

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME

Institut für Land-
und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

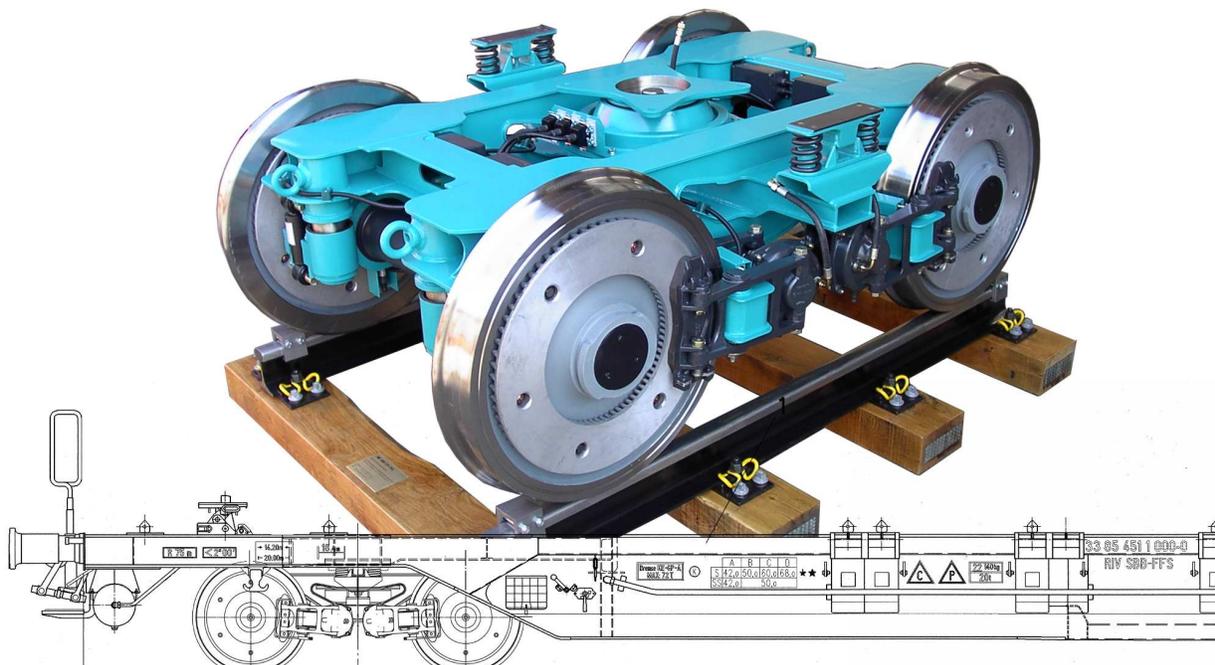
Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Tel.: +49-(0)30 314-25195

Fax.: +49-(0)30 314-22529

e-mail: Markus.Hecht@TU-Berlin.de

Bericht Nr. 30/2004
LEILA-DG
Dokumentation zum MKS-Modell
(inkl. Kesselwagen + Hupac Taschenwagen T.4)
Komponenten, Kennlinien + Massenbilanz
Statische Kräfte und Einsenkungen



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

Stand: Juni 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Komponenten, Kennlinien und MKS-Modellierung	1
1.1	Koordinatensysteme	2
1.2	Laufwerk LEILA-DG	3
1.2.1	Komponentenübersicht	3
1.2.2	Rad/Schiene-Kontakt	4
1.2.3	Primärfesselung und beteiligte Körper	8
1.2.4	Kreuzanker	23
1.2.5	Drehgestellrahmen	23
1.2.6	Sekundärfesselung	25
1.3	Fahrzeugaufbau	32
1.3.1	Kesselwagen-Aufbau	32
1.3.2	Taschenwagen-Aufbau Hupac T4.1	34
2	Massenbilanz sowie statische Kräfte und Einsenkungen	38
2.1	Massenbilanz	38
2.2	Statische Kräfte und Einsenkungen	41
A	Literaturverzeichnis	42

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 [5]	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
$\underline{\bar{e}}^{ia}$	Koppelementhilfsbasis am Körper i	MEDYNA
$\underline{\bar{e}}^{ja}$	Koppelementhilfsbasis am Körper j	MEDYNA
sp_w	Spurweite	Rad/Schiene-Kontakt
e_0	Halber Messkreisabstand	Rad/Schiene-Kontakt
μ_{rs}	Reibungskoeffizient zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
Q	Vertikalkraft zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
Y	Horizontalkraft zwischen Rad und Schiene	Rad/Schiene-Kontakt
T_x	Längsschlupfkraft	Rad/Schiene-Kontakt
T_y	Querschlupfkraft	Rad/Schiene-Kontakt
Δz_{rad}	Radanhebung	Rad/Schiene-Kontakt
gp_{AL-DGy}	Laterales Spiel (gap) AL-Gehäuse - DG-Rahmen	Y25 Drehgestell
μ_{HK}	Reibungskoeffizient Halbkugelgelenk	Allg. Drehgestell-Parameter
μ_{GS}	Reibungskoeffizient Gleitstück	Allg. Drehgestell-Parameter
r_{Ku}	Kugelradius der Drehpfanne	KE91 - Drehpfanne
μ_{HK}	Reibungskoeffizient Drehpfanne	KE91 - Drehpfanne

Tabelle 1: Verwendete Formelzeichen und Symbole

Kapitel 1

Komponenten, Kennlinien und MKS-Modellierung

Die fahrzeugdynamischen Untersuchungen werden mit dem Mehrkörperdynamikprogramm (MKS-Programm) *MEDYNA* [9, 28] durchgeführt, das sich insbesondere durch die realitätsnahe Wiedergabe des Rad/Schiene-Kontakts (KIK U. PIOTROWSKI [19, 26]) bewährt hat.

Aufgrund häufiger Nachfragen sei dabei klargestellt, dass zu den rad/schiene-relevanten Eingabegrößen die geometrische Lage¹ sowie der Reibwert gehören, während die Rad-aufstands- und Schlupfkräfte, Momente sowie Bewegungen im Rad/Schiene-Kontakt aus der im Programm implementierten Kontaktmechanik in Normalen- und Tangentialrichtung errechnet werden (KIK U. PIOTROWSKI [19, 26]). Kontaktgrößen wie Schlupf oder Lage der Berührflächen werden also nicht fiktiv vorgegeben sondern sind realitätsnahes Ergebnis der Simulationsrechnung.

¹Querprofile von Rad und Schiene, Spurweite, Spurmaß, Überhöhung, Messkreisradius, etc.

1.1 Koordinatensysteme

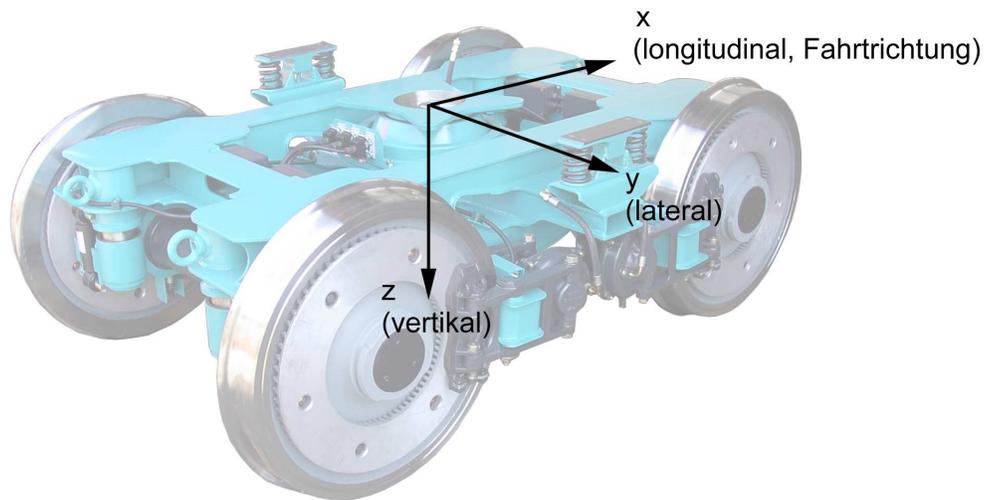


Abbildung 1.1: Allgemeines Koordinatensystem

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.

1.2 Laufwerk LEILA-DG

1.2.1 Komponentenübersicht

Die Abbildung 1.2 zeigt die Seitenansicht des LEILA-DG mit den charakteristischen Hauptmaßen. Die vor allem für die Lauftechnik relevanten Komponenten sind in der Abbildung 1.3 beziffert.

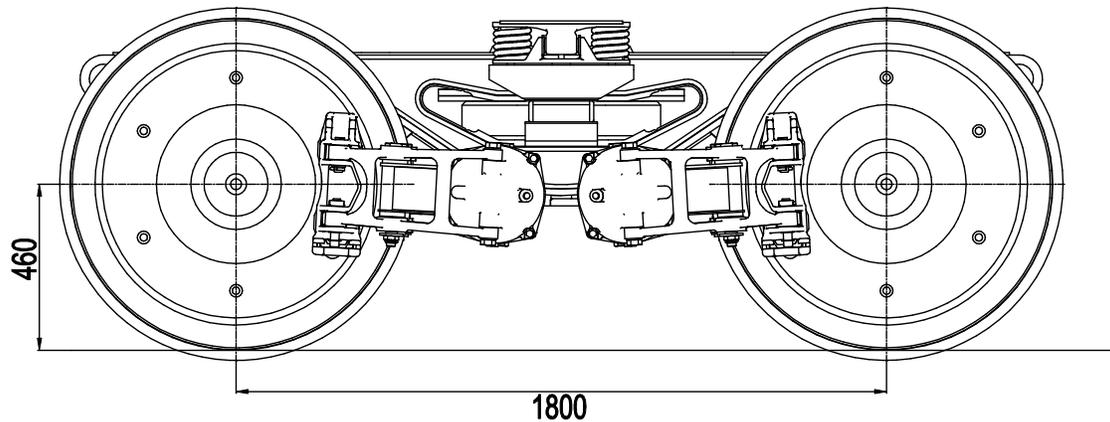


Abbildung 1.2: Seitenansicht LEILA-DG

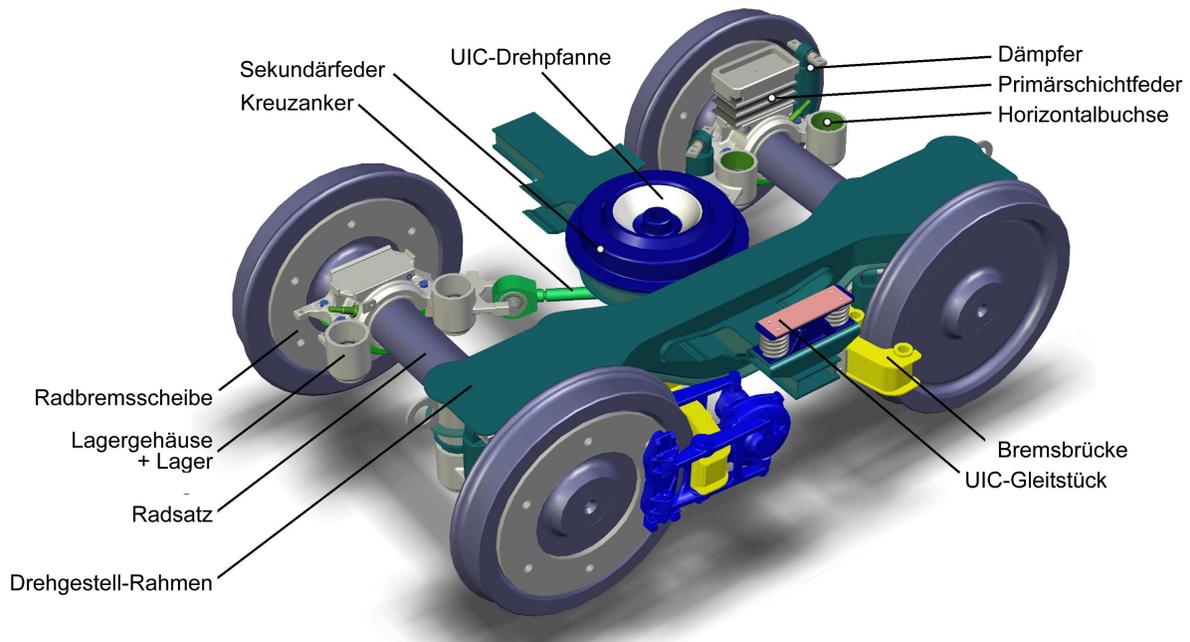


Abbildung 1.3: Übersicht relevanter Komponenten

1.2.2 Rad/Schiene-Kontakt

Der Rad/Schiene-Kontakt wird durch das bewährte nichtlineare Rad/Schiene-Koppelement KE21 (KIK U. PIOTROWSKI [19, 26]) wiedergegeben. Die Abbildung 1.4 zeigt die hierfür vorzusehenden Koordinatensysteme und Abmaße.

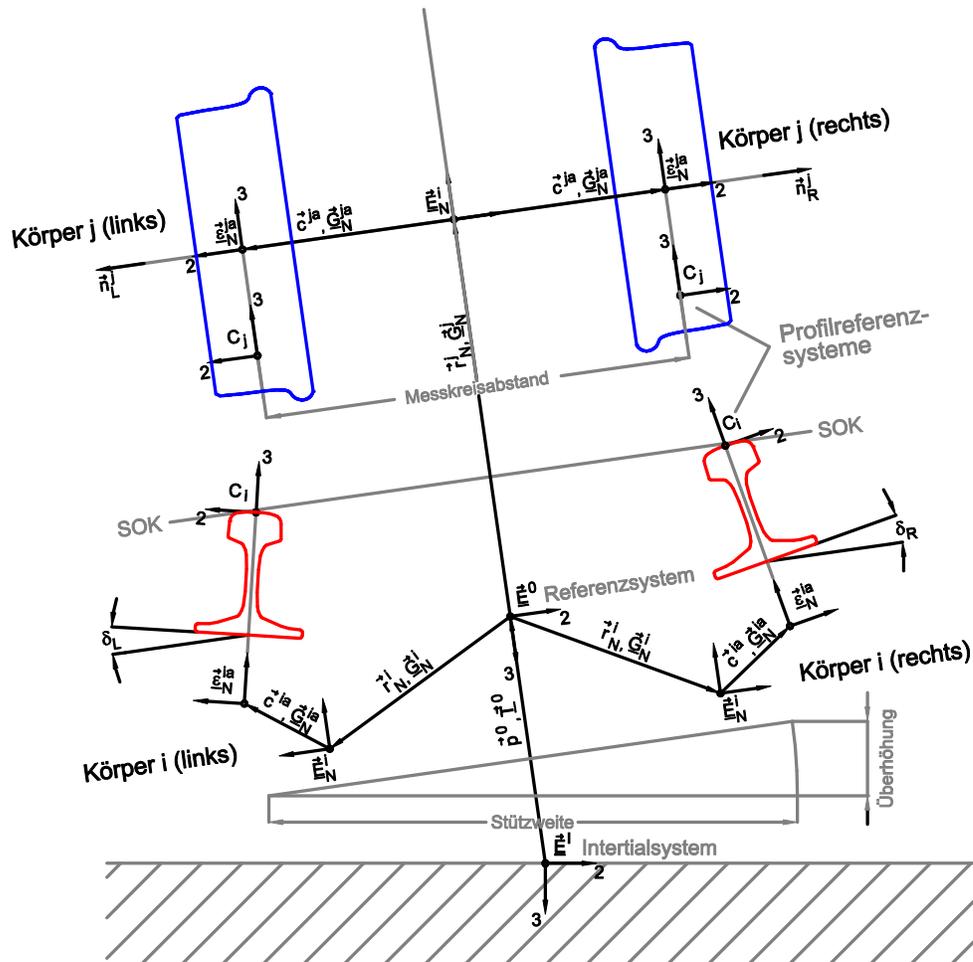


Abbildung 1.4: Koordinatensysteme zur Beschreibung des Rad/Schiene-Kontakts

Die schienenseitigen Koppelpunkte werden in der Nennspurweite von 1435 mm zueinander höhengleich angeordnet. Dafür werden Schienenprofilaten verwendet, deren Koordinatenursprung auf eben diese Standardspurweite angeglichen ist und alle zu berücksichtigenden Größen wie Einbauneigung, Spurweite, etc. bereits beinhalten. Für die Schienenprofile stehen dabei neben dem international gebräuchlichen Standardprofil UIC 60 [29] in variabler Einbauneigung auch aufbereitete Messwerte realer Schienenprofile mit entsprechendem Verschleisszustand zur Verfügung.

