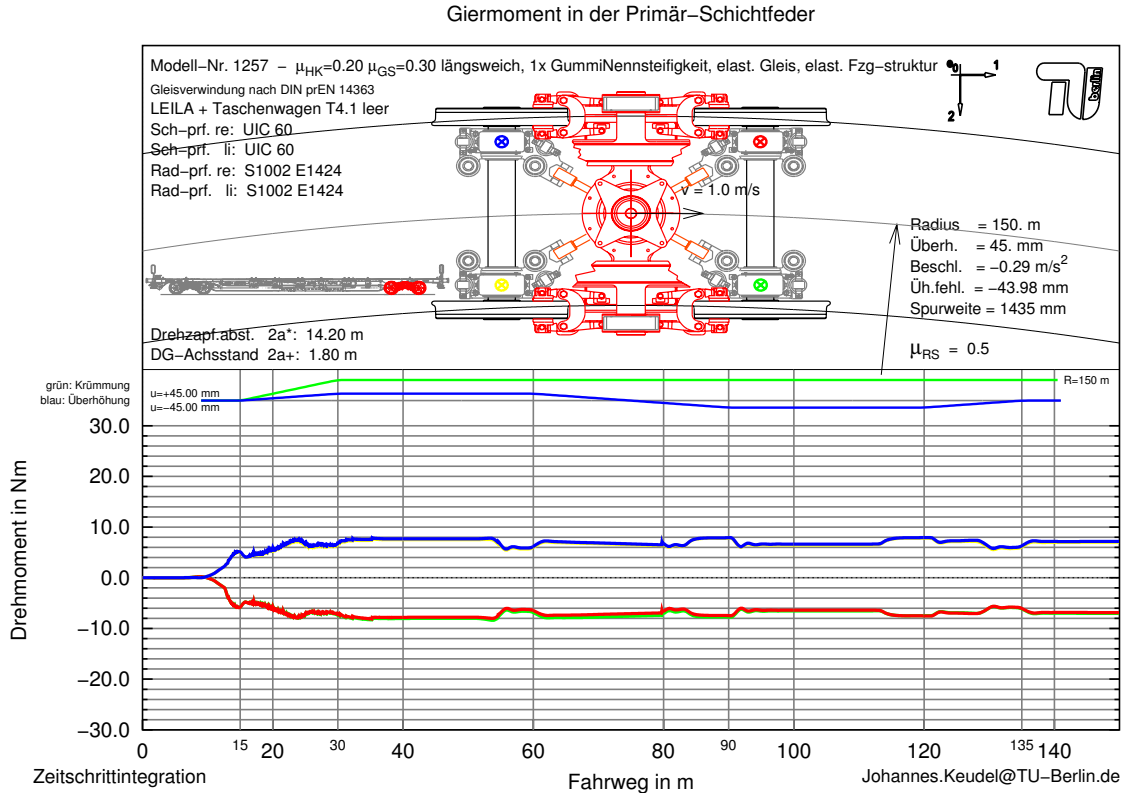




Abbildung B.46: Longitudinalauslenkung je drehgestelläußerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



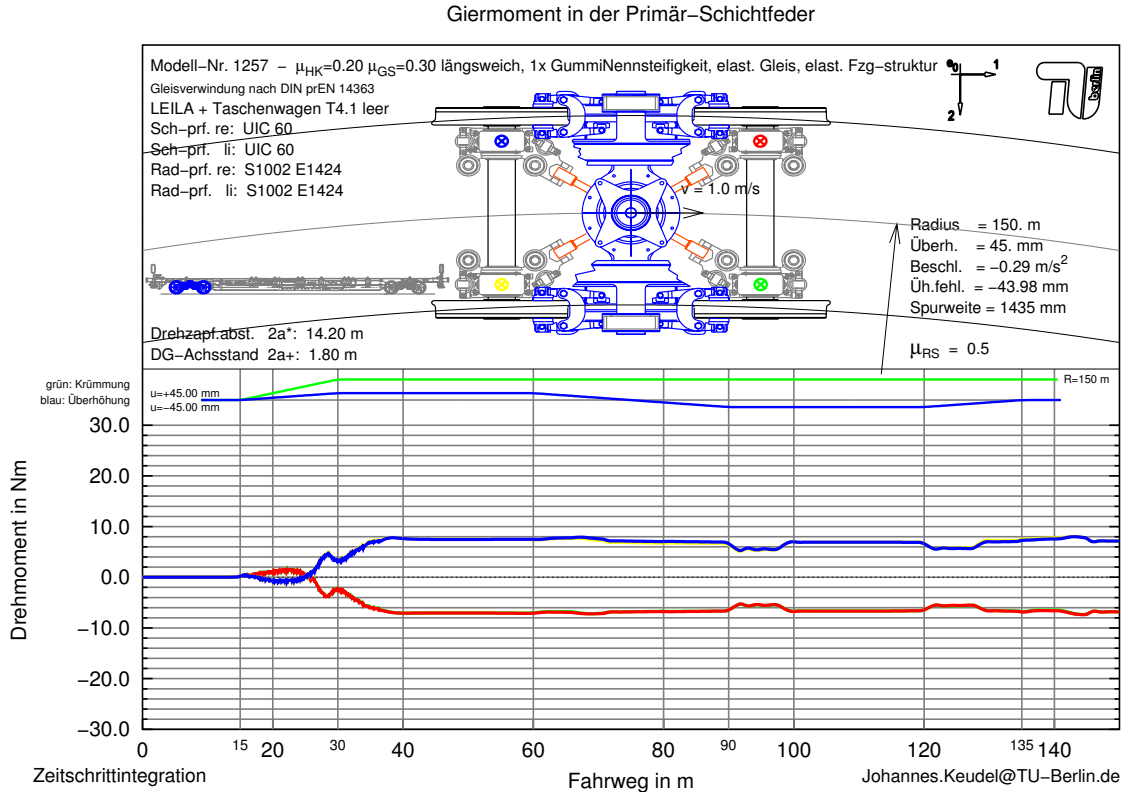
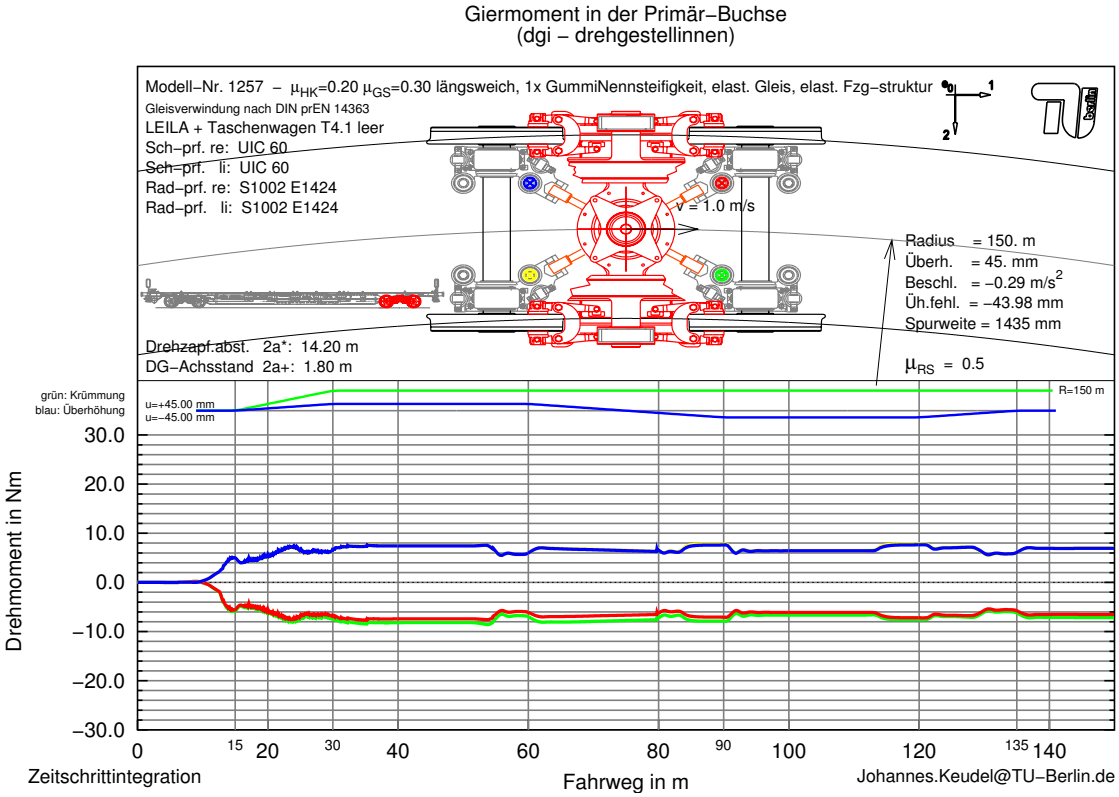




Abbildung B.47: Giermoment je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



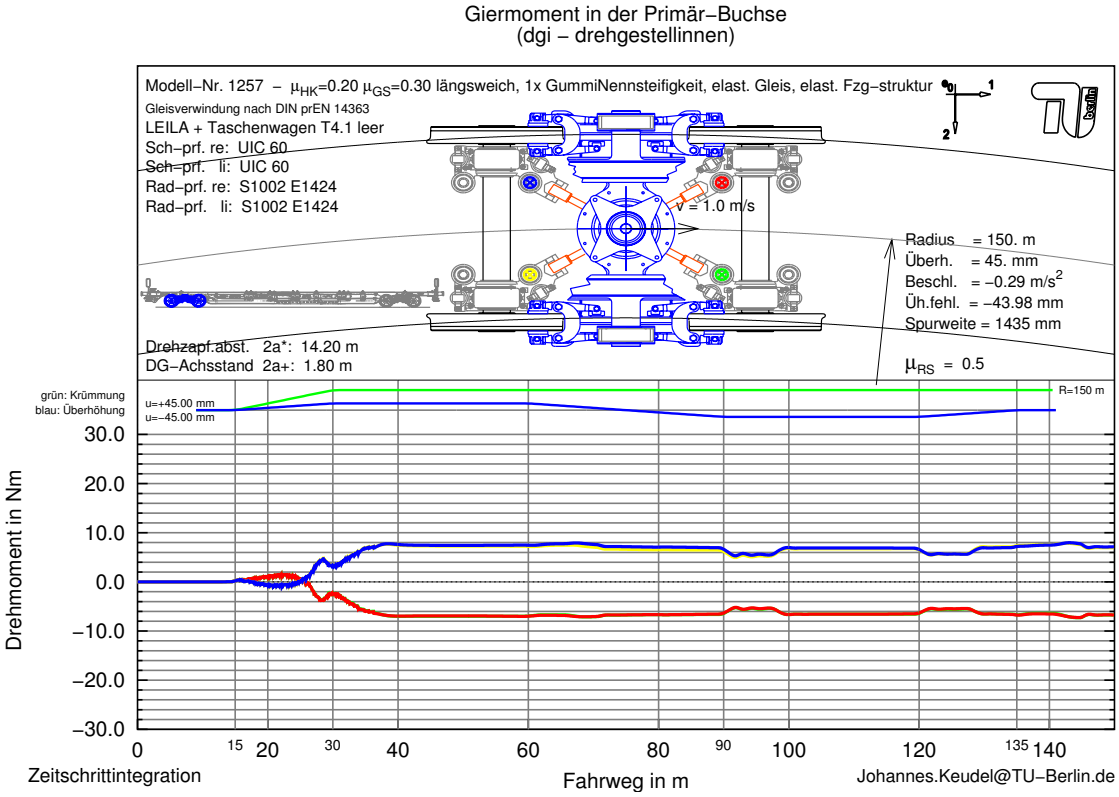
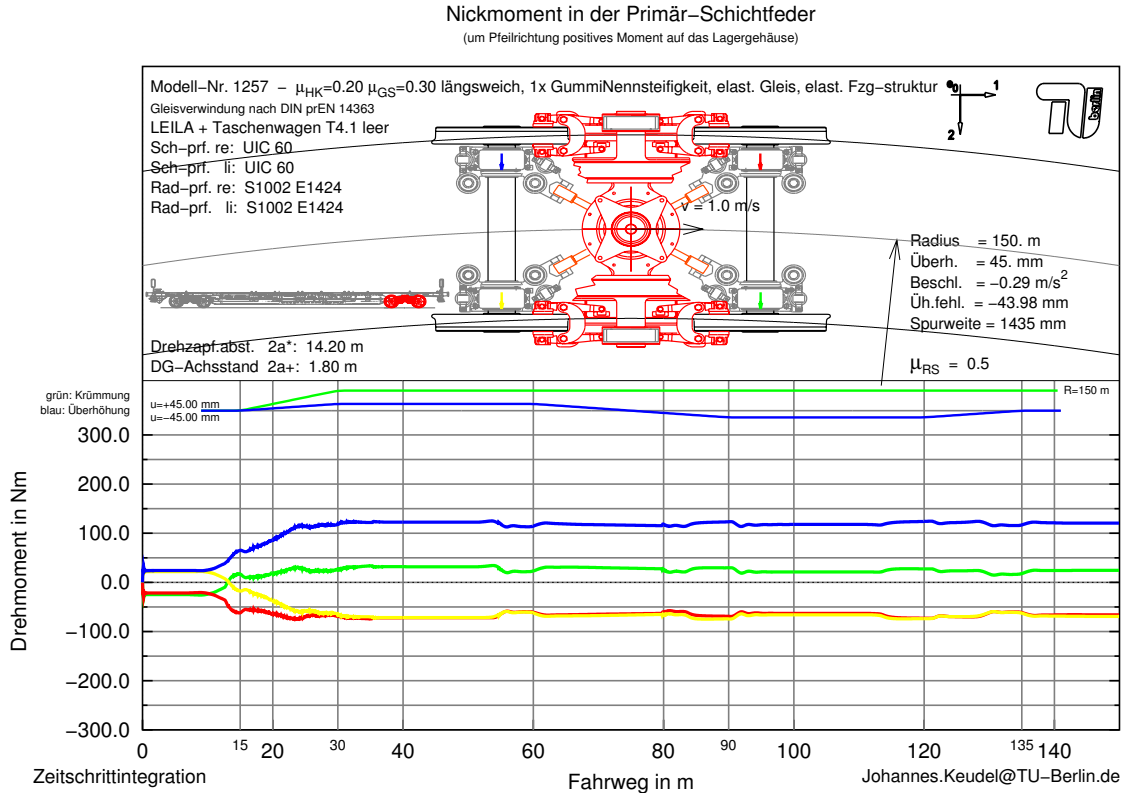




Abbildung B.48: Giermoment je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



