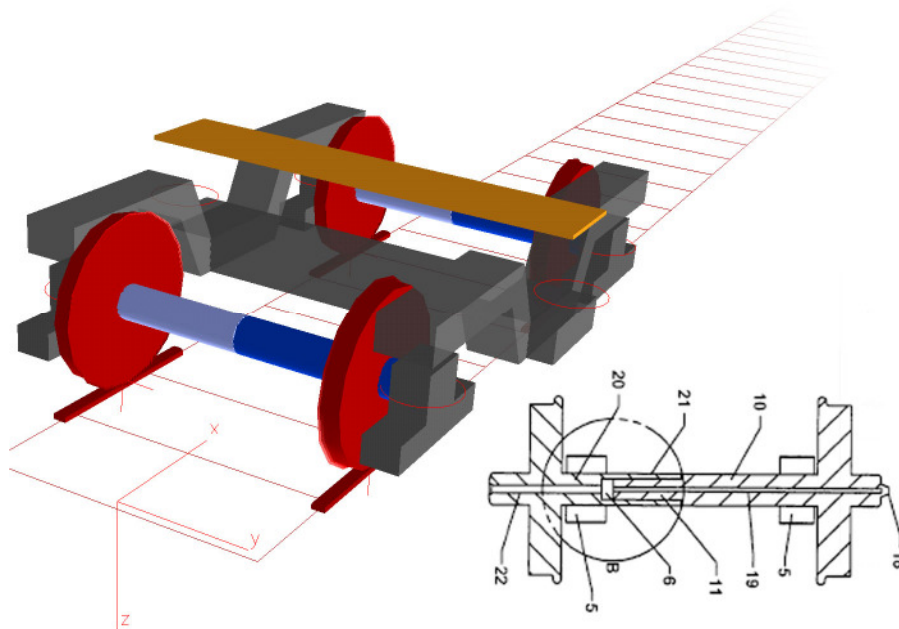


Bericht 4-385 Rev. 0

Projekt-Nr.: CH:09.059.00 DE:PDE.117.00



Lauftechnische Machbarkeitsstudie

Untersuchung einer Radsatzwelle nach dem
Patent von Dr. H. Winzeler

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
CH-8400 Winterthur
Schweiz
Tel: +41 52 262 74 00
Fax: +41 52 262 74 01
E-mail: info@prose.ch

| | Name | Datum | Unterschrift |
|--------------------|---------------------|------------|--------------|
| Erstellt | Dr. Johannes Keudel | 18.05.2010 | |
| Geprüft | Dr. Martin Schmidt | | |
| Freigegeben | Stefan Bühler | | |

Verteiler

| Firma | Abteilung | Name | Kopien | Bemerkungen |
|-------|--------------|-------------------|--------|-------------|
| BAFU | Lärmbekämpf. | Herr Liengme | 1 | |
| | | Herr Dr. Winzeler | 1 | |
| PROSE | | Archiv | 1 | |

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Revisionsindex

| | Erstellt | Geprüft | Freigegeben | Datum |
|------|---------------------|--------------------|---------------|-------|
| | Dr. Johannes Keudel | Dr. Martin Schmidt | Stefan Bühler | |
| Rev. | | | | |
| Rev. | | | | |

Änderungen

| Revision | Seite | Kapitel | Beschreibung |
|----------|-------|---------|--------------|
| | | | |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 5 |
| 2 | Einleitung | 5 |
| 3 | Simulationsmodelle und Randbedingungen | 7 |
| 3.1 | Koordinatenausrichtung | 8 |
| 3.2 | Modellierung der Winzeler-Welle | 8 |
| 3.3 | Strassenbahn in Meterspur | 9 |
| 3.4 | Meterspur-Reisezugwagen | 10 |
| 3.5 | Normalspur-Reisezugwagen | 11 |
| 4 | Simulationsergebnisse | 12 |
| 4.1 | Geradenfahrt | 12 |
| 4.2 | Bogenfahrt | 13 |
| 5 | Bei Realisierung besonders zu berücksichtigende Aspekte | 15 |
| 6 | Fazit | 17 |
| 7 | Literatur | 18 |
| 8 | Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse | 19 |
| 8.1 | Strassenbahn | 20 |
| 8.1.1 | Geradeausfahrt | 20 |
| 8.1.2 | S-Bogen mit 30m Bogenradius, 10 km/h | 21 |
| 8.2 | Meterspur-Reisezugwagen | 25 |
| 8.2.1 | Geradeausfahrt | 25 |
| 8.2.2 | S-Bogen mit Radius 60 m, 25 km/h | 28 |
| 8.3 | Normalspur-Reisezugwagen | 32 |
| 8.3.1 | Geradeausfahrt 160 km/h, Gleislagestörungen, Spurweite 1435 mm | 32 |
| 8.3.2 | Geradeausfahrt 300 km/h, keine Gleislagestörungen, Spurweite 1430 mm | 35 |
| 8.3.3 | S-Bogen mit Radius 150 m, 20 km/h | 36 |
| 8.3.4 | S-Bogen mit Radius 300 m, 70 km/h | 39 |

1 Zusammenfassung

Ausgehend von der Fragestellung des lauftechnischen Verhaltens von torsions- und quergedämpften Radsatzwellen nach dem Patent von Dr. Winzeler [13] kommt die vorliegende Machbarkeitsstudie auf Basis exemplarischer Simulationsrechnungen für drei grundlegend verschiedene Fahrzeugtypen zu folgendem Schluss:

Für die angesetzten Dämpfungsparameter verhält sich die Winzeler-Welle wie ein Losradkonzept mit dem wesentlichen Vorteil einer hohen Laufstabilität sowie dem wesentlichen Nachteil einer fehlenden Ausrichtung zur Gleistrajektorie. Für betrieblich enge Bögen der Normalspurbahn lassen sich Vorteile bezüglich der Rad/Schiene-Reibarbeit respektive der benötigten Traktionsenergie nicht aber in Bezug auf die Querschludivorgänge und damit auf die erwartete Geräuschemission ausmachen. Für engere Bögen z.B. einer Strassenbahn lassen sich ohne Kompensation des Schräglauvwinkels kaum Vorteile erwarten.

Die vorstehende Untersuchung lässt also für die Winzeler-Welle gegenüber den bekannten lauftechnischen Vor- und Nachteilen von Radsatz und Losrad keine neuen lauftechnischen Vorzüge oder eine Eliminierung von Nachteilen erkennen.

2 Einleitung

Im Bahnbereich ist heute der Radsatz bestehend aus einer Radsatzwelle und zwei aufgedrücktten Radscheiben weit verbreitet. Im Nahverkehr, insbesondere bei Niederflur-Strassenbahnen sind auch Losradkonzepte – Konzepte bei denen mindestens die Rotationsgeschwindigkeiten der Räder voneinander unabhängig sind – gängig.

Beide Konzepte weisen lauftechnisch sowohl Vor- als auch Nachteile auf.

Hintergrund ist, dass Schienenfahrzeuge typischerweise weder aktiv in den Bogen lenken noch aktiv die Spur geradeaus halten, sondern den Fahrweg durch die Rad/Schiene-Interaktion erfahren. Daraus ergibt sich das widersprüchliche Ziel der Spurführung nach einem Fahrzeug, das sich möglichst widerstandslos durch den Bogen führen bzw. ausdrehen lässt aber bei Geradeausfahrt selber die Richtung hält.

Der **Radsatz** pendelt bei Geradenfahrt infolge der Kopplung von rechtem und linkem Rad im sogenannten Sinuslauf um die Gleismitte. Diese dynamische Zentrierung führt bei tiefen und mittleren Geschwindigkeiten zu einem recht geringen und vor allem zu einem gleichmässigen Verschleiss der Räder. Bei sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten kann die Amplitude dieses Sinuslaufs zu gross werden. Durch starrachsige Anlenkung oder aufwändige Dämpfung müssen solche Grenzykelbewegungen unterbunden werden. Unter der Voraussetzung günstiger Rad/Schiene-Profile kann das bogenäussere Rad in Bögen auf einem grösseren Radius abrollen als das bogeninnere Rad, dadurch den längeren Weg der Aussenbahn ausgleichen und somit unerwünschte Reibvorgänge zwischen Rad und Schiene vermeiden. Bei Bögen mit sehr engen Radien kann der Radsatz nicht mehr rein abrollen sondern gerät vermehrt in Gleitreibung. Dies erhöht den Verschleiss an Rad und Schiene sowie den Lärmpegel und kann zu Kurvenkreischen führen.

Losradkonzepte ermöglichen unabhängige Abrollgeschwindigkeiten von rechtem und linkem Rad, was den Längsschlupf in engen Bögen minimiert. Mit zusätzlichen Massnahmen können auch die Schräglaufwinkel¹ und damit das Quergleiten klein gehalten werden. Damit wird der Lärm und der Verschleiss bei Bogenfahrt gering gehalten. Bei Geradenfahrt fehlt jedoch ein wirkungsvoller Zentrierungsmechanismus². Läuft ein Rad einseitig mit dem Spurkranz an, wird es grundsätzlich dort verbleiben. Asymmetrischer und recht grosser Verschleiss ist die Folge. Aus diesem Grund haben sich Losradkonzepte bisher auch nicht für alle Einsätze durchsetzen können.

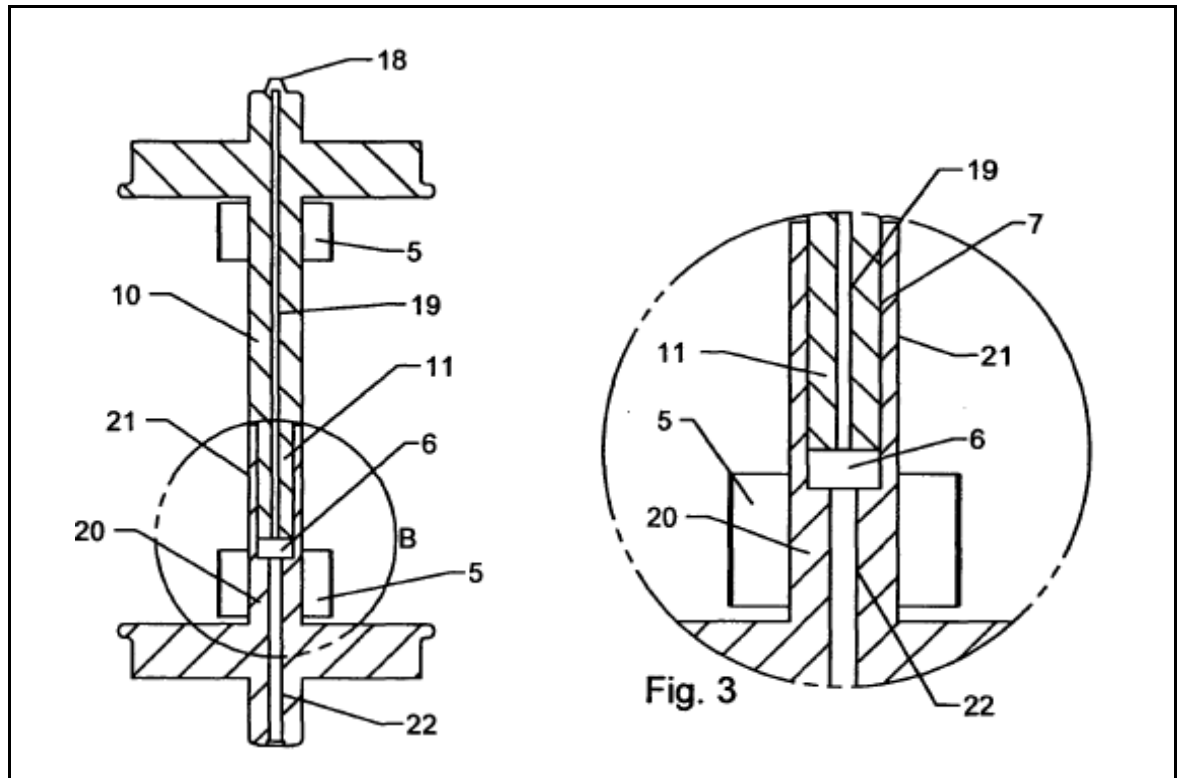


Abbildung 1: Prinzip der Winzeler-Welle [13]

Die **Patentanmeldung von Dr. H. Winzeler** [13] beschreibt eine Radsatzwelle, welche die Vorteile beider Konzepte vereinigen soll:

Die in Abbildung 1 dargestellte Welle – nachfolgend Winzeler-Welle genannt – ist zweiteilig aufgebaut und erlaubt im Unterschied zum herkömmlichen Radsatz zwischen den beiden Radsatzhälften Nr. 10 und Nr. 20 eine Drehbewegung um Y (Koordinatenausrichtung s. Abschnitt 3.1) sowie eine durch Anschläge begrenzte Querverschieblichkeit. Zwischen den Radsatzhälften ist eine viskose Dämpfung eingebracht. Diese bietet bei langsamen Relativgeschwindigkeiten kaum Widerstand gegen Verdrehung und Querverschiebung, bei schnellen Relativbewegungen werden die beiden Teile nahezu starr aneinander gekoppelt. Die Patentschrift [13] lässt insbesondere folgende lauftechnische Vorzüge erwarten:

- Gleichmässiger Verschleiss von Lauffläche und Spurkranz
- Geringere und akustisch vorteilhafte Schlupfvorgänge zwischen Rad und Schiene

¹ Schräglaufwinkel bezeichnet den zwischen der Rollrichtung des Rades und der Tangente der Schiene verbleibenden Gierwinkel, also den Fehlwinkel gegenüber der idealen Lenkbewegung.

² Je nach Rad- und Schienenprofil resultiert ein geringer Zentrierungseffekt (wie auch beim Radsatz) durch die Minimierung der potentiellen Energie in Gleismitte, sofern eine Querverschiebung des Rades über die Neigung der Profile mit einer entsprechenden Anhebung des Fahrzeugs verbunden ist.

Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist eine Aussage, ob die Winzeler-Welle diese Erwartungen für den grundlegenden Fall einer weder angetriebenen noch gebremsten Ausführung erfüllt. Gegenstand sind dabei allein lauftechnische Belange und ihre mutmasslichen Auswirkungen z.B. hinsichtlich Lärmemission. Fragestellungen beispielsweise nach Festigkeit, Zuverlässigkeit oder Instandhaltbarkeit solcher Radsatzwellen sind zweifelsohne mindestens ebenso relevant, aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Das Vorgehen dieser lauftechnischen Machbarkeitstudie besteht darin, die Winzeler-Welle unter exemplarischen Randbedingungen mittels numerischer Simulation zu untersuchen.

3 Simulationsmodelle und Randbedingungen

Die Simulationsrechnungen erfolgen mit dem etablierten Software-Paket SIMPACK [11], das die bahntypischen Belange des Rad/Schiene-Kontakts in guter Näherung wiedergeben kann. Die Untersuchung erfolgt für drei exemplarische Fahrzeugtypen:

- **Strassenbahn**, Drehgestellfahrzeug für Meterspur
- **Reisezugwagen**, Drehgestellfahrzeug für **Meterspur**
- **Reisezugwagen**, Drehgestellfahrzeug für **Normalspur** 1435 mm

Die Modellierung beinhaltet jeweils ein Fahrzeug mit Winzeler-Welle sowie zum Vergleich auch das ansonsten identische Fahrzeug mit herkömmlichen Radsätzen.

Folgende Randbedingungen sind in den Simulationsmodellen der drei Fahrzeugtypen identisch angesetzt:

- **Gleisbettung**
Für die vorliegende Prinzipuntersuchung ist der Einfluss unterschiedlicher Gleisbettungen zunächst nebensächlich. Daher wird das Gleis für diese Untersuchung als ungefedert starr gegenüber dem umgebenden Referenzsystem angesetzt. Grundsätzlich erlaubt SIMPACK aber die Berücksichtigung nahezu beliebiger Bettungseigenschaften zur Modellierung des Gleis-Oberbaus wie z.B. Zwischenlagen- oder Schottersteifigkeiten. Ein grundsätzlicher Einfluss dieser Bettungseigenschaften auf das Laufverhalten wie z.B. auf die fahrzeugindividuelle kritische Geschwindigkeit ist bekannt – z.B. [3].
- **Gleislagefehler**
Für die Frage der prinzipiellen lauftechnischen Eigenschaften der Winzeler-Welle sind Gleislagefehler zunächst unerheblich. Um deren Einfluss aber exemplarisch aufzuzeigen, stehen Messdaten einer realen Normalspurstrecke zur Verfügung.

- **Rad/Schiene-Kontakt**

Es werden jeweils fahrzeugtypische Neuprofile für Rad- und Schiene in jeweils gängiger Einbauneigung angenommen. Die Rad/Schiene-Reibungszahl wird zu Vergleichszwecken einheitlich mit 0.4 angesetzt, was trockenen Bedingungen und damit einem Reibwert etwas über dem Durchschnittswert [2] entspricht.

Fahrzeugspezifische Parameter sind in den nachfolgenden Abschnitten 3.3 bis 3.5 dargelegt. Die beiden Reisezugwagen für Meter- und Normalspur sind jeweils als Einzelwagen (also ohne Einfluss benachbarter Fahrzeug) modelliert, was für derartige Fragestellungen üblich und der Rechenzeit nützlich ist.

3.1 Koordinatenausrichtung

Die Koordinatenausrichtung erfolgt wie für lauftechnische Untersuchungen üblich: X in Fahrtrichtung, Y in Fahrtrichtung nach rechts sowie Z entsprechend der Erdbeschleunigung nach vertikal unten (s. auch Abbildung 2).

3.2 Modellierung der Winzeler-Welle

Die Modellierung der beiden Radsatzhälften erfolgt so, dass zwischen dem linken und dem rechten Rad nur die Freiheitsgrade „Verdrehung um Y“ sowie „Querverschiebung in Y“ verbleiben.

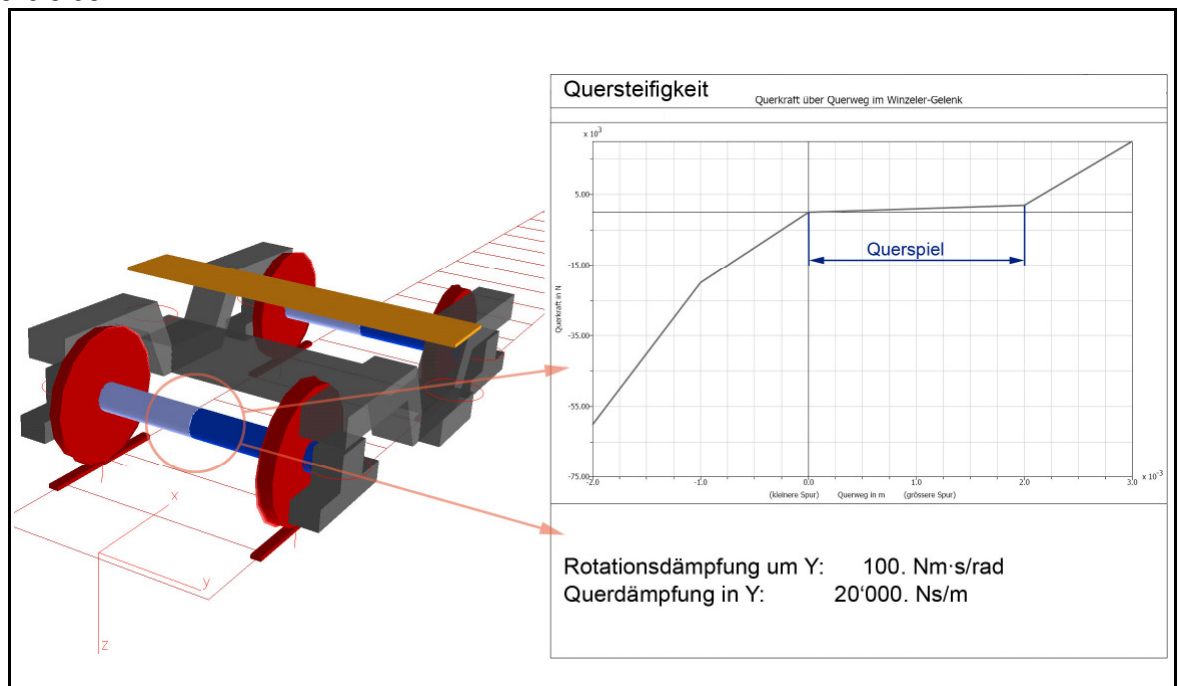


Abbildung 2: Modellierung der Winzeler-Funktionalität

Abbildung 2 gibt das in dieser Machbarkeitsstudie exemplarisch verwendete Parameterset wieder: die angesetzte Quercharakteristik erlaubt ein Auseinanderziehen der Radsatzhälften um bis zu 2 mm, bevor ein progressiv steifer werdender Anschlag zum Tragen kommt. Rotations- und Querdämpfung erfolgen exemplarisch linear zur Relativgeschwindigkeit und sind in Ihrer Grössenordnung einem Arbeitspapier [14] entnommen.

3.3 Strassenbahn in Meterspur

Das exemplarisch verwendete Strassenbahnmodell (s. Abbildung 3) besteht aus einem dreigliedrigen Fahrzeug für Meterspur und weist am vorlaufenden Drehgestell einen Messkreisdurchmesser von 660 mm auf.

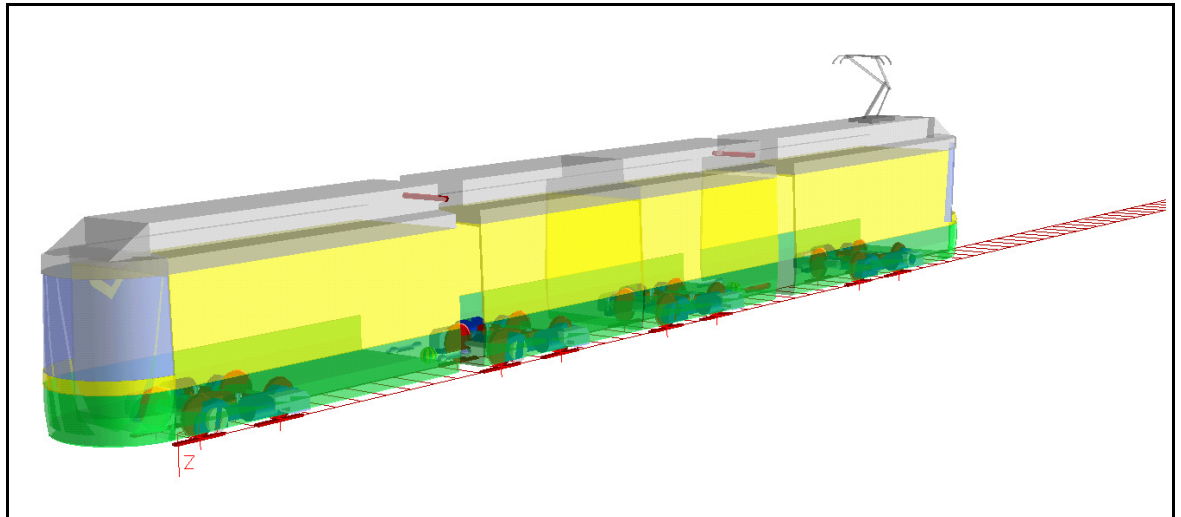


Abbildung 3: Modell des dreigliedrigen Trams

Die verwendeten Rad- und Schienenprofile sowie die resultierenden Berührlagen bei unterschiedlichen Querverschiebungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Schienenseitig wird strassenbahntypisch eine Rillenschiene (hier RI60 [8] ohne Einbauneigung) berücksichtigt. Das Radprofil ist das Standardprofil eines existierenden Strassenbahnunternehmens.

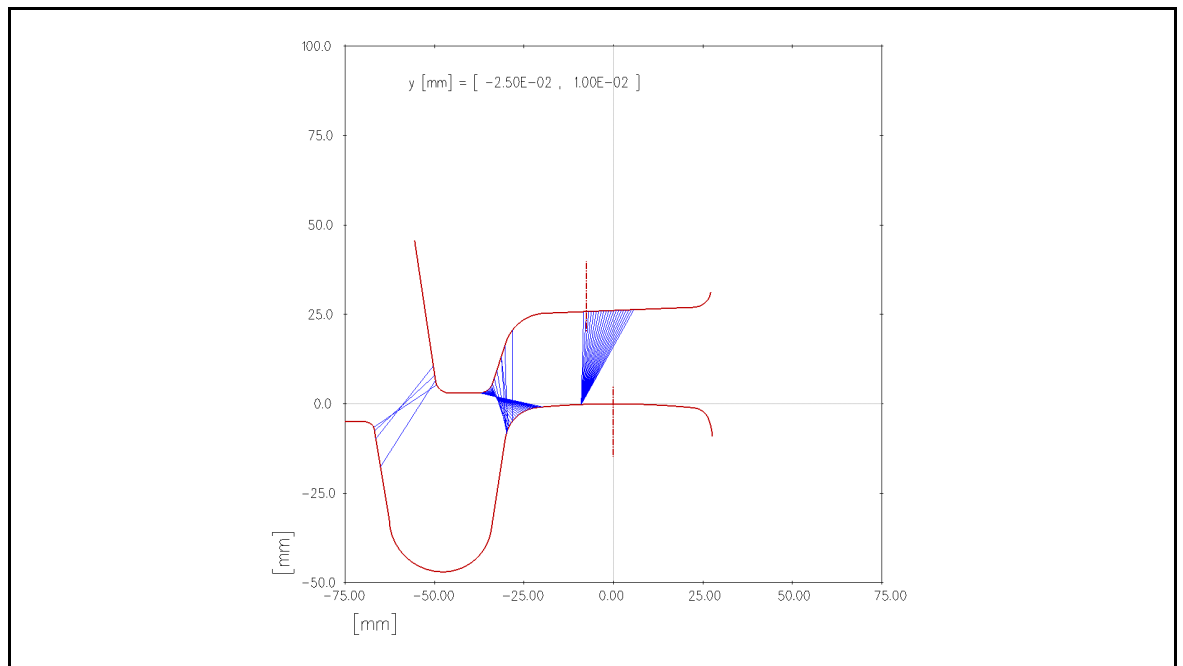


Abbildung 4: Tram-Radprofil und Rillenschiene (Darstellung SIMPACK)

3.4 Meterspur-Reisezugwagen

Abbildung 5 zeigt das Modell des exemplarischen Meterspur-Reisezugwagens, der durch einen Drehzapfenabstand von knapp 13 m, einen Radsatzstand im Drehgestell von 1.8 m, eine Radsatzlast von ca. 6 t im Leerzustand sowie einen Messkreisdurchmesser von 750 mm gekennzeichnet ist.