Die Koppелеlementhilfsbasen $\bar{\epsilon}^{ja}$ der Radprofile werden gemäß Abbildung 1.4 im Messkreisabstand von 1500 mm zueinander auf der Radsatzzwele angeordnet. Das Neuprofil wird nach BVV [2, S.21, Fig.1] durch das Standardprofil S1002 in der Form DIN 5573-E1424-135-1360 [24] mit reduziertem Spurmaß von 1424 mm gebildet.

Die Abbildungen 1.5, 1.6 und 1.7 zeigen die Charakteristik dieser Profilverpaarung in Form von Äquivalenter Konizität sowie der Lage und Ausbreitung der Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene.

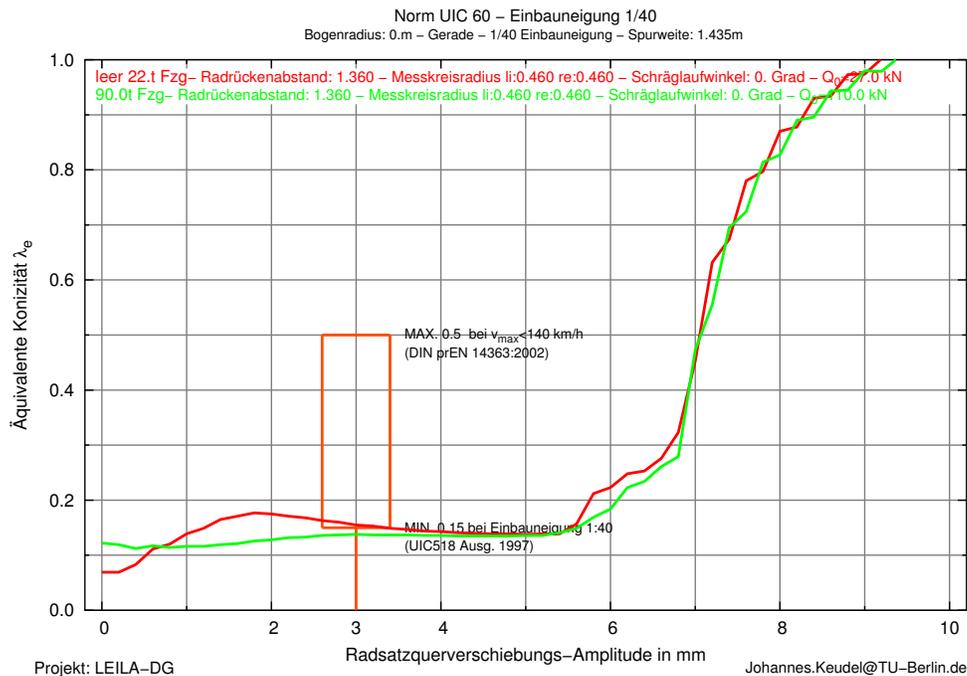


Abbildung 1.5: Äquivalente Konizität für die Profilverpaarung S1002 (E1424) auf UIC 60 1/40

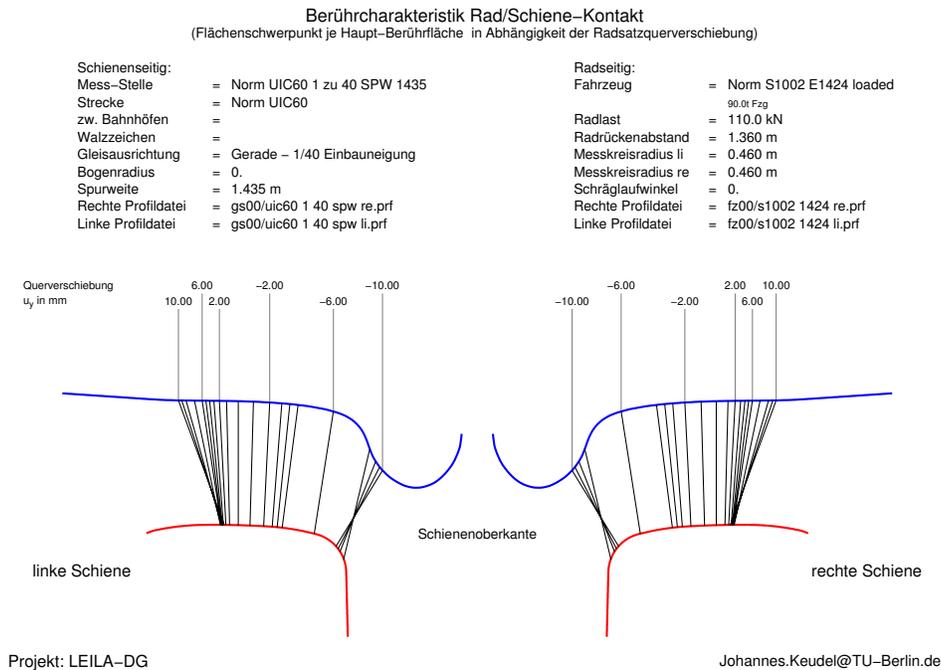


Abbildung 1.6: Berührungsmittelpunkte für die Profilpaarung S1002 (E1424) auf UIC 60 1/40

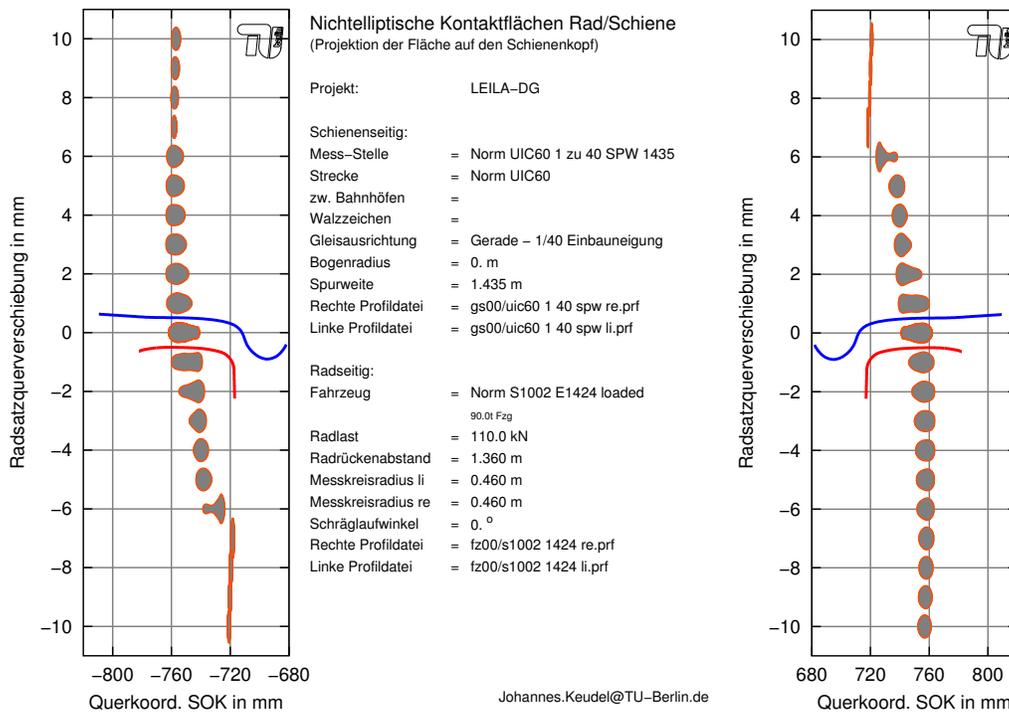


Abbildung 1.7: Exemplarisch: Nichtelliptische Kontaktflächen für die Profilpaarung S1002 auf UIC 60

Die Schienenprofile lassen sich je nach Zweck der jeweiligen Berechnung optional entweder starr mit dem Referenzsystem verbinden oder aber in eine elastische Gleislagerung einbetten. Dabei ist die Berücksichtigung einer elastischen Schienenlagerung grundsätzlich mit einer Vielzahl von festzulegenden Eingabeparametern verbunden (z.B. KNOTHE [20], GERSTBERGER [10, 11]). Um dennoch realitätsnahe und objektiv belastbare Daten für die Gleislagerung zu verwenden, wird exemplarisch die im Rahmen des MANCHESTER BENCHMARK [16] publizierte Lagerung angewendet (s. Abbildung 1.8).

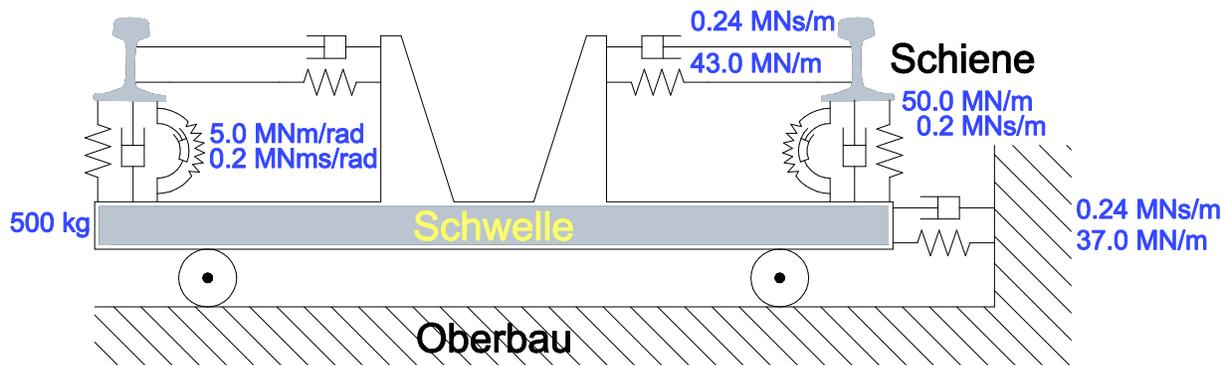


Abbildung 1.8: Gleislagerung nach MANCHESTER BENCHMARK [16]

Es sei aber betont, dass die unterschiedlichsten real auftretenden Bettungseigenschaften von Oberbau und Untergrund auch deutliche Unterschiede hinsichtlich des Laufverhaltens respektive den Belastungszuständen erwarten lassen.

1.2.3 Primärfesselung und beteiligte Körper

1.2.3.1 Radsatz, Lager und Lagergehäuse

Die Radsätze sowie die Radsatzlagergehäuse werden jeweils als separate MKS-Körper ausgebildet, die auf Höhe des Lagersitzes miteinander gekoppelt sind. Die reale Anbindung durch die Zylinderrollenlager wird durch Koppellemente vom Typ KE13 wiedergegeben. Diese werden so konfiguriert, dass Radsatz und Lagergehäuse zueinander einzig der Drehfreiheitsgrad um die Lateralachse verbleibt.

Die fahrzeugdynamisch relevanten Kennwerte von Radsatz und Radsatzlagergehäuse sowie die jeweilige Quellenangabe dieser Daten sind in der Tabelle 1.1 aufgelistet. Eine Aufgliederung, wie sich diese Massen sowie der zugehörigen Trägheitsmomente zusammensetzen, findet sich in den Tabellen 2.1 (Seite 39) und 2.2 (Seite 40).

Radsatz (Neuzustand) inklusive Anbauteile wie Bremscheiben aufgepresste Lageranteile etc. aber OHNE Radsatzlagergehäuse				
Masse	m=		1264 kg	
Trägheiten in Bezug auf Schwerpunkt	x	y	z	
	x	640		kg*m ²
	y		106	kg*m ²
	z			640 kg*m ²
Schwerpunkt neuer RS (Höhe über SOK)	h=	460 mm		(aufgrund Symmetrie zur Rollachse)
Radsatzlagergehäuse inkl. Schichtfeder und Anbauteile wie Lageraußenring, Dichtungen, Buchsenfeder, Dämpfer				
Masse	m=		151 kg	
Trägheiten in Bezug auf Schwerpunkt	x	y	z	
	x	3		kg*m ²
	y		6	kg*m ²
	z			6 kg*m ²
Schwerpunkt in Bezug auf das Lagerzentrum in der Rollachse (in Koord.-EIN MEDYNA s. Zeichnung)	sx =	36 mm	positiv = nach DG-Mitte	4-Seitiges Dokument "Bestimmung Massenträgheiten...", FAG FIASWE-LBHD, Schubert, 15.03.2005
	sy =	-58 mm	positiv = nach DG-außen	
	sz =	-14 mm	positiv = nach unten	

Tabelle 1.1: Kennwerte - Radsatz (inklusive Anbauteile wie Bremscheiben, Lagerteile) sowie Lagergehäuse (inklusive mitbewegte Anbauteile)