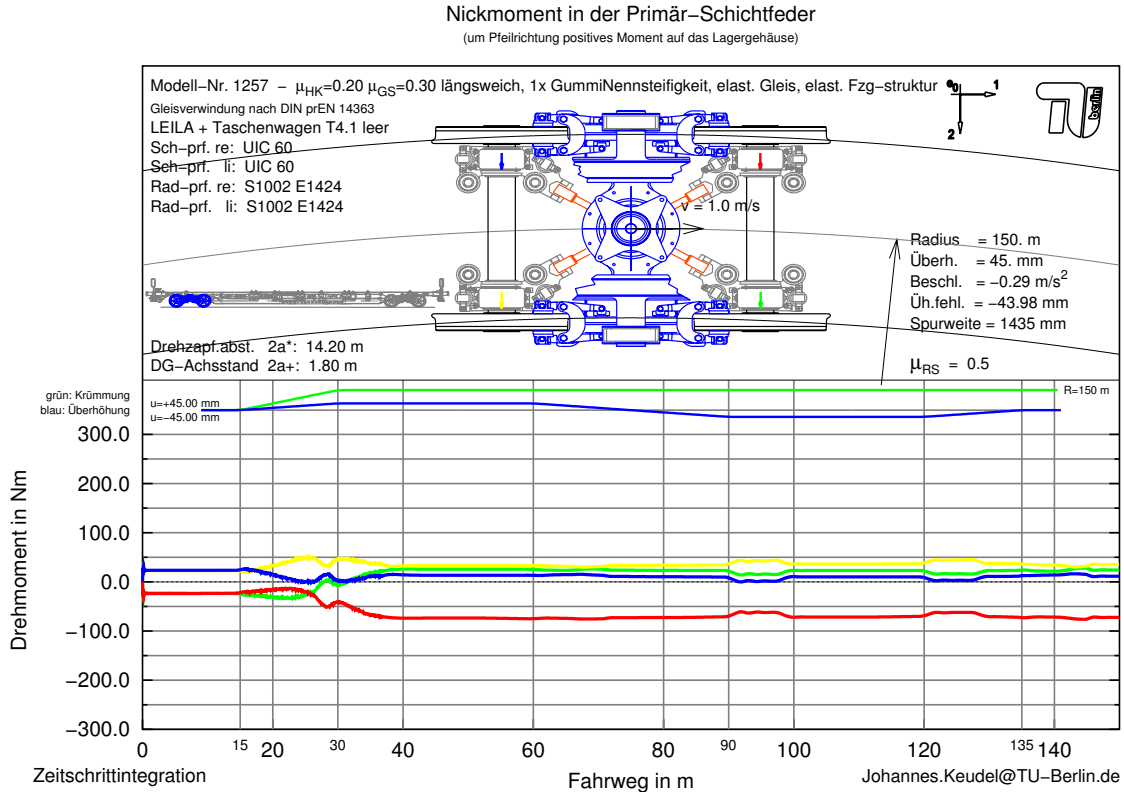
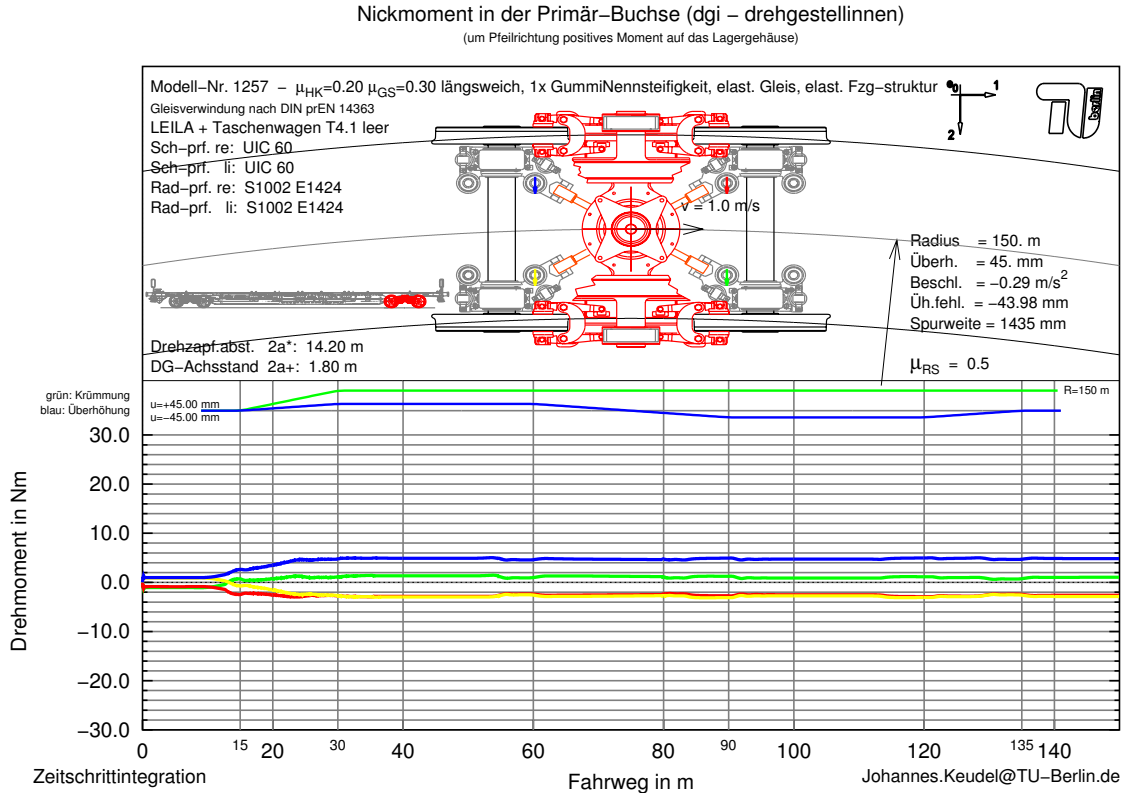




Abbildung B.49: Nickmoment je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



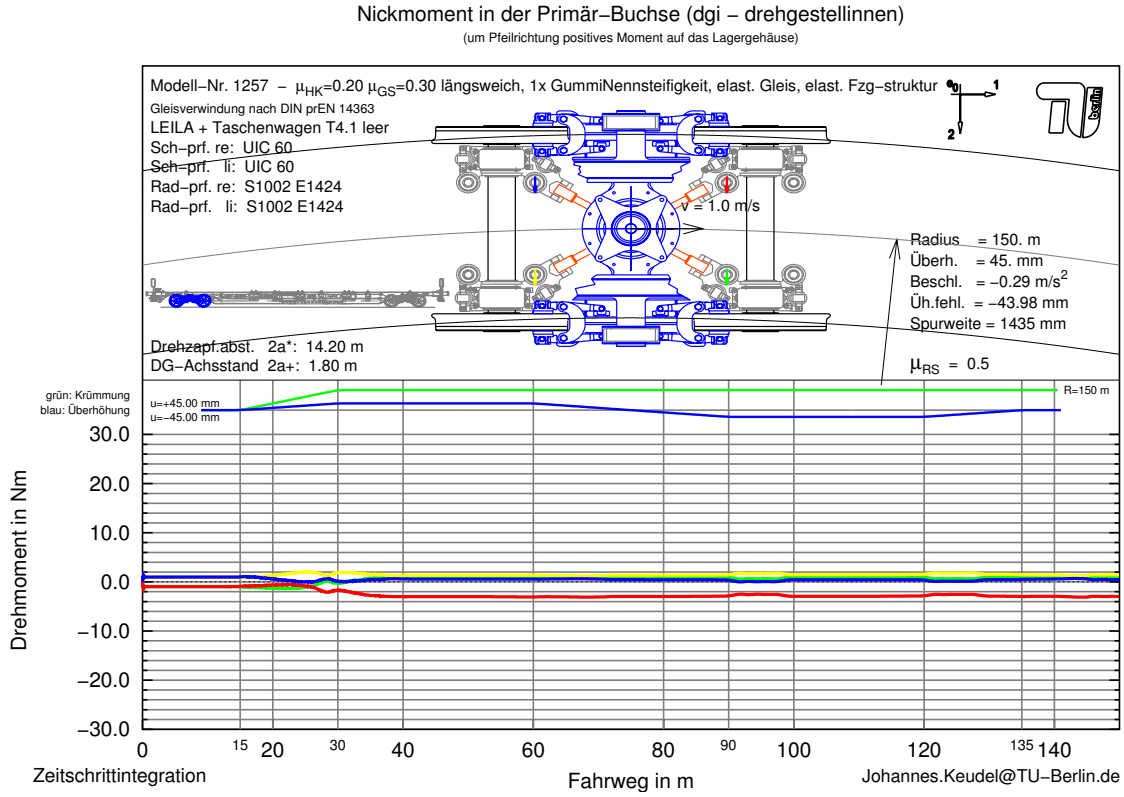
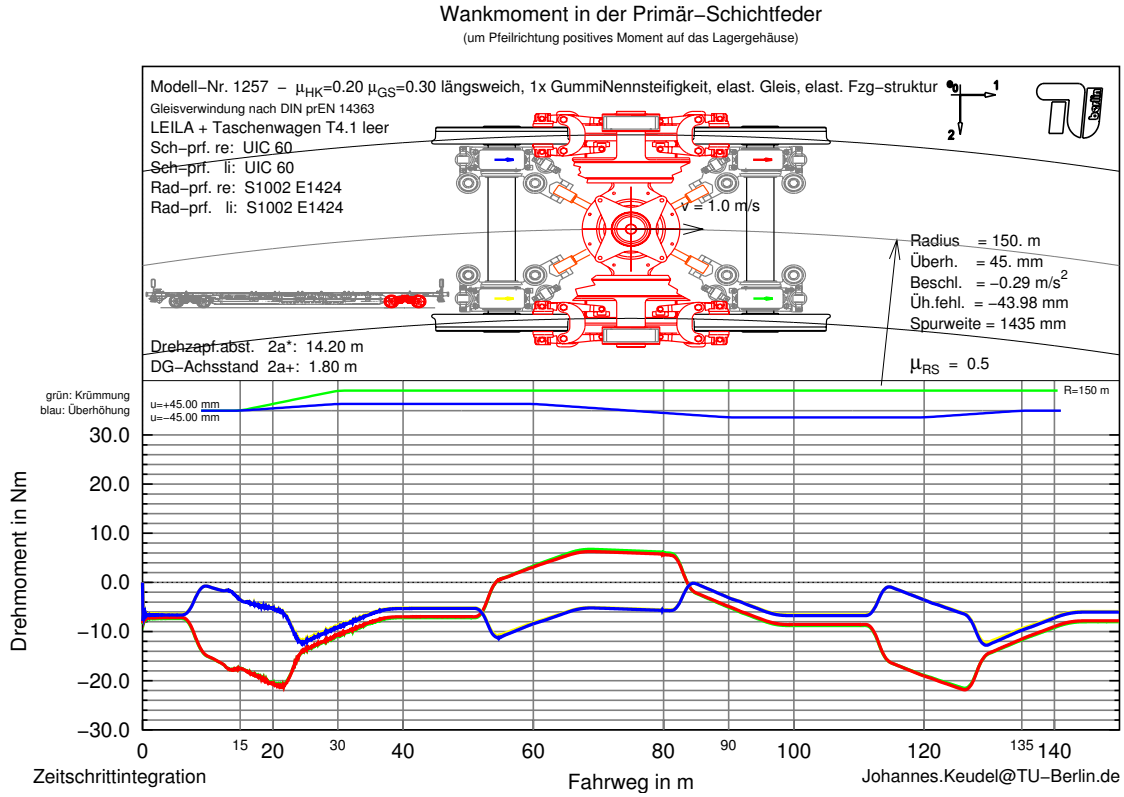




Abbildung B.50: Nickmoment je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



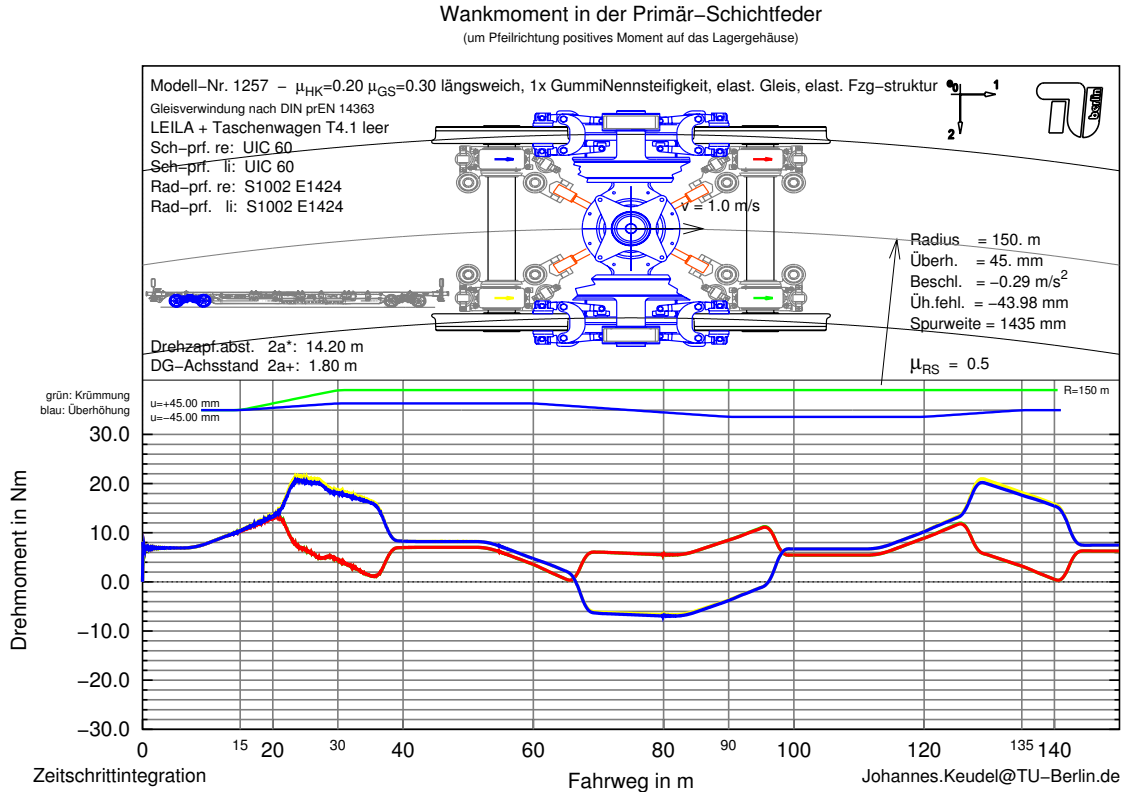
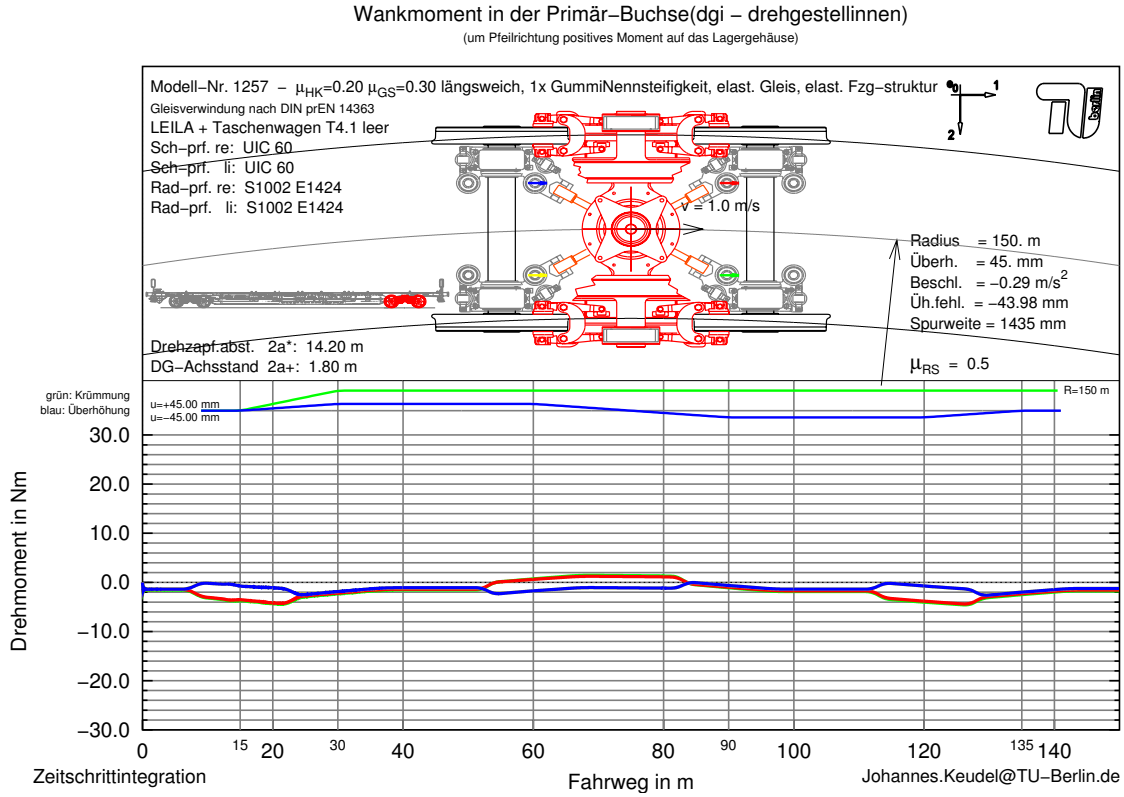