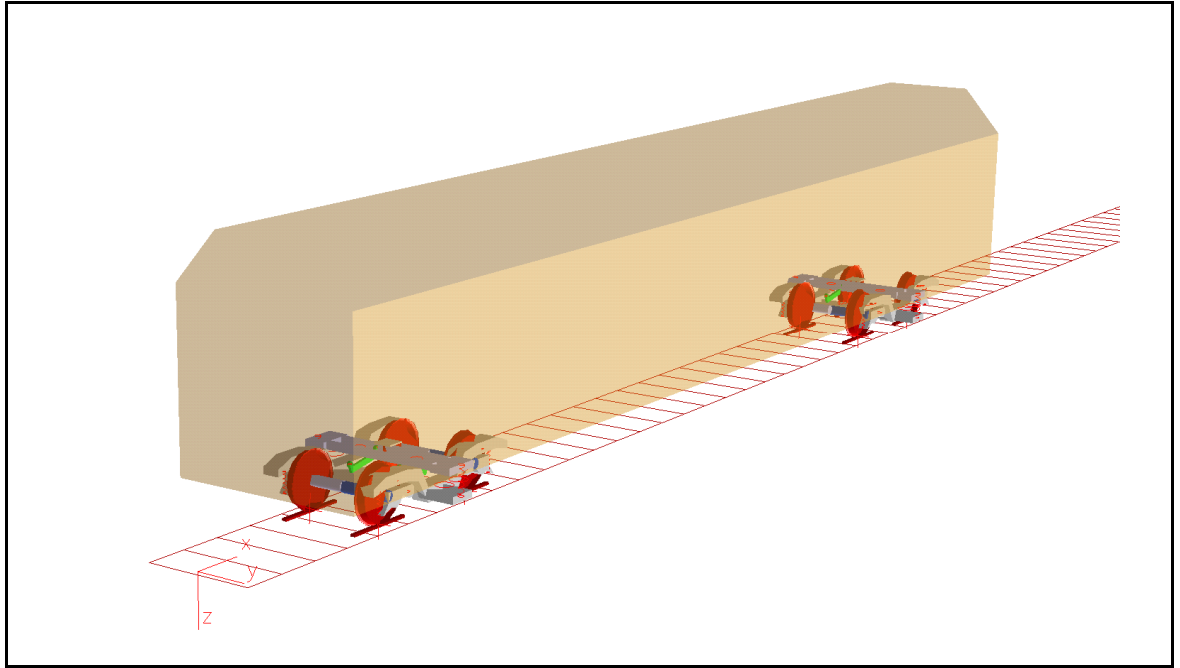


Abbildung 5: Modell des Meterspur-Reisezugwagens

Das in Abbildung 6 gezeigte Radprofil ist das Neuprofil einer Meterspurbahn. Die Schiene wird dazu passend zum Typ SBB I [8] mit einer Einbauneigung von 1:20 gewählt.

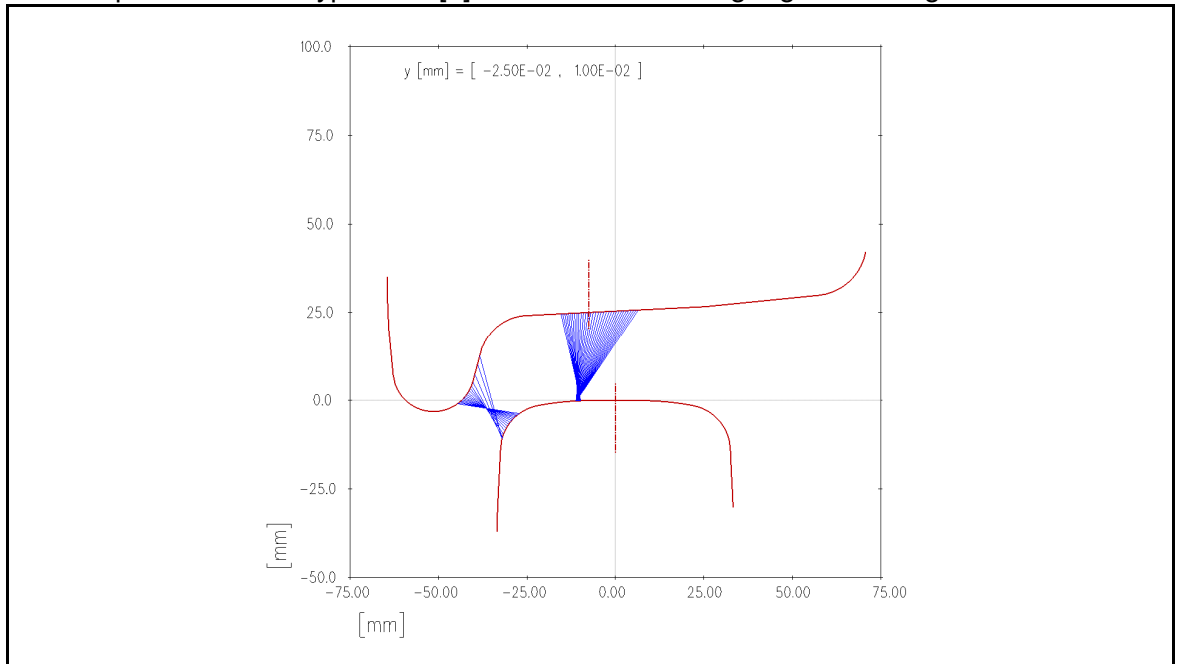


Abbildung 6: Radprofil einer Meterspurbahn und Schienenprofil SBB I (Darstellung SIMPACK, noch ohne Einbauneigung)

3.5 Normalspur-Reisezugwagen

Abbildung 7 zeigt das Modell des exemplarischen Normalspur-Reisezugwagens, der in seinen Basiseigenschaften den ICE-Mittelwagen der ersten Generation ähnlich ist [4]. Der Drehzapfenabstand beträgt 19 m, der Radsatzstand im Drehgestell 2.5 m, die Radsatzlast knapp 14 t und der Messkreisdurchmesser 920 mm.

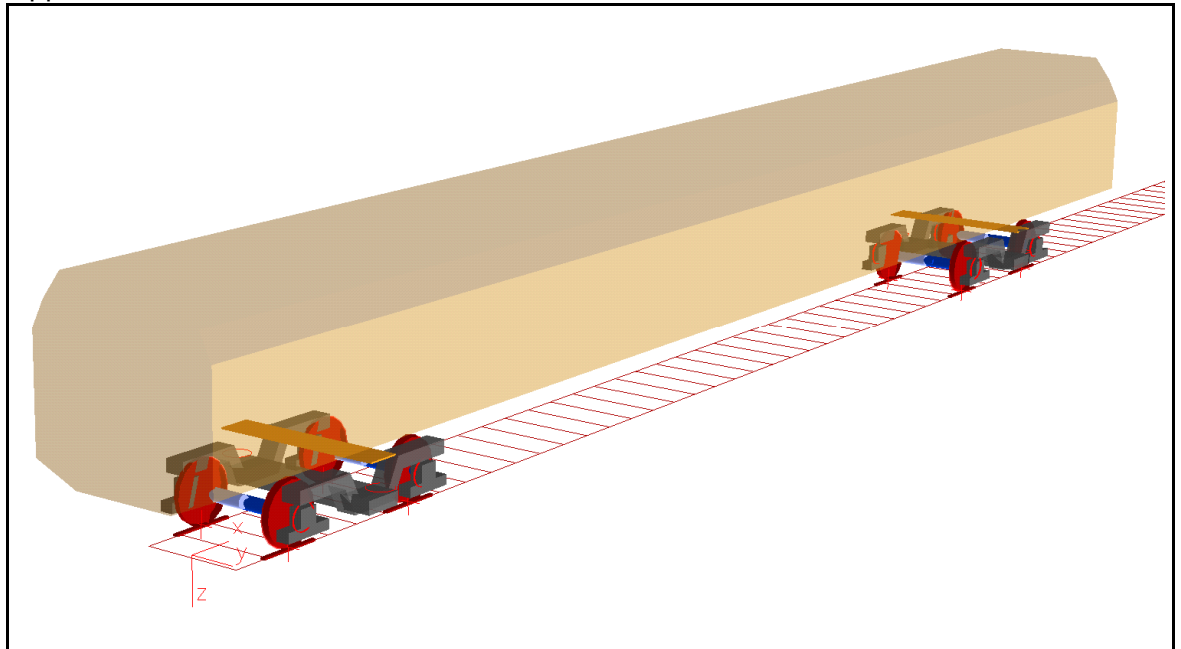


Abbildung 7: Modell des Normalspur-Reisezugwagens

Rad- und Schienenprofil sind entsprechend Abbildung 8 zu der klassischen Profilpaarung S1002 auf UIC 60 mit einer Schienenneigung von 1:40 gewählt.

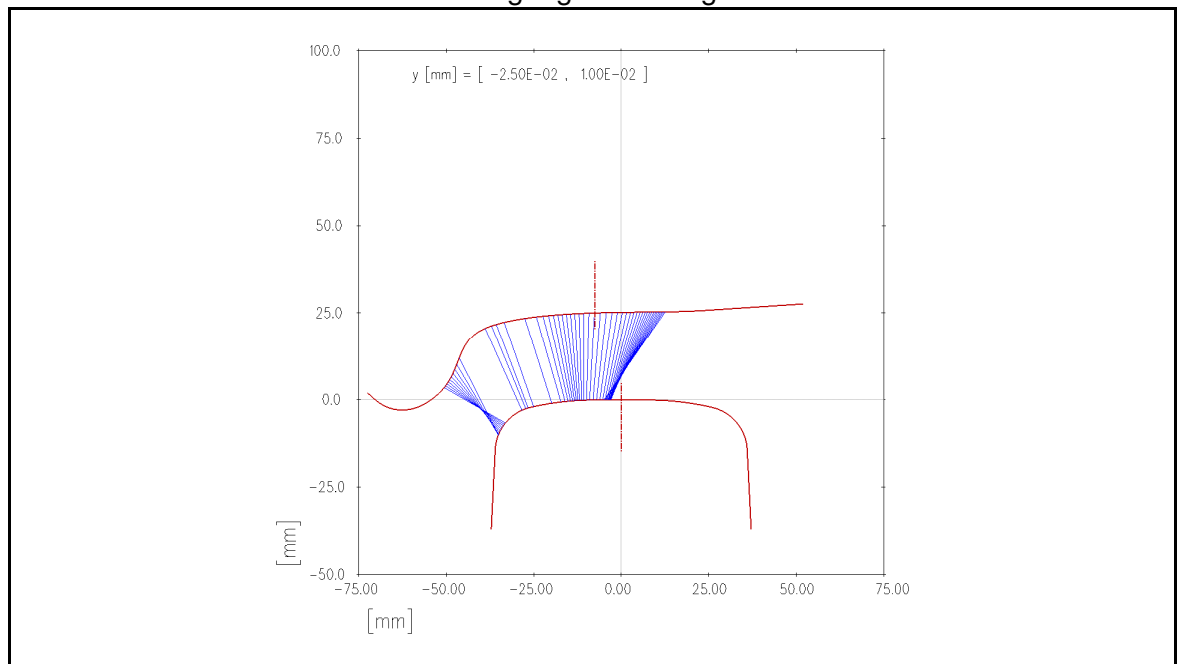


Abbildung 8: Radprofil S1002 auf Schienenprofil UIC 60 (Darstellung SIMPACK, noch ohne Schienenneigung)

4 Simulationsergebnisse

4.1 Geradenfahrt

Die Geradenfahrt erfolgt jeweils unter einer Anfangsauslenkung des Fahrzeugaufbaus. Auf diese Art ist zu Simulationsbeginn eine Bewegung des gesamten Fahrzeugs sichergestellt, wobei es anschliessend zwanglos sich selber überlassen wird.

Zentrierung im Gleis – „Kurs halten“

Unabhängig von den sehr unterschiedlichen Radlasten, Raddurchmessern, Spurweiten, Fahrzeuggeometrien und Rad/Schiene-Profilen weisen die drei exemplarisch untersuchten Fahrzeugtypen das prinzipiell selbe Rad/Schiene-Verhalten auf:

Typisch für Radsätze zeigen Abbildung 9, Abbildung 19 und Abbildung 21 eine gedämpfte Querschwingung der Radsätze auf, die ihre quasistatische Ruhelage binnen kurzer Zeit zentrisch im Gleis findet.

Typisch für Losräder zeigt die Winzeler-Welle in Abbildung 10, Abbildung 20 und Abbildung 22 eine niederfrequente Querbewegung oder ein „orientierungsloses Driften“ zwischen rechtem und linken Spurkranzlauf im Spurkanal.

Auch unter dem Einfluss von Gleislagestörungen (exemplarische Messdaten) zeigt der herkömmliche Radsatz in Abbildung 33 eine Bewegung um die Gleismitte, wobei die Berührfläche (s. Abbildung 37) weitgehend in der Mitte der Radlauffläche verbleibt.

Demgegenüber weist die Querbewegung der Winzeler-Welle in Abbildung 34 diesen Zentrierungseffekt nicht auf und es kommt trotz Geradeausfahrt losrad-typisch immer wieder zum Spurkranzlauf (s. Abbildung 38). Wie Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen, werden die beiden Winzeler-Hälften in dieser exemplarischen Simulation stets zusammengedrückt und nicht auseinandergezogen. Das in Abbildung 36 dargestellte Y-Drehmoment zwischen den Winzeler-Hälften wechselt erwartungsgemäss je nach Radstellung im Gleis das Vorzeichen bzw. den Drehsinn.

Laufstabilität

Der herkömmliche Radsatz weist bei Überschreiten einer kritischen Geschwindigkeit³ die in Abbildung 23 oder auch Abbildung 39 gezeigte typische Grenzykelbewegung auf, während die Winzeler-Welle bei selber Fahrgeschwindigkeit und unter identischen Randbedingungen in Abbildung 24 und Abbildung 38 typisch für Losradkonzepte stabil verbleibt.

³ Die Höhe der kritischen Geschwindigkeit hängt von diversen Fahrzeug- und Gleiseigenschaften wie insbesondere Rad/Schiene-Profilpaarung und Steifigkeiten ab. Weiche Längs- und Quersteifigkeiten im Fahrwerk sowie vor allem grosse Konizitäten bzw. steile Rad/Schiene-Neigungswinkel respektive enge Spurweiten provozieren eine Schlingerbewegung.

4.2 Bogenfahrt

Zur Beurteilung des Bogenverhaltens sind der Simulation jeweils S-Bögen mit Übergangsbögen zugrunde gelegt, bei denen also nach einem ersten Bogen ein zweiter und zwar gegensinniger Bogen folgt.

Das Simulationsmodell des **Trams** wird dabei dem kleinsten Bogenradius von 30 m ausgesetzt, was bei einer exemplarischen Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h und ohne Überhöhung eine quasistatische Querschleunigung von 0.26 m/s^2 auf Radsatzebene bedeutet.

Wie der Vergleich der Schräglaufwinkel von herkömmlichem Radsatz in Abbildung 11 und Winzeler-Welle in Abbildung 12 zeigt, ermöglicht die Winzeler-Welle hier keine wesentliche Verringerung des Schräglaufwinkels an vor- oder nachlaufendem Radsatz. Typisch für Radsätze sind die Längsschlupfkräfte von rechtem und linken Rad in Abbildung 13 gegensinnig orientiert, aber im Sinne eines Kräftegleichgewichts betragsmässig gleich gross. Bedingt durch den Drehfreiheitsgrad weist die Winzeler-Welle in Abbildung 14 nur geringe und gleichsinnig orientierte Längsschlupfkräfte auf. Dies macht sich in einer ständigen Verdrehbewegung zwischen den Radsatzhälften in Abbildung 18 bemerkbar, die mit dem Wechsel in den Gegenbogen auch die Drehrichtung ändert. Die Querkkräfte auf die Räder in Abbildung 17 wirken unabhängig von der Bogenrichtung stets zusammendrückend auf die beiden Radsatzhälften. Analog zu den Schräglaufwinkeln verringern sich die Querschleppkräfte durch den Einsatz der Winzeler-Welle nicht wesentlich. Gerade die Querschleppvorgänge sind jedoch als ein typischer Anregemechanismus für Radschwingungen und die damit verbundenen Geräuschemissionen bekannt (z.B. [5]). Bedingt durch die Reibsättigung im engen Bogen reicht die Verringerung des Längsschlupfes nicht, um die in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellte Rad/Schiene-Reibarbeit nennenswert zu reduzieren. In diesem Fall ist daher nicht mit einem Vorteil bezüglich Geräusentwicklung oder Bogenwiderstand respektive benötigter Traktionsenergie zu rechnen.

Die exemplarischen Ergebnisse des **Meterspur-Reisezugwagens** für den doppelt so grossen 60m-S-Bogen bei 25 km/h und damit einer freien Seitenbeschleunigung im nicht überhöhten Gleis von 0.8 m/s^2 in Abbildung 25 bis Abbildung 32 zeigen qualitativ das selbe Ergebnis wie beim Tram im 30m-S-Bogen: nahezu identische Stellung von klassischem Radsatz und Winzeler-Welle im Gleis, auszumachen am Schräglaufwinkel in Abbildung 25 und Abbildung 26 sowie an der Querverschiebung⁴ der vier Räder in Abbildung 27 und Abbildung 28. Auch hier verbleiben die Querschleppkräfte für den herkömmlichen Radsatz in Abbildung 29 sowie für die Winzeler-Welle in Abbildung 30 in Verlauf und Grösse sehr ähnlich. Bedingt durch die Reibsättigung führen die Querschleppkräfte am vorlaufenden Radsatz auch ohne Längsschlupfkräfte zu ähnlichen Rad/Schiene-Reibarbeiten von herkömmlichem Radsatz und Winzeler-Welle (Abbildung 31 und Abbildung 32). Für den weniger schlupfenden zweiten Radsatz resultiert jedoch bei Einsatz der Winzeler-Welle ein Vorteil in der Reibarbeit (Abbildung 31 und Abbildung 32).

⁴ Je nach Kontaktsteifigkeit (vergl. Abbildung 2), mit der sich die Winzeler-Hälften in Querrichtung zusammendrücken lassen, ergibt sich ein grösseres Spurspiel bzw. gegenüber dem Radsatz ein grössere mögliche Querverschiebung im Gleis.

Für den exemplarischen **Normalspur-Reisezugwagen** mit einem Radsatzstand von 2'500 mm im Drehgestell bedeutet der 150m-S-Bogen in Abschnitt 8.3.3 einen sehr engen Bogenradius, den er vielleicht auf einem Arealgleis und nur in Ausnahmen (z.B. Semmering) auf einem Streckengleis durchfährt. Demgegenüber bedeutet der 300m-S-Bogen in Abschnitt 8.3.4 eine zwar enge aber beispielsweise für den Gotthard oder auch die Berliner Stadtbahn typische Trassierungsgrösse. Wie auch bei den für Tram und Meterspur-Reisezugwagen gezeigten Ergebnissen reduzieren sich bei Einsatz der Winzeler-Welle die Längsschlupfkräfte erwartungsgemäss ganz wesentlich (Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 49, Abbildung 50). Die Querschlupfkräfte von herkömmlichem Radsatz und Winzeler-Welle verbleiben zumindest für den vorlaufenden Radsatz in sehr ähnlicher Höhe (Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 51, Abbildung 52), können aber je nach Reibsättigung für den Winzeler-Radsatz auch ansteigen (nachlaufender Radsatz in Abbildung 44 im Vergleich zu Abbildung 43). In Bezug auf die Rad/Schiene-Reibarbeit bzw. den Bogenwiderstand respektive den benötigten Traktionsbedarf zeigt die Winzeler-Welle ein gewisses Reduktionspotential insbesondere am nachlaufenden Radsatz (Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 53, Abbildung 54). Die Reduktion liegt in den exemplarischen Ergebnissen für den 300m-Bogen unter Verwendung neuer Rad- und Schienenprofile sowie bei idealer Gleislage in der Grössenordnung von 30 %⁵ im Vollbogen. Im Verlauf beispielsweise der Querschlupfkräfte (Abbildung 51, Abbildung 52) aber auch der Berührlage am Rad (Abbildung 55, Abbildung 56) fällt auf, dass der herkömmliche Radsatz der Trassierung der Übergangsbögen in einer Übergangsbewegung folgt, während die Winzeler-Welle typisch für Losradkonzepte in abrupter Bewegung respektive Laständerung in den Gegenbogen wechselt. Auch der Ansatz einer exemplarisch 100-fach vergrösserten Rotationsdämpfung von 10'000 Nms/rad in der Winzeler-Welle in Abbildung 57 zeigt noch einen ähnlich abrupten Übergang. Trotz der erhöhten Dämpfung zentrieren die Räder sich nicht in Gleismitte (Sim.-Zeit ab 32 s in Abbildung 57 versus Abbildung 55). Die Rad/Schiene-Reibarbeit in Abbildung 58 verbleibt trotz erhöhter Dämpfung ähnlich zu Abbildung 54.

⁵ Im gezeigten Beispiel ergibt sich im Vollbogen eine Rad/Schiene-Reibleistung von ca. 25 kJ/s in Summe aller 8 Räder für herkömmliche Radsätze sowie ca. 18 kJ/s bei Einsatz der Winzeler-Welle.

5 Bei Realisierung besonders zu berücksichtigende Aspekte

Vor einer Realisierung sind neben der Frage nach dem lauffechnischen Verhalten insbesondere folgende Themen zu berücksichtigen:

- Die **Dauer- oder Betriebsfestigkeit** von Radsatzwellen ist ohnehin von besonderer Bedeutung, da Radsätze in aller Regel nicht redundant ausführbar sind und ein Versagen mit einem erheblichen Schadensausmass verbunden sein kann. Eine Risikominimierung (Auftrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmass) lässt sich also nur durch eine sehr geringe Versagenswahrscheinlichkeit bewerkstelligen [6]. Dies ist nach einigen Radsatzversagen der jüngsten Vergangenheit wie z.B. [9] von besonderer Bedeutung. Der Nachweis ausreichender Umlaufbiegebeanspruchbarkeit für eine geteilte Radsatzwelle erscheint anspruchsvoll.
- Sofern eine Rissbildung wie z.B. auch bei herkömmlichen Radsätzen nicht endgültig ausgeschlossen werden kann [6], muss eine **zerstörungsfreie Prüfung (ZP)** der Welle z.B. per Ultraschall im eingebauten Zustand möglich sein.
- **Witterungs- und Umgebungseinflüsse** auf das Dämpfungsmedium sind zu bedenken. Typisch sind Temperaturen im Bereich von ca. -35°C bis ca. $+50^{\circ}\text{C}$ zu ertragen, bei Tunnelein- und -ausfahrten in schnellem Wechsel (Temperaturschock). Neben Regen und Kondensat sind Schnee- Eis- oder Reifbildung und Luftfeuchtigkeiten von 0 bis 100 % zu berücksichtigen. Dies kann insbesondere für Trams gemischt sein mit Streusalz. Für die Reinigung von Schienenfahrzeugen finden sich typischerweise Angaben von z.B. $+50^{\circ}\text{C}$ warmes Wasser, versetzt mit Reiniger zu einem pH-Wert im Bereich von 5 bis 9, mit bis zu 100 bar Sprühdruk aus ca. 50 cm Entfernung aufgesprüht. Weiterhin sind die Beschleunigungen zu berücksichtigen, denen die Welle als ungefederte Masse ausgesetzt ist.
- Die **Lebensdauer** von Schienenfahrzeugen beträgt typischer Weise ca. 30 Jahre. **Revisionsintervalle** können je Fahrzeuggattung erheblich differieren, können aber z.B. 1 Mio km bzw. 6...8 Jahre lauten. Verschleissteile wie Räder und damit verbunden auch die Wellen müssen sich in ihren **Lebenszykluskosten** respektive **Standzeiten** in dieser Lebensdauer bzw. in diesen Revisionsintervallen wieder finden.
- Der **finanzielle und zeitliche Aufwand der Zulassung** einer oder verschiedener Varianten solcher Radsatzwellen sind zu bedenken. Diese können je nach Einsatzgebiet (national, international, Vollbahn, Schmalspur-Inselbahn, Strassenbahn) erheblich differieren.

- Vor Beginn des Zulassungsprozesses ist eine **schrittweise Erprobung** zu empfehlen. Dazu scheint insbesondere auch von den formal rechtlichen Randbedingungen her der Strassenbahnbereich geeignet.
- Die **elektrische Leitfähigkeit** bzw. der Widerstand zwischen den Radsatzhälften kann für die Belange der Zugsicherung (z.B. Gleisbesetzmeldung) eine Rolle spielen. Dieser Aspekt ist wenn nicht direkt, dann z.B. durch Erdung über benachbarte Bauteile sicherzustellen.
- Beim **Querspiel** der Radsatzhälften ist neben Fragen von **Lastannahmen, Festigkeit und Verschleisswiderstand** der Anschlagflächen insbesondere auch die Passierbarkeit von z.B. **Radlenkern bei Weichenfahrt** zu bedenken. Vergl. Toleranz Radrückenabstand z.B. [10]
- Es ist damit zu rechnen, dass die Primärfederstufe infolge von **Fertigungs- und Montagetoleranzen** oder auch elastischer Nachgiebigkeit von Bauteilen bzw. Alterung von z.B. Gummifedern nicht exakt die ideale Nulllage einhält. In diesem Fall können die Radsatzhälften schon in der statischen Ausgangslage zusammengedrückt oder (evt. bis zum Sicherheitsanschlag) auseinandergezogen werden.
- Besondere Berücksichtigung für den Fall von **Antrieb oder Bremse** ist in der Patentschrift [13] bereits angeführt, während die vorliegende Untersuchung einen reinen Laufradsatz zum Gegenstand hat.
- Es ist je Fahrzeug und vorhandenem Schienenprofil eine sorgsame **Auswahl des Radprofils** zu empfehlen.
- Von anderen Losradkonzepten her wie z.B. [1],[7] ist bekannt, dass es einer besonderen **Pflege und Beobachtung der Radprofile** sowie insbesondere der Rollradiendifferenz von linkem und rechten Rad bedarf, um einen einseitigen Verschleiss im Betrieb auszuschliessen. Dazu spielt sicher auch für den spezifischen Einsatz der **Anteil Bögen** gegenüber der Geradenfahrt sowie der Anteil von Links- zu Rechtsbögen eine Rolle.