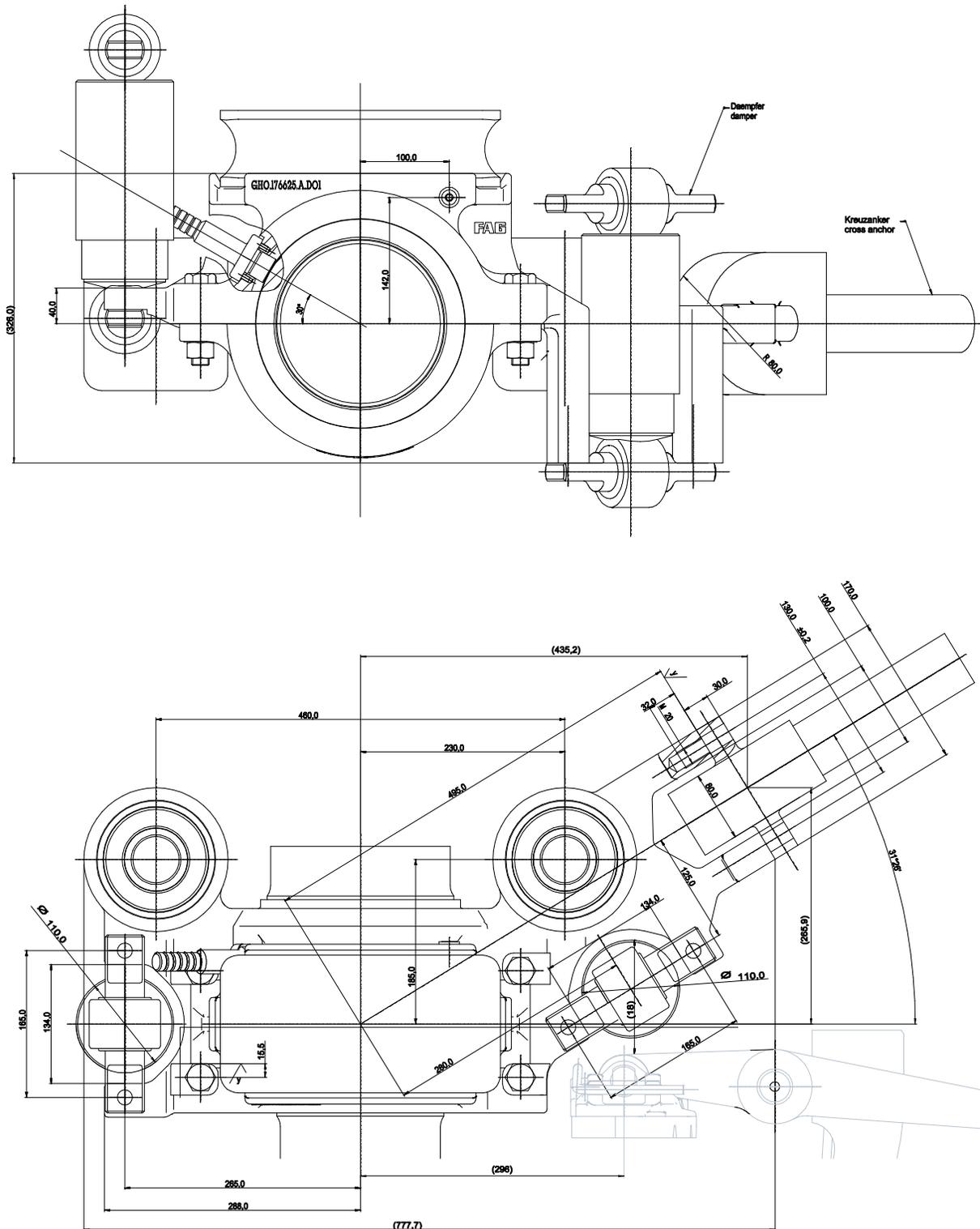


Abbildung 1.9: Radsatzlagergehäuse und Primärfesselungskomponenten (FAG)

1.2.3.2 Übersicht der Primärfesselungskomponenten

Die Komponenten der Primärfesselung sind in den 1.9 und Abbildungen 1.10 kenntlich gemacht. Dabei werden die je Lagergehäuse mehrfach auftretenden Komponenten Horizontalbuchse und Dämpfer mit der Kennzeichnung „dgi“ für „drehgestellinnen“ bzw. „dga“ für „drehgestellaußen“ entsprechend der Abbildung 1.10 eindeutig unterschieden.

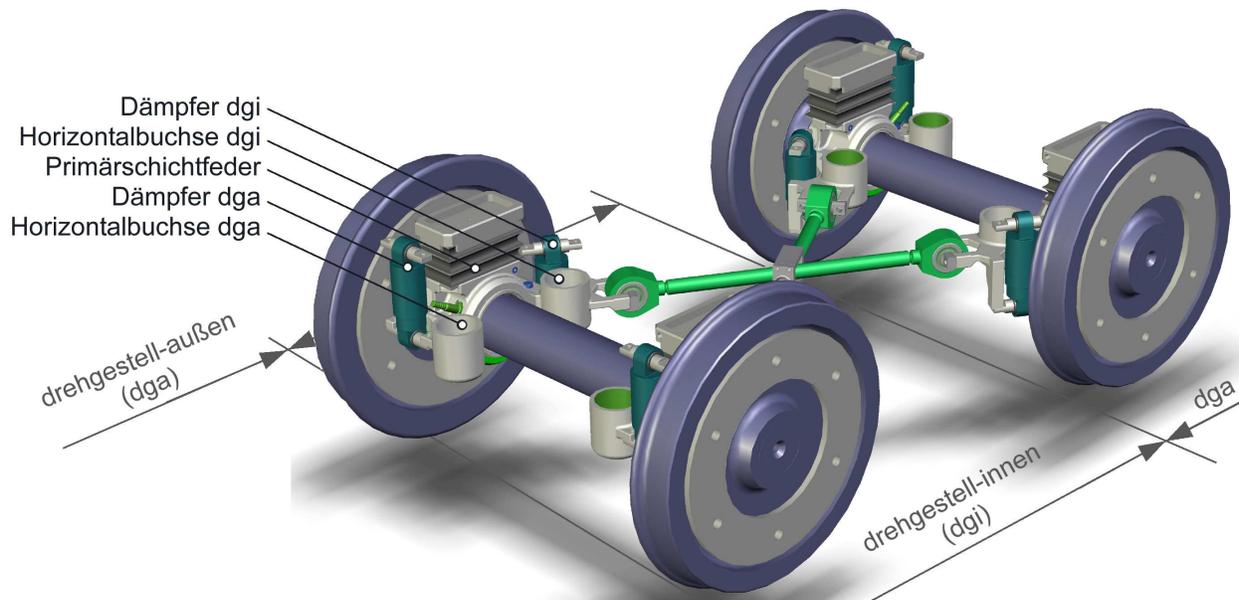


Abbildung 1.10: Komponenten der Primärfesselung

1.2.3.3 Lastabhängigkeit

Da ein Güterwagen im Gegensatz zu Personenzugfahrzeugen in aller Regel ein Vielfaches seines Eigengewichts als Ladegut aufnehmen kann, ergibt sich ein erheblicher Masseunterschied zwischen leerem und beladenem Fahrzeug. Diesem Unterschied muss durch eine entsprechende Fahrwerkabstimmung begegnet werden und erfordert zumindest eine progressive Steifigkeitskennlinie insbesondere in vertikaler Wirkrichtung. Unter Gesichtspunkten einer unabhängig vom Beladungszustand konstant bleibenden Laufgüte bzw. Komfortziffer im Fahrzeugaufbau ist zudem eine lastabhängige Vertikaldämpfung angebracht.

In Hinblick auf die Simulation bedeutet dies: Während es für die Fragestellung der grundsätzlichen Prinzipfindung von SCHIRMER [15] genügte, eine je Beladungszustand als linear zu simulierende Steifigkeit anzusetzen, ist es vor dem Hintergrund des erreichten Detaillierungsgrads des LEILA-DG nunmehr sinnvoll, die verfügbare nichtlineare Charakteristik umfassend in der Simulationssoftware *MEDYNA* zu hinterlegen. Die Vorteile dieses Vorgehens gehen über die Bestimmung der statischen Anfangslast im MKS-Modell hinaus und schließen die dynamische Anpassung beispielsweise während der Bogeneinfahrten oder dem Passieren einer Gleisverwindung ebenso ein wie die Bildung synthetischer Lastkollektive je Komponente oder ein Anschlagen bei Erreichen des z_3 -Maßes sowie eine totale Entlastung bei extremen Fahrsituationen.

Die vollständigen Kennlinien der Primärfesselung sind in einem sogenannten Koppellement (Fortran-Modul) in die Simulationssoftware *MEDYNA* implementiert, welches die Kräfte und Momente in mehrdimensionaler Abhängigkeit der Auslenkungsrichtungen (Lastabhängigkeit) wiedergibt.

1.2.3.4 Vertikalschichtfeder

Die Vertikalschichtfeder dominiert die vertikale Charakteristik der Primärfesselung, weist aber auch horizontal einen gewissen Steifigkeitsanteil auf.

Die seitens des Projektpartners FREUDENBERG verfügbaren Steifigkeitskennwerte der Vertikalschichtfeder sind in der Tabelle 1.2 aufgelistet. Sie liegen teilweise in Form von Fittingfunktionen vor, die aus Messwerten gewonnen wurden. Andererseits bestehen sie aus Steifigkeitsangaben für das Leerfahrzeug (22t nach SCHIRMER [15]) sowie einem entsprechenden Versteifungsfaktor für das 90t-Fahrzeug. Die lastabhängige horizontale Versteifung vollzieht sich dabei nach Angabe des Projektpartners FREUDENBERG in guter Näherung linear.

Weiterhin ist nach Auskunft von FREUDENBERG davon auszugehen, dass die Gummielemente während des realen Betriebs infolge von Alterung und Temperatureinflüssen härter werden (und erst durch einen einsetzenden Zersetzungsprozess am Ende der Lebensdauer des Gummis wieder weichere Eigenschaften annehmen). Während die hier wiedergegebene Gummi-Nenncharakteristik also den z.B. in Hinblick auf die Fahrstabilität relevanten Fall geringster Steifigkeit beinhaltet, wird für die maximale Gummi-Versteifung infolge Alterung und Witterung z.B. in Bezug auf den Nachweis der Entgleisungssicherheit der seitens FREUDENBERG empfohlene Faktor 2 angenommen, um einen Nachweis „zur sicheren Seite“ zu führen.

Vertikalschichtfeder			
translatorisch:			
Längssteifigkeit	cx	335 000 N/m leer	Faktor für belad. 0.8 ... 1.2 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
Quersteifigkeit	cy	335 000 N/m leer	Faktor für belad. 0.8 ... 1.2 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
Vertikalsteifigkeit	cz	ergibt sich aus Polynomverlauf der Vertikalkraft: aktualisierte Funktion analog Folie Freudenberg vom 02.09.2003	
Vertikalkraft	Fz	0.1035 x ⁴	Exceldatenblatt "leila_bis_120kN..." Email Hr. Pfaff 15.12.2004
		+ -4.1956 x ³	
		+ 86.3460 x ²	
		+ 2 097.5000 x ¹	
		+ 0.0000 x ⁰	
Längsdämpfung	dx	0 Ns/m	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003 (Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Querdämpfung	dy	0 Ns/m	
Vertikaldämpfung	dz	0 Ns/m	
rotatorisch:			
Wanksteifigkeit (um longitudinal)	cx_rot	70 Nm/°	Faktor für belad. 1.0 ... 1.2 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		4 011 Nm/rad	
Nicksteifigkeit (um lateral)	cy_rot	353 Nm/°	Faktor für belad. 1.0 ... 1.2 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		20 225 Nm/rad	
Giersteifigkeit (um vertikal)	cz_rot	22 Nm/°	Faktor für belad. 1.0 ... 1.2 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		1 261 Nm/rad	
Wankdämpfung	dx_rot	0 Nms/rad	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003 (Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Nickdämpfung	dy_rot	0 Nms/rad	
Gierdämpfung	dz_rot	0 Nms/rad	

Tabelle 1.2: Kennwerte - Primärfesselung Vertikal-Schichtfeder

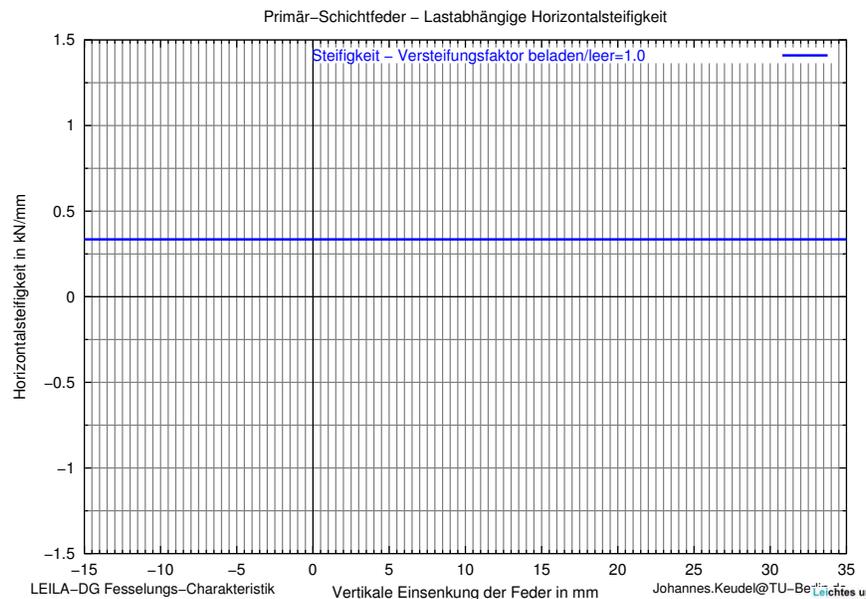
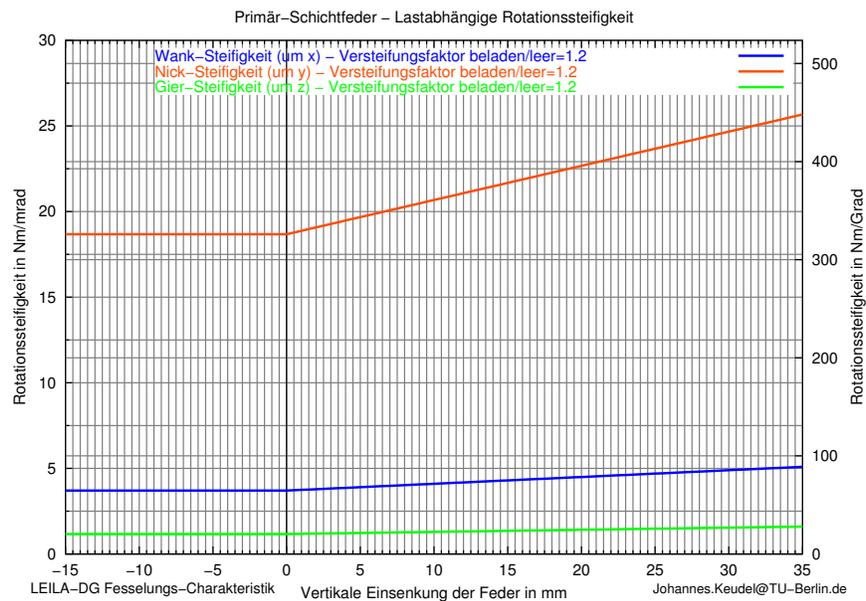
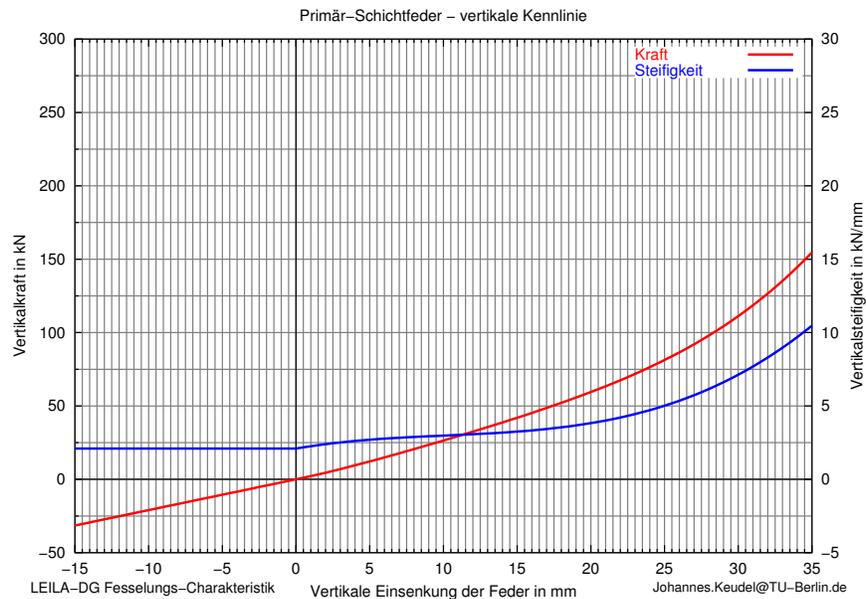