Abbildung B.51: Wankmoment je Primärschichtfeder - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



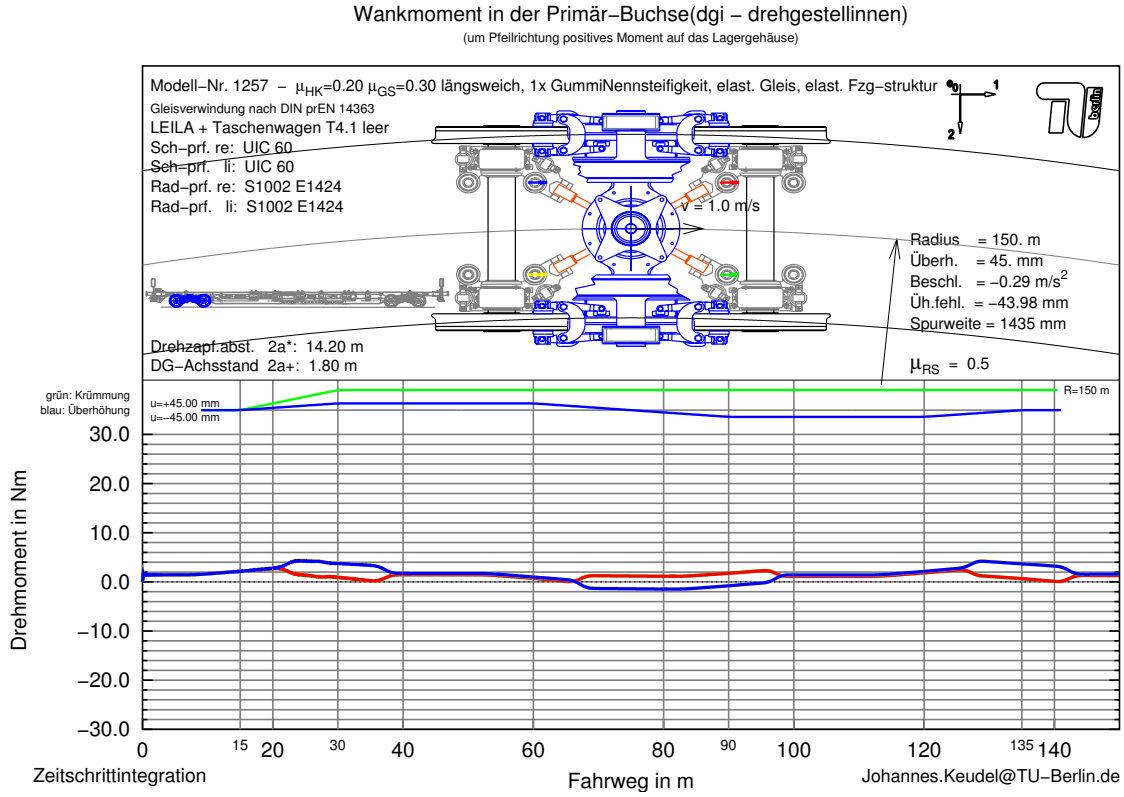
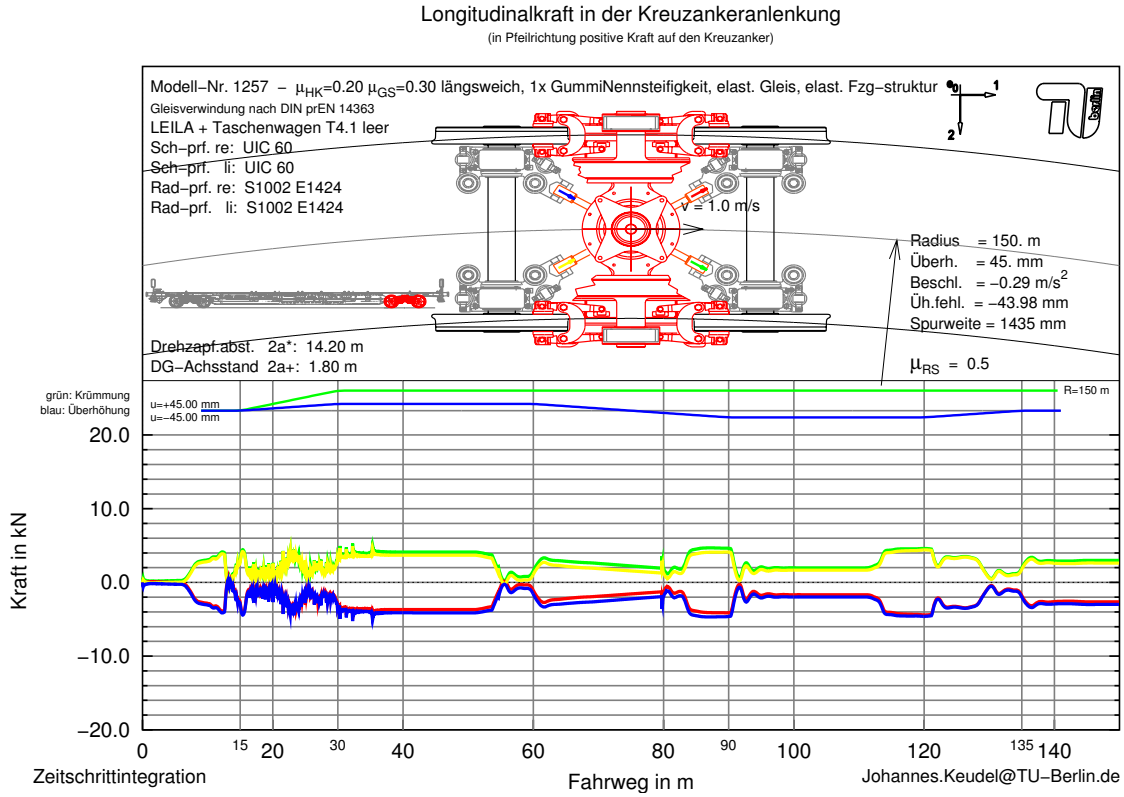




Abbildung B.52: Wankmoment je drehgestellinnerer Primär-Buchse - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



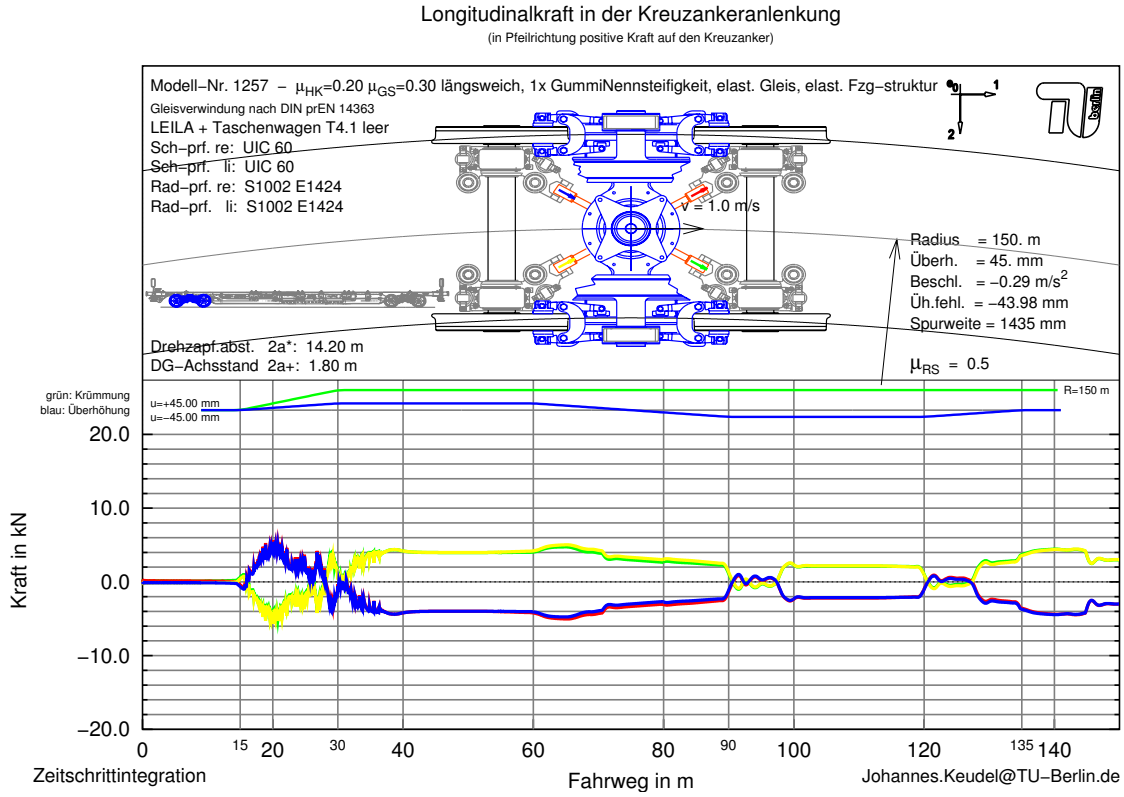
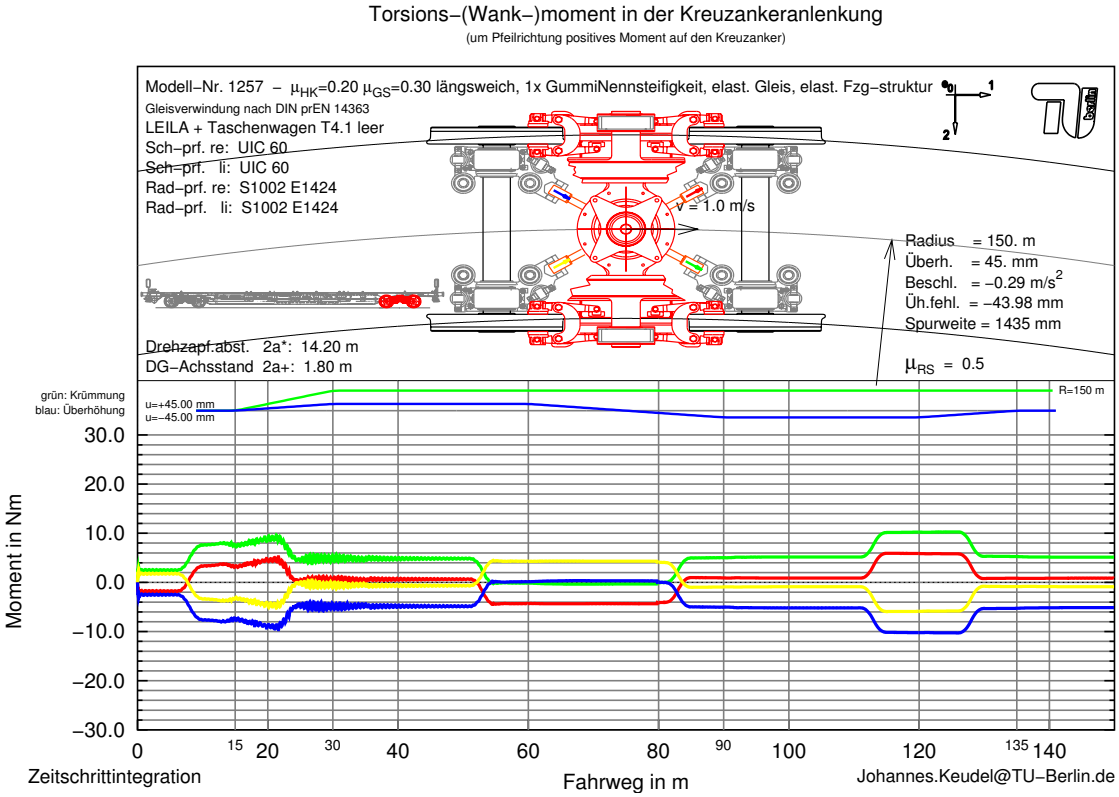




Abbildung B.53: Kreuzankerlängskraft - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



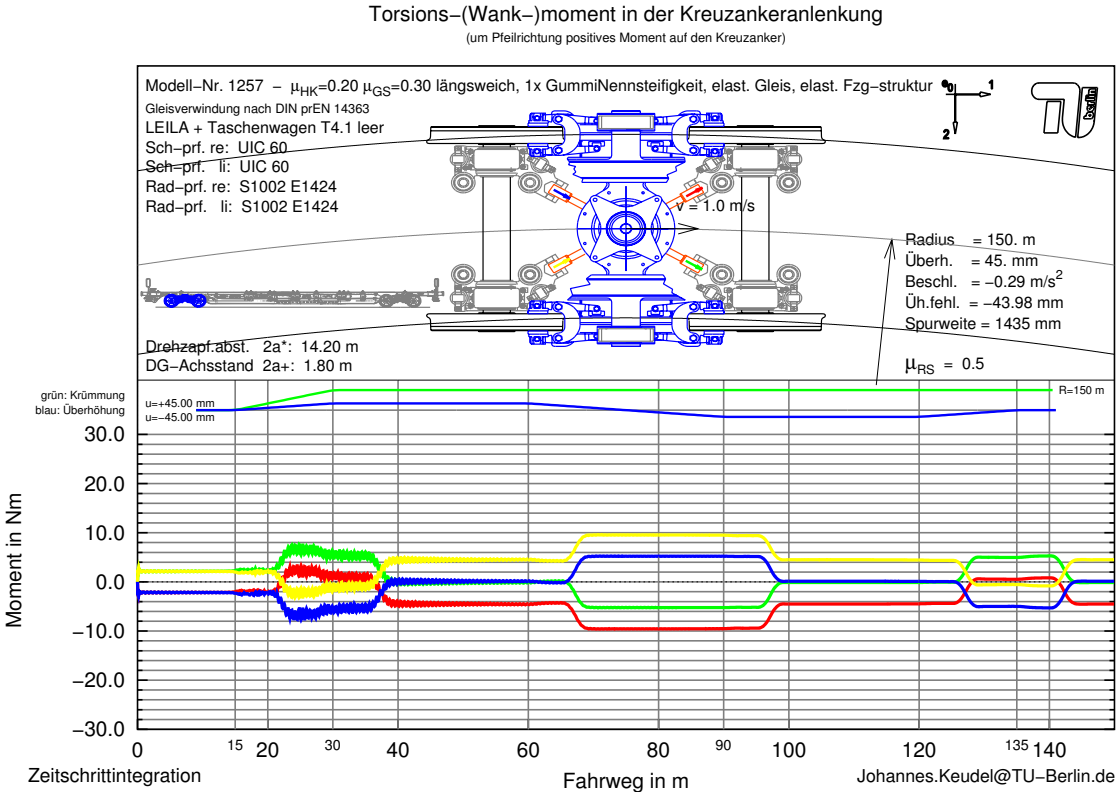
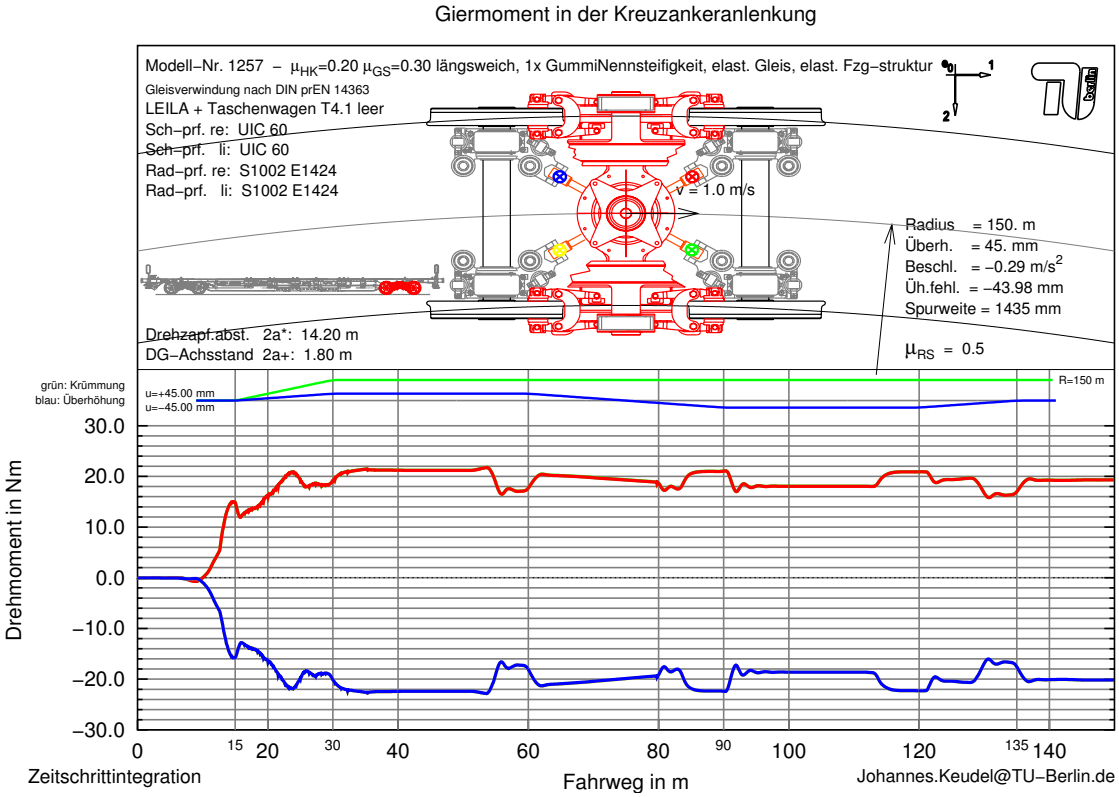