6 Fazit

Für die in der numerischen Simulation exemplarisch untersuchten Fahrzeugtypen und Betriebsbedingungen zeigt die Winzeler-Welle im Grundsatz das Verhalten eines Losrades auf: Vorteilhaft ist, dass selbst bei hohen Fahrgeschwindigkeiten keine Grenzykel- bzw. Schlingerbewegungen auftreten. Nachteilig ist, dass kein selbständiges Zentrieren in Gleismitte erfolgt. Für sehr enge Bögen von Tram und Meterspur sind ohne Kompensation des Schräglaufwinkels keine Vorteile bezüglich Rad/Schiene-Reibung bzw. Verschleiss bzw. Bogenwiderstand respektive benötigter Traktionsenergie oder Geräuschemission zu erwarten. In engen Bögen der Vollbahn kann sich ein Vorteil hinsichtlich Rad/Schiene-Reibarbeit ergeben. Es ist aber in den exemplarischen Simulationsergebnissen kein Vorteil bezüglich Querschlupfverhalten und damit zur erwarteten Geräuschemission auszumachen. Bei einer wesentlichen Steigerung der Dämpfungsparameter der Winzeler-Welle sind zunehmend die Eigenschaften eines herkömmlichen Radsatzes zu erwarten. Damit kann – technische Realisierbarkeit vorausgesetzt – je nach Streckennetz und Einsatz sinnvoll parametrisiert werden.

Für die untersuchte Geraden- und Bogenfahrt werden die Radsatzhälften stets zusammengedrückt und nicht auseinander gezogen. Dies ist aber z.B. hinsichtlich Weichenfahrt zu prüfen.

Die vorstehende Untersuchung lässt also für die Winzeler-Welle gegenüber den bekannten lauftechnischen Vor- und Nachteilen von Radsatz und Losrad keine neuen lauftechnischen Vorzüge oder eine Eliminierung von Nachteilen erkennen. Der zu erwartende Nutzen scheint gegenüber vermutlichen Risiken und Kosten in einem fraglichen Verhältnis zu stehen.

7 Literatur

- [1] Beucker, K.: Die Talgo-Instandhaltung. ZEVrail Glasers Annalen 126, 140–145 (2004).
- [2] Fulford, C.R.: Review of Low Adhesion Research, www.rssb.co.uk (2004).
- [3] Gerstberger, U.: Vertikal- und Lateral­dynamik von Fahrzeu­gen und Gleis unter Einbeziehung des Untergrundes. Mensch und Buch Verlag, Nordenstr. 75, 13156 Berlin (2004).
- [4] Jaschinski, A., Jochim, M. (eds.) Simulation eines ICE-Reisezugwagens mit MEDYNA zur Analyse von Brummschwingungen, Institut für Robotik und Systemdynamik, Oberpfaffenhofen (1992).
- [5] Kurzeck, B.: Methoden zur Minderung mittelfrequenter Schwingungen bei Bogenfahrt im Schienennahverkehr. Techn. Univ., Diss.--Berlin, 2008. Shaker, Aachen (2008).
- [6] Liedgens, K.: Über die Inspektionsfristen von Radsatzwellen zur Detektion von Ermüdungsanrissen. Techn. Univ., Diss.--Clausthal, 2008. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld (2008).
- [7] Netzel, A.: Talgo XXL - zuverlässige Neigetechnik im hochwertigen Reisezugverkehr. ZEVrail Glasers Annalen 126, 404–414 (2002).
- [8] N.N.: Schienen. Thyssen Schienen Technik GmbH (ed.), Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47161 Duisburg (2001).
- [9] N.N.: Flüssiggas-Zug sorgte für schlimmstes Gefahrgutun­glück seit Jahren. gefährliche ladung, 28 (2009).
- [10] N.N.: Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (Schweiz). AB-EBV. 01.07.2010, 3003 Bern (2010).
- [11] Wallrapp, O.: Review of Past Developments in Multibody System Dynamics at DLR - From FADYNA to SIMPACK. In: Vehicle System Dynamics, pp. 339–348. Taylor & Francis (2004).
- [12] Wanner, M.: Geschichte des Baues der Gotthardbahn. Luzern, Druck und Verlag J. Burkhardt (1885).
- [13] Winzeler, H.B.: Bahnachse. PatentschriftWO 2009/100557 A2. Radsatz in zwei Achsteile ent­starrt. 20.08.2009 (2009).
- [14] Winzeler, H.B.: Berechnung Kollergang in Kurven, Viskosität. Berechnungsbeispiel Strassenbahn (2009).

8 Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse

8.1 Strassenbahn

8.1.1 Geradeausfahrt

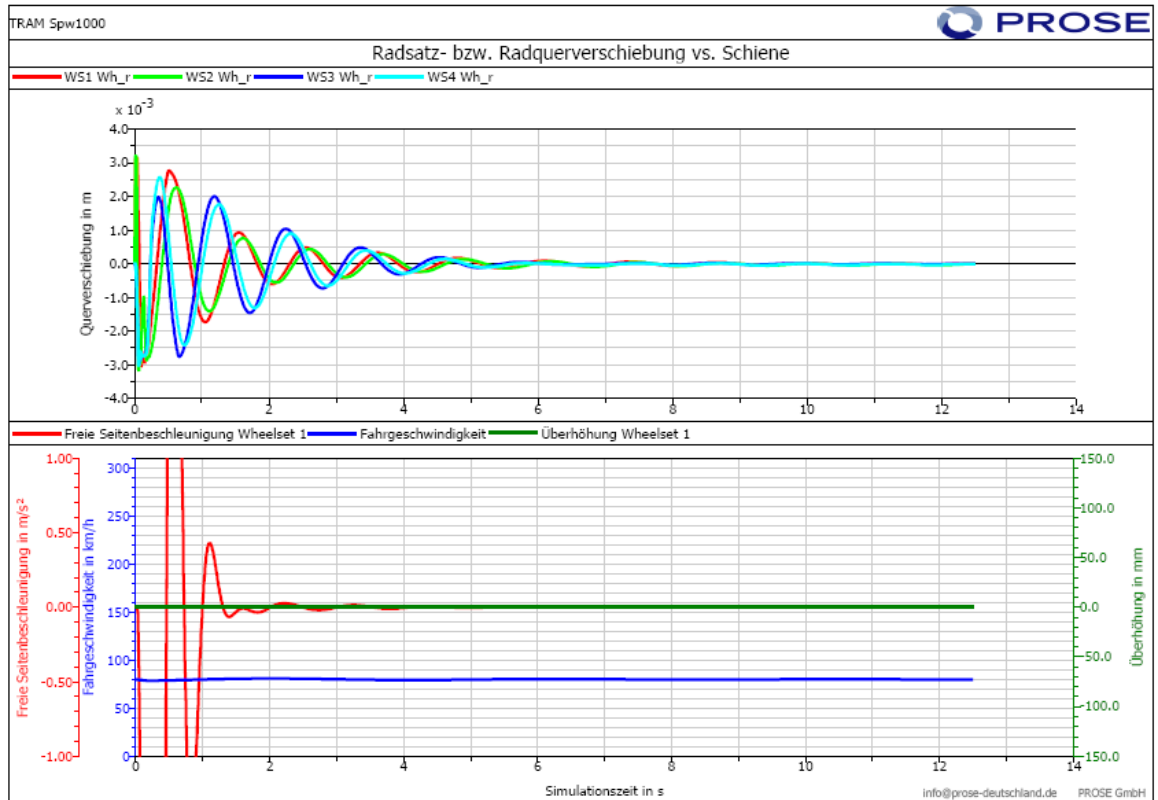


Abbildung 9: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 80 km/h mit herkömmlichem Radsatz

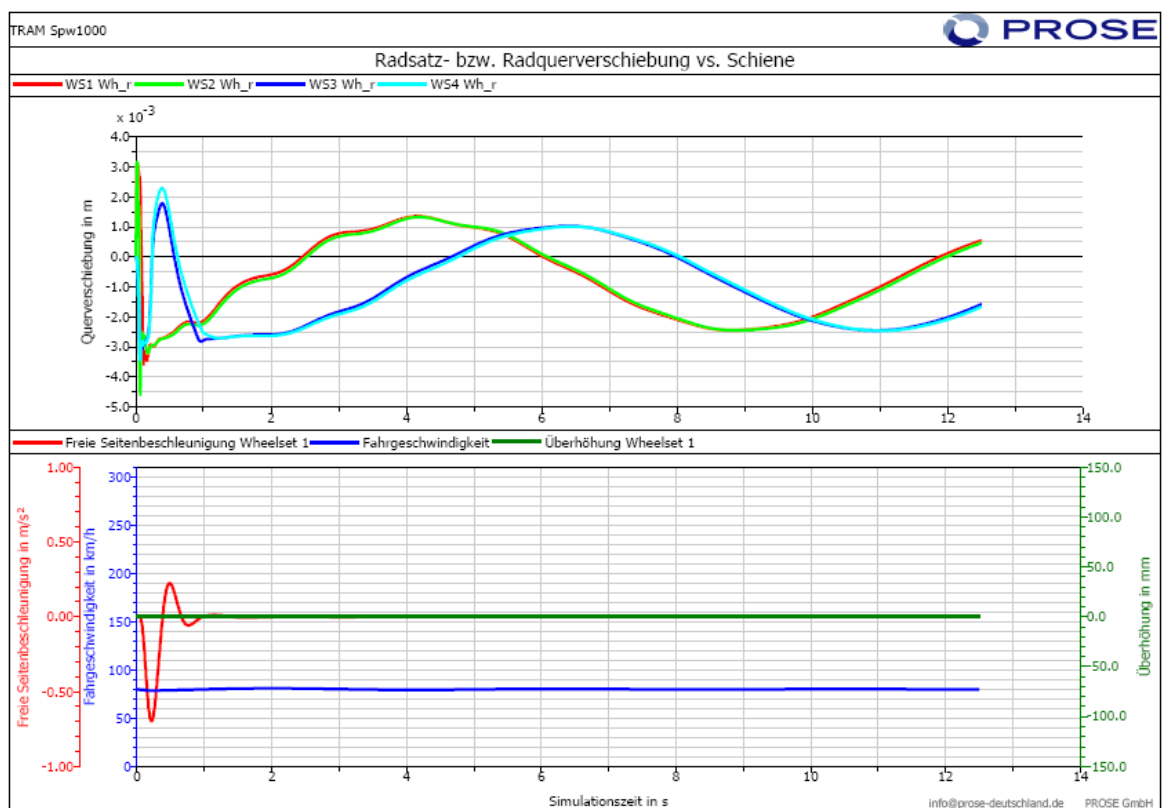


Abbildung 10: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 80 km/h mit Winzeler-Welle