Abbildung 1.11: Charakteristik der Primärschichtfeder

1.2.3.5 Horizontalbuchse

Die Horizontalbuchse dominiert die horizontale (longitudinale und laterale) Charakteristik, liefert aber auch einen Anteil zur Vertikalsteifigkeit. Zudem sind der Horizontalbuchse wie in der Abbildung 1.12 angetragen folgende Sicherheitsanschläge zwischen Radsatzlagergehäuse und Drehgestellrahmen überlagert:

- Sicherheit gegen Überlast (vertikal, z_3 -Maß = 32 mm gegenüber gänzlich unbelastetem Zustand)
- Sicherheit gegen übermäßige Horizontalverschiebungen ($\sqrt{s_x^2 + s_y^2} = 10 \text{ mm}$)
- Abhebesicherung bei Anheben des Fahrzeugs ($s_z = -10 \text{ mm}$ gegenüber gänzlich unbelastetem Zustand)

Buchse			
translatorisch:			
Längssteifigkeit	cx	2 580 000 N/m leer	Faktor für belad. 1.2 ... 1.4 Fax mit Datum 21.01.2005: Horizontalsteifigkeit Leerfahrzeug - Faktor für beladen Email 04.09.2003
Quersteifigkeit	cy	2 580 000 N/m leer	Faktor für belad. 1.2 ... 1.4 Fax mit Datum 21.01.2005: Horizontalsteifigkeit Leerfahrzeug - Faktor für beladen Email 04.09.2003
Vertikalkraft	Fz	0.0021 x ⁴	Exceldatenblatt "leila_bis_120kN..." Email Hr. Pfaff 15.12.2004
	+	0.5175 x ³	
	+	-26.2870 x ²	
	+	824.9700 x ¹	
	+	0.0000 x ⁰	
Längsdämpfung	dx	0 Ns/m	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003 (Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Querdämpfung	dy	0 Ns/m	
Vertikaldämpfung	dz	0 Ns/m	
rotatorisch:			
Wanksteifigkeit (um longitudinal)	cx_rot	15 Nm/°	Faktor für belad. 1.2 ... 1.4 Freudenberg Email vom 04.09.2003
		859 Nm/rad	
Nicksteifigkeit (um lateral)	cy_rot	15 Nm/°	Faktor für belad. 1.2 ... 1.4 Freudenberg Email vom 04.09.2003
		859 Nm/rad	
Giersteifigkeit (um vertikal)	cz_rot	23 Nm/°	Faktor für belad. 1.2 ... 1.4 Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		1 289 Nm/rad	
Wankdämpfung	dx_rot	0 Nms/rad	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003 (Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Nickdämpfung	dy_rot	0 Nms/rad	
Gierdämpfung	dz_rot	0 Nms/rad	

Tabelle 1.3: Kennwerte - Primärfesselung Horizontalbuchse

Die Kennwerte der Primärbuchse sind in der Tabelle 1.3 wiedergegeben, die implementierte Nenn-Charakteristik inklusive Sicherheitsanschlägen findet sich in der Abbildung 1.13.

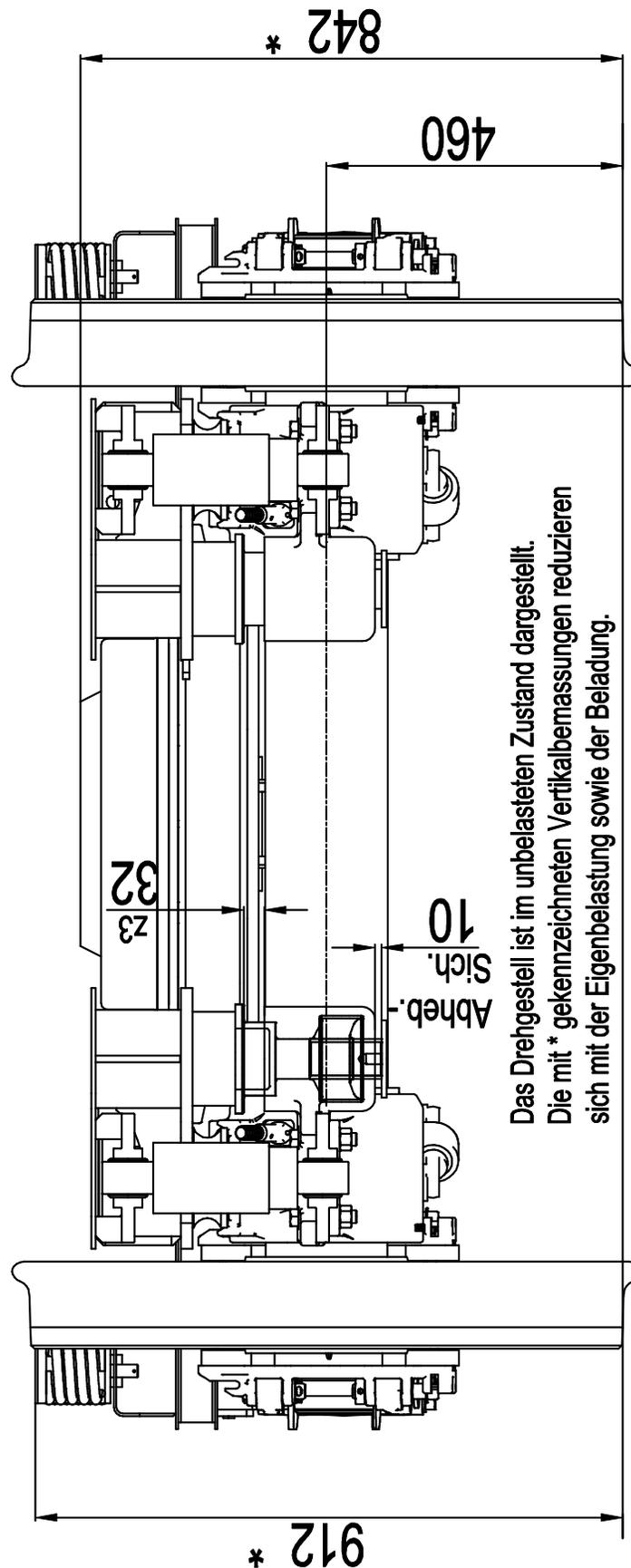


Abbildung 1.12: Stirnansicht LEILA-DG inkl. z₃-Maß sowie Abhebesicherung

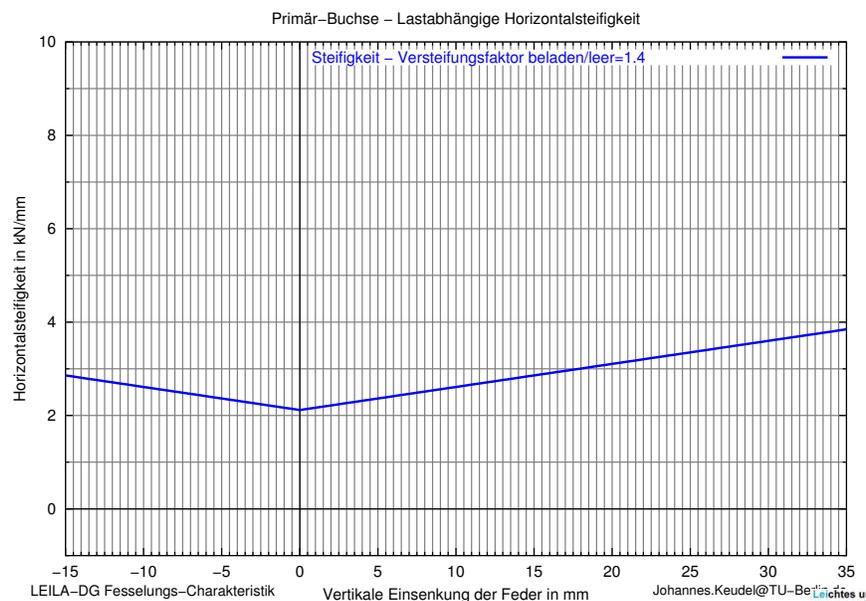
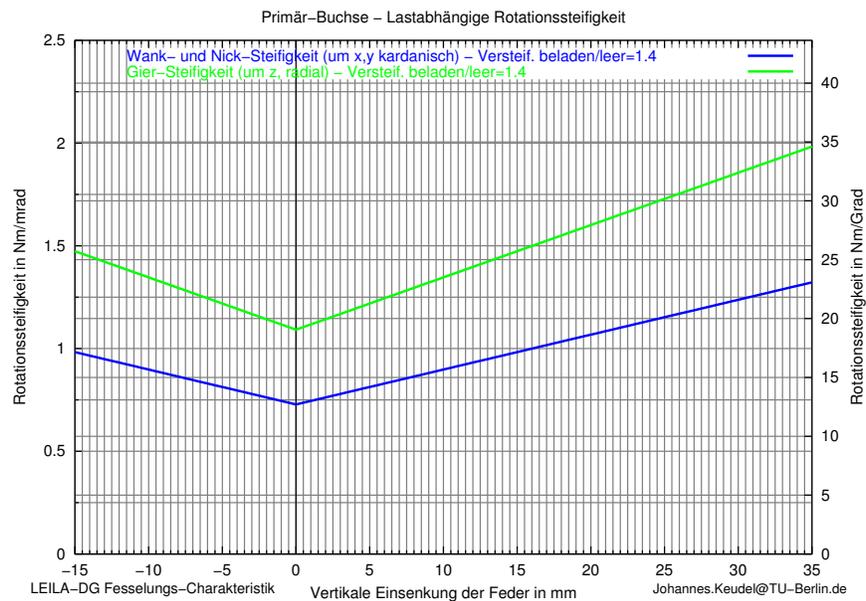
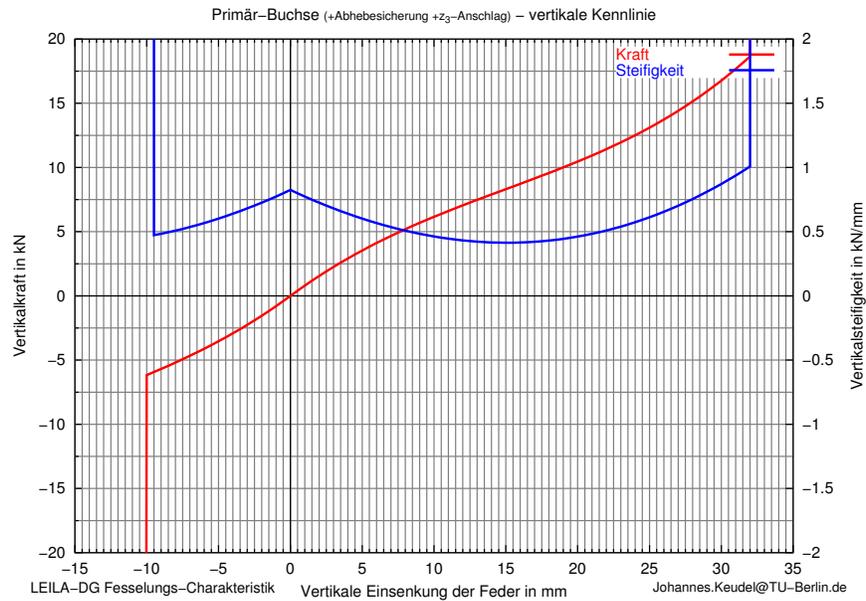


Abbildung 1.13: Charakteristik der Primärbuchse



1.2.3.6 Dämpfer

Grundsätzlich existieren Entwicklungen hydraulischer Dämpfer, die die im Abschnitt 1.2.3.3 erläuterten Erfordernisse der Lastabhängigkeit erfüllen. Dabei lässt sich eine veränderliche Dämpfercharakteristik am einfachsten durch Öl-Bypässe in Form von Nuten realisieren, die in Abhängigkeit der Einsenkung geöffnet bzw. geschlossen werden².

Zwei Zielkonflikte stehen beim LEILA-DG dieser vergleichsweise einfachen technischen Lösung entgegen:

1. Die Innenlagerung bei LEILA-DG und die gleichzeitige Forderung nach migrationsfähiger Einhaltung der Fahrzeugbegrenzungslinie bei Verwendung bisheriger Fahrzeugaufbauten erfordert eine vergleichsweise große Vertikalsteifigkeit und führt so zu geringen Federwegen.

Bei geringen Einsenkwegen kann eine zuverlässige Lastabhängigkeit aufgrund der erforderlichen Nutgeometrie sowie den üblichen Montage-Toleranzen im Güterwagensektor nicht gewährleistet werden.

2. Infolge der Temperatur-, Alterungs- sowie Vorlastabhängigkeit der Gummieigenschaften, kann einem Beladungszustand nicht eindeutig sowie reproduzierbar eine bestimmte Einsenkung zugeordnet werden - und umgekehrt.

Vor dem Hintergrund von anzunehmenden Versteifungseffekten bis zur Verdopplung der Nominalsteifigkeit ist eine wegabhängige Dämpfercharakteristik nicht sinnvoll.

Es gilt daher, einen Kompromiss zu finden, der sich am empfohlenen Wertebereich für den Dämpfungsgrad D der Tauchbewegung des Wagenkastens orientiert:

KNOTHE [21]:

$$0.1 \leq D \leq 0.3 \quad (1.1)$$

sowie HANNEFORTH U. FISCHER [13]:

$$0.2 \leq D \leq 0.3 \quad (1.2)$$

²Eine elektrische Ventil-Ansteuerung der Bypässe scheint aus Kostengründen, Energiebedarf wie auch Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit zunächst nicht sinnvoll, obwohl mit einer ohnehin vorhandenen elektronischen Lasterfassung in Hinblick auf die Zukunft alle Voraussetzungen dazu gegeben sind.

Der Prinzipentscheid über das zu realisierende Fahrwerkkonzept beim LEILA-DG [15] ergab aus Grundsatzüberlegungen heraus zunächst folgende linear formulierte Dämpfungswerte je Radaufstand:

Leerfahrzeug: $d = 50 \text{ Ns/m}$

90t-Fahrzeug: $d = 130 \text{ Ns/m}$

Einstellung für **Fa. Freudenberg, Velten**
Leila
Vertikaldämpfer
ZF Sachs Zeichn. Nr. 42 1300 000 XXX
Index 0



v (m/s)	Einstellung 7280023a		Innerhalb der Nuten	
	Zug (N)	Dr. (N)	Zug (N)	Dr. (N)
0.05	1760	-2530	490	-950
0.1	6360	-6040	1600	-2860
0.2	10780	-11100	5400	-7770
0.3	14510	-14910	8830	-11160
0.5	20700	-22880	14830	-16490

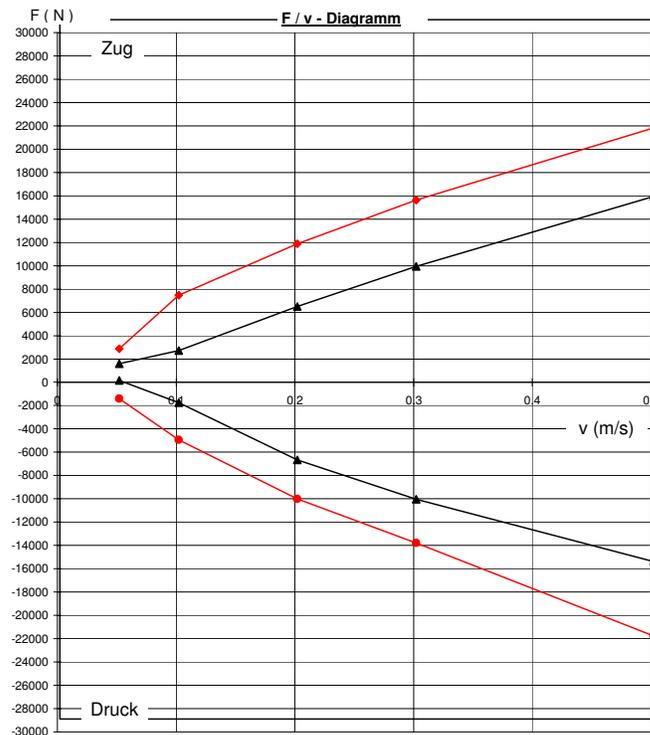


Abbildung 1.14: Realisierbare Dämpferkennlinie nach ZF SACHS

Auf dieser Basis wurde seitens ZF SACHS [27] die in der Abbildung 1.14 wiedergegebene Kennlinie als herstellbare Charakteristik zur Realisierung vorgeschlagen. Dabei bezieht sich diese Kennlinie noch auf den seinerzeit vorgesehenen 1 Dämpfer je Primärfesselung, während beim aktuellen Entwicklungsstand 2 Dämpfer je Primärfesselung vorgesehen sind. Der nachfolgenden Untersuchung liegt dabei die rote Kennlinie zur Grundlage (während die schwarze Kennung sich auf den „geschwächten“ Bereich innerhalb von

Bypass-Nuten bezieht). Zu beachten ist neben der Nichtlinearität das unterschiedliche Kraftniveau zwischen Zug- und Druckbelastung.