Abbildung B.54: Wankmoment in der Kreuzankeranlenkung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



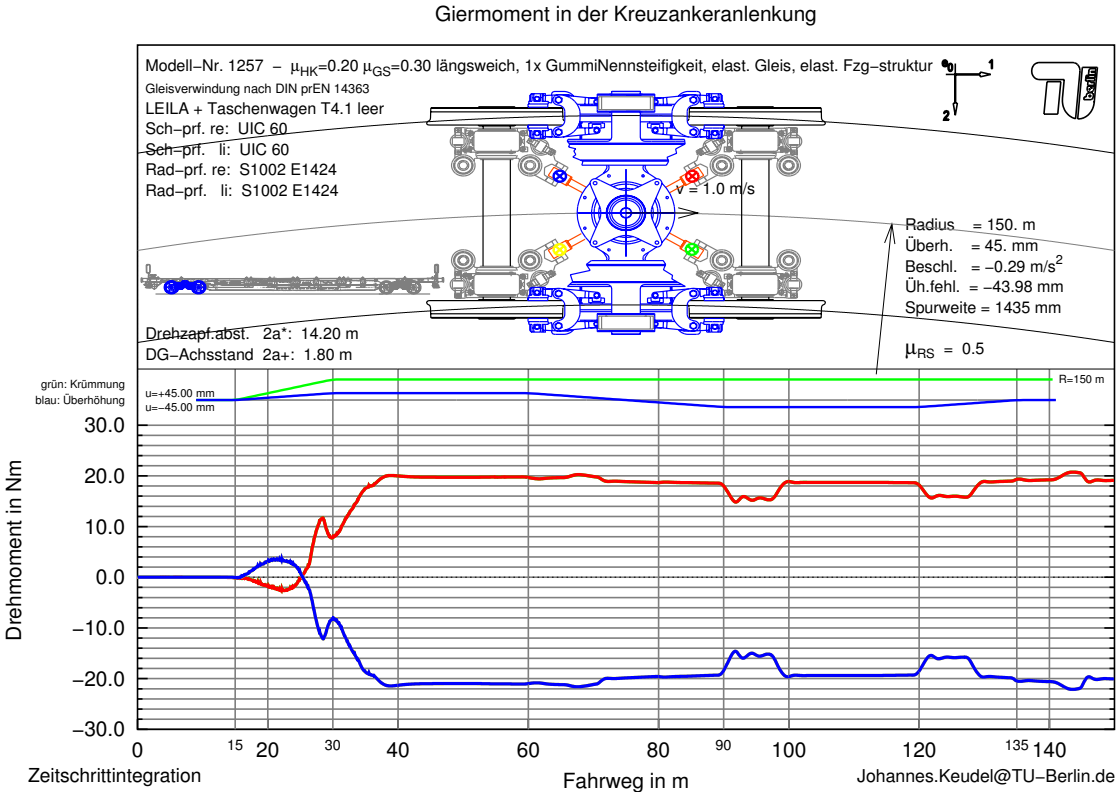
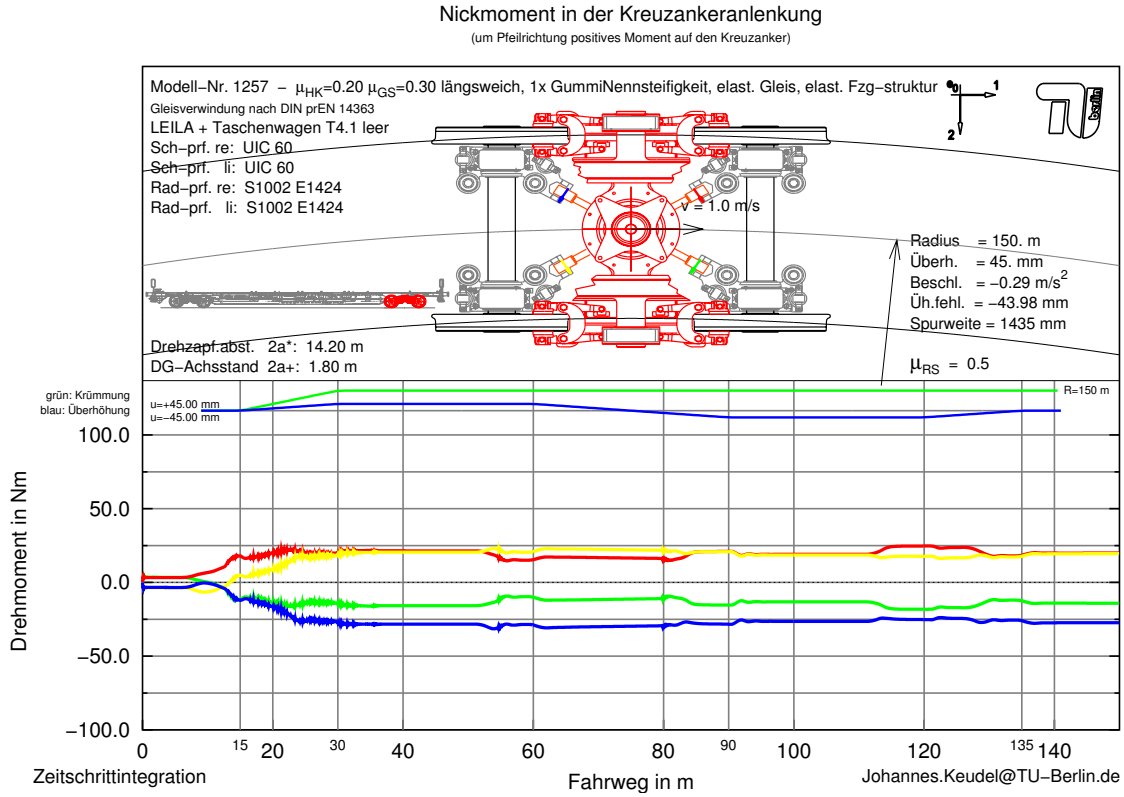




Abbildung B.55: Giermoment in der Kreuzankeranlenkung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



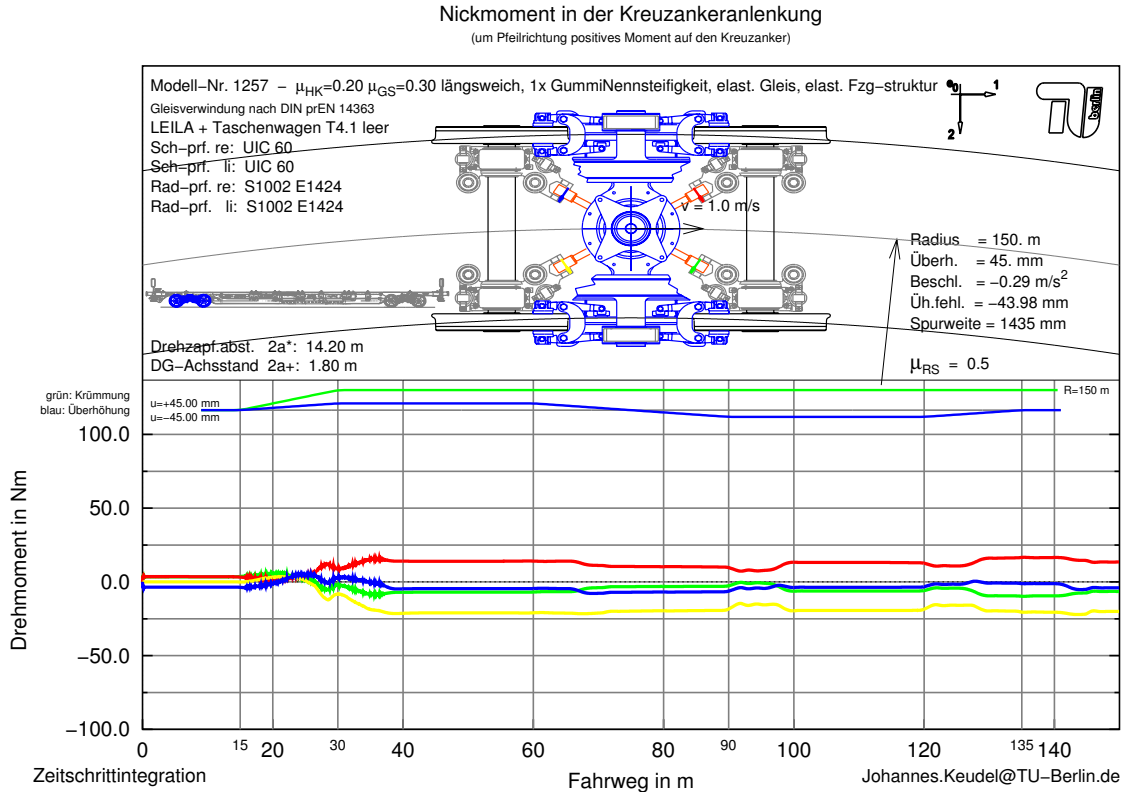
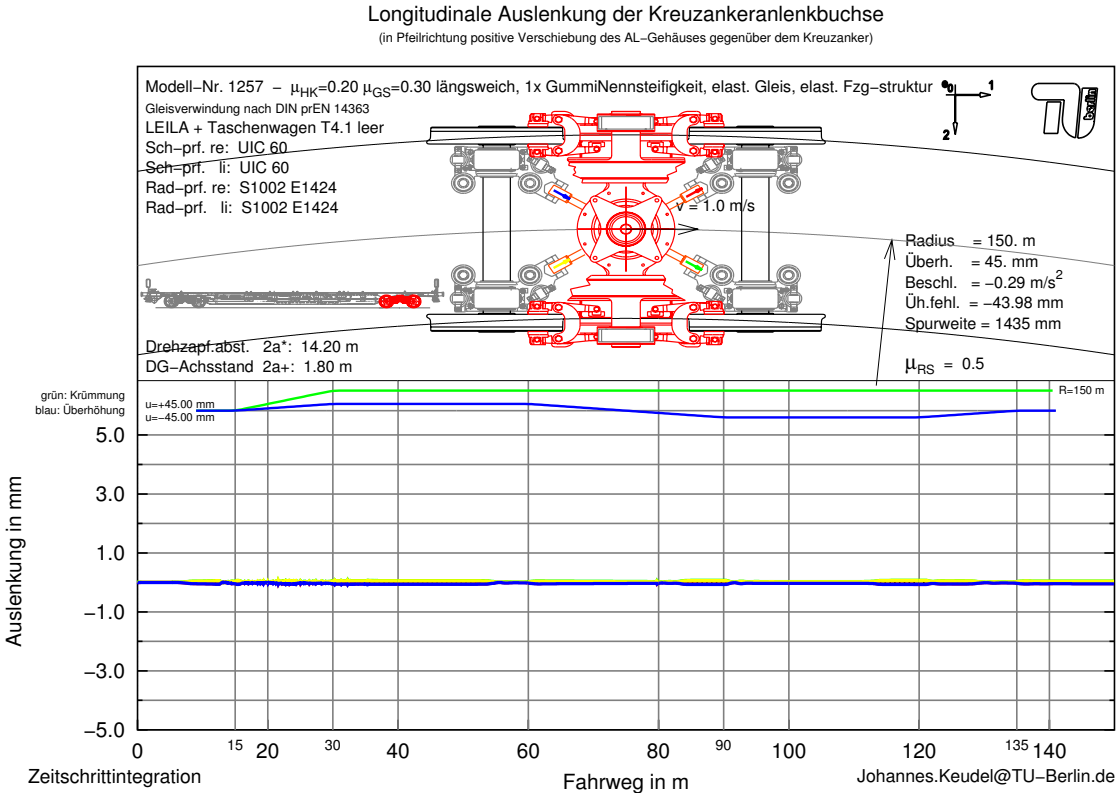




Abbildung B.56: Nickmoment in der Kreuzankeranlenkung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