8.1.2 S-Bogen mit 30m Bogenradius, 10 km/h

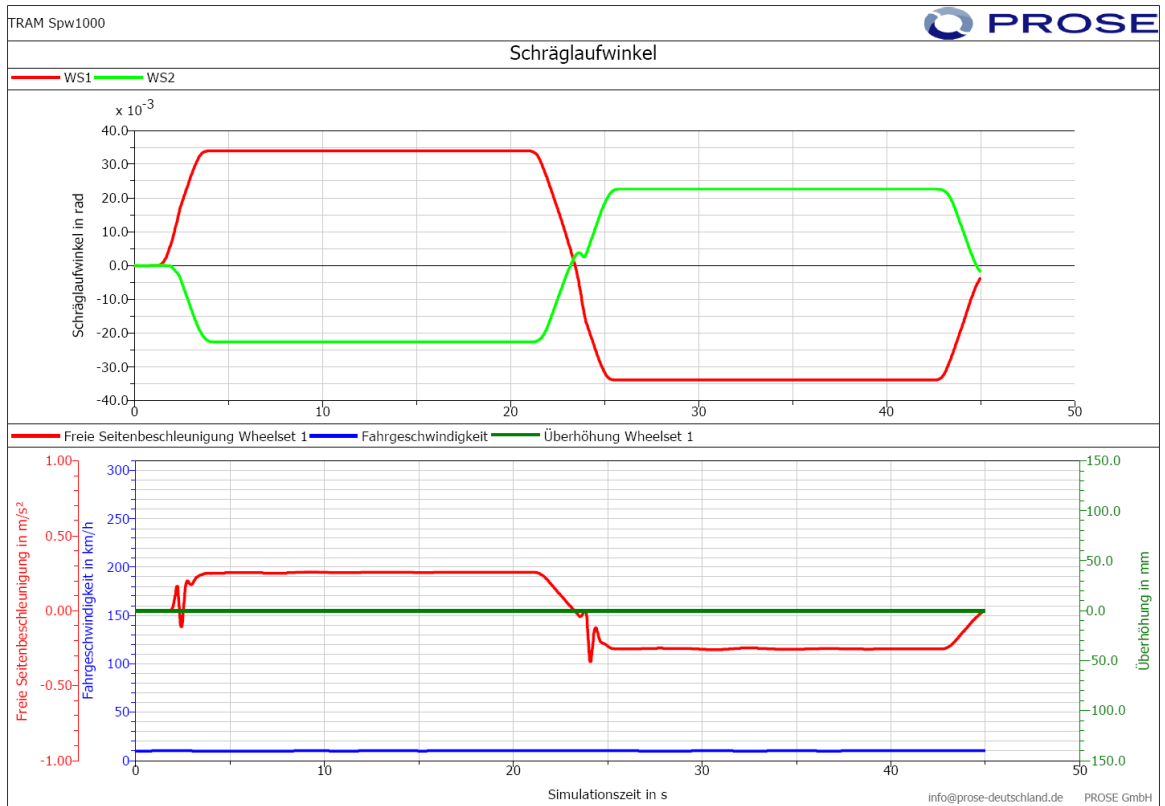


Abbildung 11: Schräglaufwinkel im 30m-Bogen mit herkömmlichem Radsatz

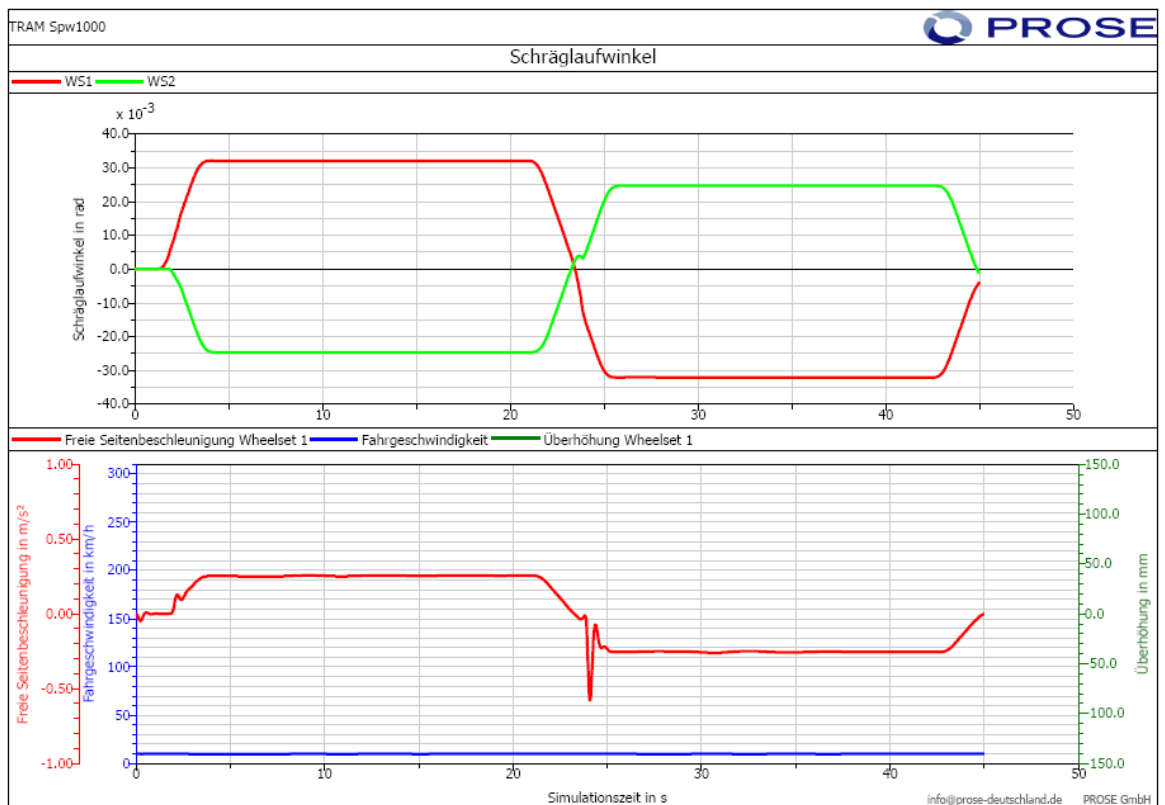


Abbildung 12: Schräglaufwinkel im 30m-Bogen mit Winzeler-Welle

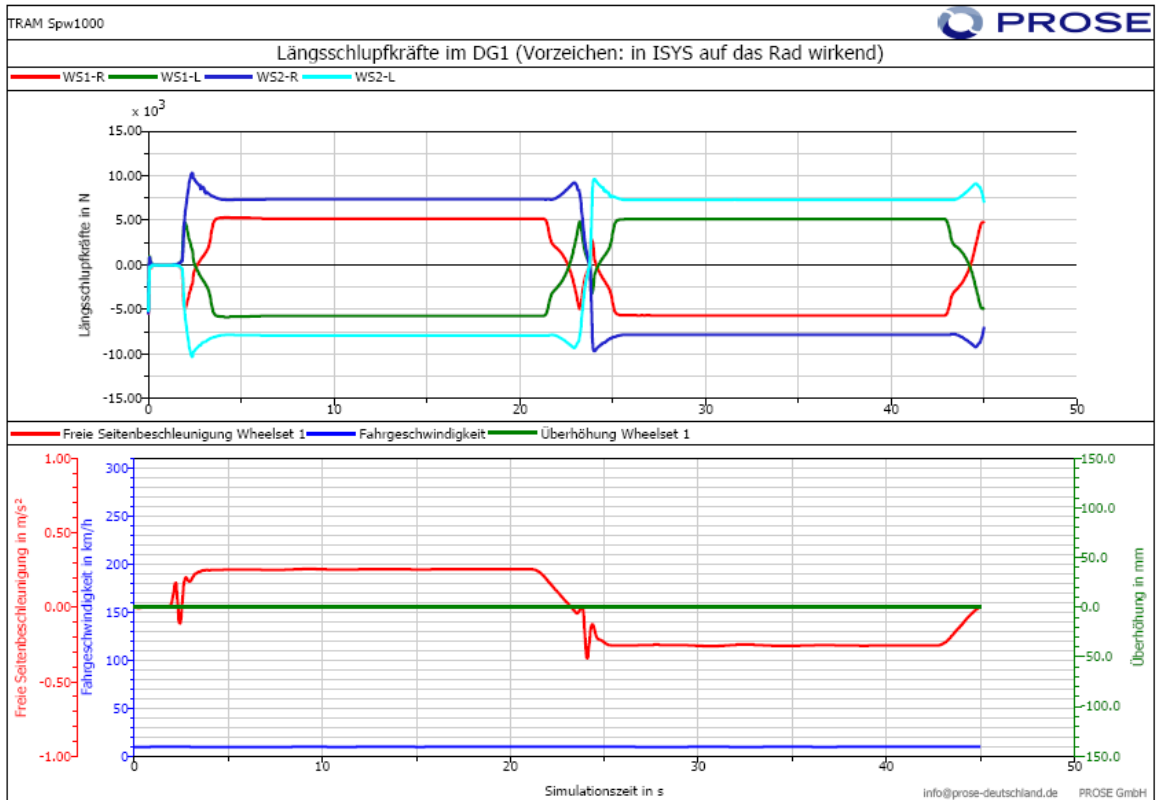


Abbildung 13: Längsschlußkräfte im 30m-Bogen bei herkömmlichem Radsatz

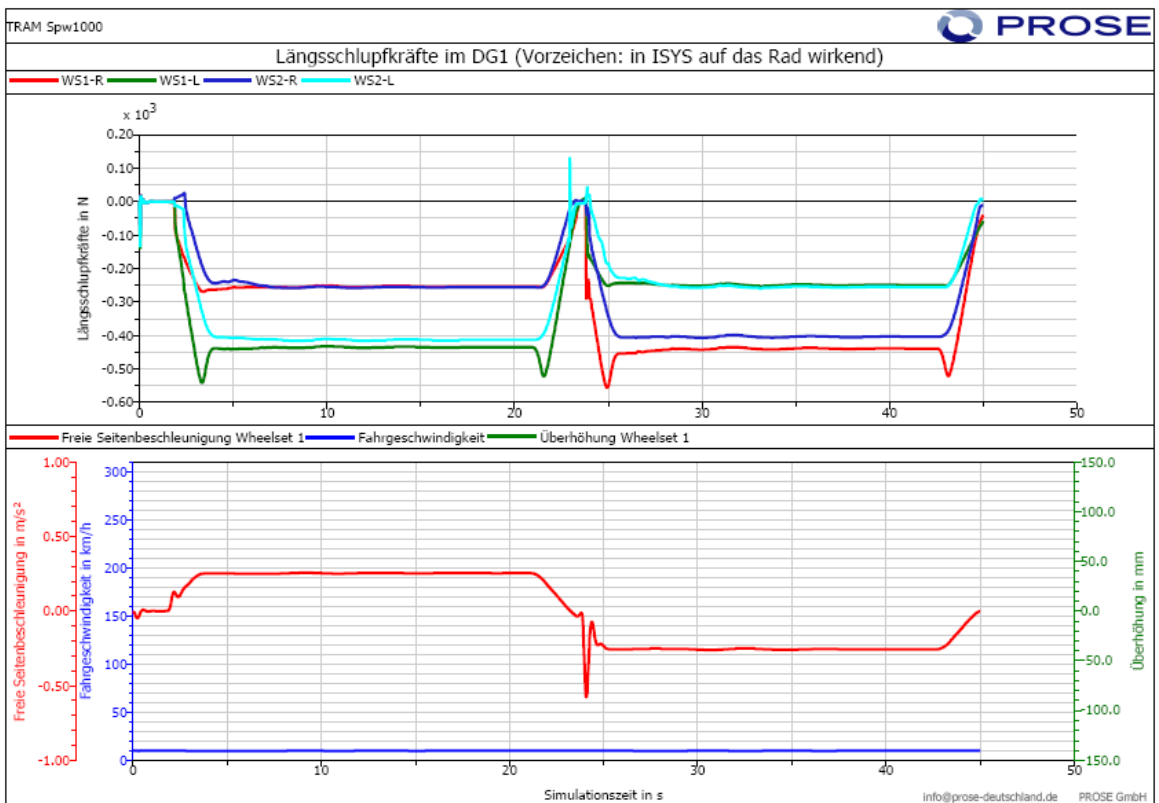


Abbildung 14: Längsschlußkräfte im 30m-Bogen mit Winzeler-Welle

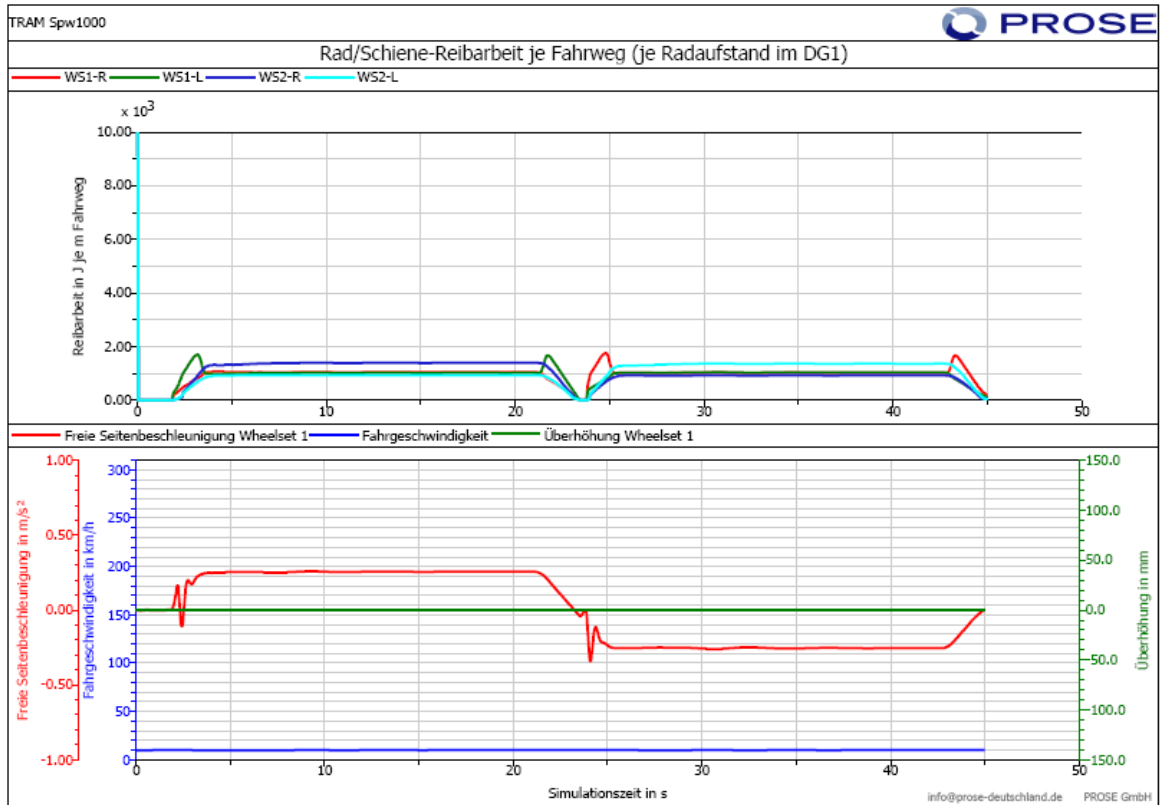


Abbildung 15: Rad/Schiene-Reibarbeit im 30m-Bogen bei herkömmlichem Radsatz

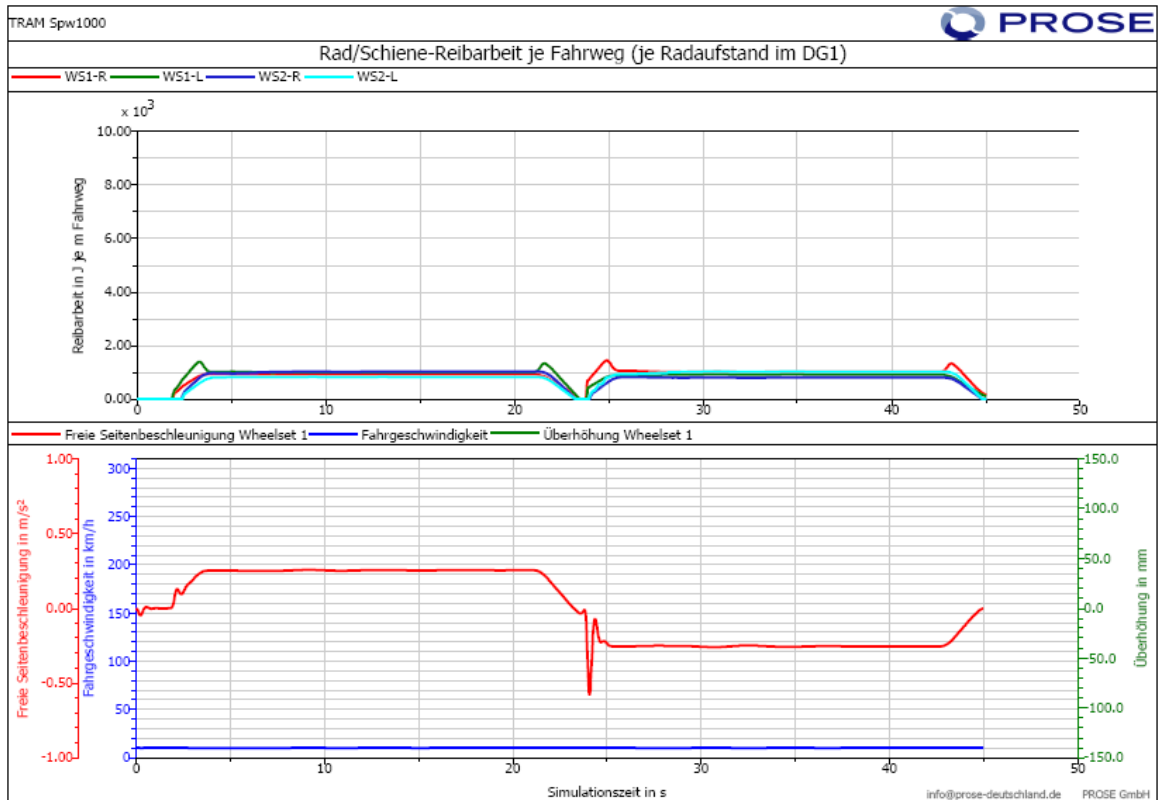


Abbildung 16: Rad/Schiene-Reibarbeit im 30m-Bogen mit Winzeler-Welle

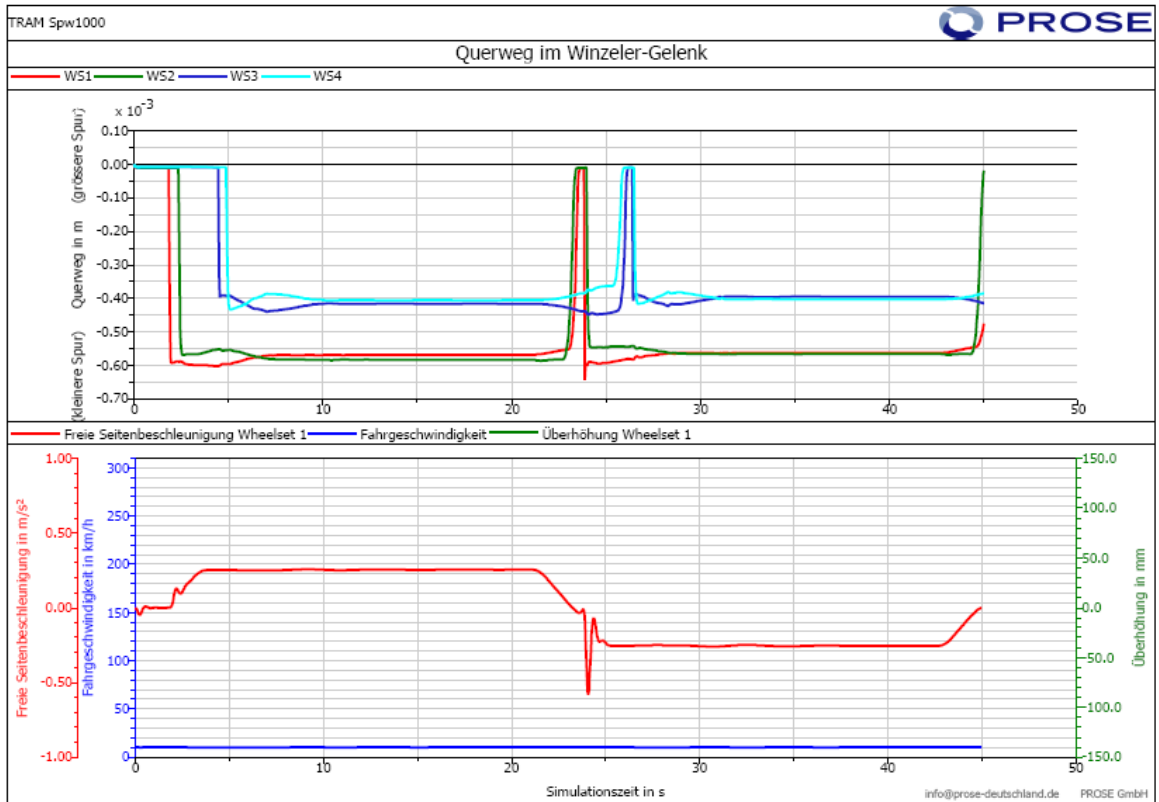


Abbildung 17: Zusammenrücken des Radsatzes im 30m-Bogen bei Winzeler-Welle

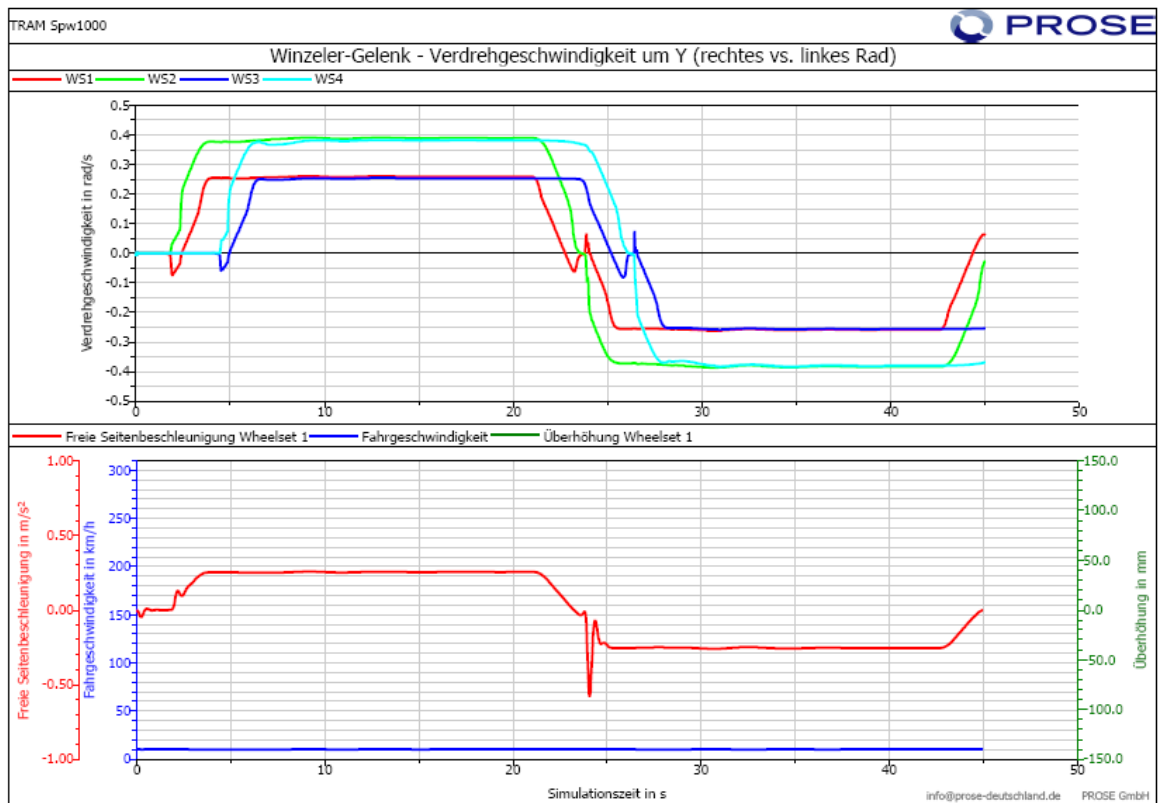


Abbildung 18: Wechsel der Drehrichtung im Winzeler-Gelenk bei 30m-S-Bogen

8.2 Meterspur-Reisezugwagen

8.2.1 Geradeausfahrt

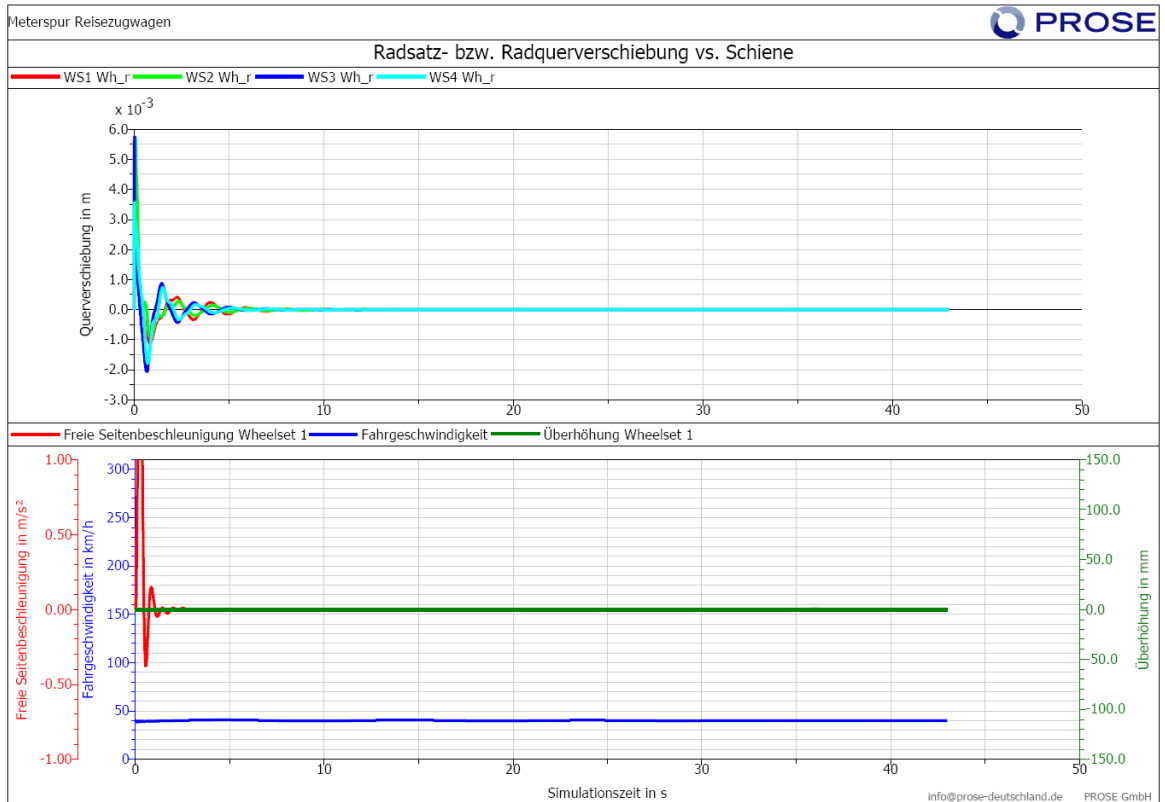


Abbildung 19: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 40 km/h mit herkömmlichem Radsatz

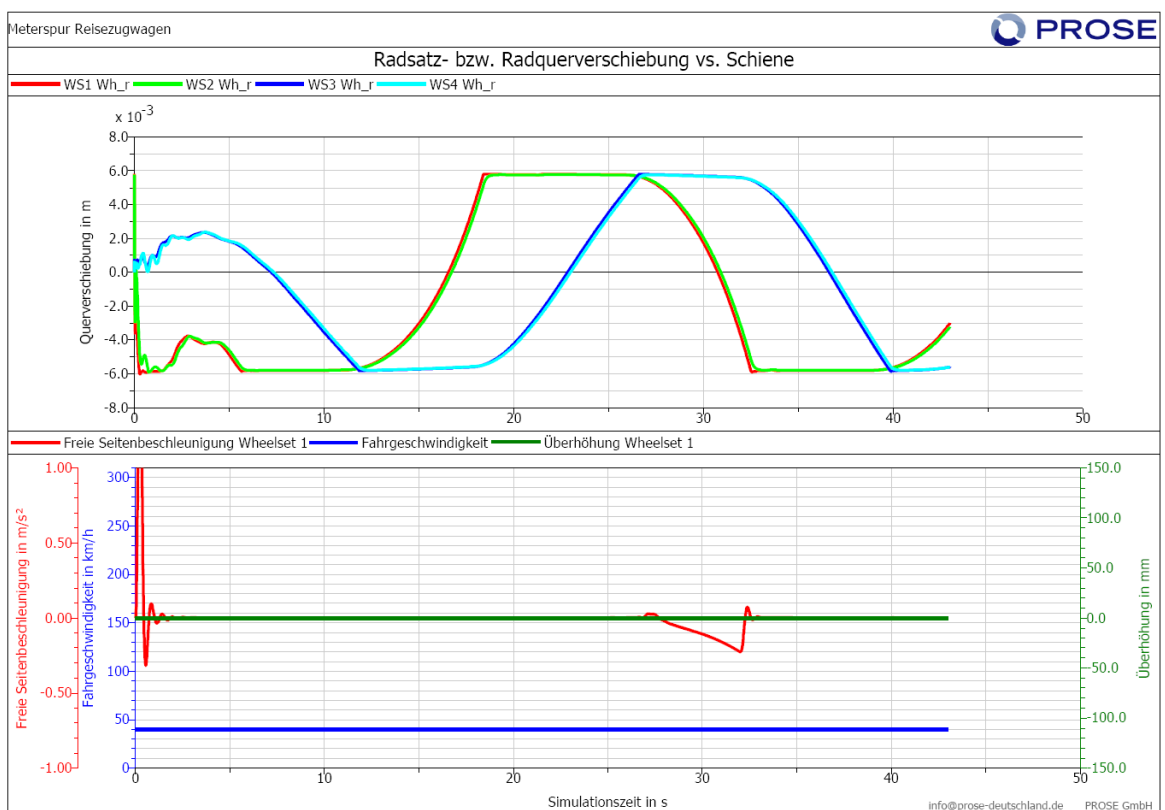


Abbildung 20: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 40 km/h mit Winzeler-Welle

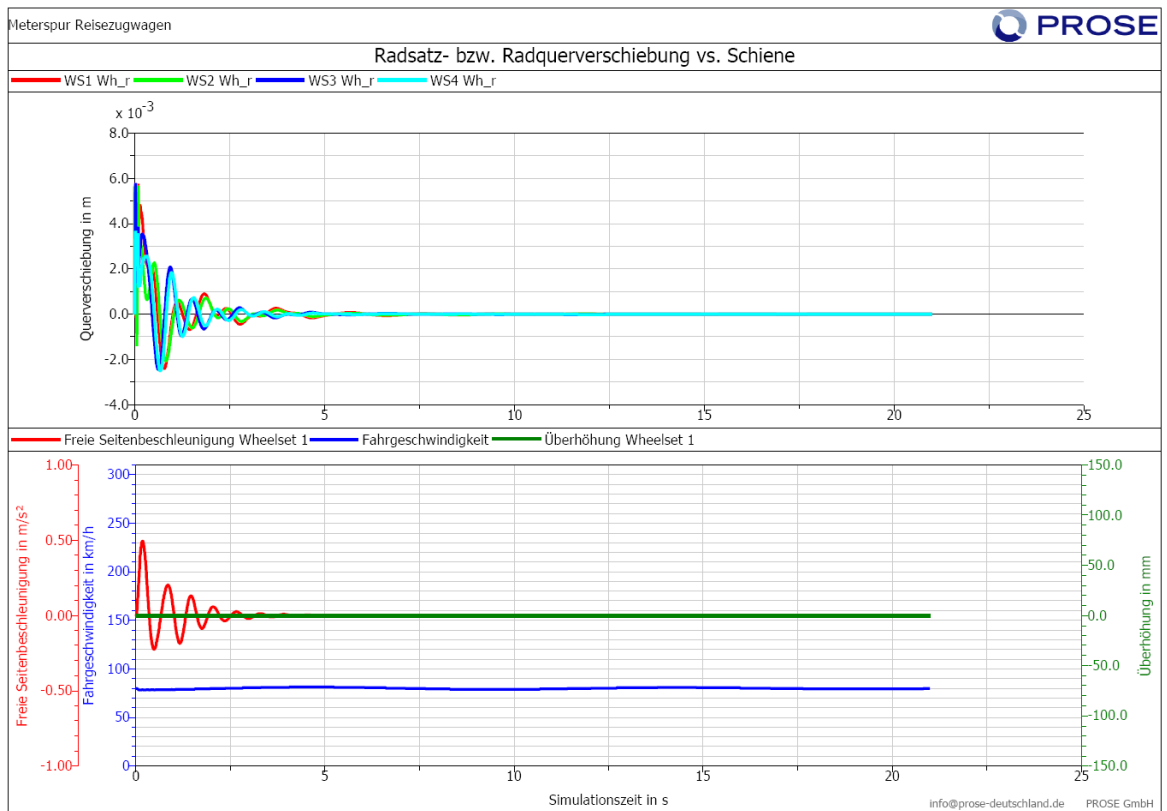


Abbildung 21: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 80 km/h mit herkömmlichem Radsatz

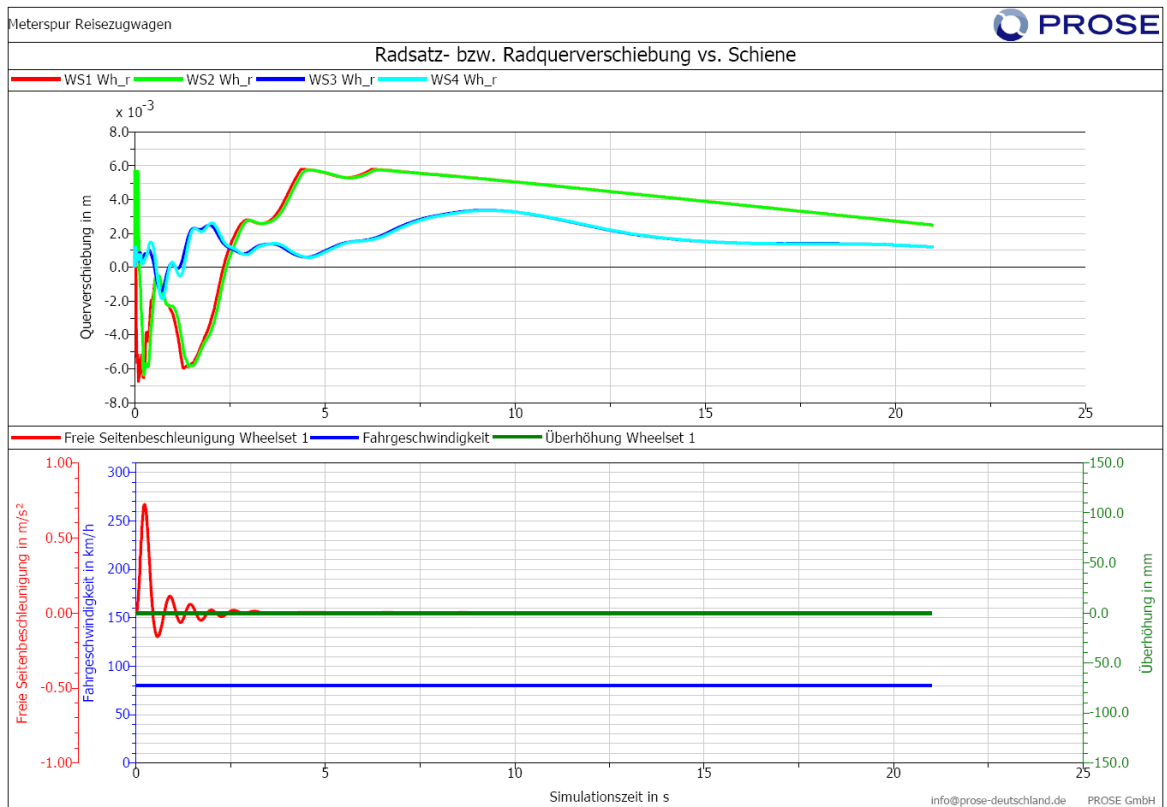


Abbildung 22: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 80 km/h mit Winzeler-Welle

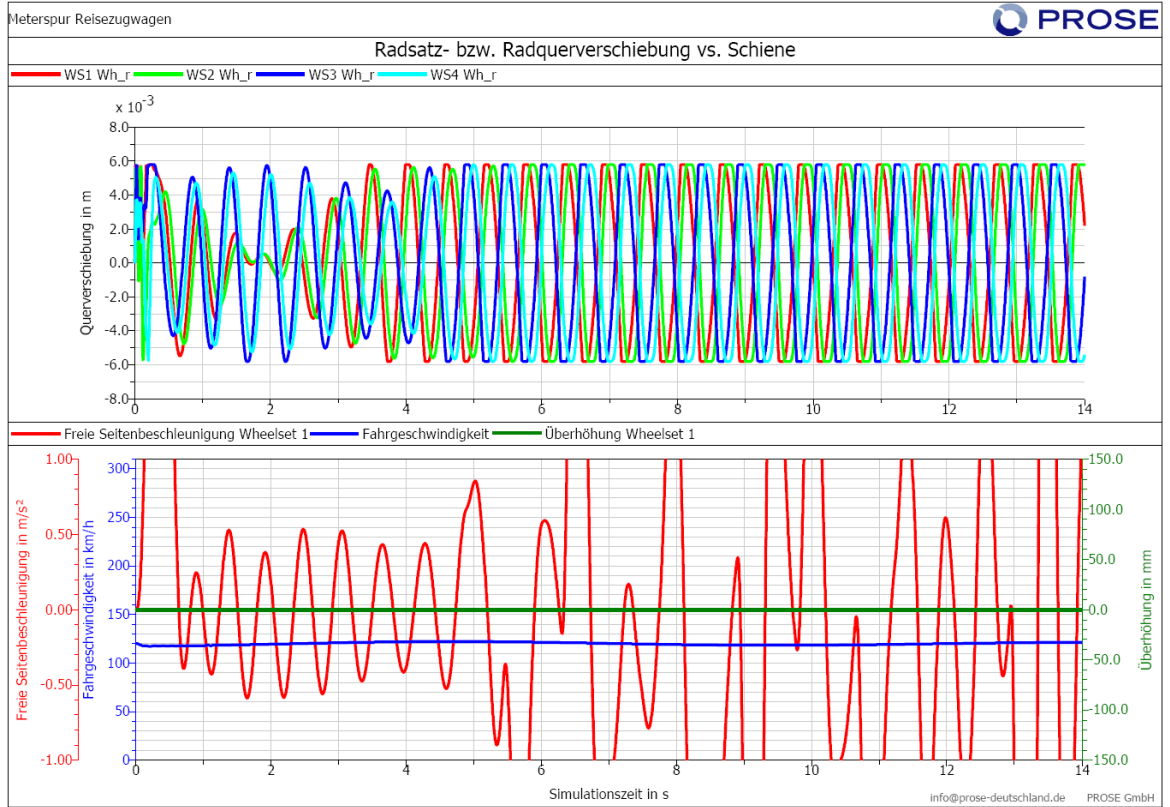


Abbildung 23: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 120 km/h mit herkömmlichem Radsatz

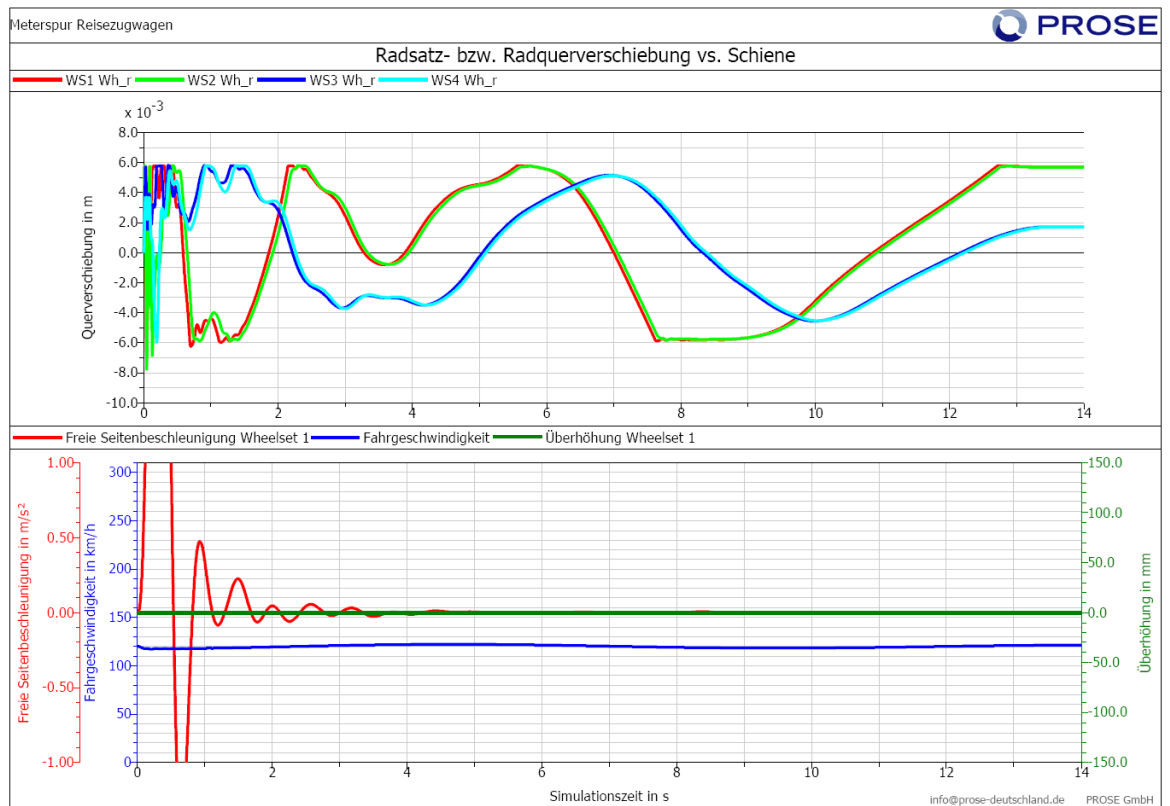


Abbildung 24: Radsatzquerbewegung nach Anfangsauslenkung bei 120 km/h mit Winzler-Welle