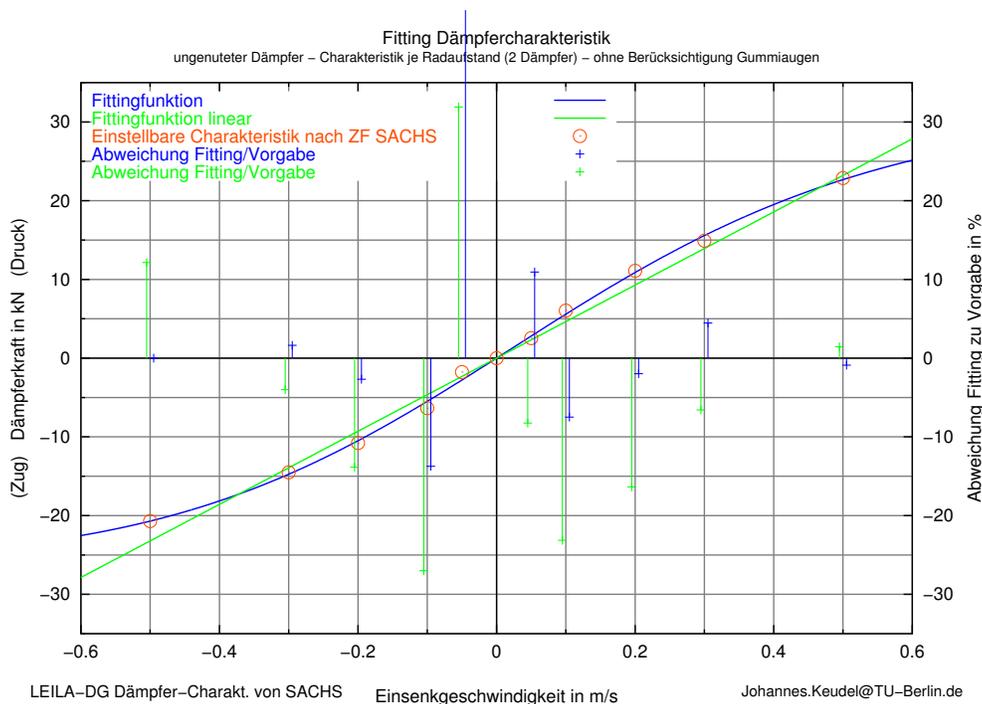


Abbildung 1.15: Fitting der Dämpferkraft

Um die Kennlinie in die MKS-Simulation integrieren zu können, bedarf es einer (empirischen) Fittingfunktion, mittels der die Dämpferkennlinie vollständig und kontinuierlich mathematisch beschrieben werden kann. Die Abbildung 1.15 zeigt neben den von ZF SACHS angegebenen Stützpunkten der Kennlinie aus der Abbildung 1.14 sowohl eine lineare Ausgleichsfunktion als auch den empirischen Ansatz einer Kombination von Exponentialfunktionen. Wie die Abbildung 1.15 zeigt, kommt die nichtlineare Nachbildung der Kennlinie insbesondere bei kleineren Relativgeschwindigkeiten den Vorgabepunkten deutlich näher, als dies bei der Linearisierung der Fall ist.

Die nichtlineare Fittingfunktion nach Abbildung 1.15 wird nachfolgend als Referenzkennlinie herangezogen und eine Variation der Dämpfung durch einen Vorfaktor zu dieser Funktion realisiert.

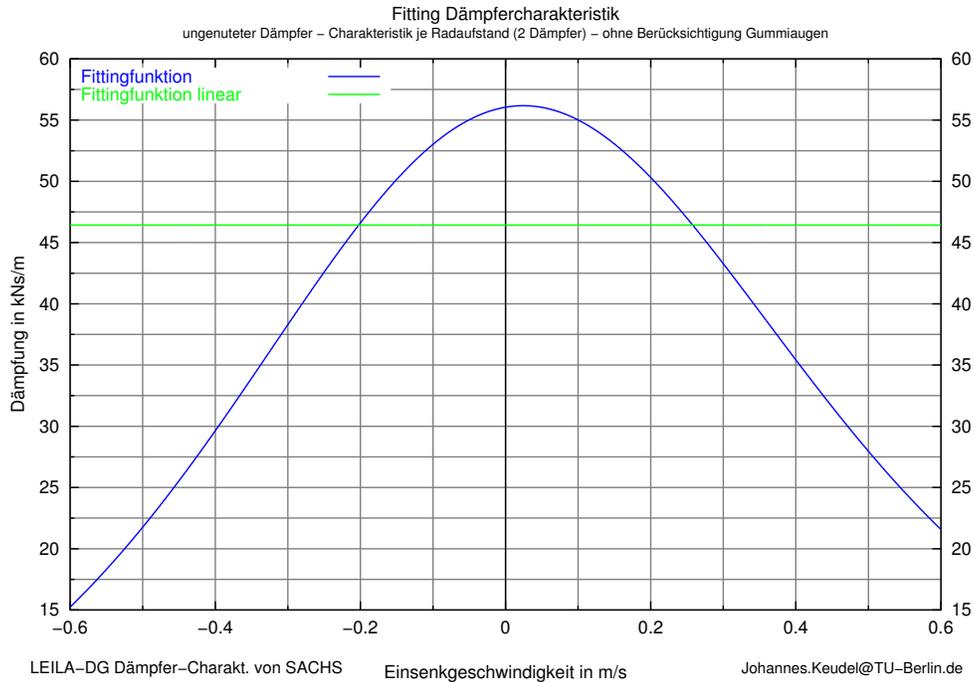


Abbildung 1.16: Fitting der Dämpfung

Um mit der Skalierung der Dämpfercharakteristik einen möglichst guten Kompromiss zu erreichen, wird an einem reinen Vertikalmodell das Abklingverhalten (Abbildung 1.17) respektive das Dämpfungsmaß (Abbildung 1.18) bestimmt.

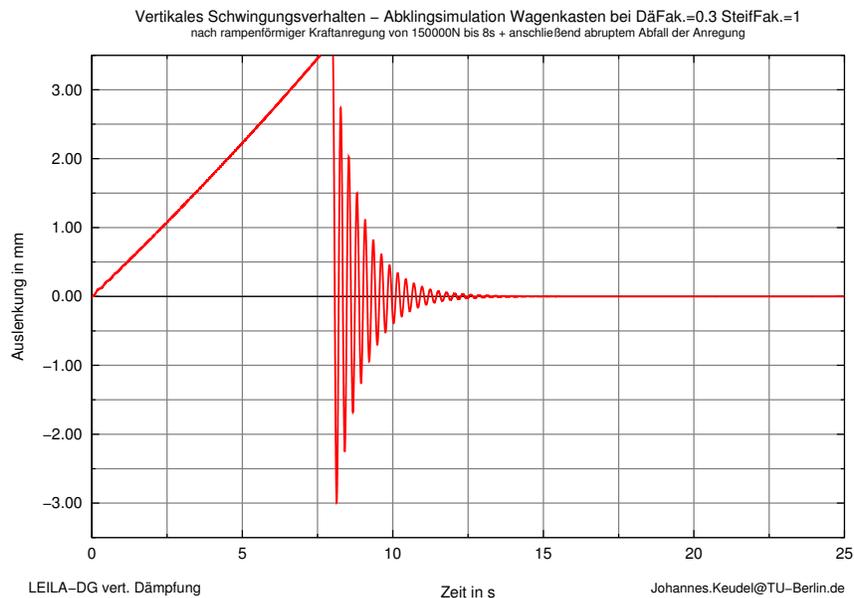


Abbildung 1.17: Exemplarisch: vertikales Abklingverhalten des Wagenkastens

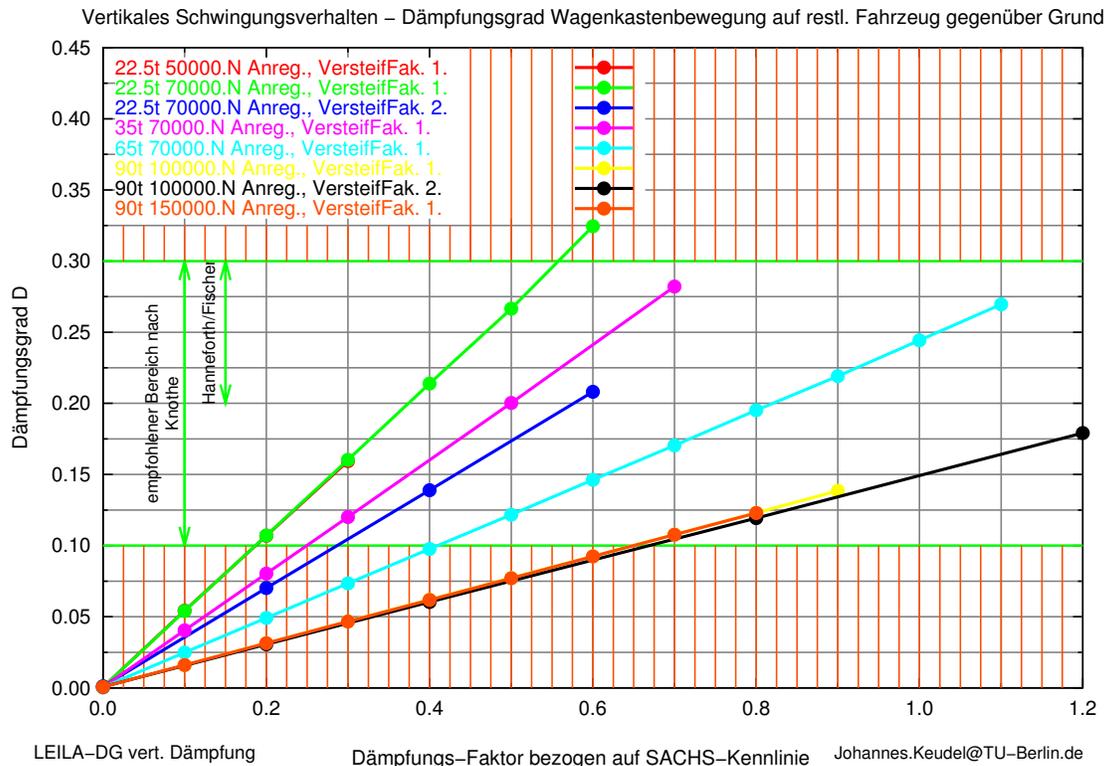


Abbildung 1.18: Dämpfungsgrad des Wagenkasten-Tauchens

Wie die Abbildung 1.18 noch einmal unterstreicht, wäre eine lastabhängige Dämpfung notwendig, um unabhängig vom Beladungszustand einen konstanten Dämpfungsgrad erreichen zu können. Um als Kompromiss mit einer einzigen diskreten Kennlinie alle Fahrzustände abzudecken, muss neben dem Beladungszustand auch die Gummiversteifung infolge Alterung und Witterung berücksichtigt werden: Wie die Abbildung 1.18 zeigt, hat die Gummi-Versteifung für den beladenen Wagen kaum einen Einfluss auf das Dämpfungsmaß, während sich beim leeren Wagen deutliche Unterschiede ergeben. Als Kompromiss erscheint der Skalierungsfaktor 0.6 geeignet, bei dem der leere Wagen mit Nenngummisteifigkeit etwas mehr und der beladene Wagen etwas weniger als nach KNOTHE [21]: empfohlen gedämpft wird. Während alle Teilbeladungszustände dabei schon im empfohlenen Bereich liegen, bewegt sich auch der Leerwagen mit zunehmender Gummi-Versteifung in den „grünen“ Bereich.

1.2.3.7 Befestigungselemente, Dämpferaugen

Neben der eigentlichen dämpfenden Funktion der Hydraulikkomponenten haben weiterhin auch die Befestigungselemente des Dämpfers z.B. in Form von „*Gummi*augen“ durch ihre Elastizität einen Einfluss auf die Kraft/Weg-Kennlinie des vollständigen Dämpfers.

Um trotz der geringen Federwege und der in Serie befindlichen Steifigkeiten der Dämpferaugen ein gutes Ansprechen der Dämpfer zu gewährleisten, sollten die Dämpferaugen so steif wie seitens des Herstellers ZF SACHS [27] gegenüber der Lebensdauer vertretbar ausgeführt werden.

Die Kennlinie des Dämpfers inklusive der in Serie befindlichen Steifigkeiten lässt sich im MKS-Modell aus mathematischen Gründen nur dann in einem einzigen Koppellement wiedergeben, wenn die Dämpferkennlinie linear angenommen wird. Soll hingegen die nichtlineare Dämpfungseigenschaft eingebunden werden, müssen die Dämpferaugen entweder als starre Befestigungen modelliert werden, oder aber der Dämpfer rechenintensiv in mehrere massebehaftete Simulationskörper unterteilt werden. In Hinblick auf die vorliegende Untersuchung ist die Implementierung der nichtlinearen Kennlinie notwendig (Abb. 1.15), während eine Masseunterteilung des Dämpfers aufgrund der immensen Gewichtsdiskrepanz zu den anderen Baugruppen numerische Probleme bzw. Rechenzeiterweiterungen erwarten lässt. Daher wird im Rahmen dieser Untersuchung die nichtlineare Kennlinie mit starren Dämpferaugen im MKS-Modell implementiert.

1.2.4 Kreuzanker

Die geometrischen Anlenkpunkte des Kreuzankers sind in der Abbildung 1.9 ersichtlich. Die Kennwerte des aktuellen Konstruktionsstands sind in der Tabelle 1.4 zusammengetragen.