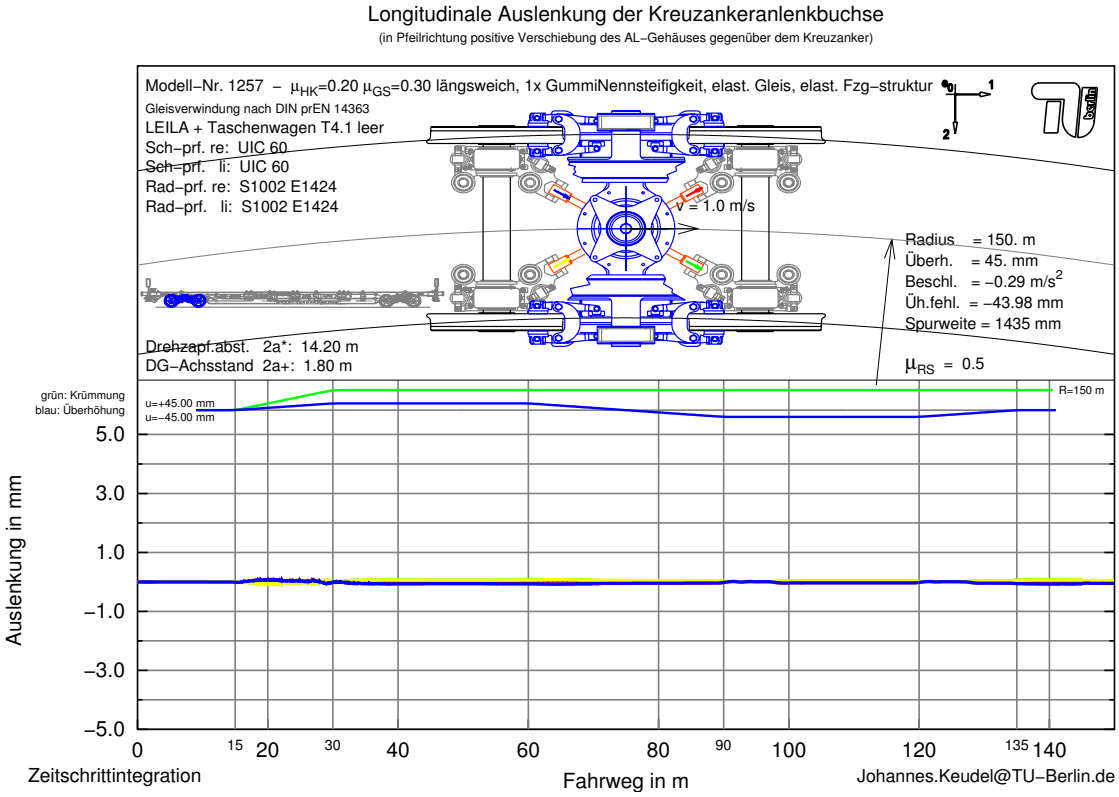
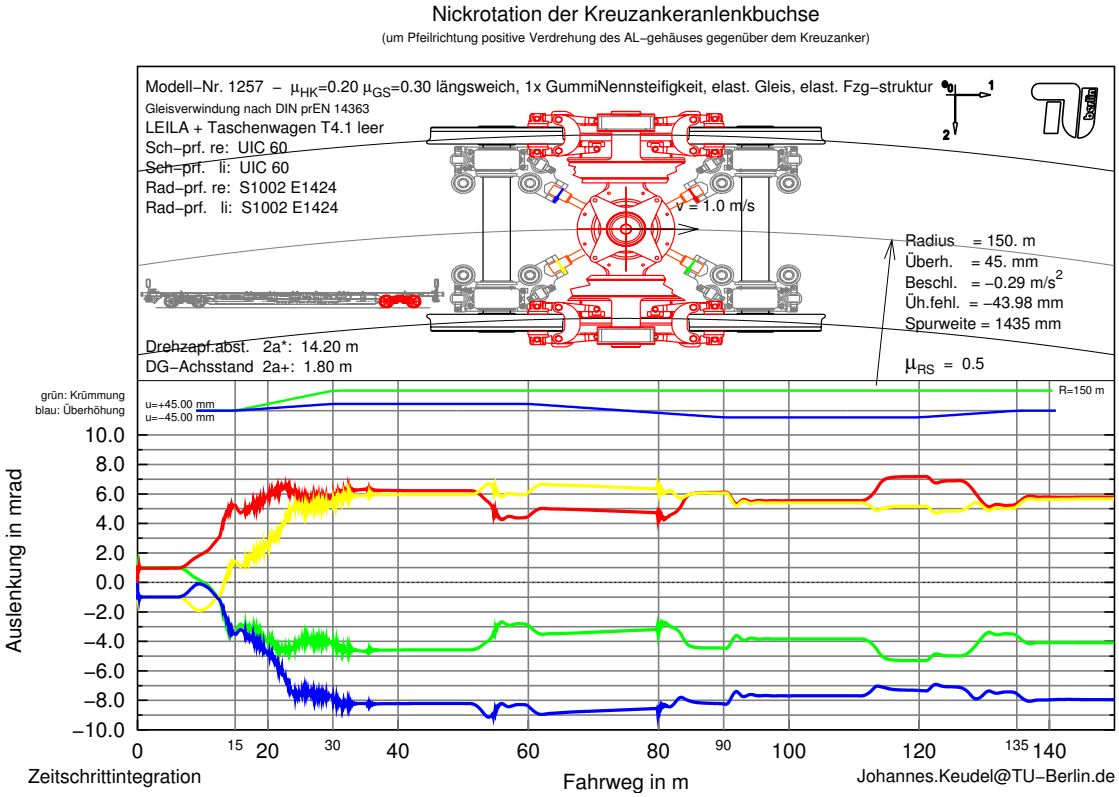




Abbildung B.57: Kreuzankeranlenkung: Längsdehnung- bzw. Stauchung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



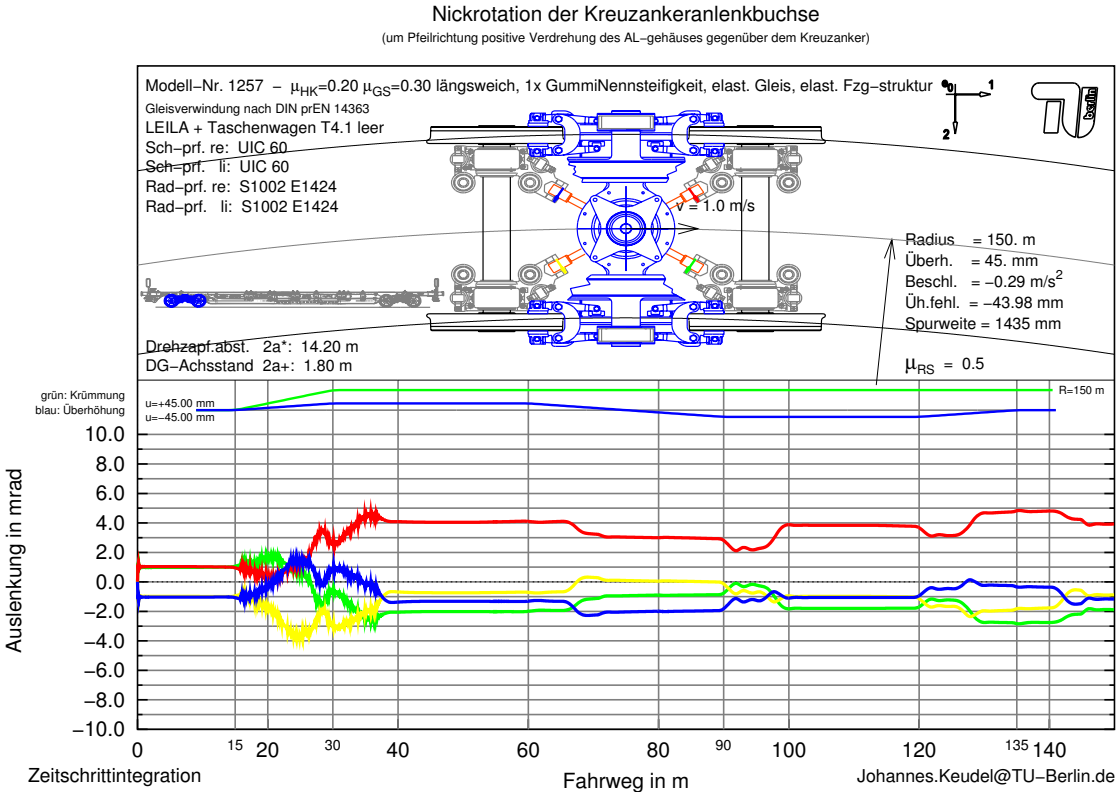




Abbildung B.58: Nickausdrehung in der Kreuzankeranlenkung - Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45

## B.3.2 Taschenwagen T4.1 21.4t - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm

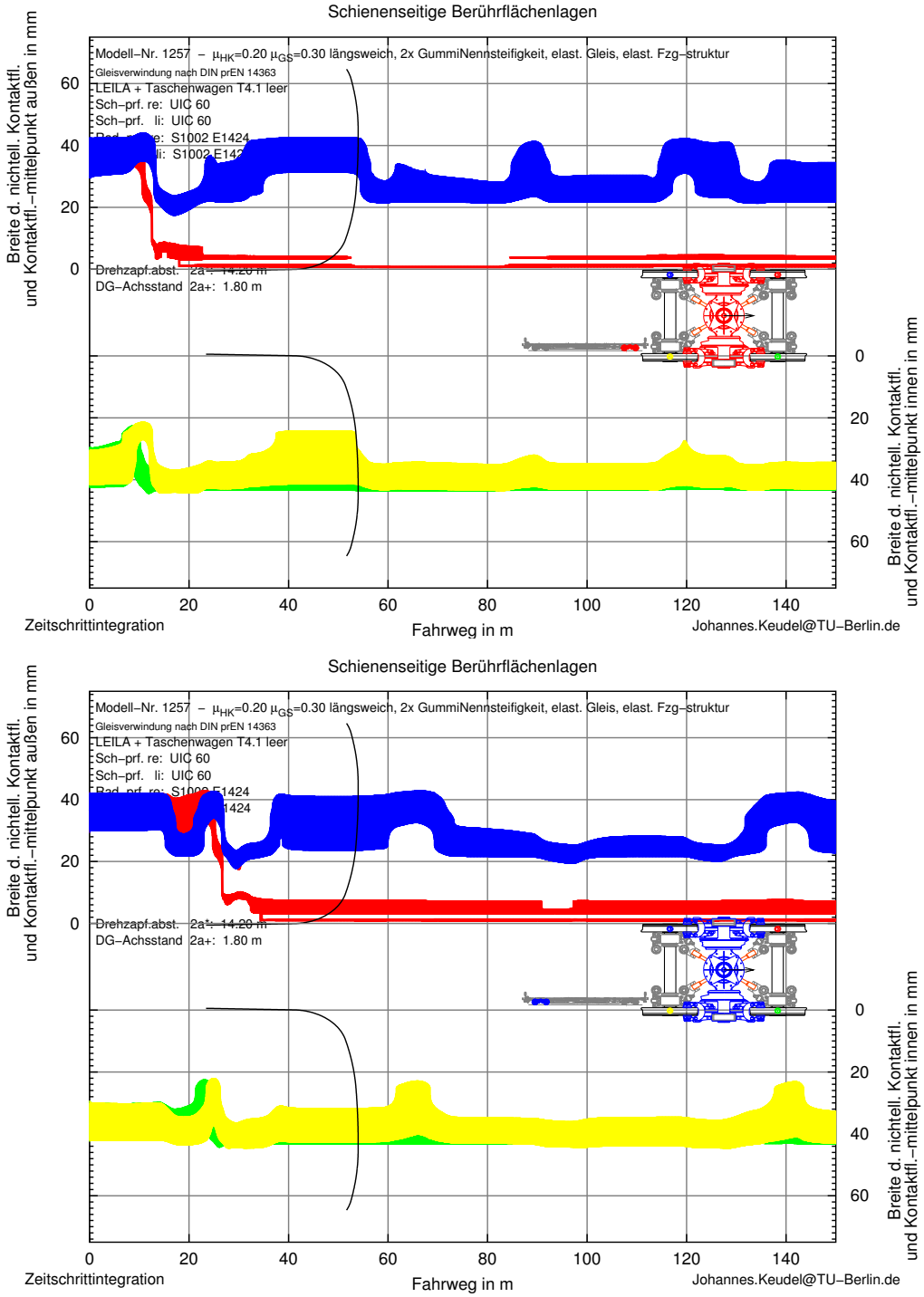
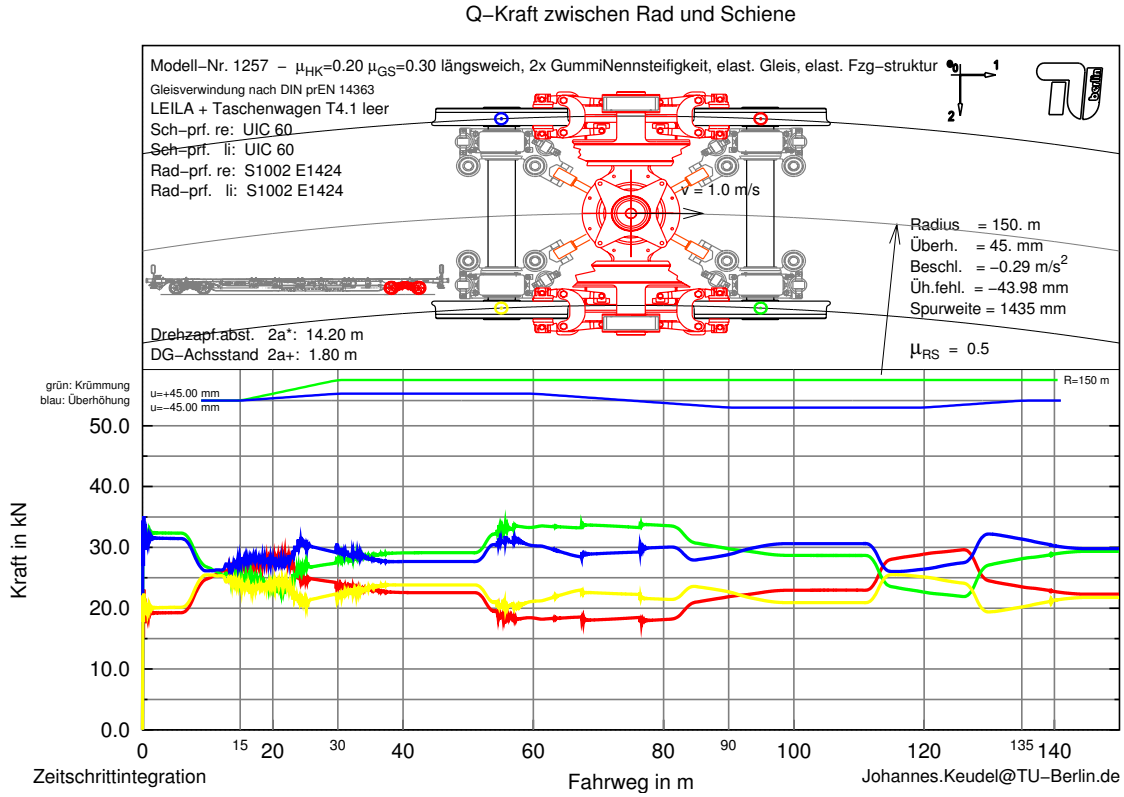



Abbildung B.59: Schienenberührlagen - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