8.2.2 S-Bogen mit Radius 60 m, 25 km/h

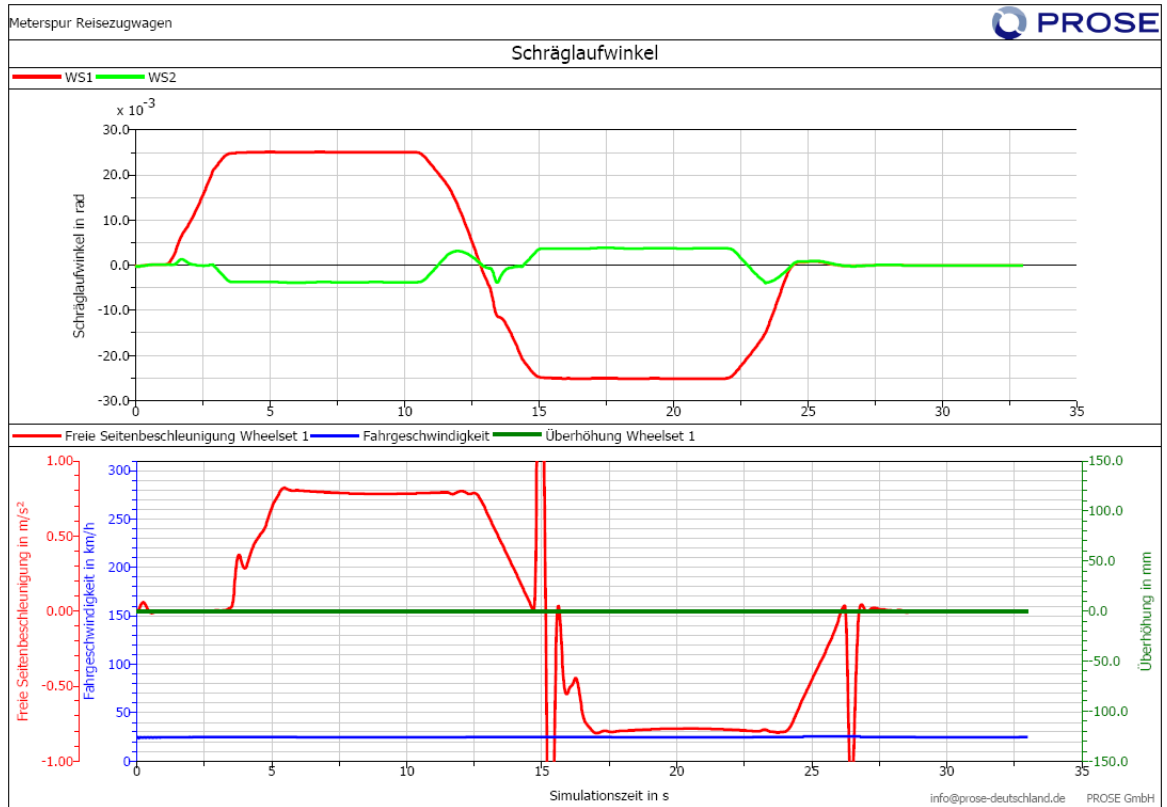


Abbildung 25: Schräglaufwinkel im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit herkömmlichem Radsatz

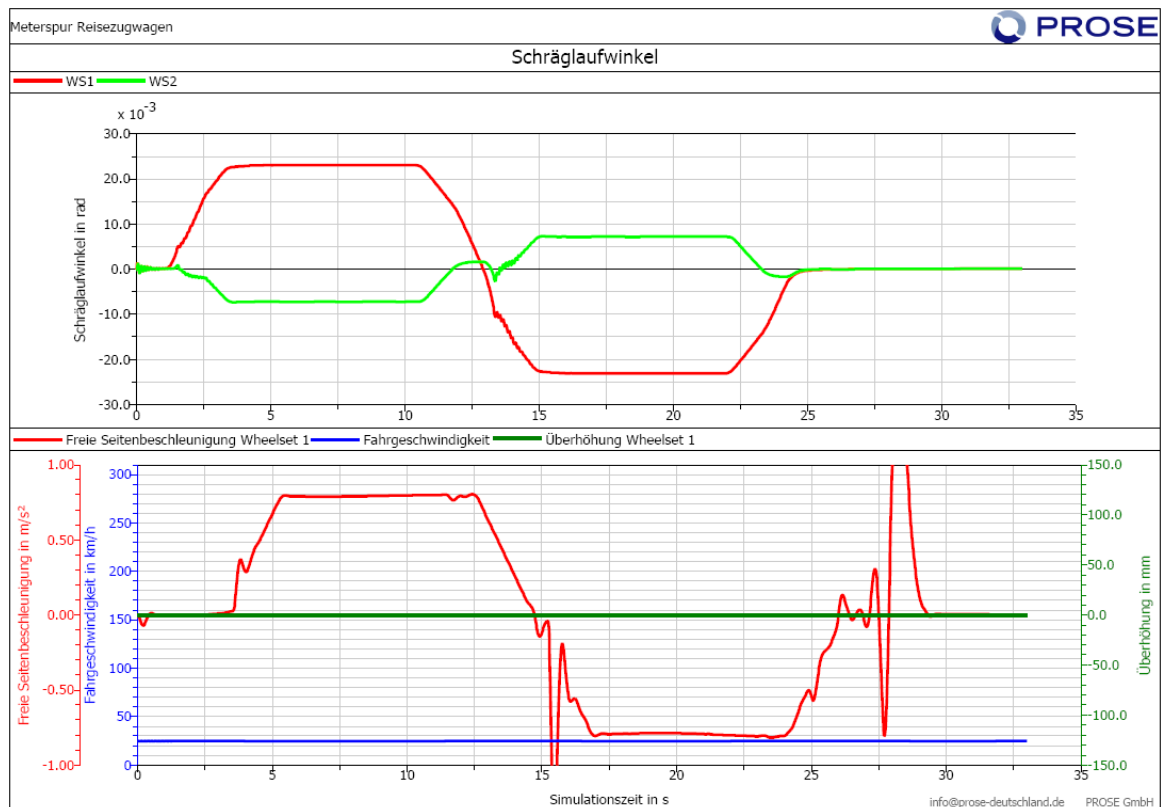


Abbildung 26: Schräglaufwinkel im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit Winzler-Welle

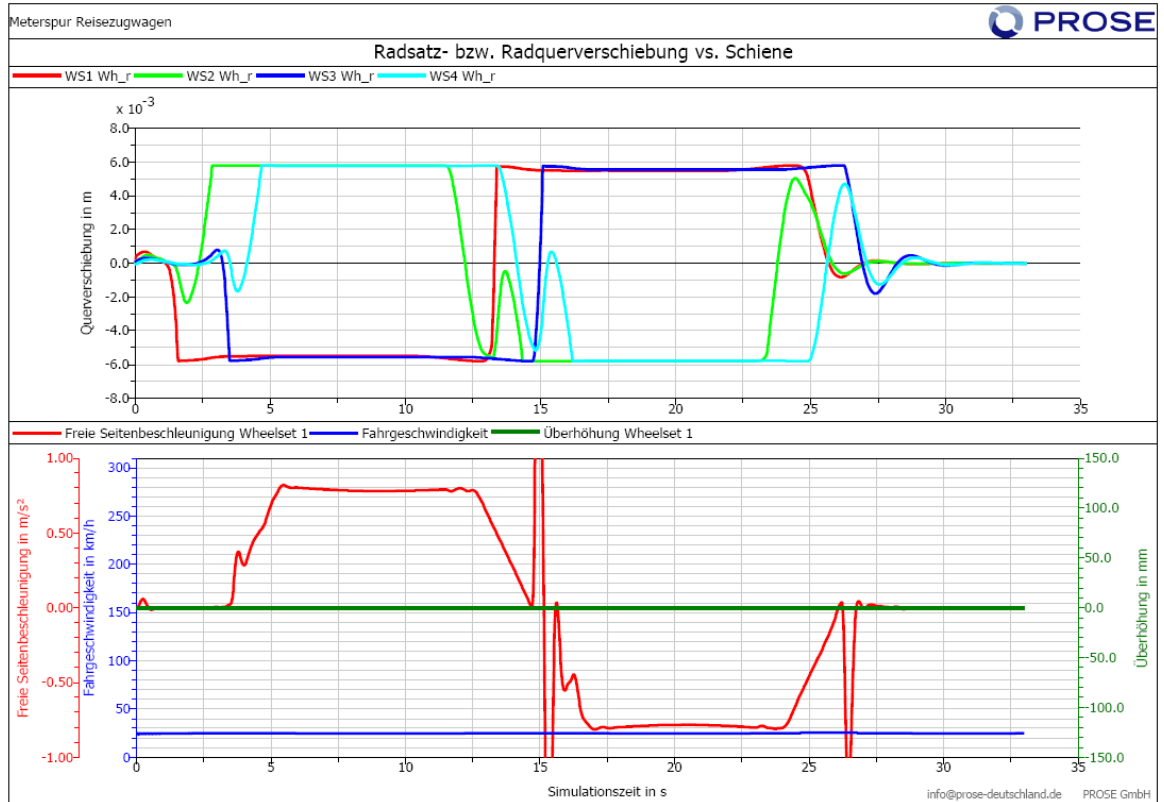


Abbildung 27: Radsatzquerbewegung im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit herkömmlichem Radsatz

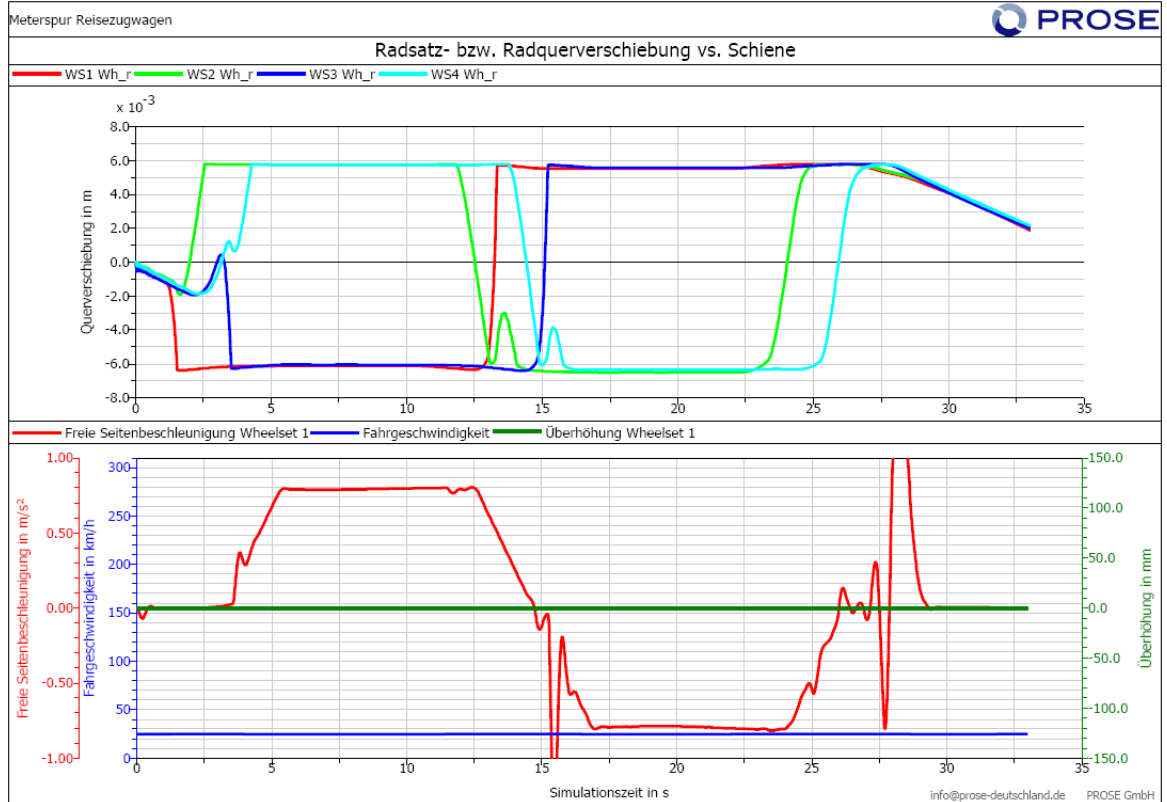


Abbildung 28: Radsatzquerbewegung im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit Wenzeler-Welle

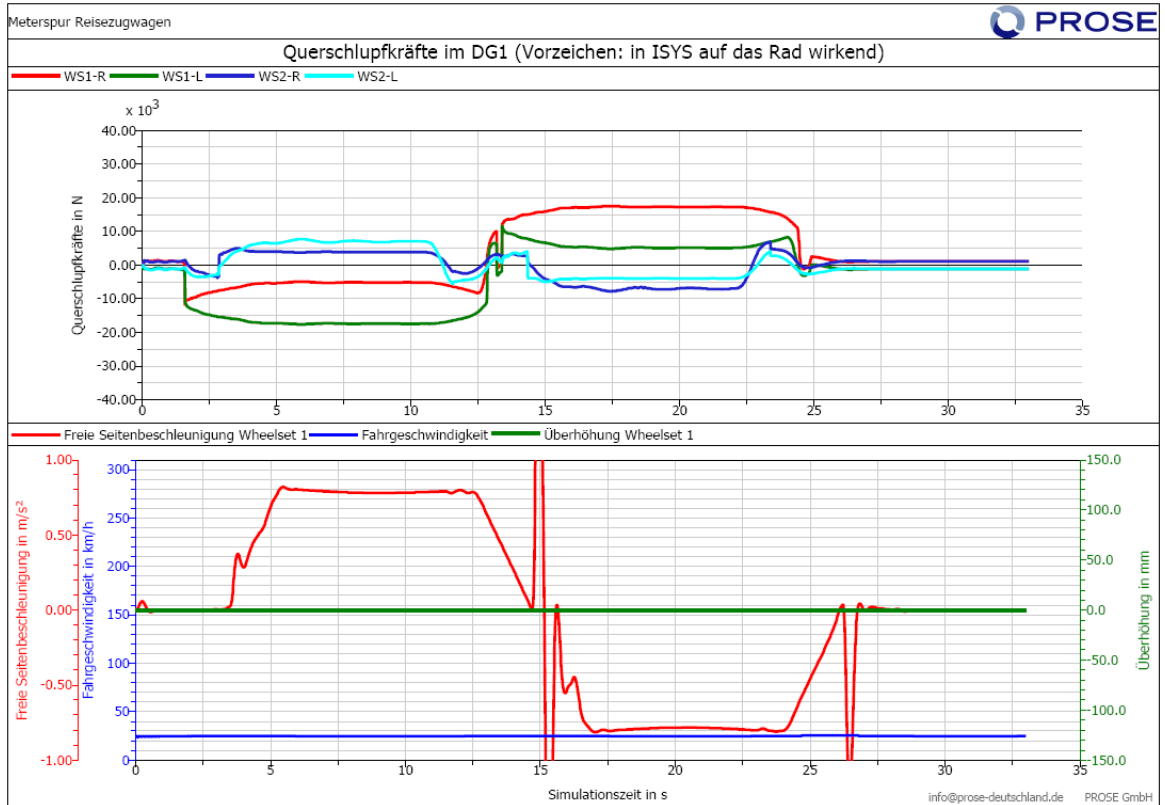


Abbildung 29: Querschleppkräfte im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit herkömmlichem Radsatz

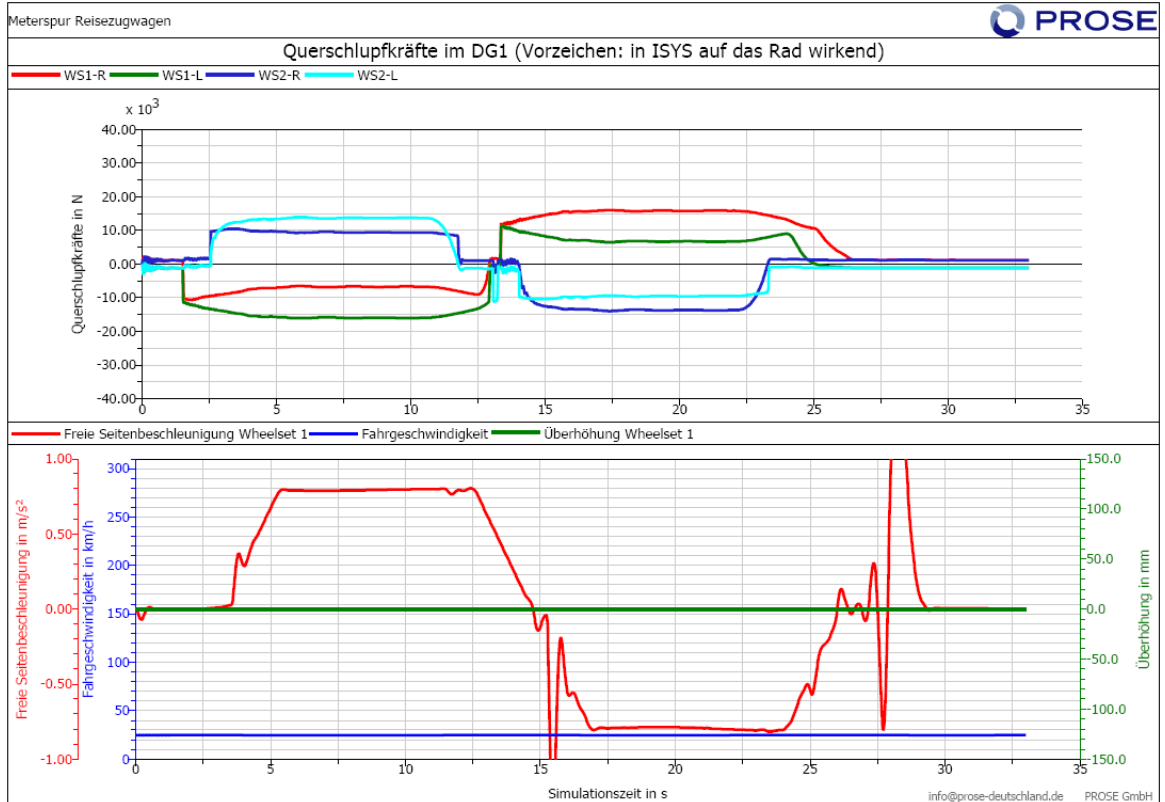


Abbildung 30: Querschleppkräfte im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit Winzeler-Welle

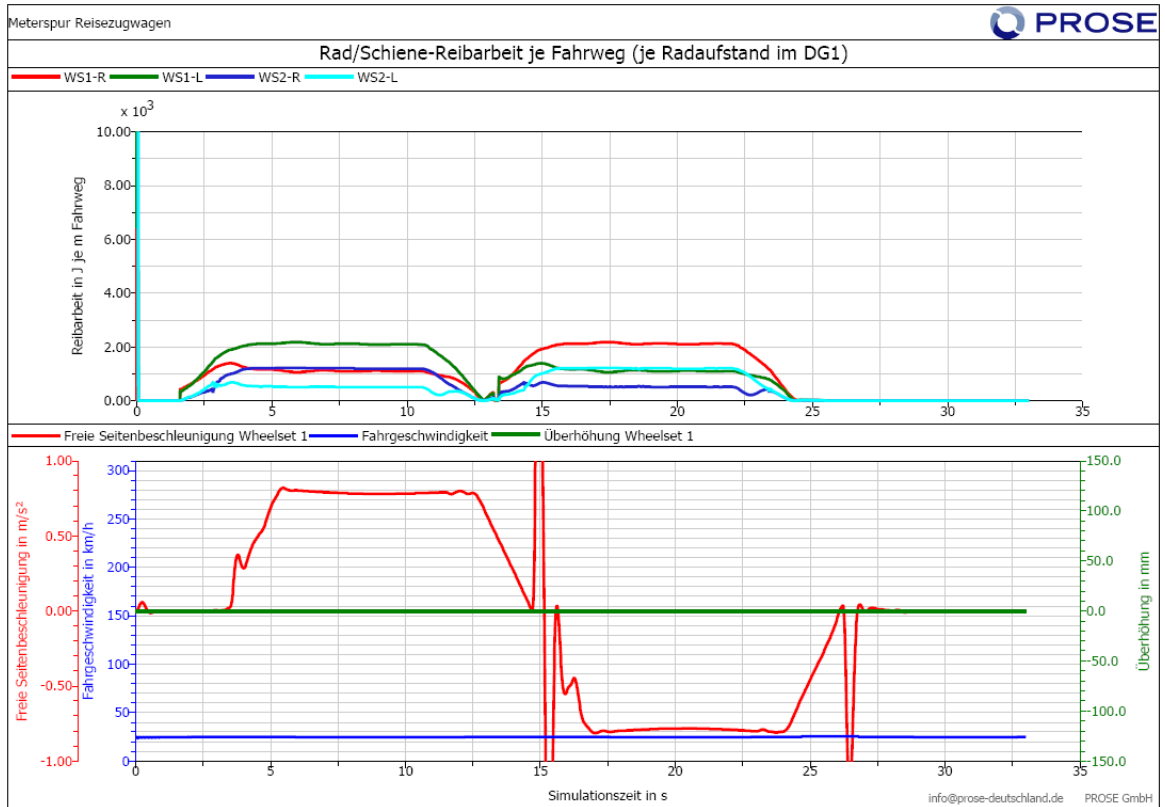


Abbildung 31: Rad/Schiene-Reibarbeit im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit herkömmlichem Radsatz

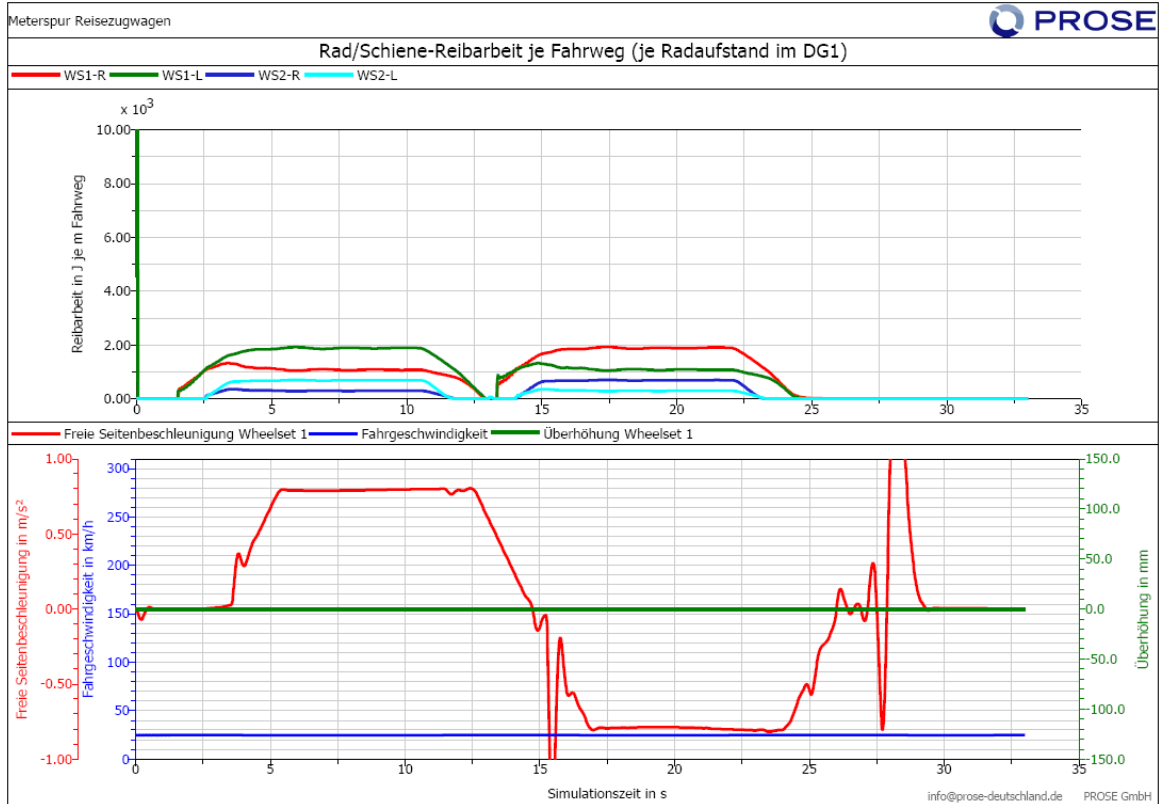


Abbildung 32: Rad/Schiene-Reibarbeit im 60m-S-Bogen bei 25 km/h mit Winzeler Welle