Kreuzanker																					
Masse	m= 34.5 kg																				
Trägheiten in Bezug auf Schwerpunkt	<table border="1"> <tr> <th></th> <th>x</th> <th>y</th> <th>z</th> <th></th> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.10</td> <td></td> <td></td> <td>kg*m²</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0</td> <td>6.9</td> <td></td> <td>kg*m²</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>6.9</td> <td>kg*m²</td> </tr> </table>		x	y	z		x	0.10			kg*m ²	y	0	6.9		kg*m ²	z	0	0	6.9	kg*m ²
	x	y	z																		
x	0.10			kg*m ²																	
y	0	6.9		kg*m ²																	
z	0	0	6.9	kg*m ²																	
Schwerpunkt (Höhe über SOK)	h= 460 mm																				
translatorisch:																					
Längssteifigkeit je Kreuzanker	cx 32 500 000 N/m																				
Längssteifigkeit je Anlenkpunkt	cx 65 000 000 N/m																				
Quersteifigkeit je Anlenkpunkt	cy 75 000 000 N/m																				
Vertikalsteifigkeit je Anlenkpunkt	cz 75 000 000 N/m																				
rotatorisch:																					
Wanksteifigkeit (um longitudinal)	cx_rot 60 Nm/° 3 438 Nm/rad																				
Nicksteifigkeit (um lateral)	cy_rot 60 Nm/° 3 438 Nm/rad																				
Giersteifigkeit (um vertikal)	cz_rot 60 Nm/° 3 438 Nm/rad																				

Lagergehäusekonstruktion: Kraftangriff in Rollachsenhöhe

Folie Freudenberg vom 02.09.2003

Freudenberg Herr Schnaibel telefonisch am 19.09.2003

Freudenberg Herr Schnaibel telefonisch am 19.09.2003

Freudenberg, Herr Schnaibel telefonisch am 19.09.2003 :
Ergebnis eines Rechenprogramms seien 600 Nm/°
In der Realität könnten die Werte aber deutlich darunter ausfallen
Daher angesetzt: 60 Nm/°

Tabelle 1.4: Kennwerte - Kreuzanker

1.2.5 Drehgestellrahmen

Es ist davon auszugehen, dass der reale Drehgestellrahmen eine gewisse Biege- und Torsionselastizität aufweist. Bei genauer Kenntnis der Biegeeigenformen des Rahmens inklusiver seiner Anbauteile (Modalanalyse FEM-Modell) ist die Berücksichtigung elastischer Bauteileigenschaften in *MEDYNA* grundsätzlich möglich. Ein solches Vorgehen ist aber nur für sehr detaillierte Zielsetzungen sinnvoll und im Aufwand vertretbar. Insbesondere vor dem Hintergrund der Simulation der entgleisungskritischen Fahrt durch eine Gleisverwindung liegt zudem die Berechnung auf Basis eines starren Rahmens „auf der sicheren Seite“. Daher wird zunächst auf die Einbindung elastischer Rahmeneigenschaften verzichtet.

Die Tabelle 1.5 gibt die simulations-relevanten Kennwerte des Drehgestellrahmens inklusive der mit ihm fest verbundenen Anbauteile wieder.

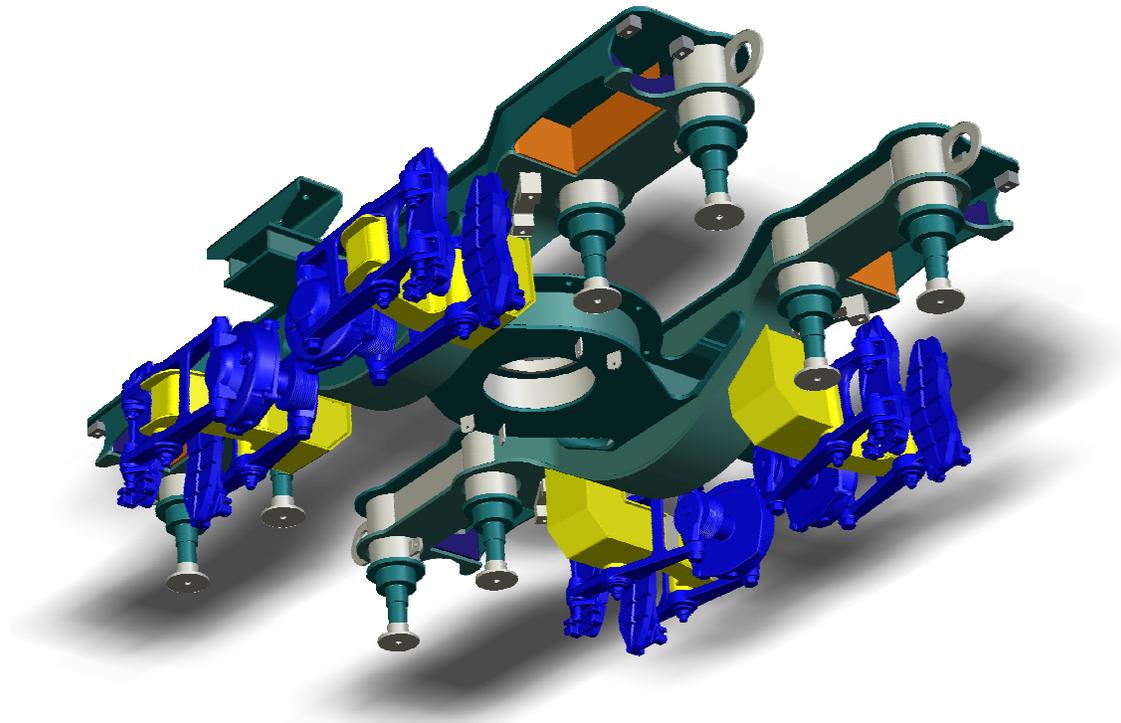


Abbildung 1.19: Drehgestellrahmen und starr mitbewegte Anbauteile

Drehgestellrahmen inkl. Anbauteile wie Bremsausrüstung etc., ohne Primär- und Sekundärfesselung

Masse	m=	1010 kg		
Trägheiten in Bezug auf Schwerpunkt		x	y	z
	x	358	0	0
	y	0	315	0
	z	0	0	618
				kg*m ²
Schwerpunkt unter Oberkante	h=	171 mm		
Längsträger				
Oberkante Längsträger über SOK in unbelastetem Zustand	h=	825 mm		

Josef Meyer, F. Fackler, Word-Datei
Masseigenschaften vom 13.04.2005
Josef Meyer CAD-Zeichnung 133184a.dxf vom
09.03.2005

Tabelle 1.5: Kennwerte - Drehgestellrahmen inkl. Anbauteile wie Bremsausrüstung

1.2.6 Sekundärfesselung

Die Abbildung 1.20 zeigt die Komponenten der Sekundärfesselung, über die der Fahrzeugaufbau mit dem Drehgestell verbunden ist.

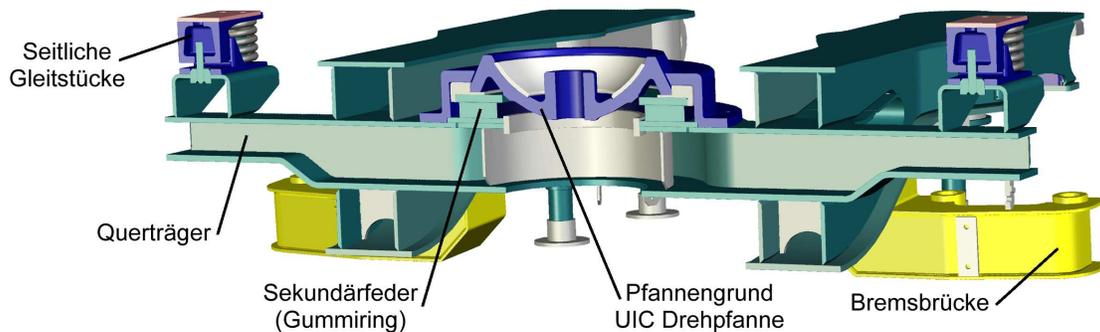


Abbildung 1.20: Sekundärfesselung

In Erweiterung zum derzeitigen UIC-Standardfahrwerk Y25 ist für das LEILA-DG eine Gummiringfeder zwischen Drehgestellrahmen und Standarddrehpfanne vorgesehen, um insbesondere Spitzenlasten abfedern, dadurch die Gummielemente der Primärfesselung vor zu hohen Belastungen zu schützen und für eine ausgewogene Laufgüte zu sorgen. Das Bauteil zwischen der Gelenkkugel am Fahrzeugaufbau und der Sekundärfeder wird im folgenden „Pfannengrund“ genannt. Die Sekundärfesselung besteht somit aus den Bauteilen UIC-Drehpfanne, gefederte seitliche Gleitstücke (UIC standard), Sekundär-Gummiringfeder und Pfannengrund. Zwischen Pfannengrund und Drehgestellrahmen ist ein horizontaler Anschlag nach radial 2.5 mm installiert, um die Fahrzeugbegrenzungslinie stets einzuhalten.

Pfannengrund				
Masse inkl. Sekundärfeder	m=	147		kg
Trägheiten in Bezug auf Schwerpunkt		x	y	z
		3		
		0	3	kg*m ²
		0	0	7
SWP Höhe unter Oberkante DG-	h=	90		mm

Josef Meyer CAD-Zeichnung 05.04.2004

Tabelle 1.6: Kennwerte - Pfannengrund

Die für die Simulation relevanten Kennwerte des Pfannengrunds sind in der Tabelle 1.6 aufgelistet.

1.2.6.1 Sekundärfeder

Die Kennwerte der Sekundärfeder sowie der seitlichen Gleitstücke sind in der Tabelle 1.7 zusammengefasst.

Sekundärfeder					
translatorisch:					
Längssteifigkeit	cx	5 200 000 N/m leer	Faktor für belad.	3.0	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 16.09.2003, Hr.
Quersteifigkeit	cy	5 200 000 N/m leer	Faktor für belad.	3.0	Pfaff: könnte sich aber noch deutlich ändern
Vertikalsteifigkeit	cz	Messwerte in Fitting überführt			Email Herr Pfaff 21.02.2005: Messwerte
Längsdämpfung	dx	0 Ns/m			Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
Querdämpfung	dy	0 Ns/m			(Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Vertikaldämpfung	dz	0 Ns/m			
rotatorisch:					
Wanksteifigkeit (um longitudinal)	cx_rot	32 500 Nm/°	Faktor für belad.	3.0	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		1 862 113 Nm/rad			
Nicksteifigkeit (um lateral)	cy_rot	32 500 Nm/°	Faktor für belad.	3.0	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		1 862 113 Nm/rad			
Giersteifigkeit (um vertikal)	cz_rot	3 350 Nm/°	Faktor für belad.	3.0	Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
		191 941 Nm/rad			
Wankdämpfung	dx_rot	0 Nms/rad			Freudenberg, Herr Pfaff telefonisch 15.09.2003
Nickdämpfung	dy_rot	0 Nms/rad			(Gummidämpfung vernachlässigbar gering)
Gierdämpfung	dz_rot	0 Nms/rad			
Seitliche Gleitstücke					
Spiel und Anschlag:	sx	1 mm			Standard Y25 Lsd1
(Neuzustand)	sz	10 mm			Einschränkung kinematische Fahrzeugbegrenzung (Standard Y25 Lsd1=12mm)
Vertikalsteifigkeit	sz	570 000 N/m je Gleitstück			Standard Y25 Lsd1
Horizontalsteifigkeit	sx=sy=	380 000 N/m je Gleitstück			Y25 Standard

Tabelle 1.7: Kennwerte - Sekundärfesselung

Die vertikale Kennlinie der Sekundärfeder liegt in Form von diskreten Messwerten vor, die zur Einbindung in die Simulationssoftware sinnvoller Weise in einer einzigen mathematischen Funktion gefittet wird. Das Ergebnis des Fittingprozesses ist in der Abbildung 1.21 wiedergegeben. Die Implementierung der mehrdimensionalen Charakteristik der Sekundärfeder ist in der Abbildung 1.22 dargestellt.