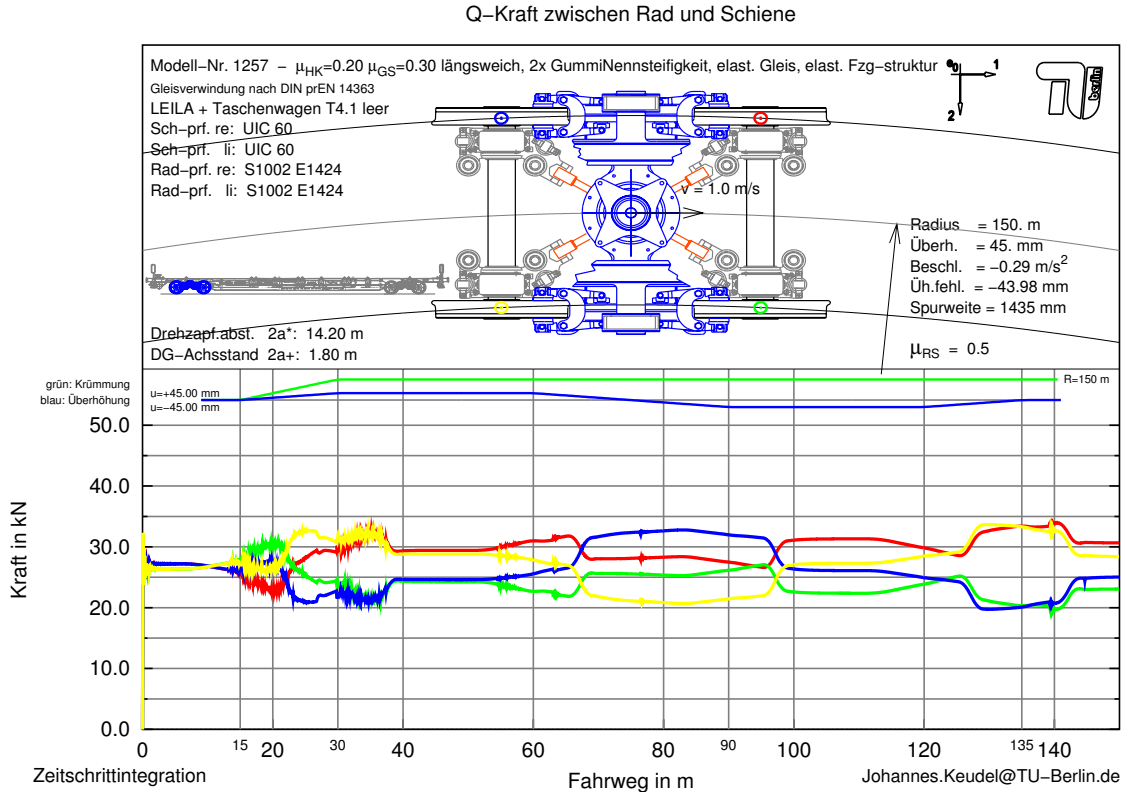
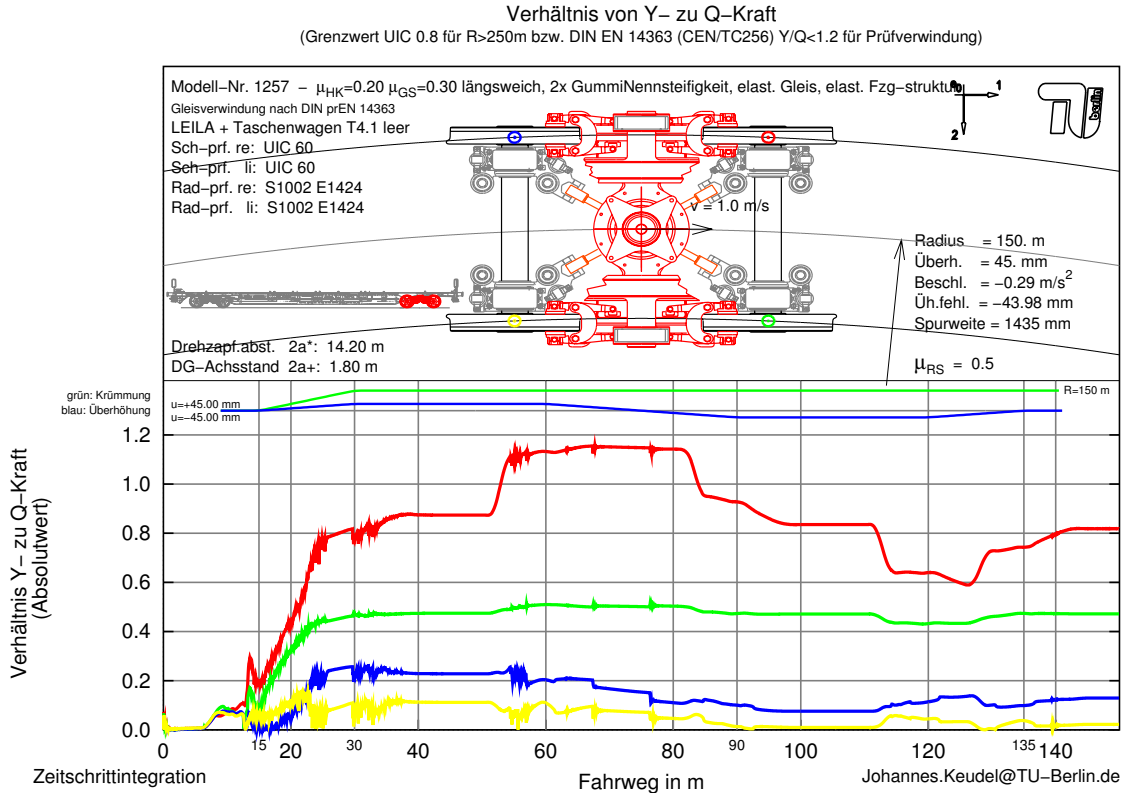




Abbildung B.60: Q-Kraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



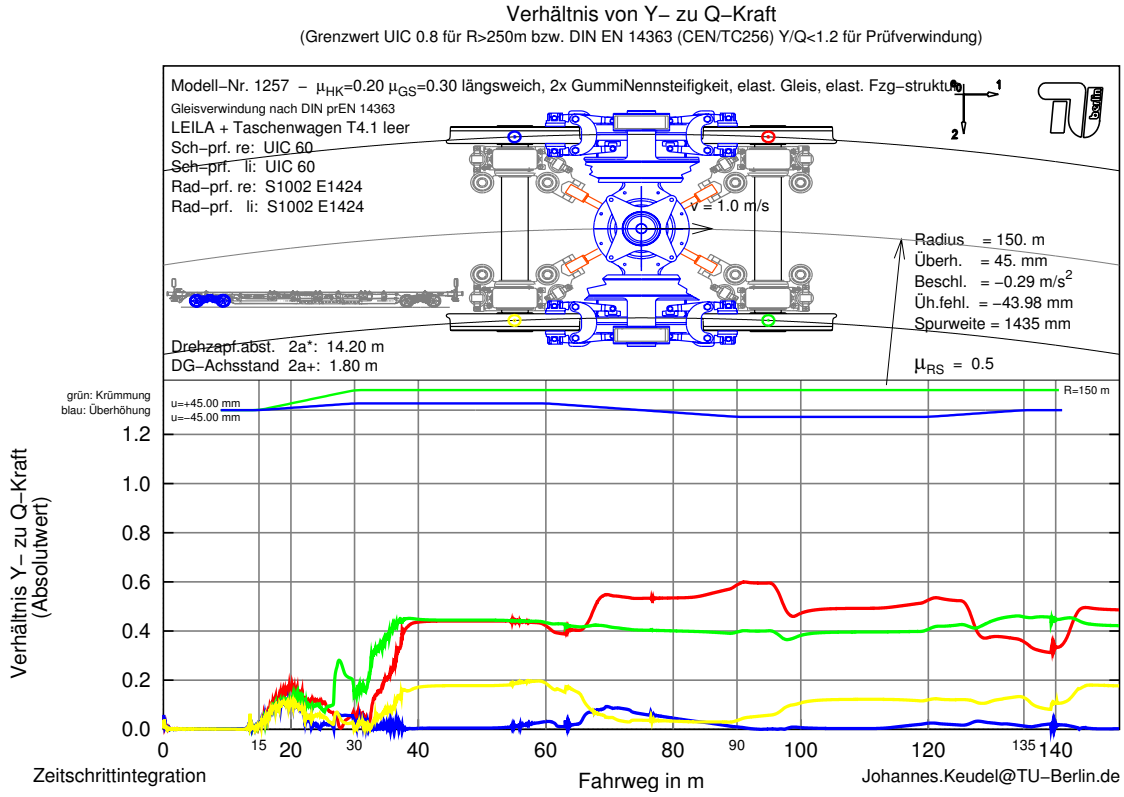
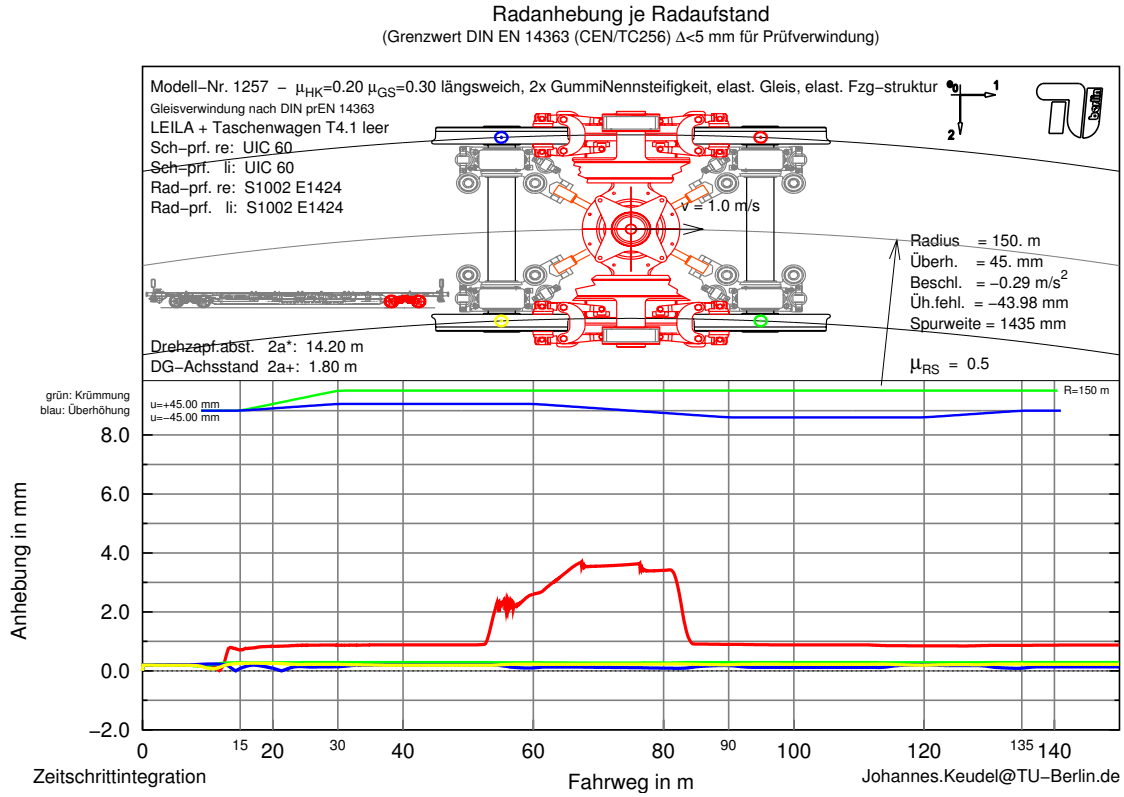




Abbildung B.61: Y/Q - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



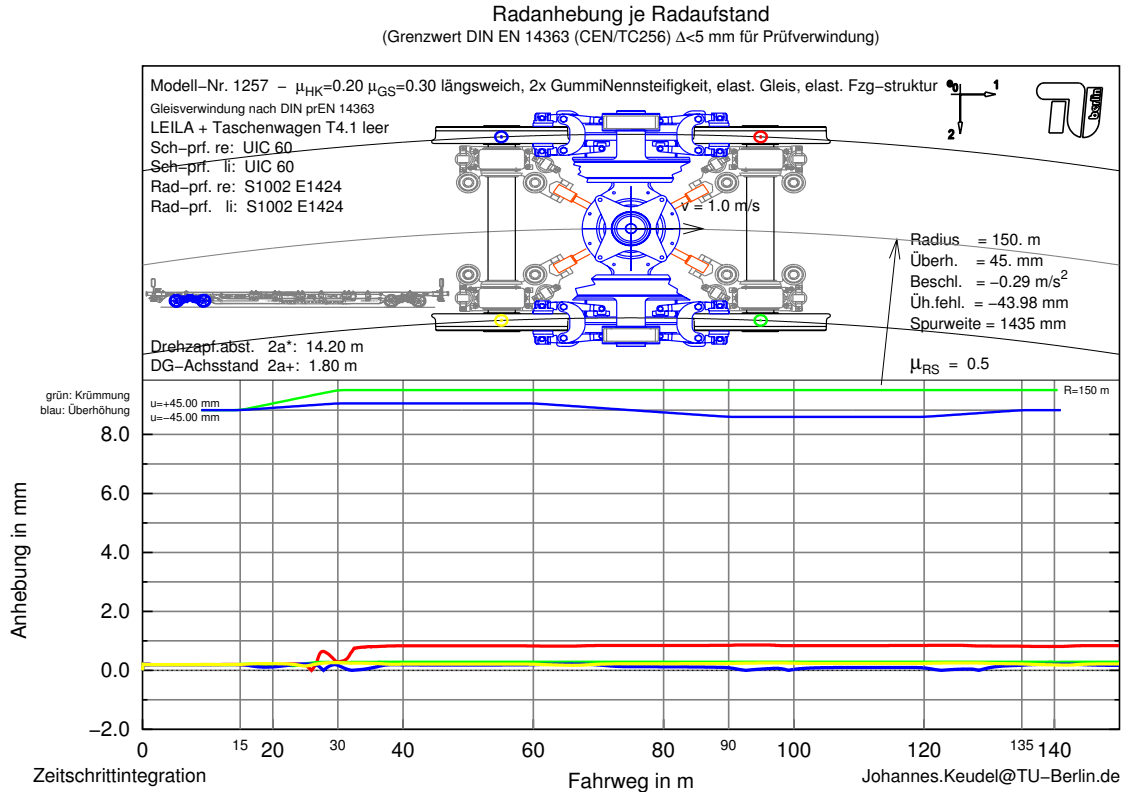
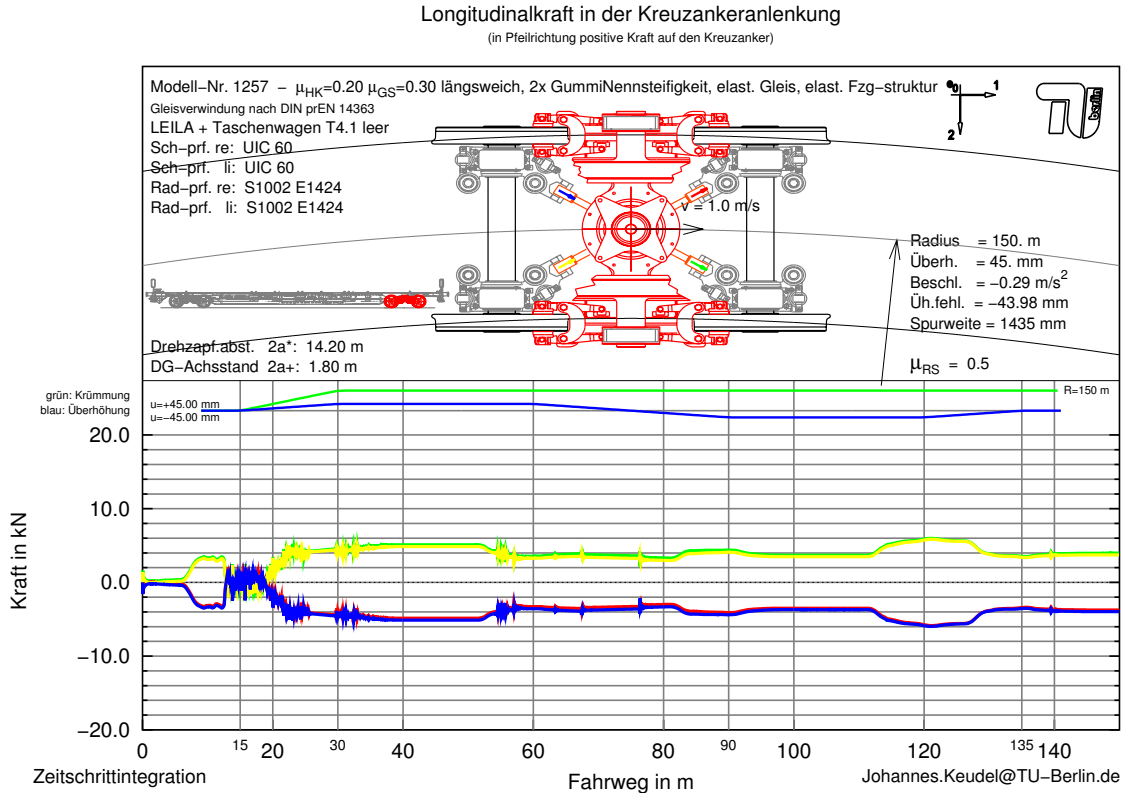




Abbildung B.62: Radanhebung - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