8.3 Normalspur-Reisezugwagen

8.3.1 Geradeausfahrt 160 km/h, Gleislagestörungen, Spurweite 1435 mm

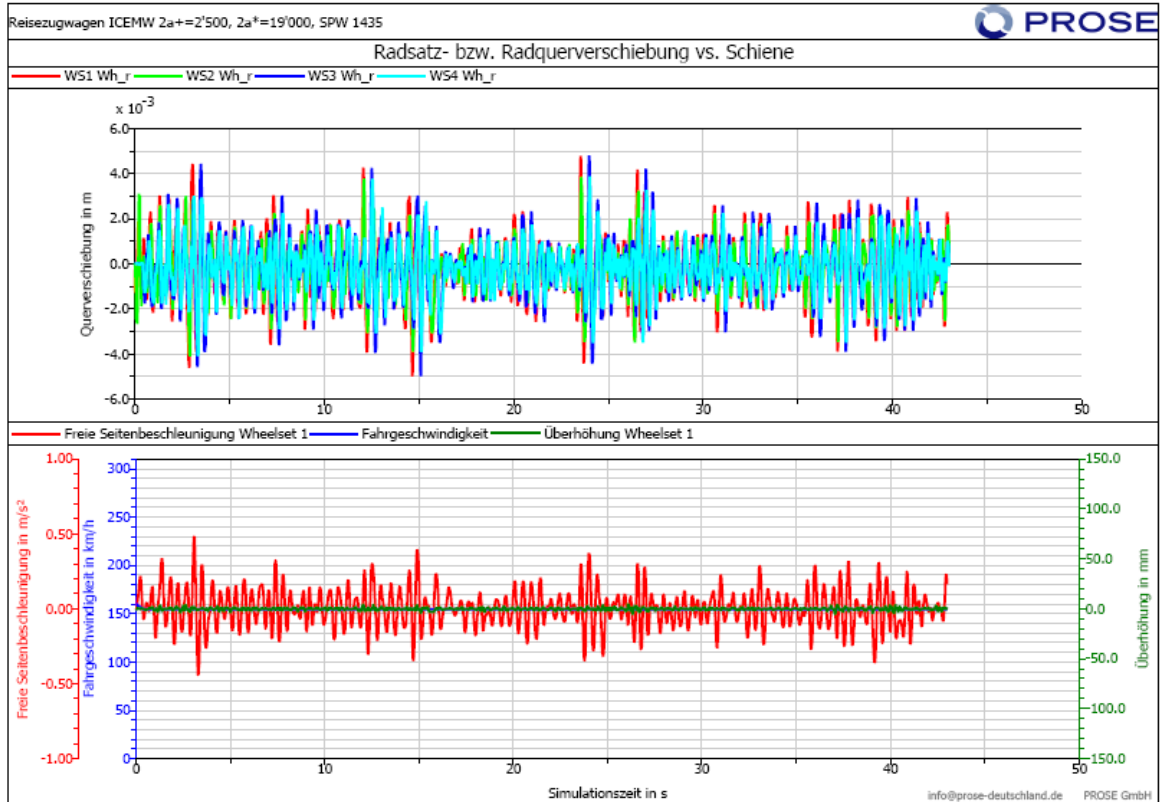


Abbildung 33: Radsatzquerbewegung bei herkömmlichem Radsatz

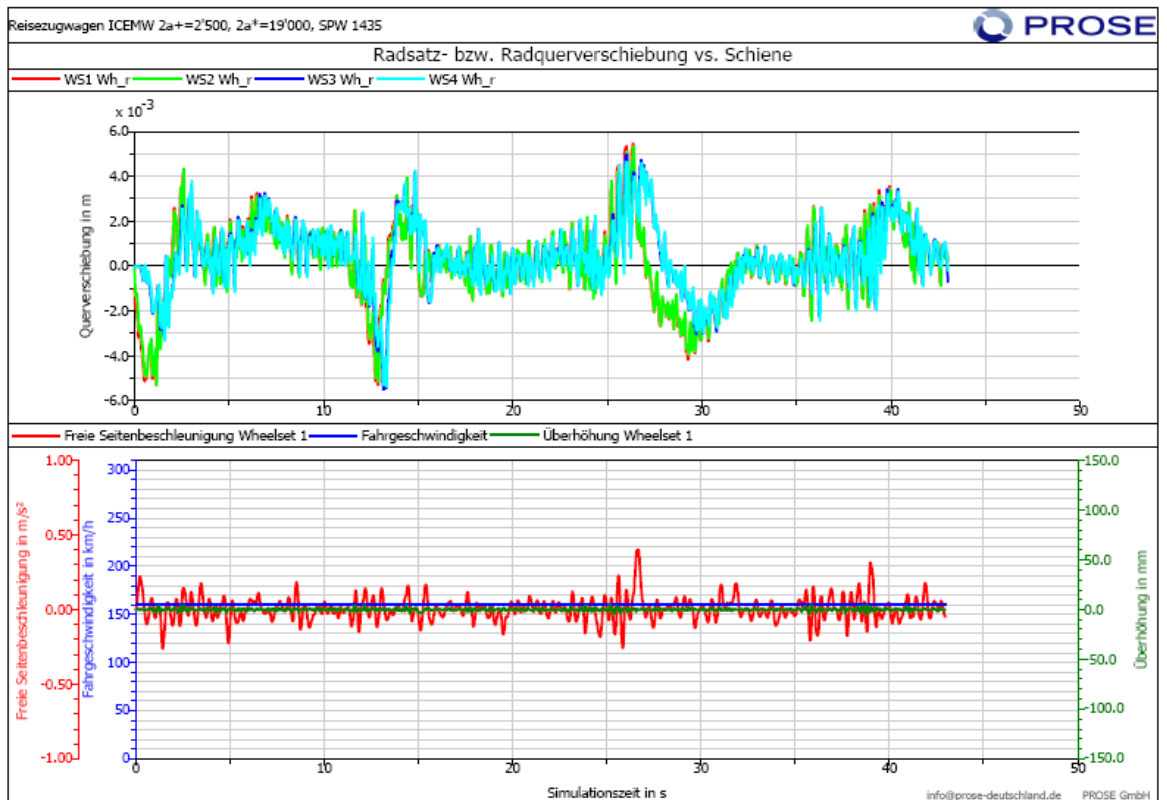


Abbildung 34: Radsatzquerbewegung bei Winzeler-Welle

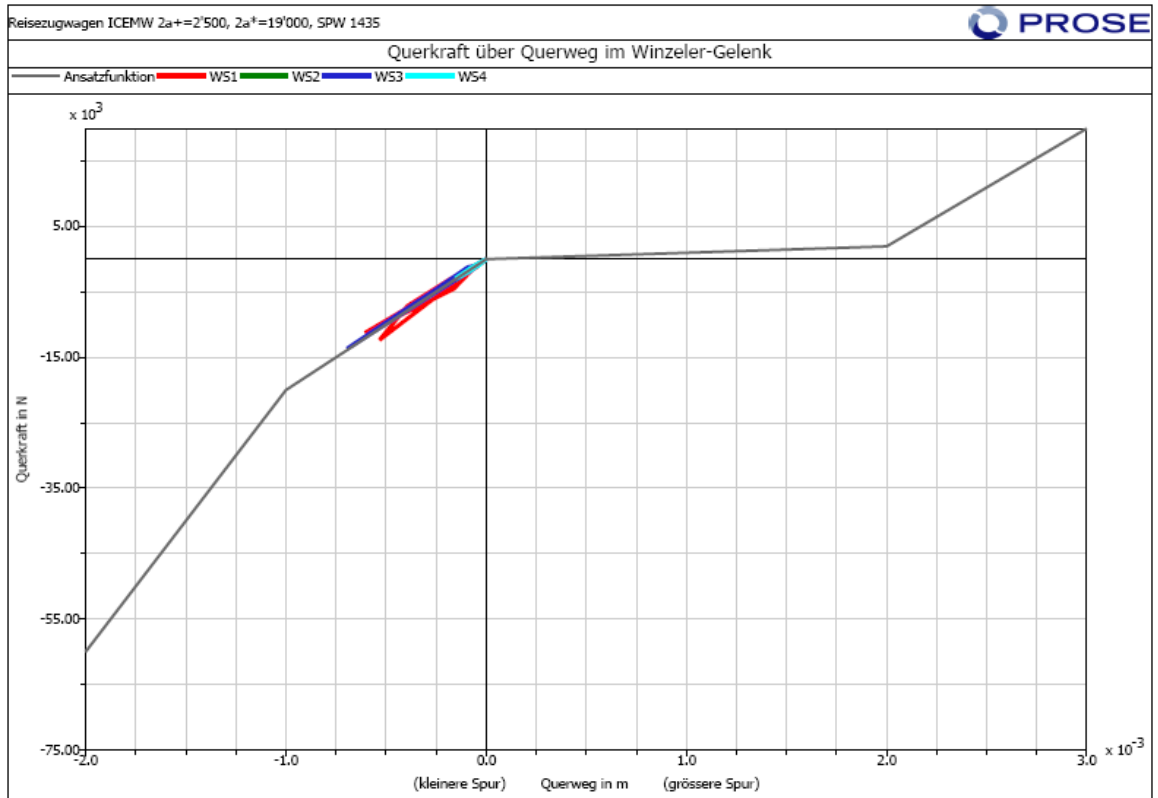


Abbildung 35: Querverschiebung im Winzeler-Gelenk

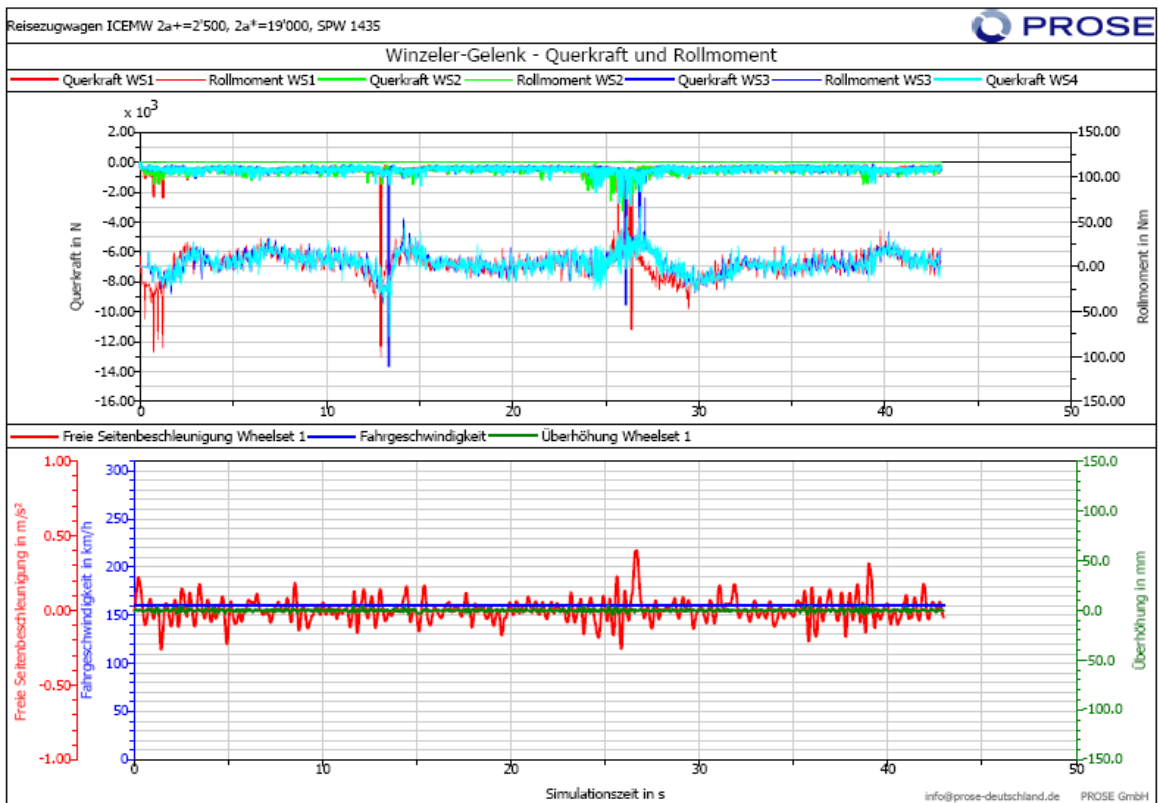


Abbildung 36: Querkräfte und Drehmomente im Winzeler-Gelenk

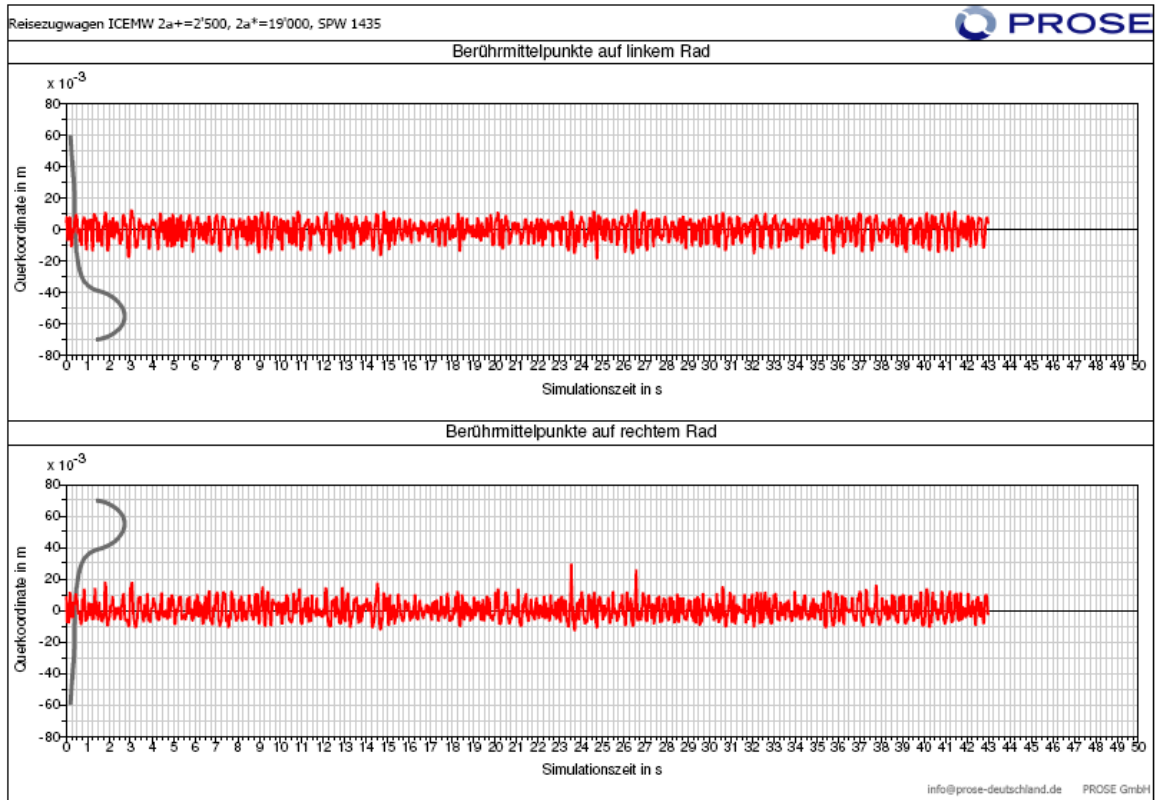


Abbildung 37: Berührflächenmittelpunkte am Rad beim herkömmlichen Radsatz

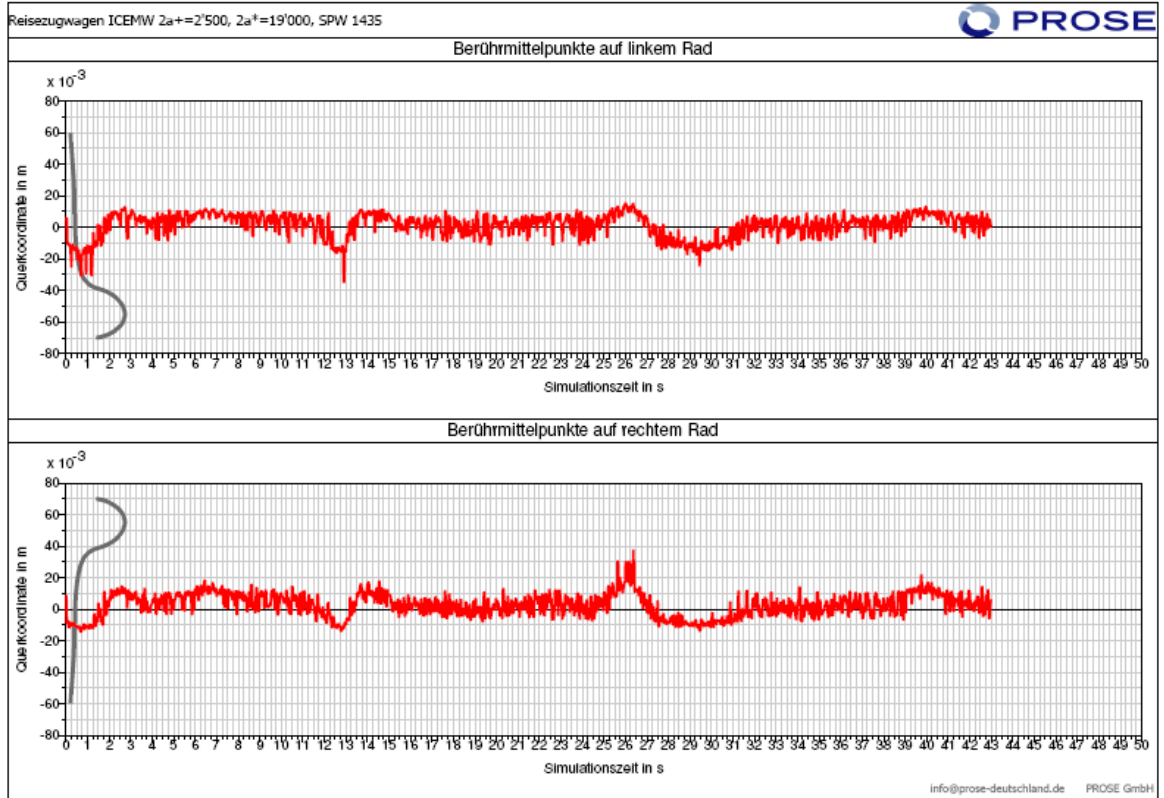


Abbildung 38: Berührflächenmittelpunkte am Rad bei der Winzler-Welle

8.3.2 Geradeausfahrt 300 km/h, keine Gleislagestörungen, Spurweite 1430 mm

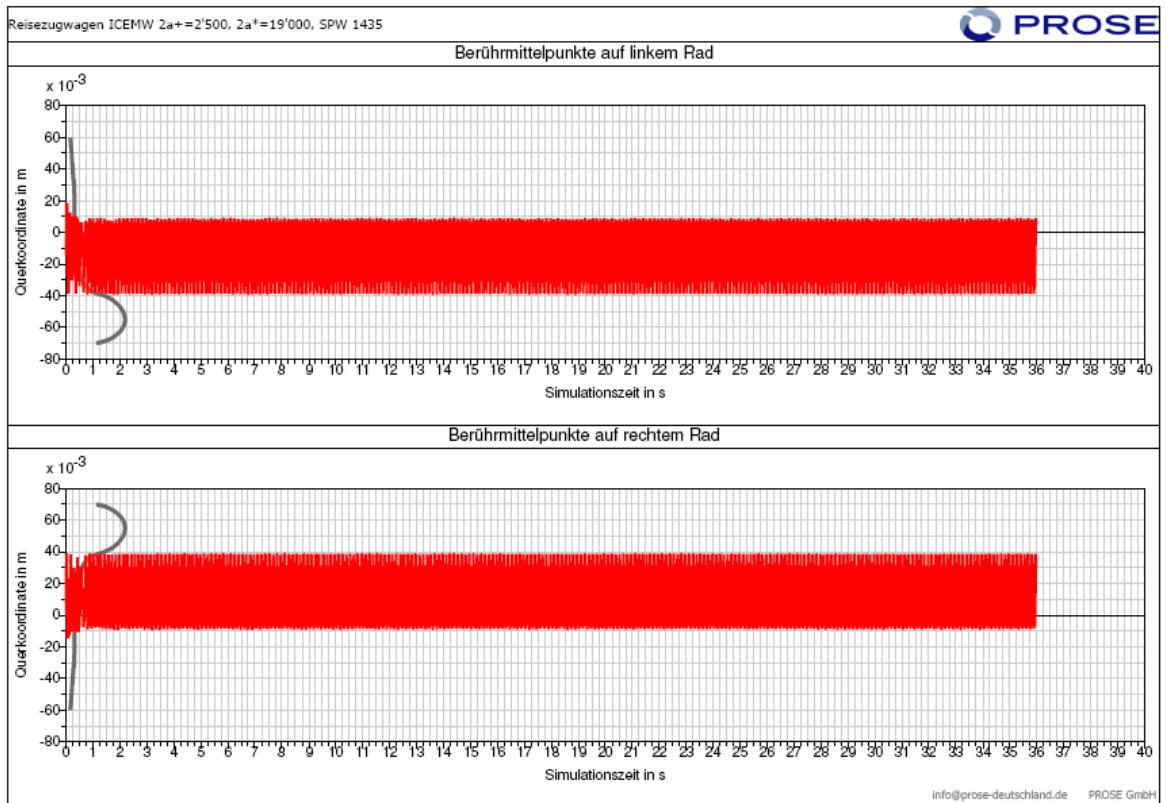


Abbildung 39: Schlingerbewegung sichtbar im Wechsel der Berührfläche am Rad des herkömmlichen Radsatzes