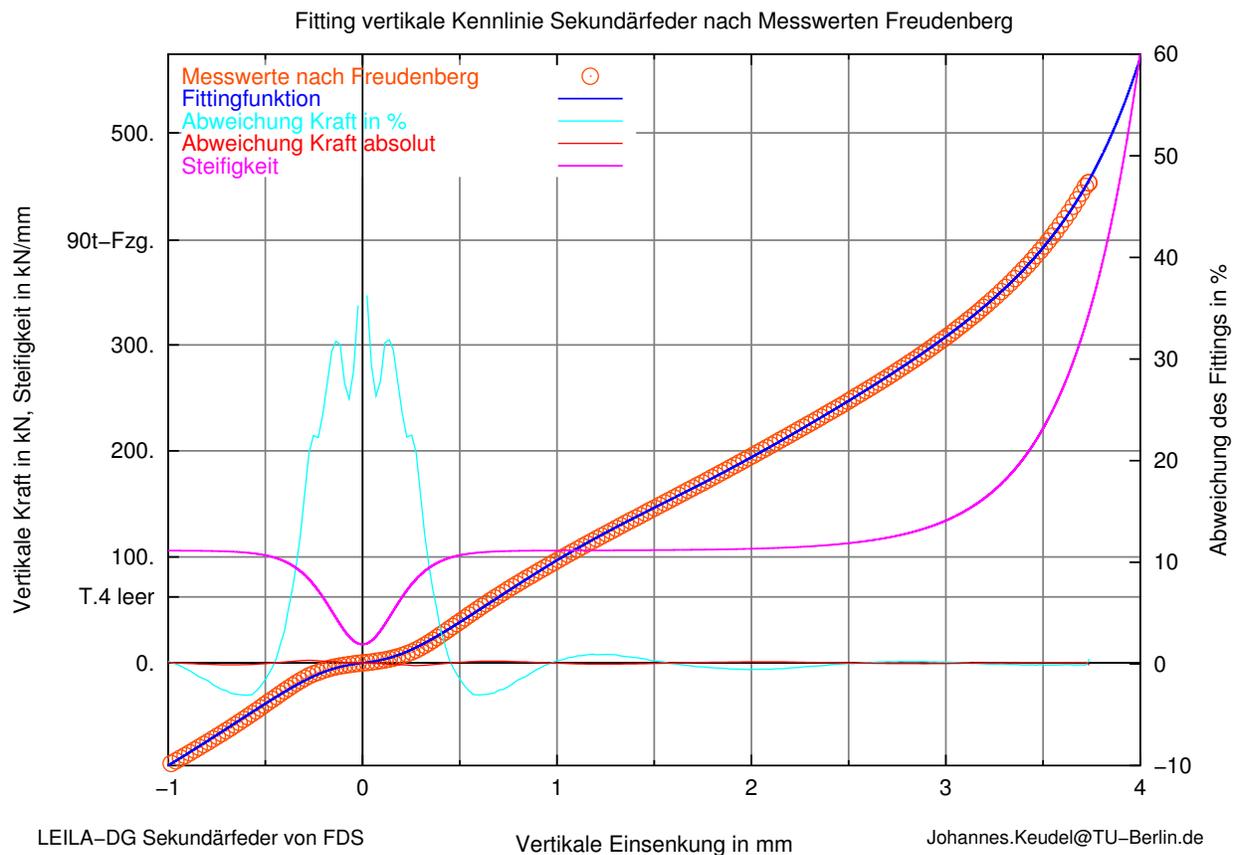


Abbildung 1.21: Vertikale Kennlinie Sekundärfesselung

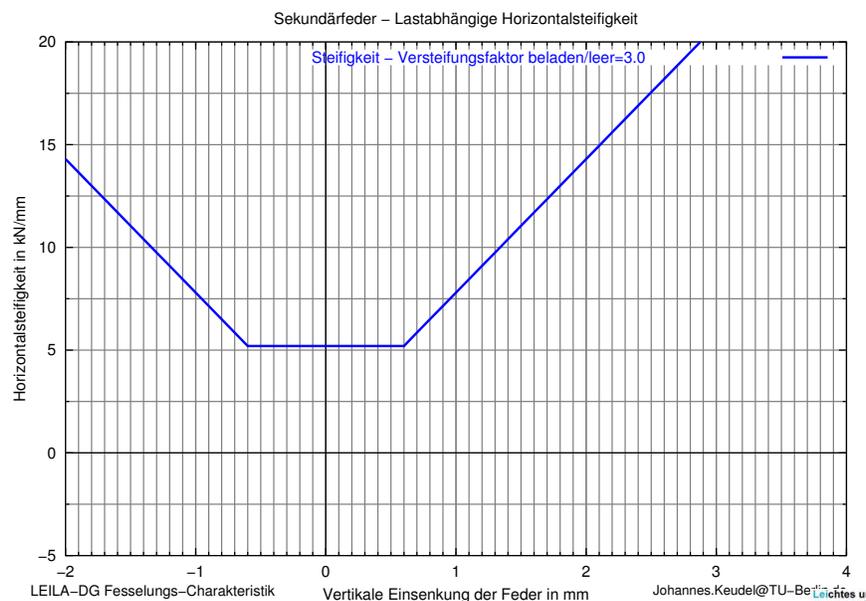
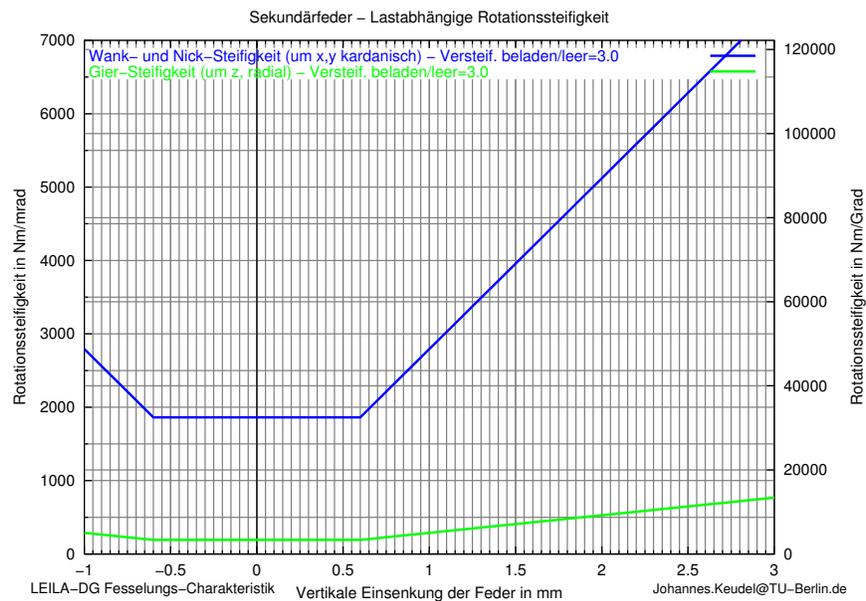
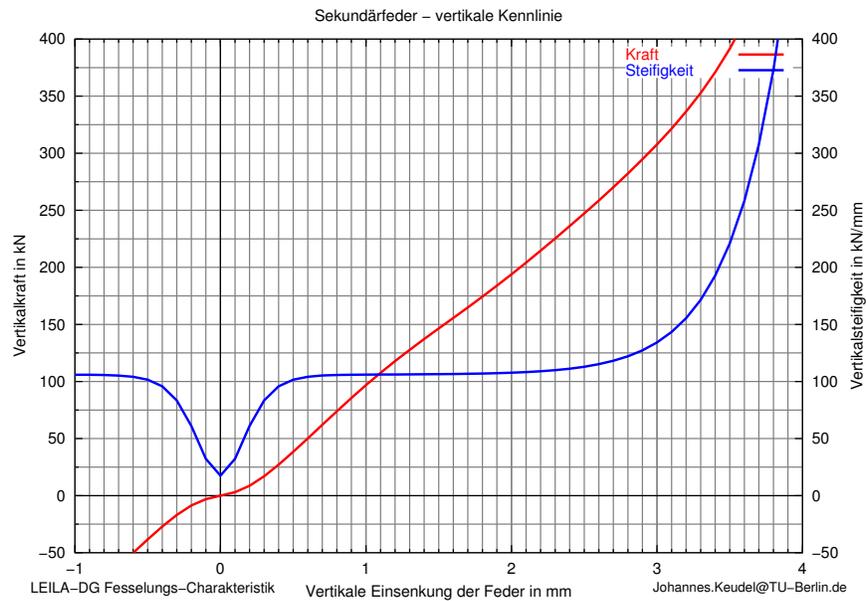


Abbildung 1.22: Charakteristik der Sekundärfeder



1.2.6.2 Drehpfanne

Die Drehpfanne wird durch eine Standard UIC-Drehpfanne mit einem Kugelradius von $r_{Ku} = 190 \text{ mm}$ gebildet. Die Drehpfanne wird durch das am Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin entwickelte Koppellement KE91-Keudel (s. KEUDEL [18]) wiedergegeben (s. Abb. 1.23 und 1.24).

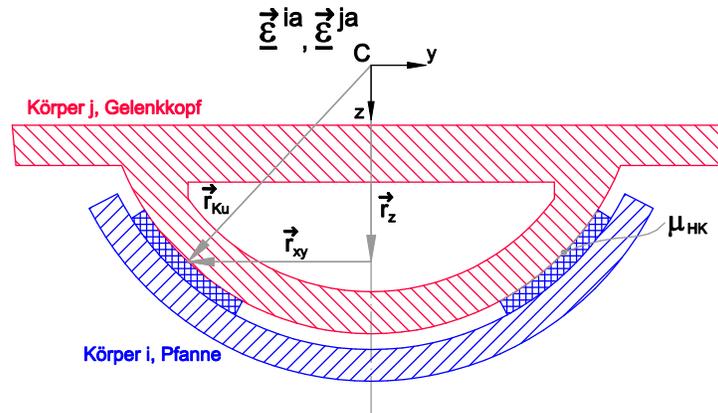


Abbildung 1.23: Drehpfannenordnung im Schnitt

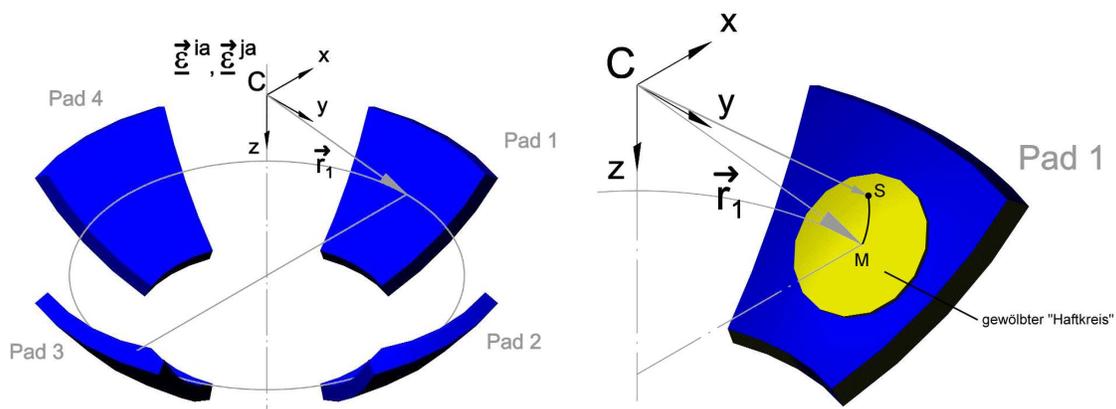


Abbildung 1.24: Modellierung der Rotationsreibung in der Simulationsrechnung [18]

Dieses Koppellement ist so konfiguriert, dass neben den translatorischen Steifigkeiten insbesondere Effekte der Rotationsreibung der Ringeinlage um alle drei Drehachsen berücksichtigt werden. Für den Reibwert zwischen der Drehpfanneneinlage (Polyamid inkl. Trockenschmierstoff) und der stählernen Pfanne werden von unterschiedlichen Herstellern Werte um 0.2 angegeben [7, 8], während Messergebnisse von Ausdrehversuchen

auch deutlich höhere Werte aufzeigen.

1.2.6.3 Seitliche Gleitstücke

Der Nennwert des vertikalen Gleitstückspiels (für den Neuzustand) beträgt beim Y25 12 mm. Je nach Fahrzeugtyp kann jedoch eine Reduktion des Gleitstückspiels notwendig sein, um die Einhaltung der Fahrzeugbegrenzungslinie zu garantieren.

Im Gegensatz zum Y25 beinhaltet das LEILA-DG die Sekundärfeder, die durch ihre Ein- und Ausfederung das Gleitstückspiel beeinflusst. Wie die Untersuchungen des Wankverhaltens [14] zeigen, vermag eine Reduktion des Gleitstückspiels beim LEILA-DG ein gegenüber dem Y25 stets geringeres Wanken zu garantieren, so dass volle Migrationsfähigkeit zu herkömmlichen Wagenaufbauten gegeben ist. Um die numerischen Nachweise „auf der sicheren Seite“ auszuführen, wird das Gleitstückspiel gemäß folgender Überlegung beabsichtigt auf einen ungünstigen Wert gesetzt: Der größte Wankwinkel, für den LEILA-DG vergleichbar mit dem Y25 sein muss, entsteht bei größter freier Seitenbeschleunigung sowie höchster Schwerpunktlage bei entsprechend großer Fahrzeugmasse und maximaler Gummisteifigkeit der Sekundärfeder (Verdopplung infolge Alter und Temperatur). Nach KEUDEL [14] reicht für diesen Zustand eine Reduktion auf 9 mm Gleitstückspiel aus, um die Einhaltung des Wankwinkels zu garantieren. In Abhängigkeit des Federwegs bei der Beladung und unter der Berücksichtigung der Versteifung reicht dabei ein für das Leerfahrzeug einzustellendes Gleitstückspiel von 10 mm aus, um für alle bislang mit Y25 ausgerüsteten Wagen die Fahrzeugbegrenzungslinie einzuhalten.

Unabhängig von der Einstellung des Gleitstückspiels wird davon ausgegangen, dass die vorgespannte Anpresskraft der Gleitstücke bei 16 kN Nennwert je Gleitstück verbleibt, also die Veränderung des Anschlagmaßes durch Höhenänderung des Anschlagbolzen innerhalb der Gleitstückfedern und nicht durch Vorspannplatten unter dem Fahrzeugaufbau realisiert wird.

Die seitlichen Gleitstücke werden aufgrund ihrer Anzahl von Anschlägen und Reibflächen als separate Körper ausgebildet, wenn auch ihre Masse keinen Einfluss auf das Fahrverhalten hat. Sie werden im Drehgestellrahmen durch ein Koppелеlement vom Typ KE13

geführt. Dieses Koppellement wird so konfiguriert, dass den Gleitstücken die translatorische Longitudinal- und Vertikalbewegung verbleibt. Alle anderen Freiheitsgrade sind gesperrt. Die Gleitstücke werden zur Berücksichtigung der Reibflächen mit dem Wagenkasten durch Koppellemente vom Typ KE92-Keudel [17] verbunden. Die Anschläge zwischen Gleitstück und Drehgestellrahmen in longitudinaler und vertikaler Richtung werden ebenfalls durch Koppellemente vom Typ KE92-Keudel gebildet.

Für den Reibwert zwischen der Kunststoffauflage des Gleitstückes und der stählernen Reibplatte unter dem Fahrzeugaufbau wird nach Angabe der DB Systemtechnik derzeit ein Wert von 0.22 angestrebt. Die Nennwerte aus Laborversuchen mehrerer Hersteller bestätigen Werte um 0.2 [7, 8]. Demgegenüber betonen Experten dieser Firmen, dass sich unter realen Bedingungen auch größere Reibwerte einstellen können, so dass im Rahmen dieser Untersuchung mit 0.2 aber auch 0.3 gerechnet wird.

1.3 Fahrzeugaufbau

Das Laufverhalten eines Drehgestell-Güterwagens wird nicht allein durch die Beschaffenheit des Laufwerks sondern auch durch relevante Eigenschaften des Fahrzeugaufbaus bestimmt. So haben insbesondere die Geometrie, die Schwerpunktlage, das Eigenschwingungsverhalten der Fahrzeugstruktur aber auch die Beschaffenheit der Ladung wesentlichen Einfluss. Daher kann das neue Drehgestell LEILA-DG sinnvoller Weise nicht für sich allein sondern nur in Verbindung mit einem entsprechenden Fahrzeugaufbau hinsichtlich seines Laufverhaltens bewertet werden.

Die Anzahl an derzeit im Betrieb befindlichen Bauarten von Güterwagen mit Drehgestellen ist allerdings beträchtlich [3, 4, 6, 25], so dass offenkundig nicht alle Fahrzeugaufbauten Eingang in diese numerische Untersuchung finden können. Unter lauftechnischen Gesichtspunkten lassen sich aber Extreme unter den Bauarten ausmachen, so dass das Laufverhalten der meisten anderen Wagen mutmaßlich „zwischen“ dem dieser Extreme liegt:

So weist ein Kesselwagenaufbau im Vergleich zu gängigen Güterwagen den wohl höchsten Massenschwerpunkt auf. Zudem ist dieser Fahrzeugaufbau aufgrund einer den Sicherheitsanforderungen des Füllmediums angepassten Wandstärke aber auch aufgrund der tür- und fensterlosen geschlossenen Struktur sehr torsions- und biegesteif.

Dem gegenüber weist ein Taschen- oder Containertragwagen eine torsions- und biegeelastische Tragstruktur in Verbindung mit einem vergleichsweise niedrigen Schwerpunkt auf.

Nachfolgend sind daher die lauftechnisch relevanten Parameter für eine reale Kesselwagenstruktur sowie den Taschenwagen T4.1 der HUPAC SA zusammengestellt.

1.3.1 Kesselwagen-Aufbau

Der gesamte Aufbau inklusive Ladegut wird im MKS-Modell durch einen einzigen Körper wiedergegeben, für den sich je nach Beladungszustand die Masse, die Trägheitsmomente und die Schwerpunkthöhe ändern. Dies impliziert die Annahme, dass der Wagen entweder maximal beladen oder vollständig entleert verkehrt. Ist der Kessel dabei in seiner Größe der Dichte eines einzigen zulässigen Füllmediums angepasst, wird ein

randvoll gefüllter Kessel auch ebenso wie ein leerer Kesselwagenaufbau als ein starrer Körper zu nähern sein, weil dem Ladegut „kein Platz zum Bewegen bleibt“. Insbesondere bei Mehrzweck-Kesselwagen (z.B. Chemiekesselwagen) sind aber Beladungszustände denkbar, bei denen zwar das zulässige Gewicht nicht aber das im Kessel vorhandene Volumen ausgeschöpft wird (z.B. Volumendaten in KVG [22]). Weiterhin könnte sich das Ladegut in Gas- und Flüssigphase unterteilen. Für diese Fälle wären Effekte der Fluidodynamik (Schwall) des Ladeguts innerhalb der starren Hülle des Tanks zu berücksichtigen. Die verwendeten Kennwerte des Fahrzeugaufbaus sind in der Tabelle 1.8 wiedergegeben. Die Massenkennwerte basieren dabei auf vertraulichen Angaben eines Herstellers für einen real existierenden Kesselwagen mit einem vergleichsweise großen Drehzapfenabstand von $2a^* = 11.46$ m. Der große Drehzapfenabstand ist hinsichtlich der Entgleisungssicherheit aber auch der notwendigen Drehgestellausdrehungen im Bogen als besonders kritisch anzusehen.