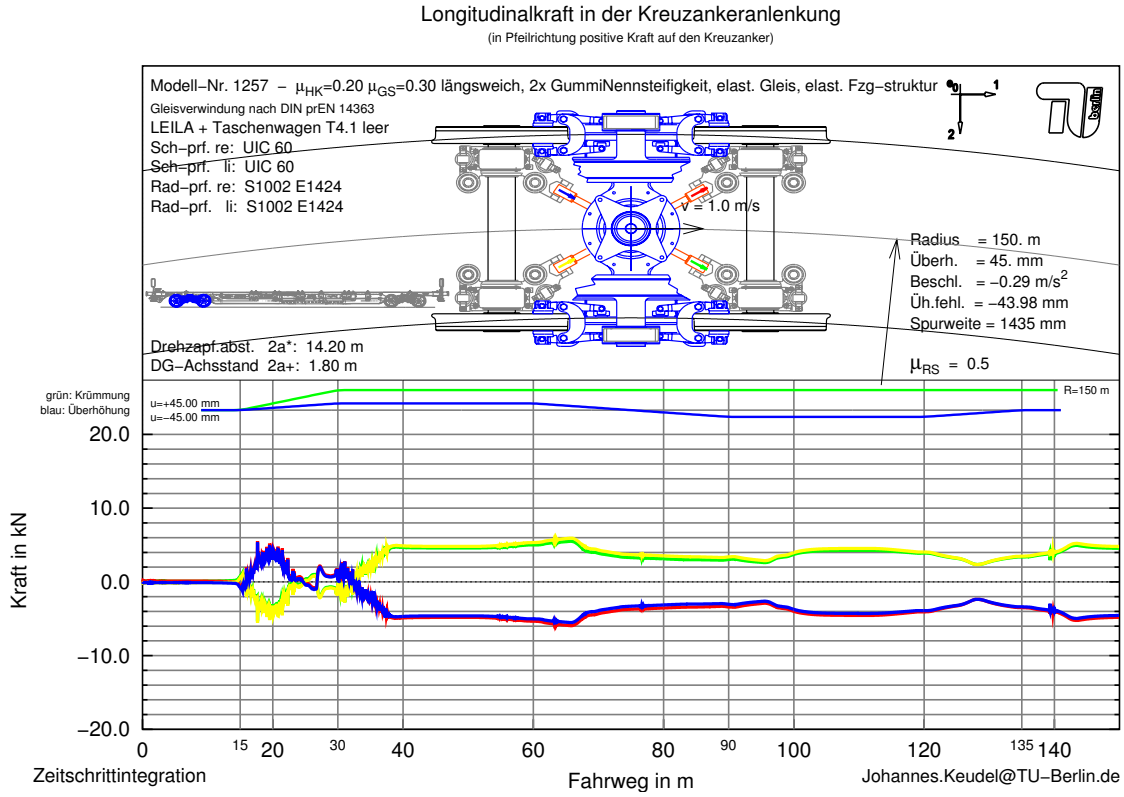
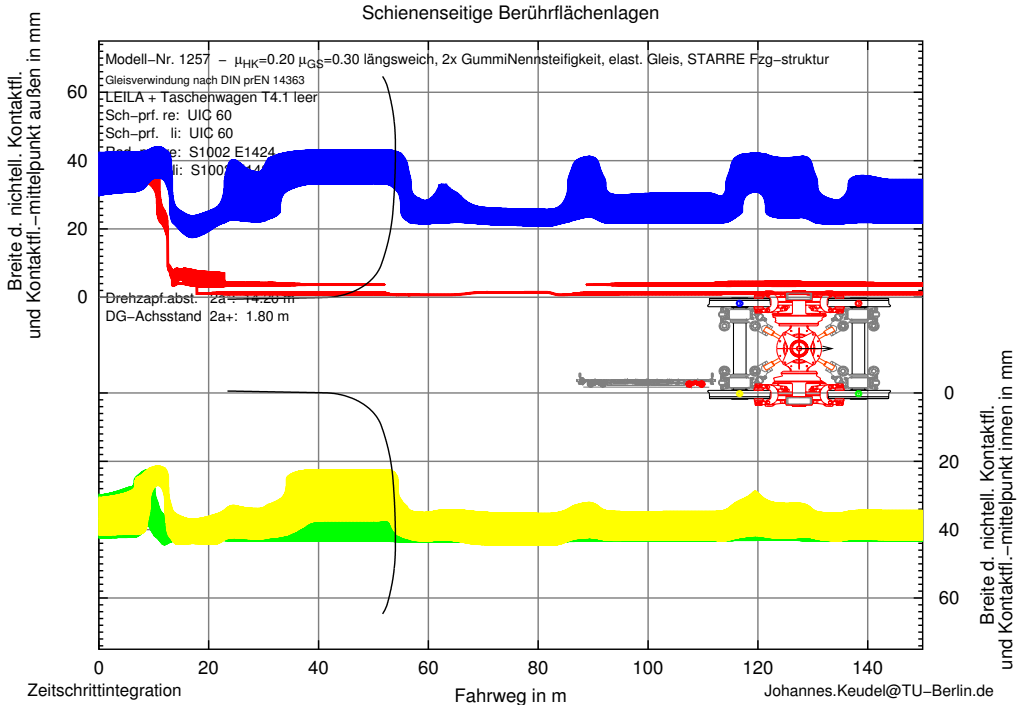




Abbildung B.63: Kreuzankerlängskraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, elast. Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45

## B.3.3 Taschenwagen T4.1 21.4t - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - S1002 / UIC 60 $\mu_{rs}$=0.5 R=150m v=1.0m/s uh=45mm



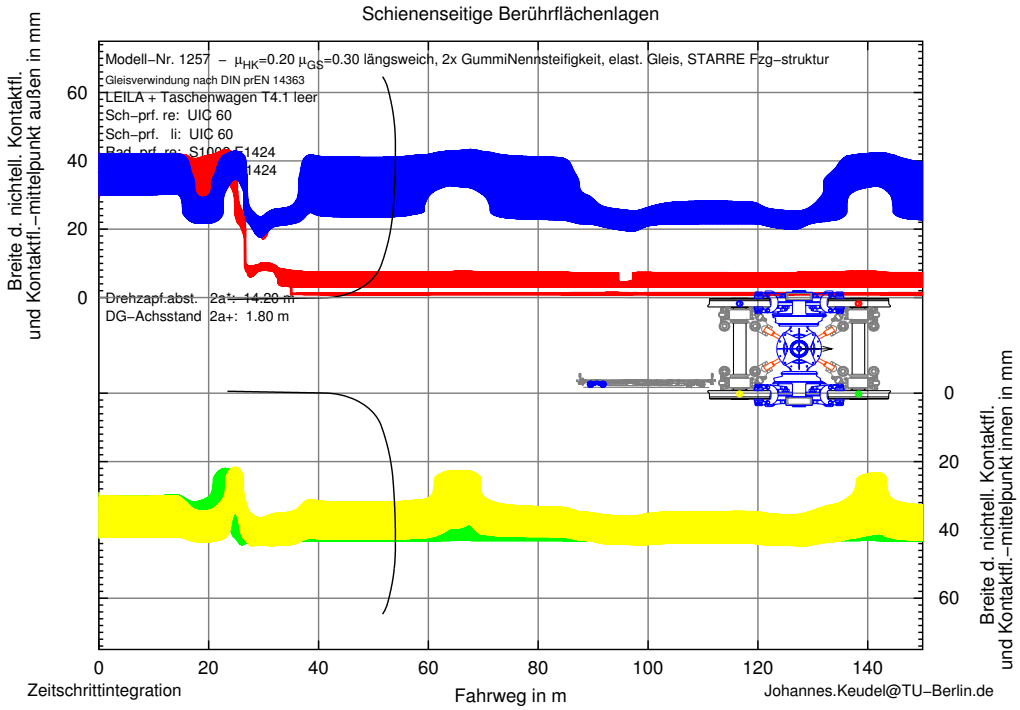
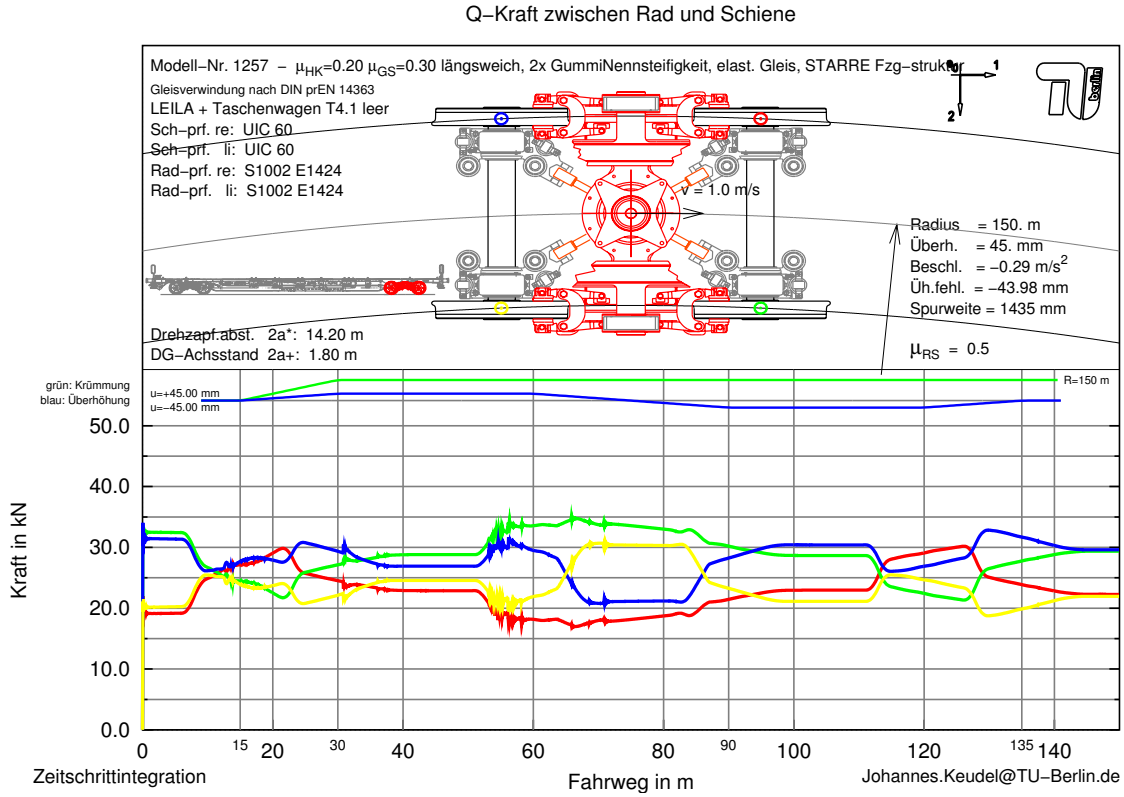




Abbildung B.64: Schienenberührlagen - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



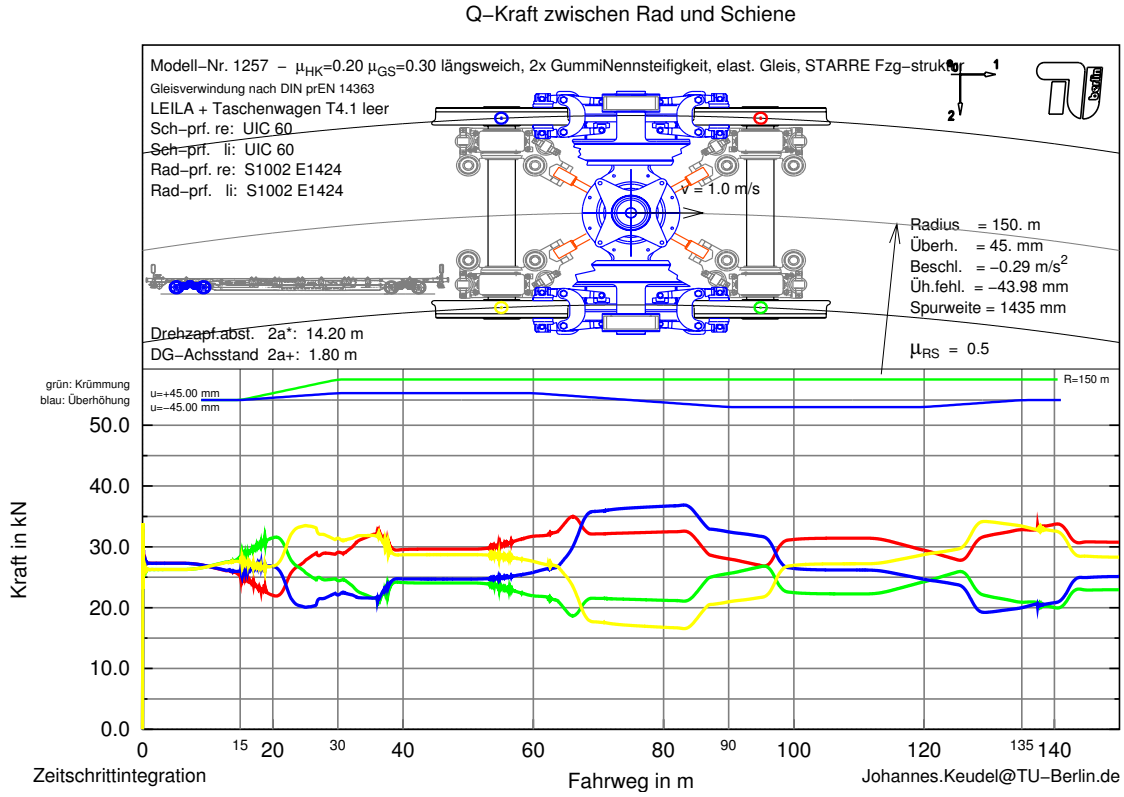
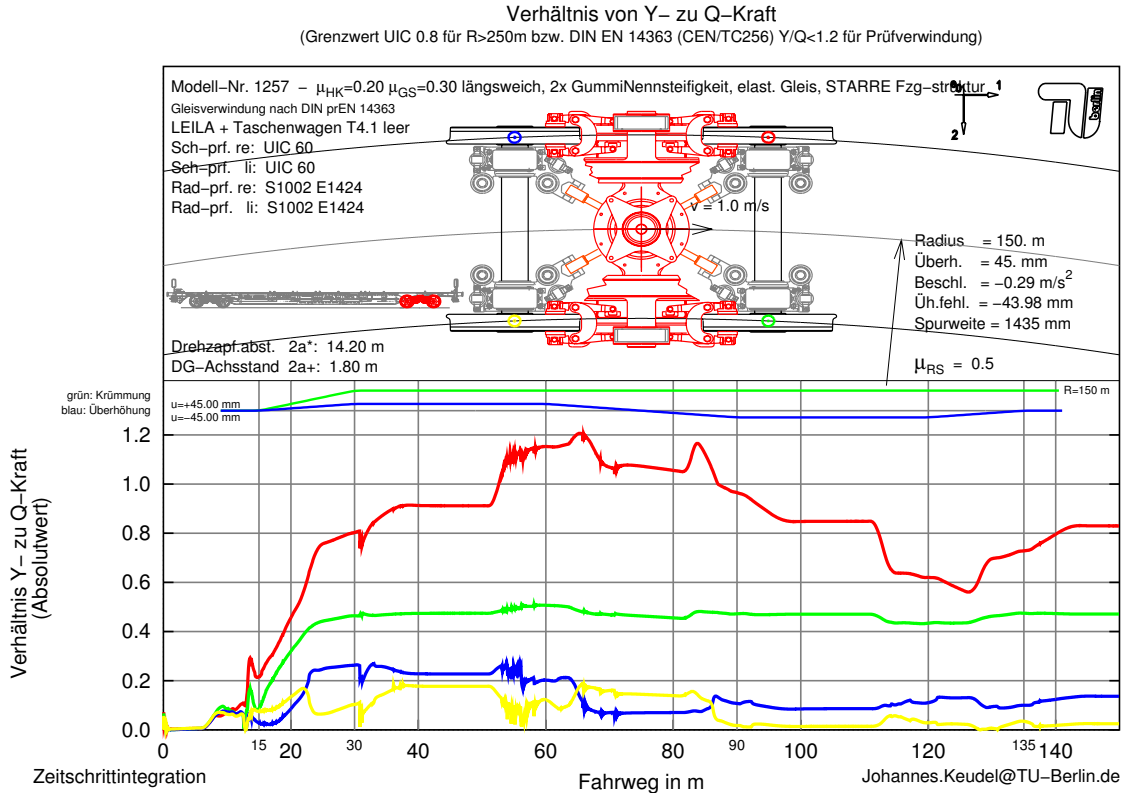