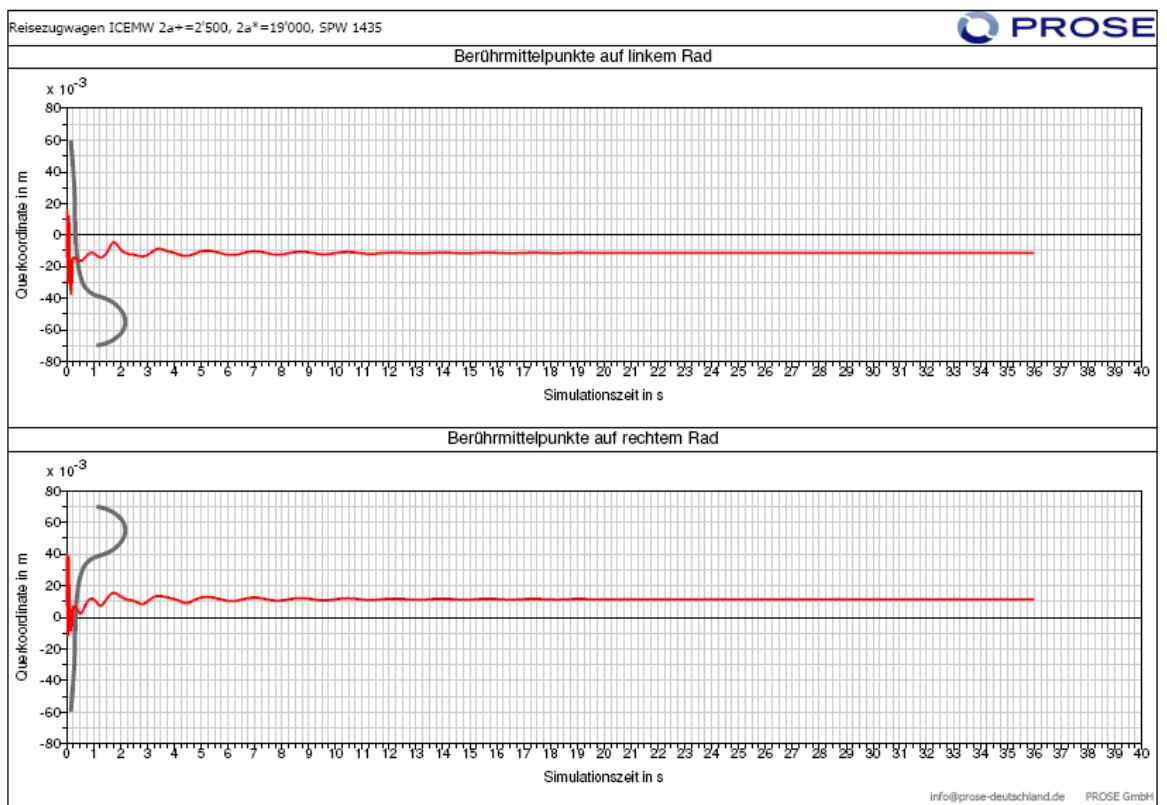


Abbildung 40: Keine Schlingerbewegung bei Winzeler-Welle

8.3.3 S-Bogen mit Radius 150 m, 20 km/h

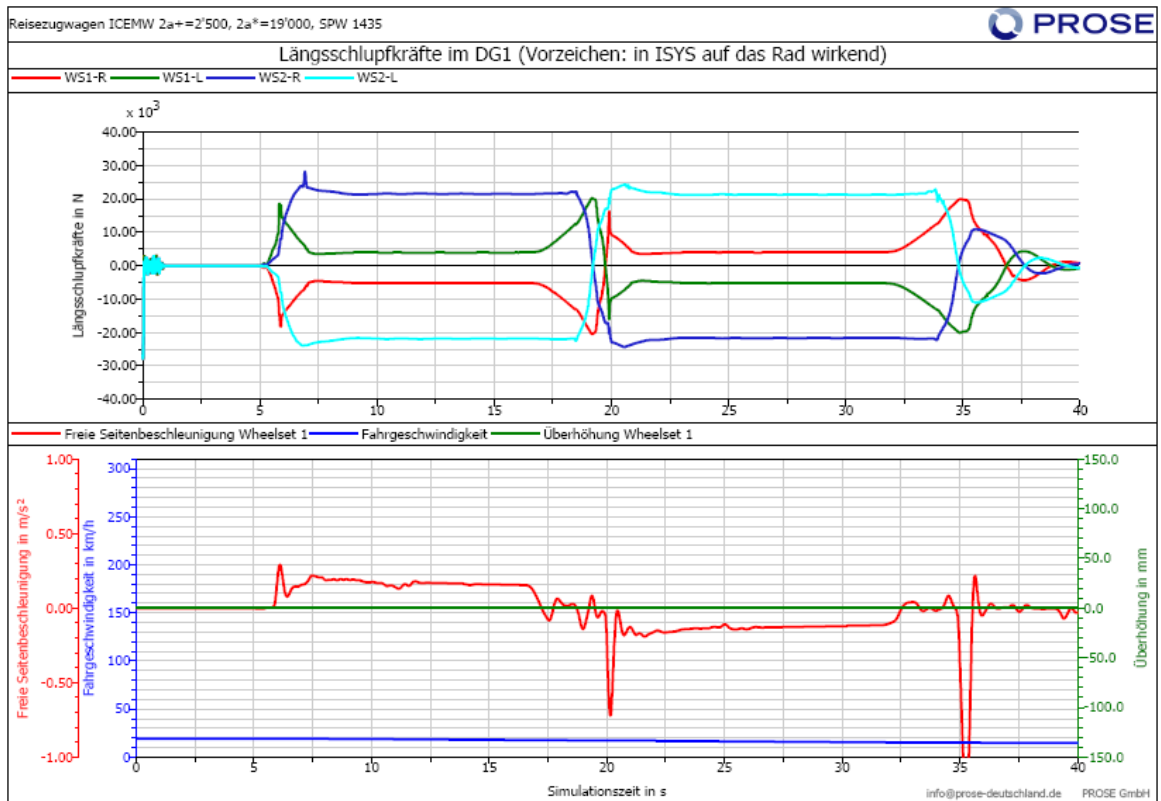


Abbildung 41: Längsschlupfkraften beim herkömmlichen Radsatz

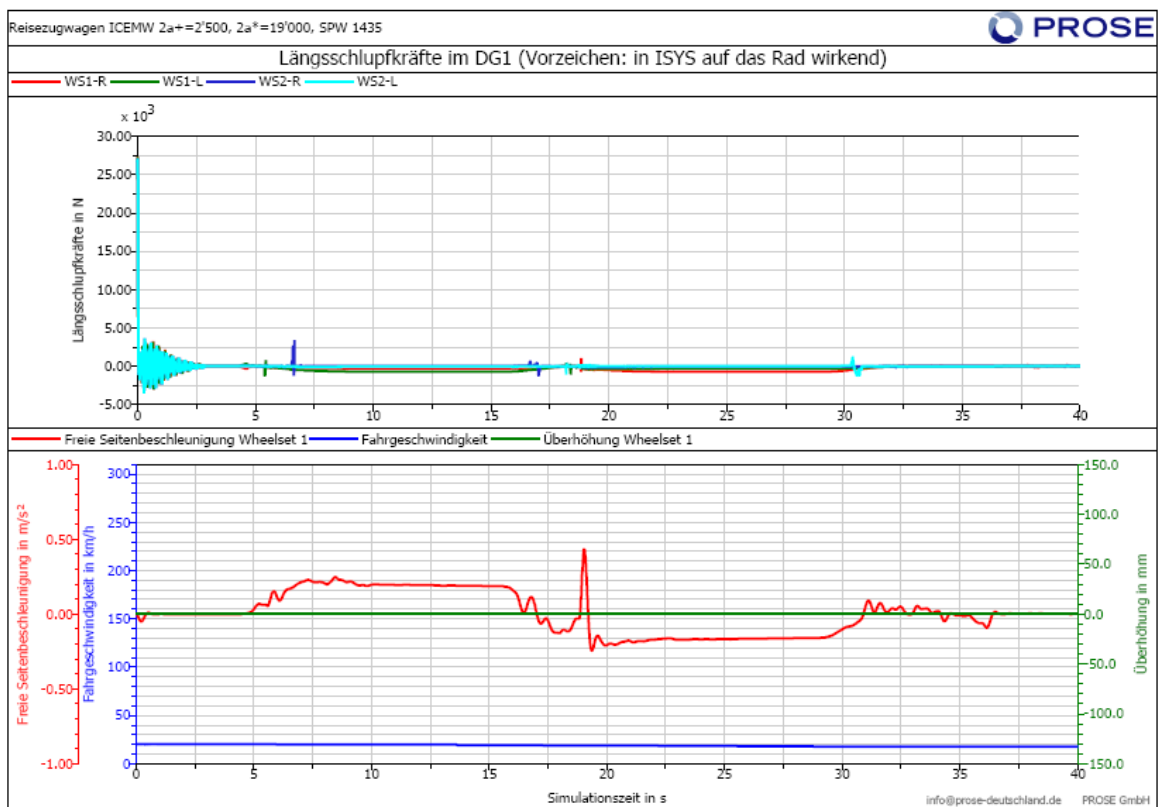


Abbildung 42: Längsschlupfkraften bei Winzeler-Welle

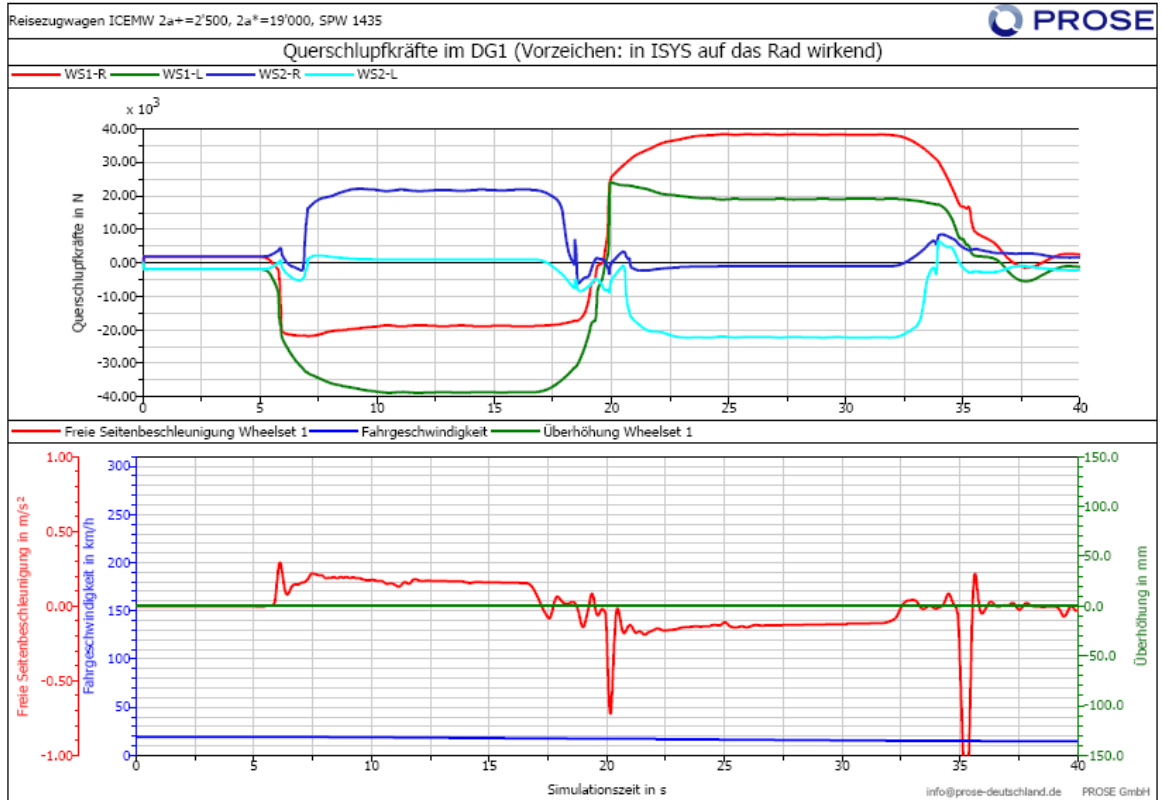


Abbildung 43: Querschlupfkraften bei herkömmlichem Radsatz

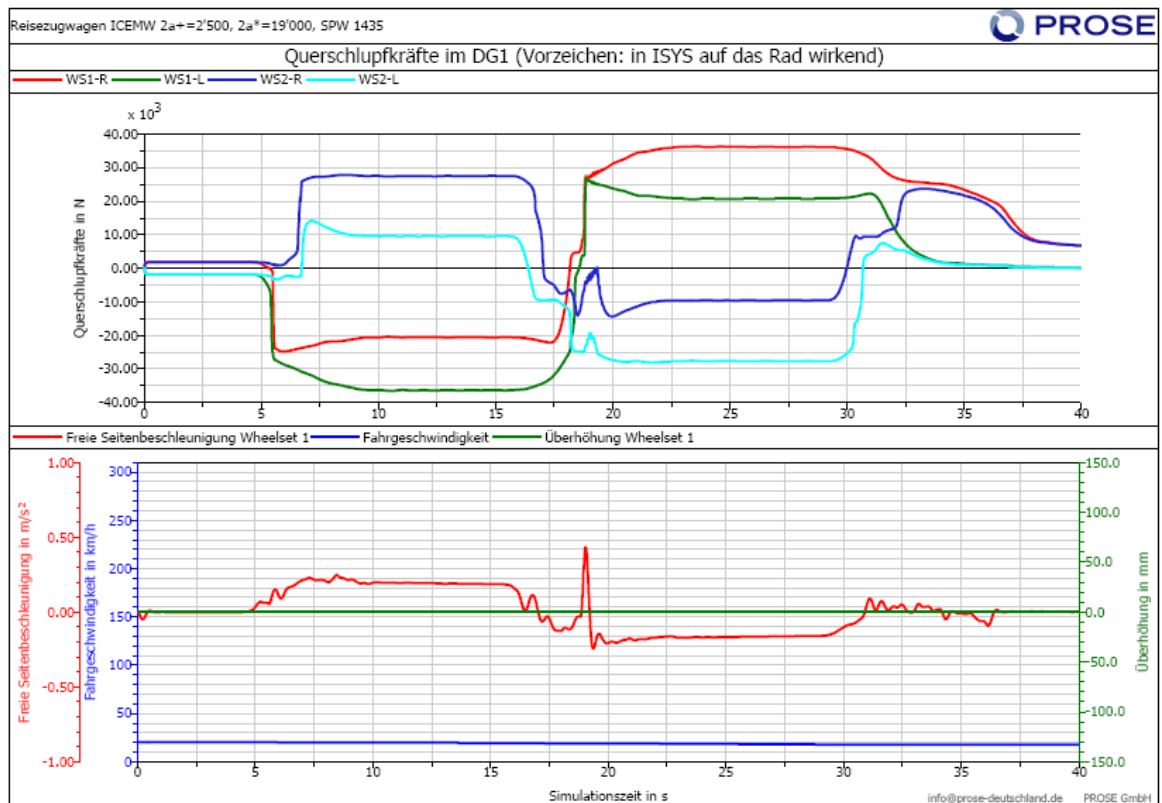


Abbildung 44: Querschlupfkraften bei Winzeler-Welle

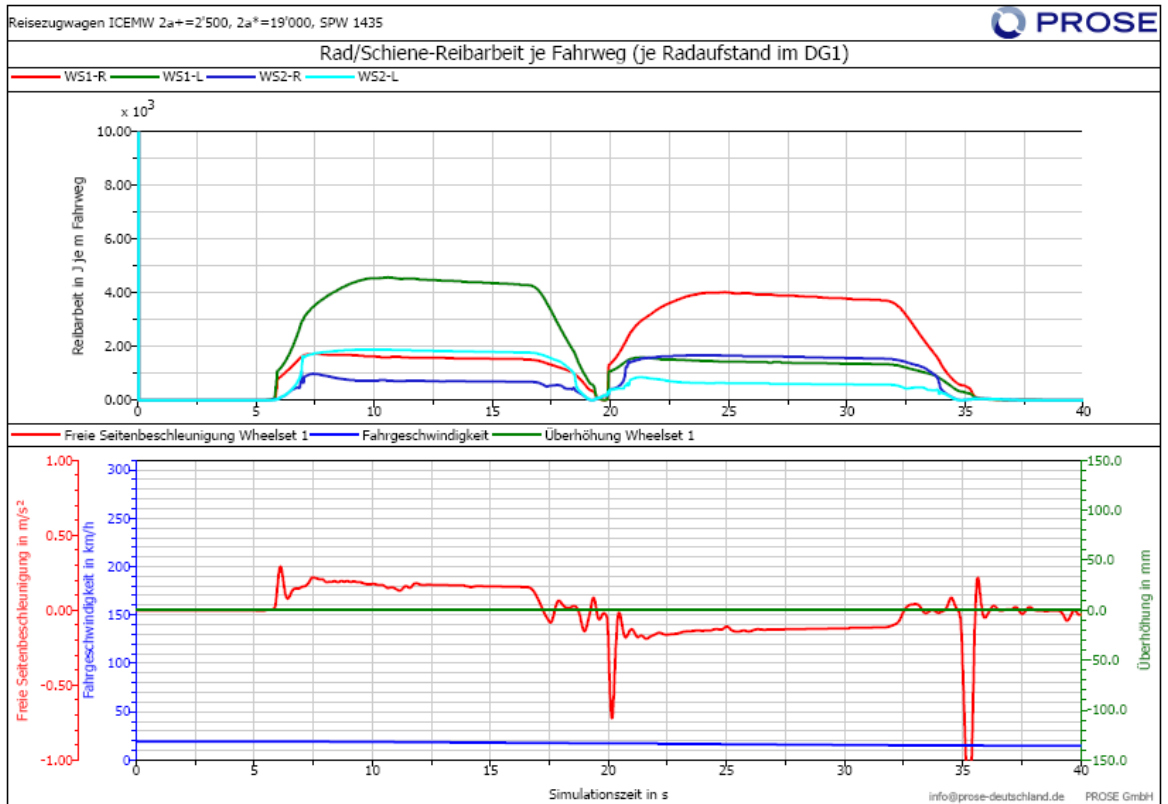


Abbildung 45: Reibarbeit im Rad/Schiene-Kontakt bei herkömmlichem Radsatz

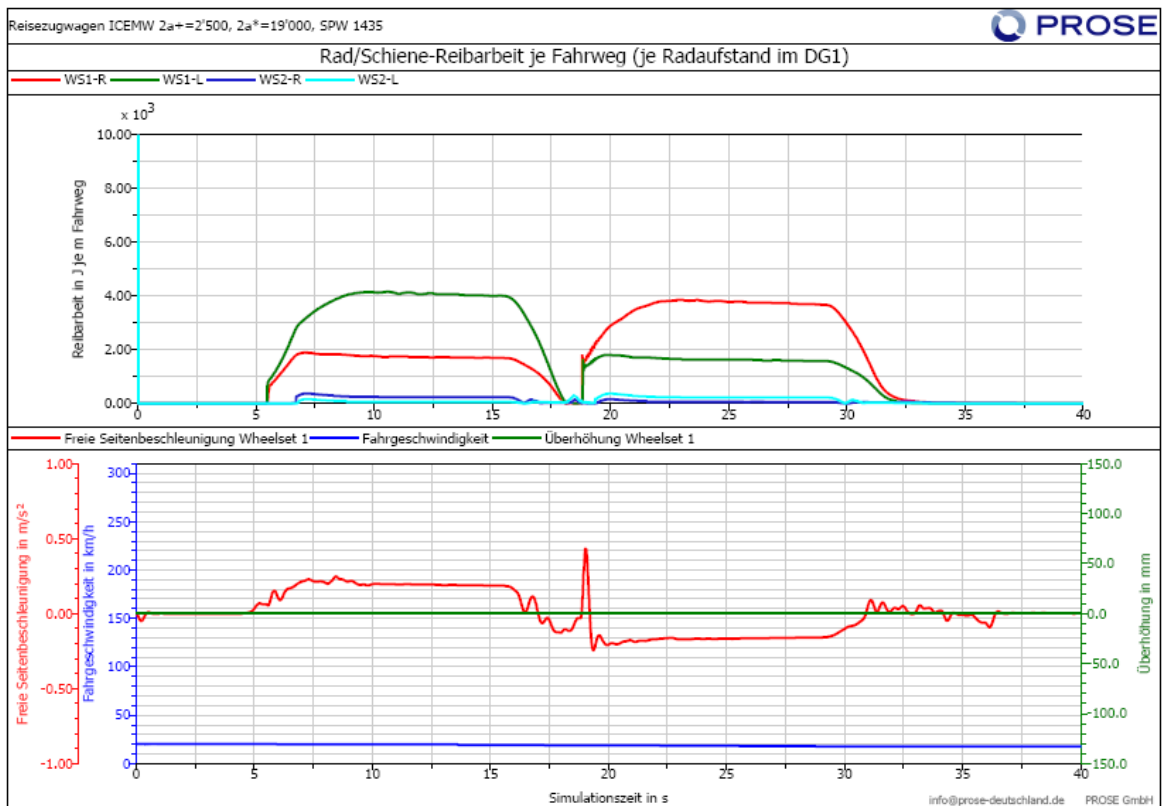


Abbildung 46: Reibarbeit im Rad/Schiene-Kontakt bei herkömmlichem bei Winzler-Welle