Abbildung B.65: Q-Kraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



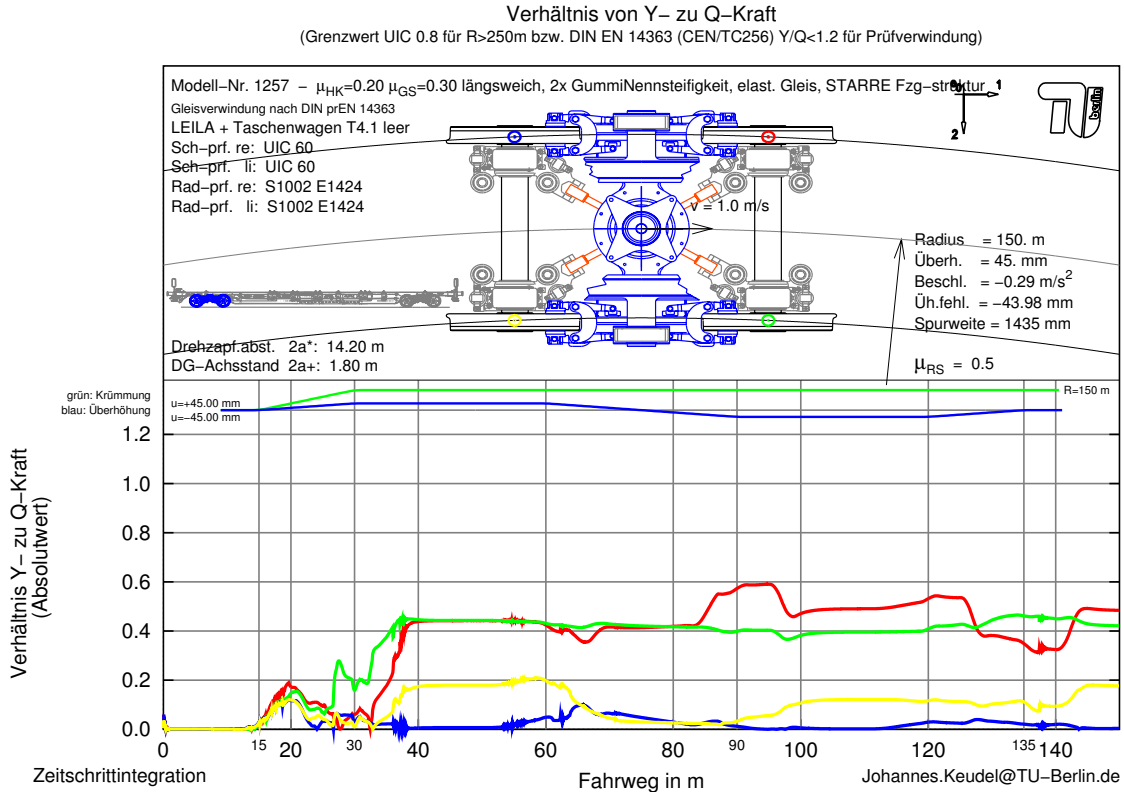
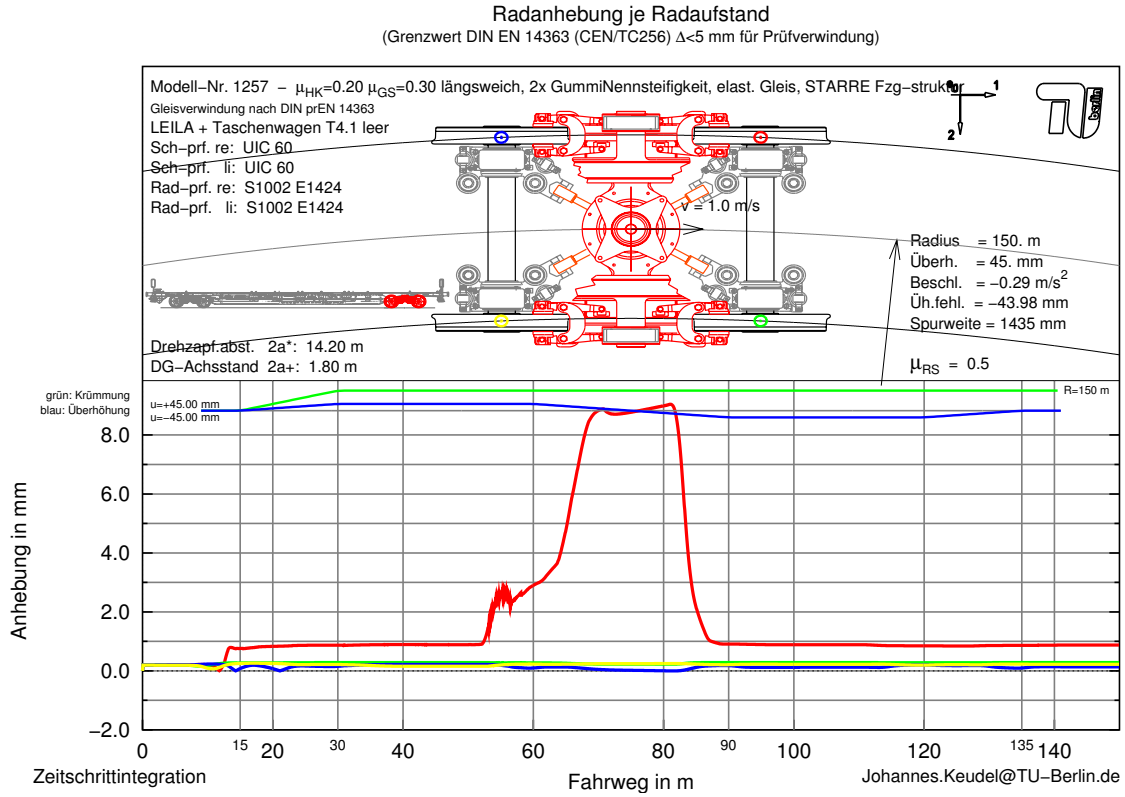




Abbildung B.66: Y/Q - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



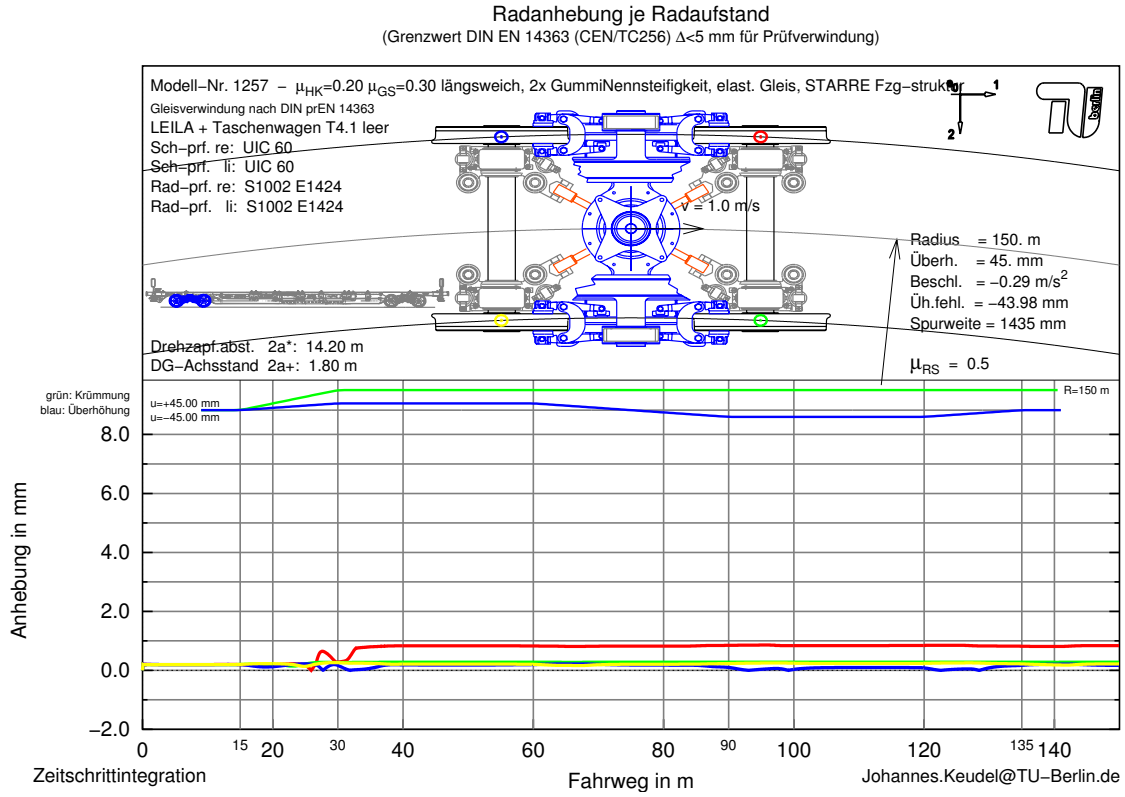
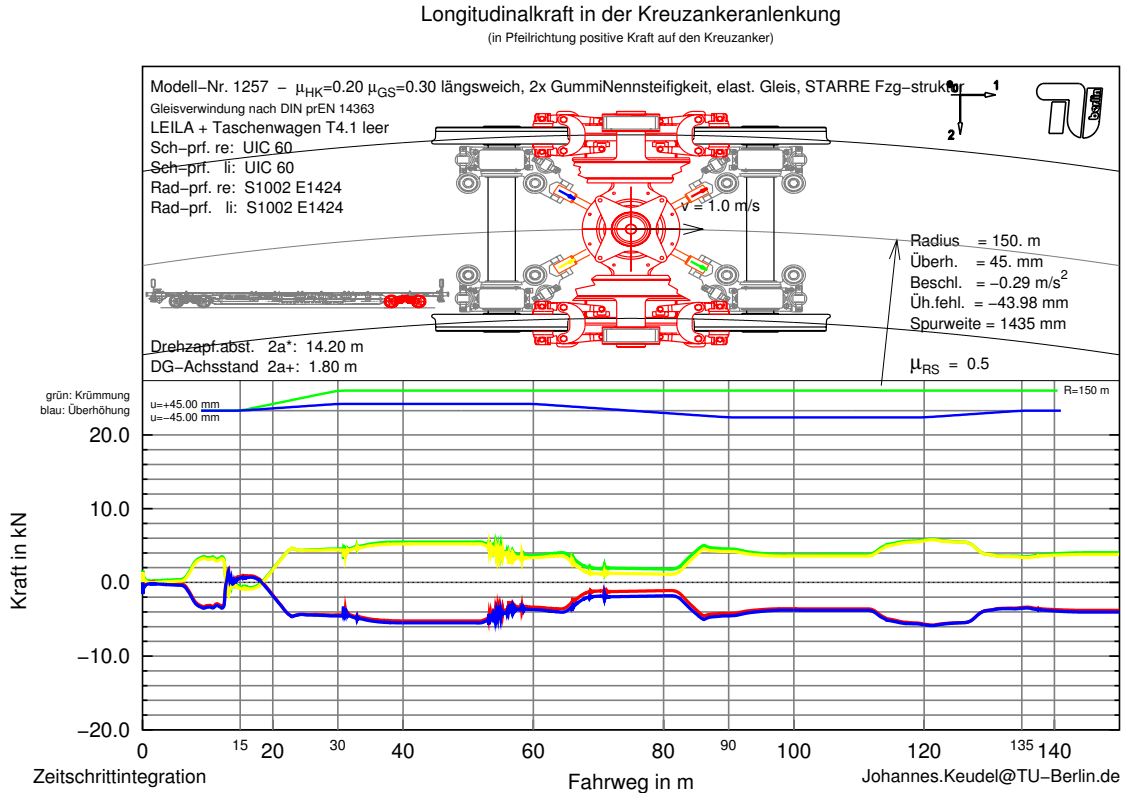




Abbildung B.67: Radanhebung - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45



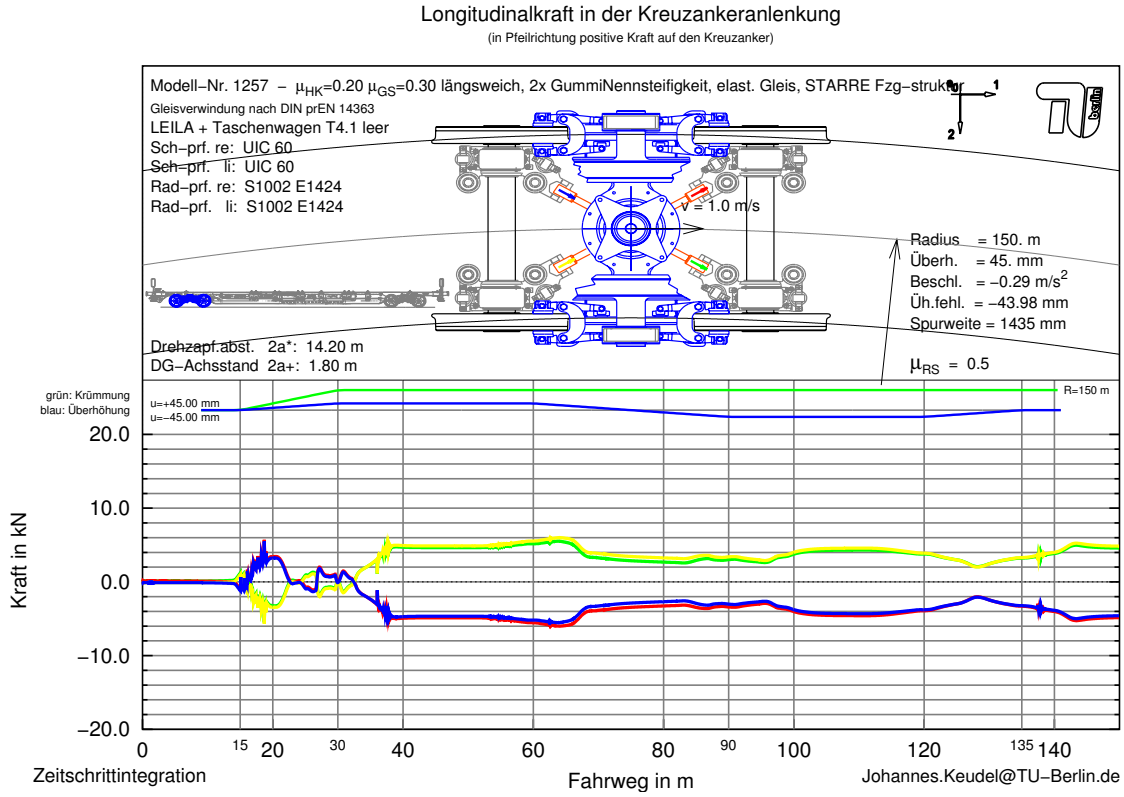




Abbildung B.68: Kreuzankerlängskraft - Doppelte Gummi-Nennsteifigkeit, $\mu_{GS}$= 0.3 längsweich, $\mu_{HK}$= 0.2, starre Wagenstruktur - Gleisverwindung $\mu_{rs}$=0.5 R=150 v=1.0 u=45