8.3.4 S-Bogen mit Radius 300 m, 70 km/h

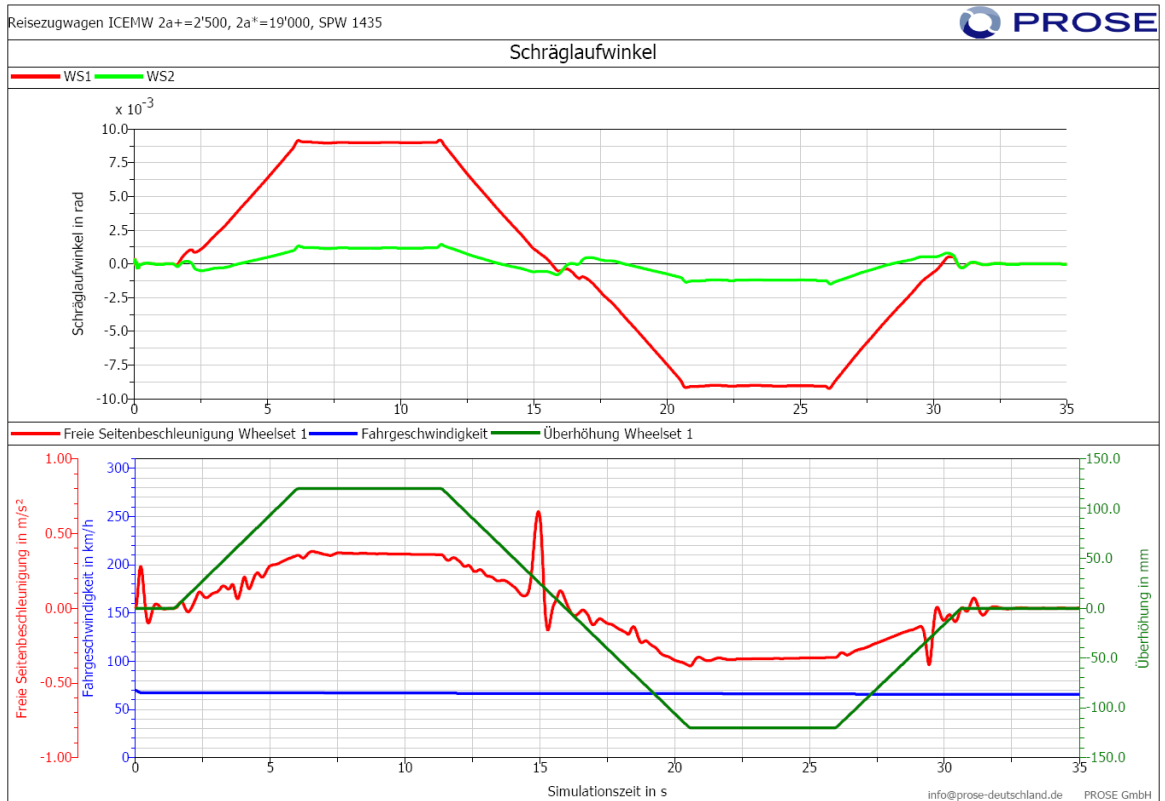


Abbildung 47: Schräglaufwinkel bei herkömmlichem Radsatz

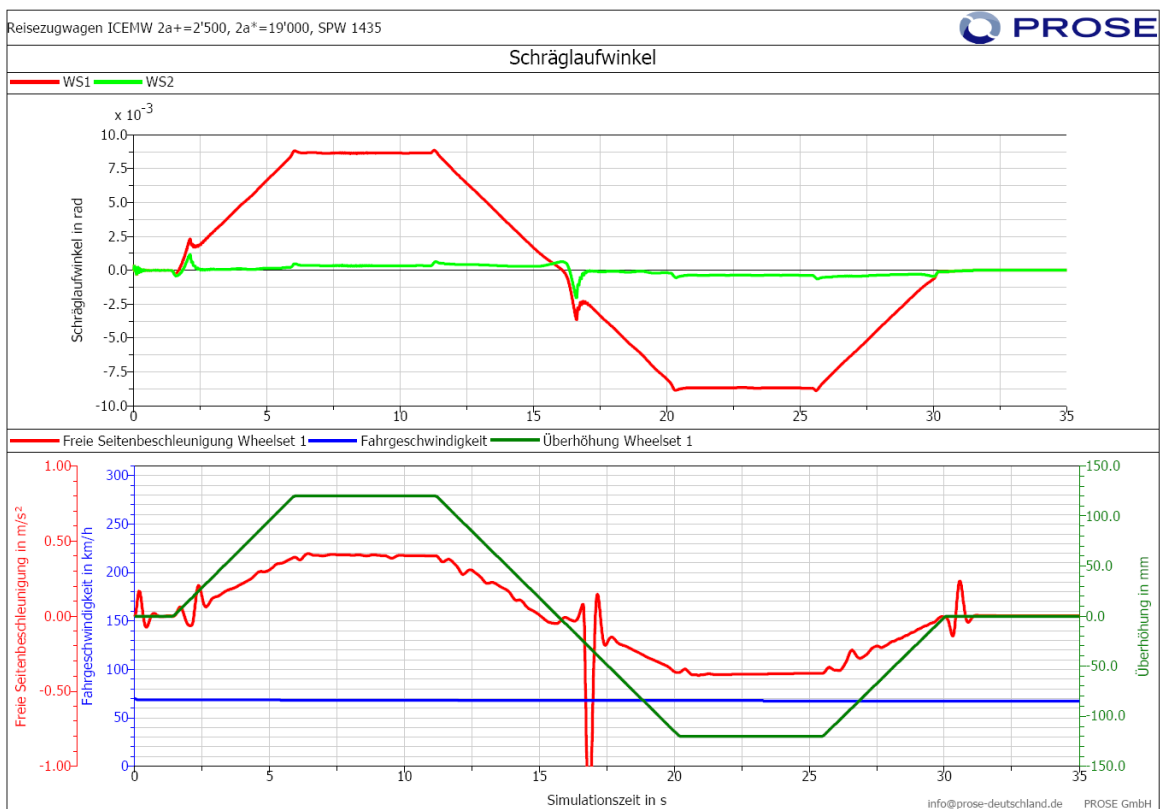


Abbildung 48: Schräglaufwinkel bei Winzeler-Welle

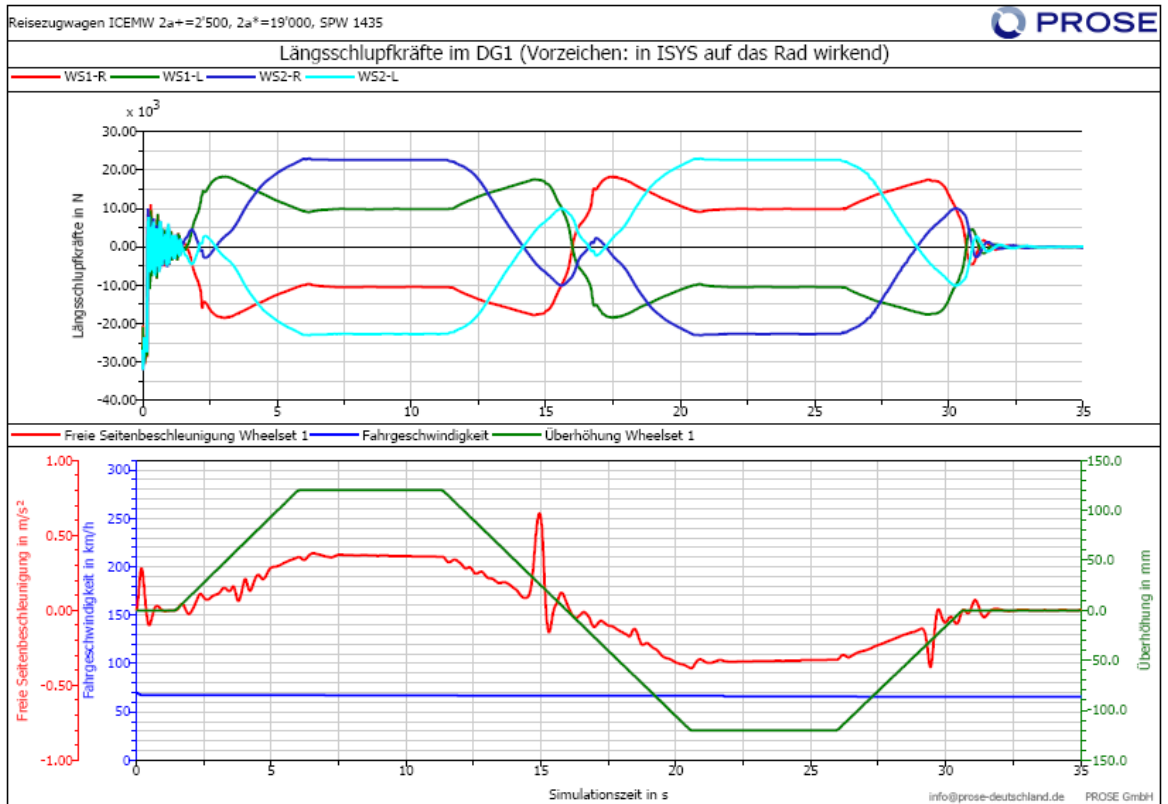


Abbildung 49: Längsschlupfkraften bei herkömmlichem Radsatz

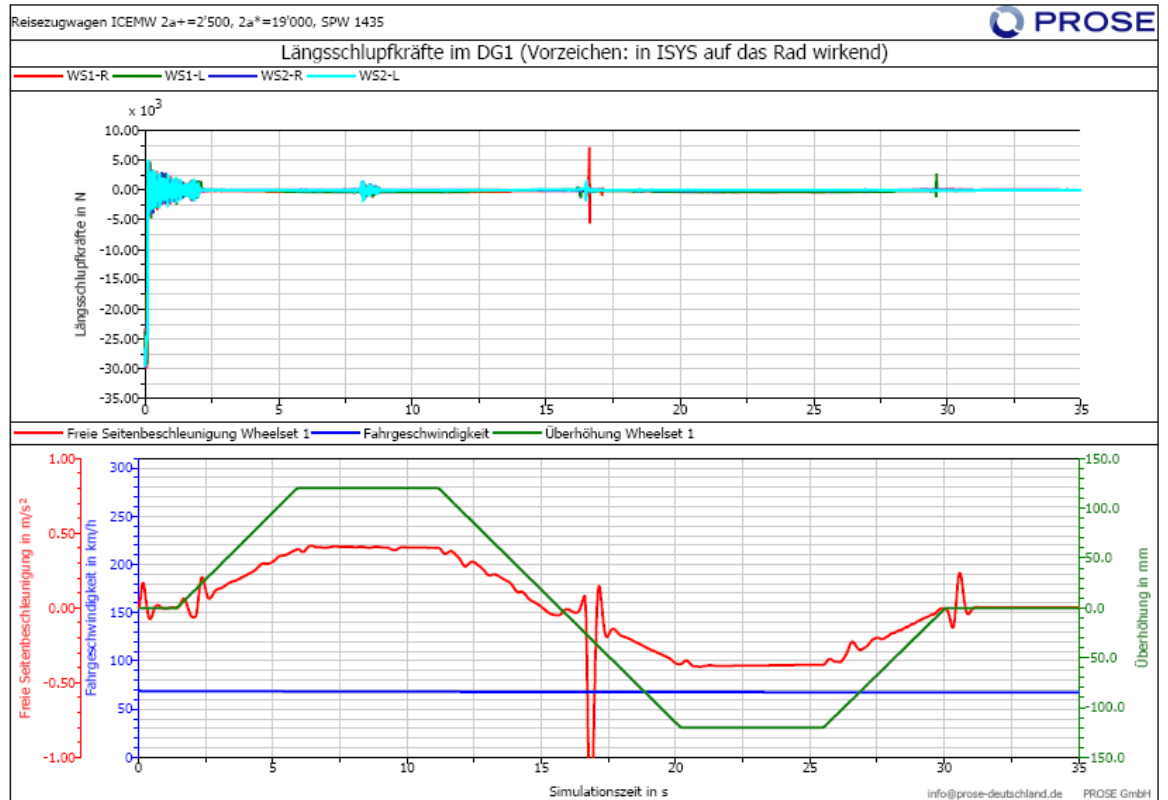


Abbildung 50: Längsschlupfkraften bei Winzeler-Welle

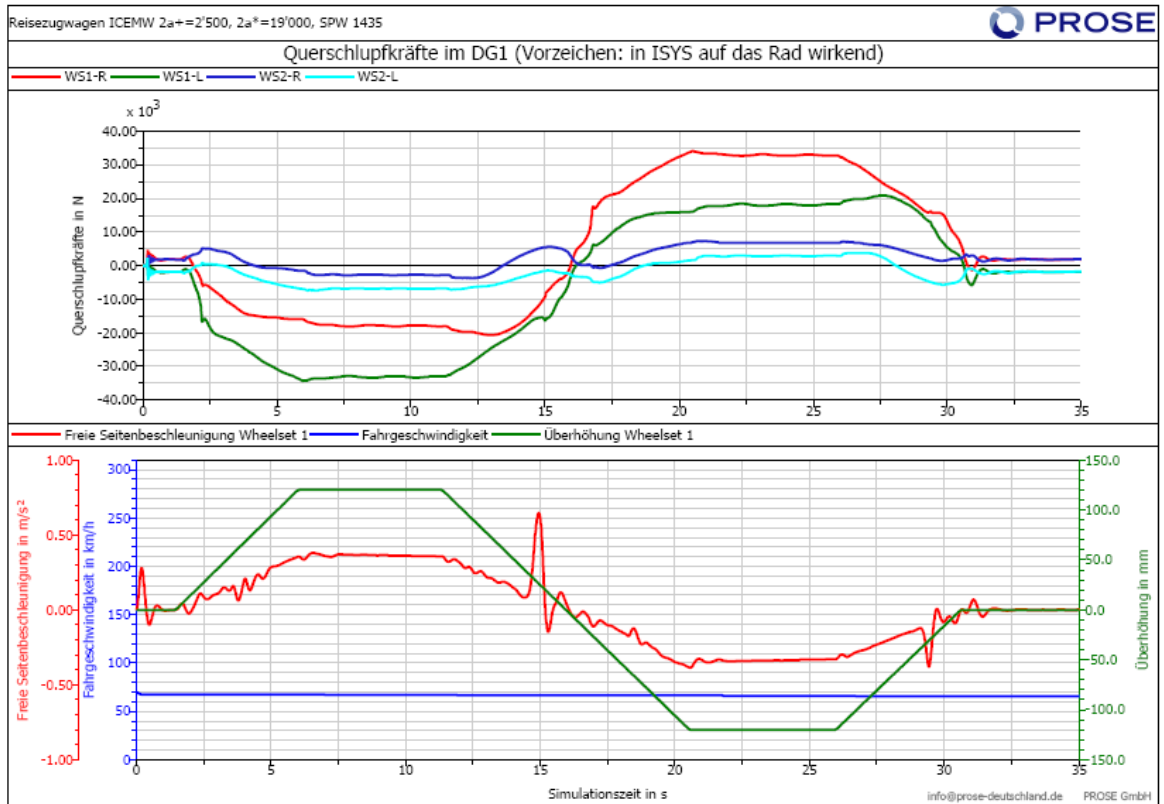


Abbildung 51: Querschlußkräfte bei herkömmlichem Radsatz

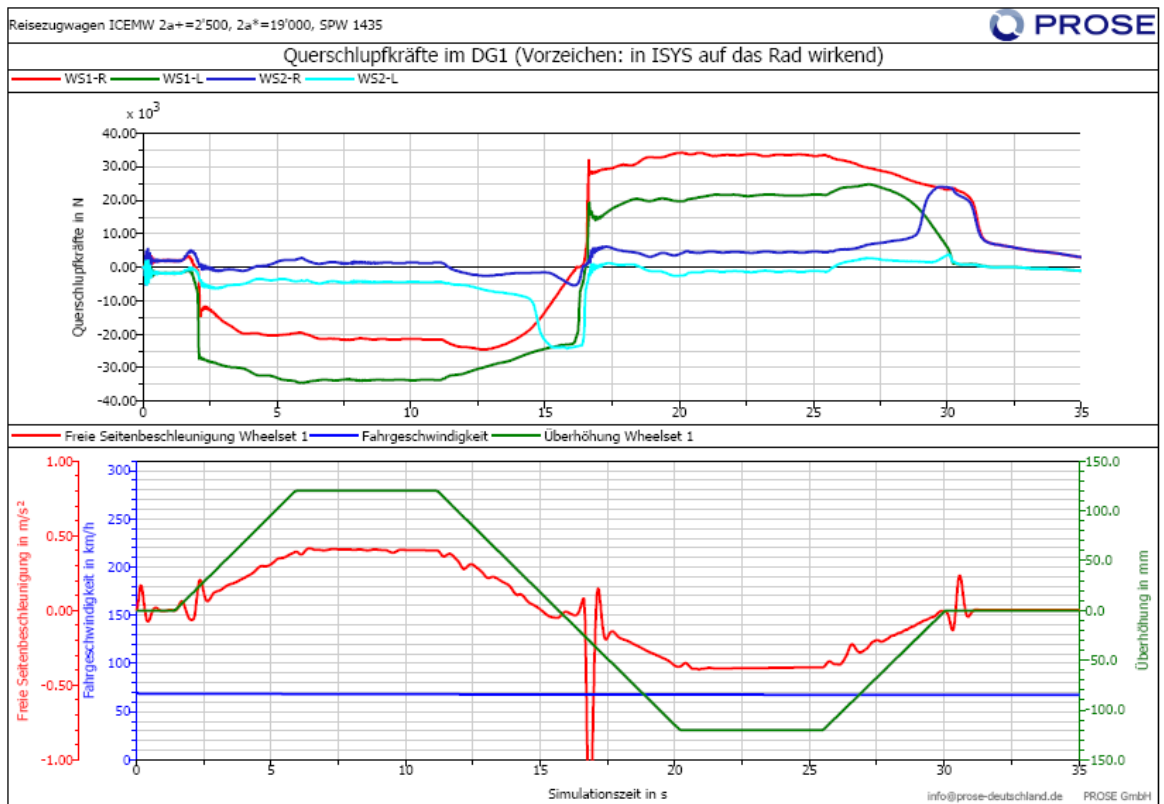


Abbildung 52: Querschlußkräfte bei Winzeler-Welle

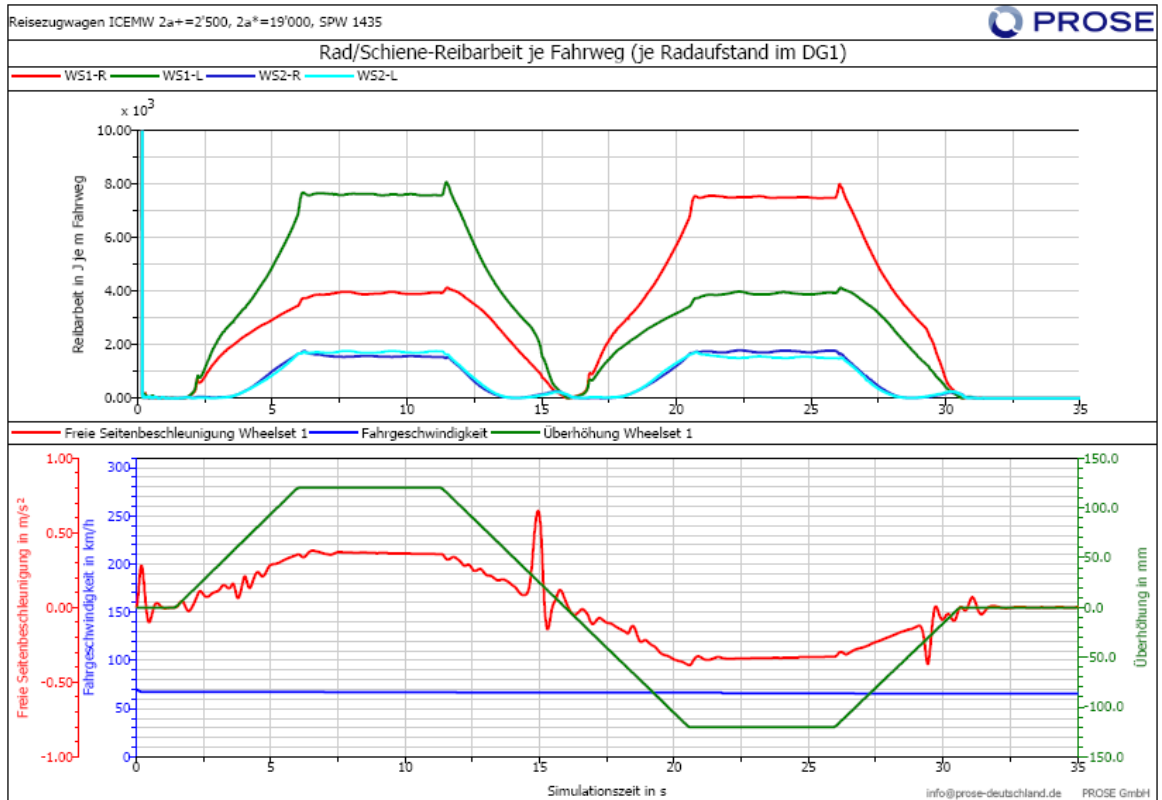


Abbildung 53: Reiarbeit im Rad/Schiene-Kontakt bei herkömmlichem Radsatz

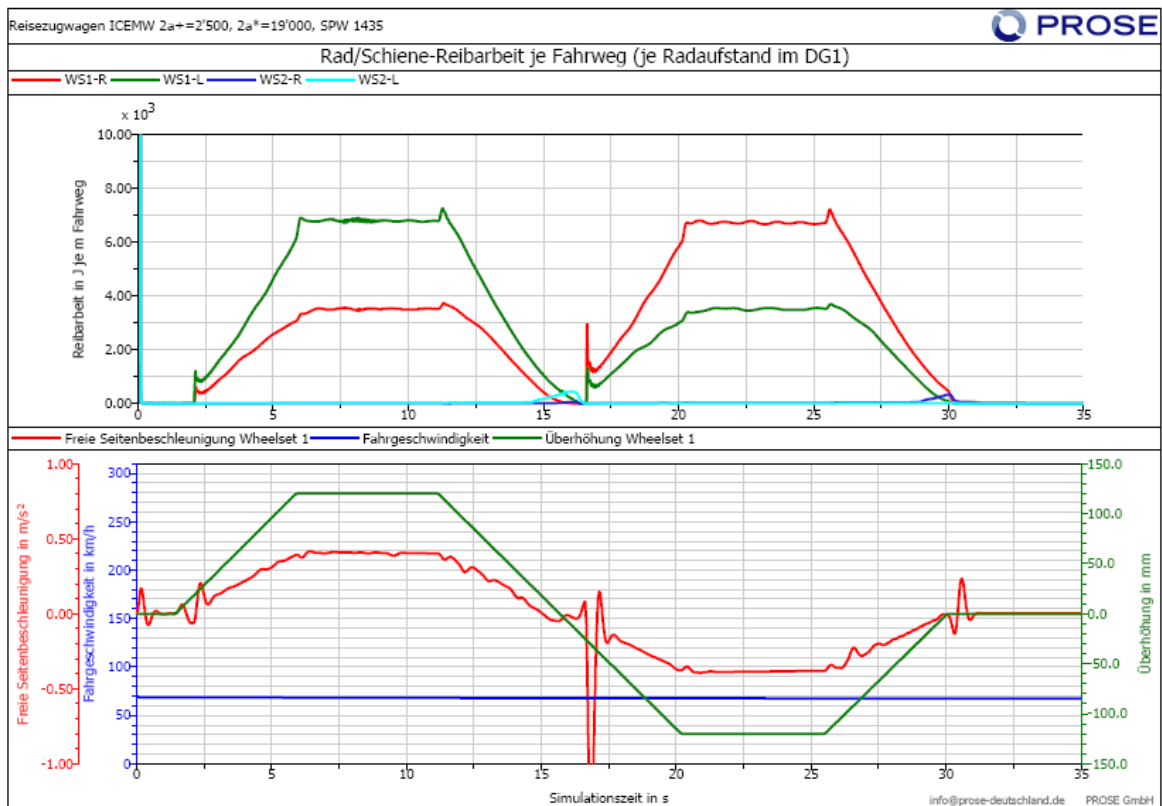


Abbildung 54: Reiarbeit im Rad/Schiene-Kontakt bei Winzeler-Welle

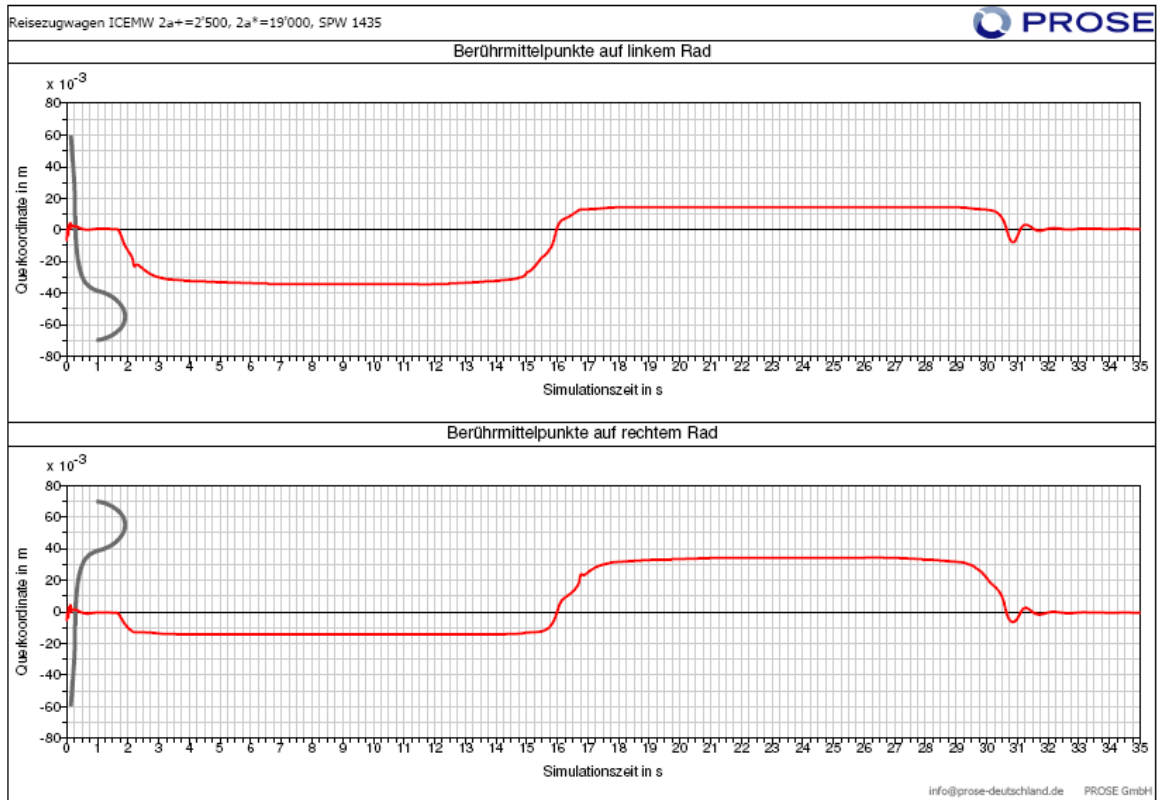


Abbildung 55: Radseitige Berührlagen bei herkömmlichem Radsatz

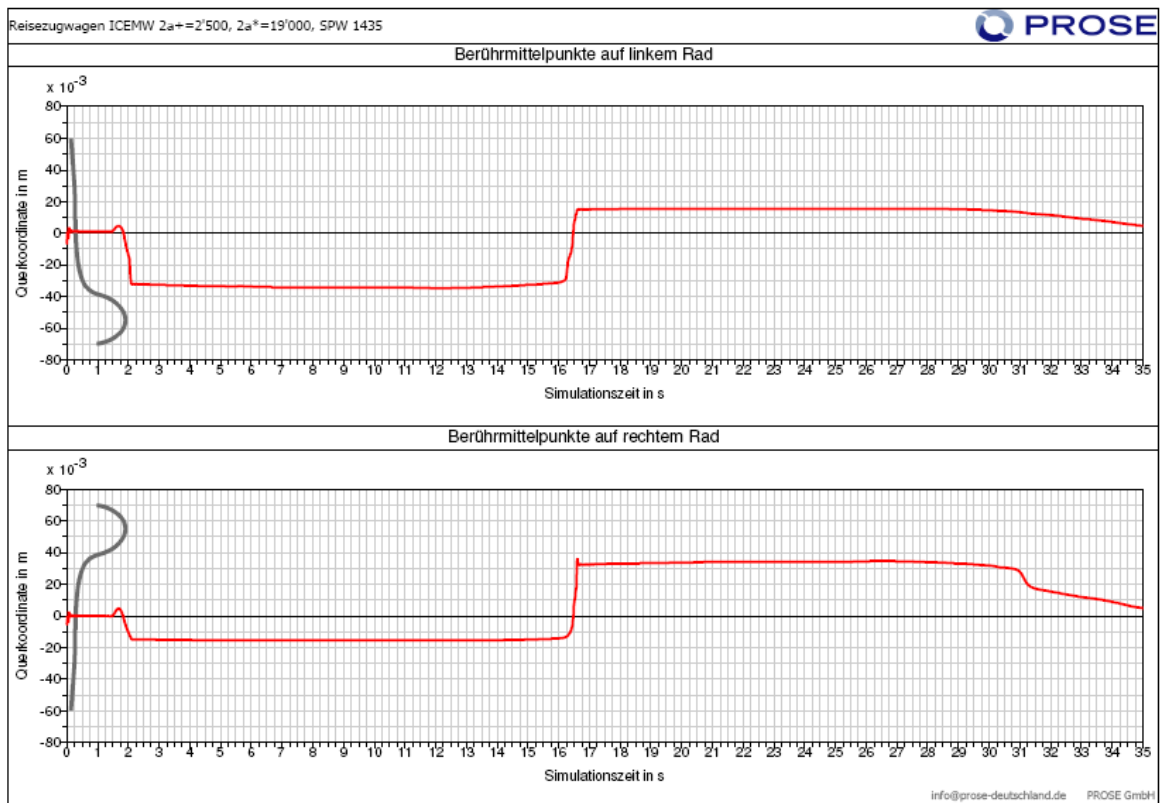


Abbildung 56: Radseitige Berührlagen bei Winzler-Welle

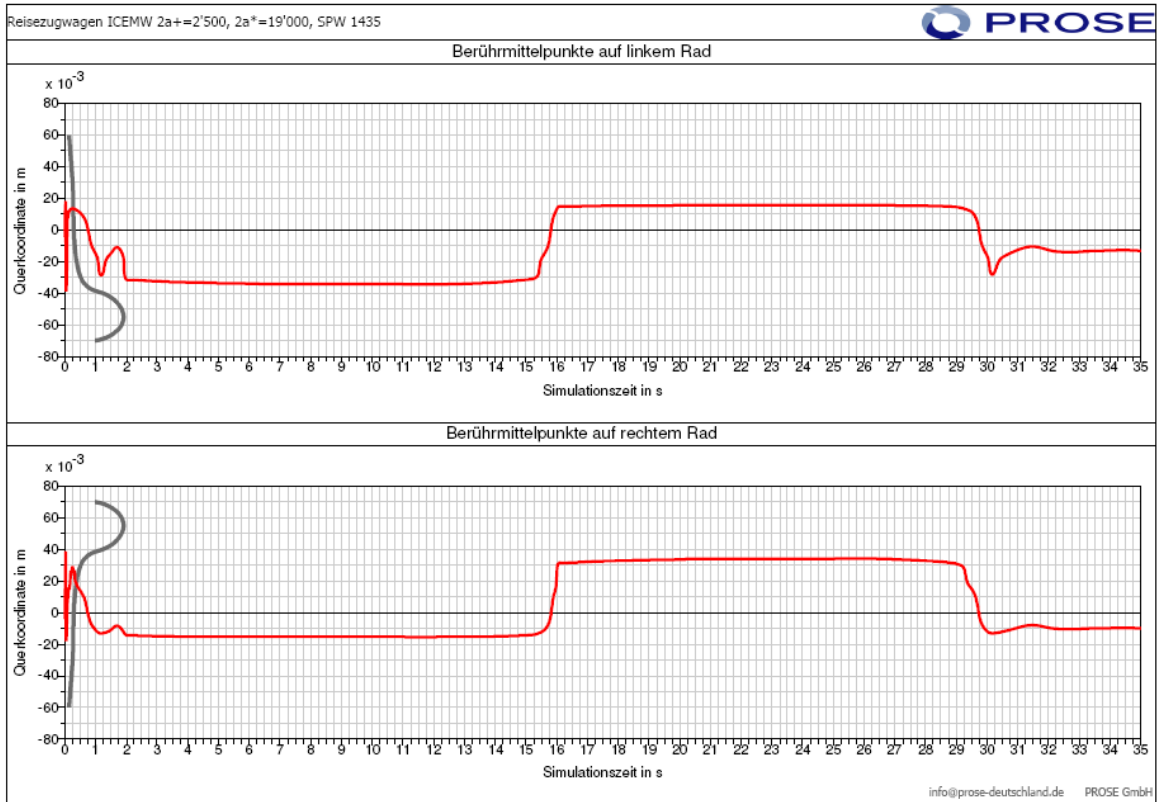


Abbildung 57: Radseitige Berührlagen bei Winzeler-Welle mit 100-facher Drehdämpfung (10'000 Nms/rad)

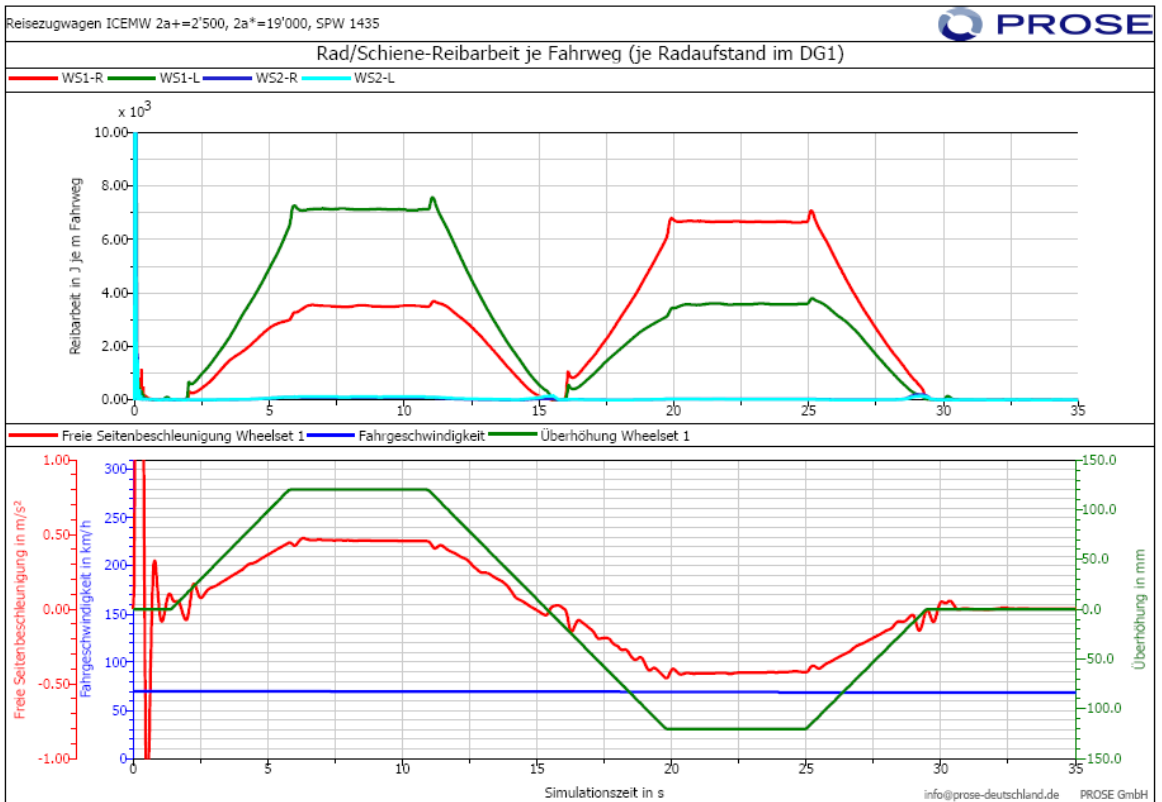


Abbildung 58: Rad/Schiene-Reibarbeit bei Winzeler-Welle mit 100-facher Drehdämpfung (10'000 Nms/rad)