Fahrzeugaufbau - KESSELWAGEN, Drehzapfenabstand $2a^* = 11.46$ m					
LEER	m=	14 000 kg		realer Kesselwagen (vertrauliche Daten eines Herstellers)	
Trägheiten		x	y	z	
	x	34 600			kg*m ²
	y	0	398 500		kg*m ²
	z	0	0	391 400	kg*m ²
Schwerpunkt (Höhe über SOK)	h=	2 116 mm		realer Kesselwagen (vertrauliche Daten eines Herstellers)	
BELADEN	m=	81 280 kg		Rest zu 90t	
Trägheiten		x	y	z	
	x	101 050			kg*m ²
	y	0	1 656 550		kg*m ²
	z	0	0	1 643 250	kg*m ²
Schwerpunkt (Höhe über SOK)	h=	2 511 mm		realer Kesselwagen analog auslegung Radsatz BVV	

Tabelle 1.8: Kennwerte - Fahrzeugaufbau Kesselwagen

1.3.2 Taschenwagen-Aufbau Hupac T4.1

Der erste Einsatz eines LEILA-DG ist unter einem Taschenwagen der Bauart T4.1 (Abb. 1.25) im Betrieb der HUPAC SA vorgesehen. Dieser Wagen kann im Vertikalumschlag wahlweise entweder mit einem Sattelaufleger oder mit Containern beladen werden.

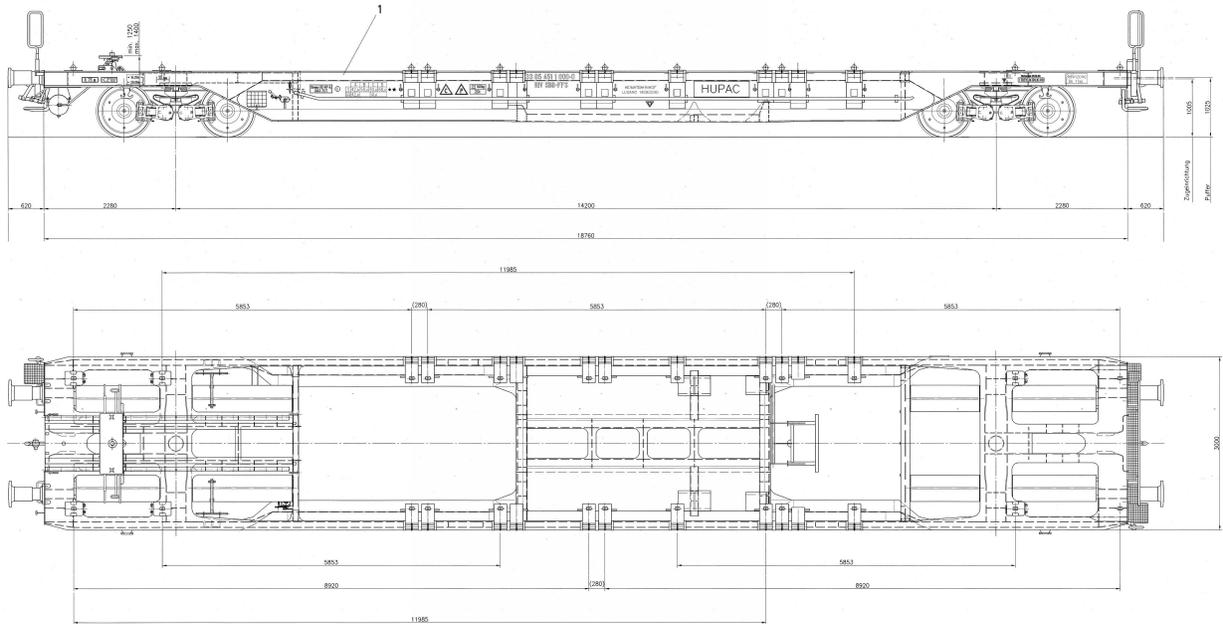


Abbildung 1.25: Taschenwagen T4.1 der HUPAC SA

Die Massenkennwerte des Taschenwagens sind in der Tabelle 1.9 zusammengestellt.

LEER	m=	12 700 kg			Zeichnungen/Stückliste Cattaneo FEM-Analyse Dipl.-Arbeit Lopez auf Basis Zeichnungen/Stückliste Cattaneo FEM-Analyse Dipl.-Arbeit Lopez auf Basis Zeichnungen/Stückliste Cattaneo	
Trägheiten		x	y	z		
	x		15 180			kg*m ²
	y		0	450 600		kg*m ²
	z		0	0		463 700 kg*m ²
Schwerpunkt (Höhe über SOK)	h=	864 mm				

Tabelle 1.9: Kennwerte - Fahrzeugaufbau Taschenwagen nach LOPEZ [23]

Im Vergleich zu einem Kesselwagen ist die Struktur eines Taschenwagens als deutlich elastischer einzuschätzen, so dass die elastischen Eigenschaften des Fahrzeugaufbaus in dem MKS-Modell berücksichtigt werden müssen. Während diese Eigenschaften für das Leerfahrzeug auf Basis von technischen Zeichnungen in einer FEM-Modalanalyse ermittelt wurden (LOPEZ [23]), verhält es sich für das beladene Fahrzeug schwierig: einerseits variieren die Ladebehältnisse in Form unterschiedlicher Sattelaufleger oder Containergrößen und -arten (Trockencontainer, Kühlcontainer, Tankcontainer, etc.). Andererseits ist innerhalb des Behältnisses außerdem die Art und Lage der Ladung deutlich verschieden, so dass es weder einen einzigen noch einen typischen Beladungszustand gibt. Da für viele Betrachtungen wie die Entgleisungssicherheit das Leerfahrzeug relevant ist, werden die laufdynamischen Simulationen für den Taschenwagen entsprechend auf das Leerfahrzeug beschränkt.

Nach WALLRAPP [30] erfolgt die Einbindung elastischer Eigenschaften in ein MKS-Modell sinnvoller Weise durch Superposition von Schwingungsformen der ungelagerten elastischen Struktur (Frei-Frei-Mode) aus einer FEM-Analyse. Alle Randbedingungen sowie Einschränkungen an Freiheitsgraden werden dann durch die ohnehin vorhandenen Gelenke etc. des MKS-Modells und nicht im FEM-Modell berücksichtigt (BREMER U. PFEIFFER [1]). Während GÖTSCH [12] für eine genauere Betrachtung zwar die fixierte Struktur und zusätzlich statische Einflussfunktionen zum Ansatz bringt, ist in *MEDYNA* keine Eingabe solcher Einflussfunktionen eingerichtet. Daher erfolgt die Einbindung der Ergebnisse der FEM-Analyse von LOPEZ [23] in der vorliegenden Arbeit als Superposition von Eigenformen der ungelagerten Struktur.

Typischer Weise werden FEM-Modelle zur Festigkeitsauslegung genutzt, benötigen dazu eine entsprechend detaillierte Vernetzung und müssen aber in aller Regel nur die eigentlich tragende Struktur berücksichtigen. Im Gegensatz dazu erlaubt das rein auf Modalanalyse ausgelegte Modell von LOPEZ [23] ein deutlich weniger aufwendiges Netz, während es aber neben der eigentlich tragenden Struktur auch die reale Massenverteilung von Anbauteilen wie der Bremsausrüstung, Zug- und Stoßeinrichtungen sowie klappbare Containerzapfen etc. berücksichtigen muss.

Als Ergebnis der FEM-Modalanalyse werden für die interessierenden Eigenformen im lauftechnisch relevanten Frequenzbereich bis 30 Hz folgende Daten in das MKS-Modell

implementiert:

- Generalisierte Masse, Steifigkeit und Dämpfung
- Verschiebungen und Verdrehungen von relevanten Knoten des FEM-Modells. Relevante Knoten sind insbesondere solche, denen Befestigungselemente wie z.B. die Drehpfanne zuzuordnen sind.

Die Abbildungen 1.26 bis 1.30 zeigen jeweils links im Bild die animierte Eigenform des FEM-Modells sowie rechts die in das MKS-Modell übertragenen relevanten Knoten der Taschenwagenstruktur.

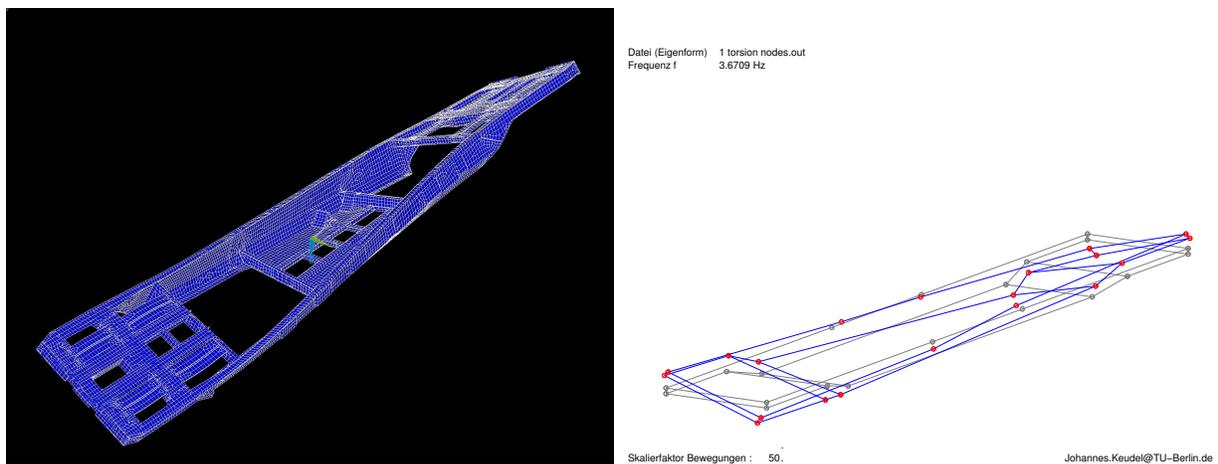


Abbildung 1.26: Erste Torsions-Eigenform

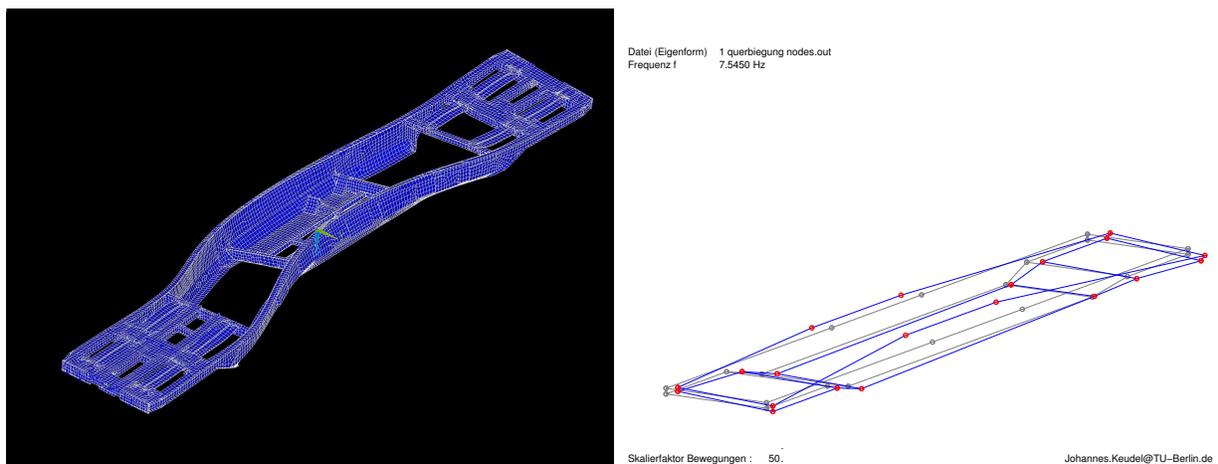


Abbildung 1.27: Erste Querbiege-Eigenform

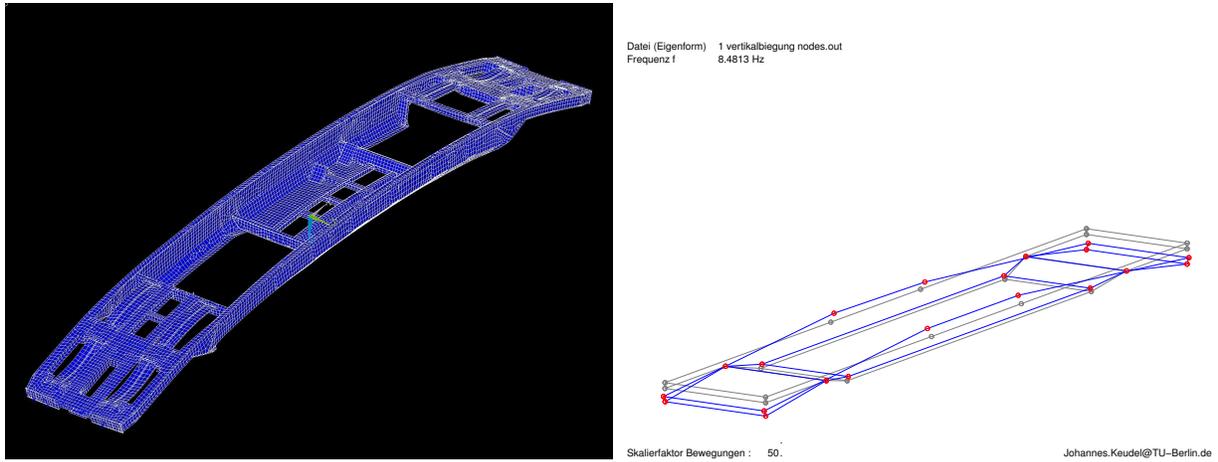


Abbildung 1.28: Erste Vertikalbiege-Eigenform

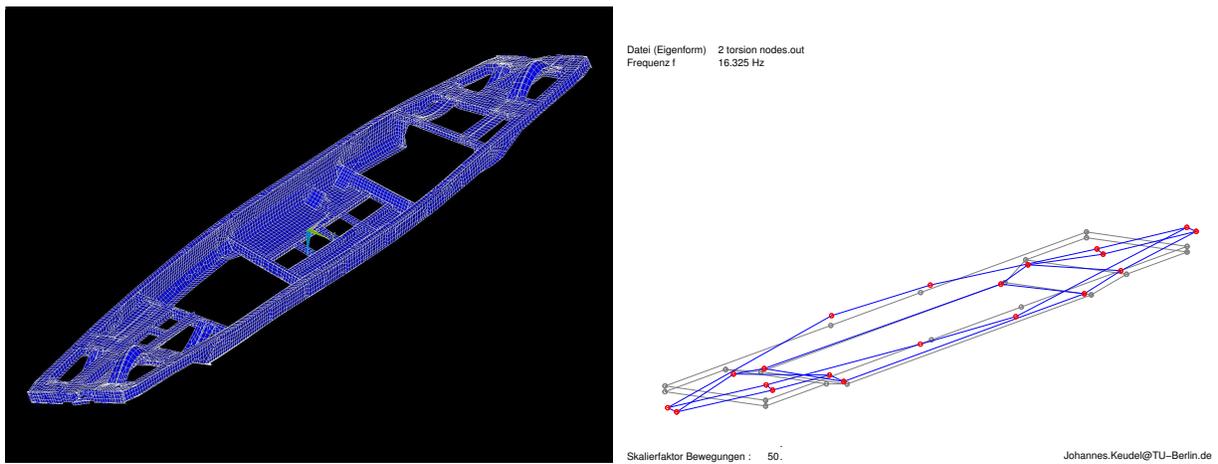


Abbildung 1.29: Zweite Torsions-Eigenform

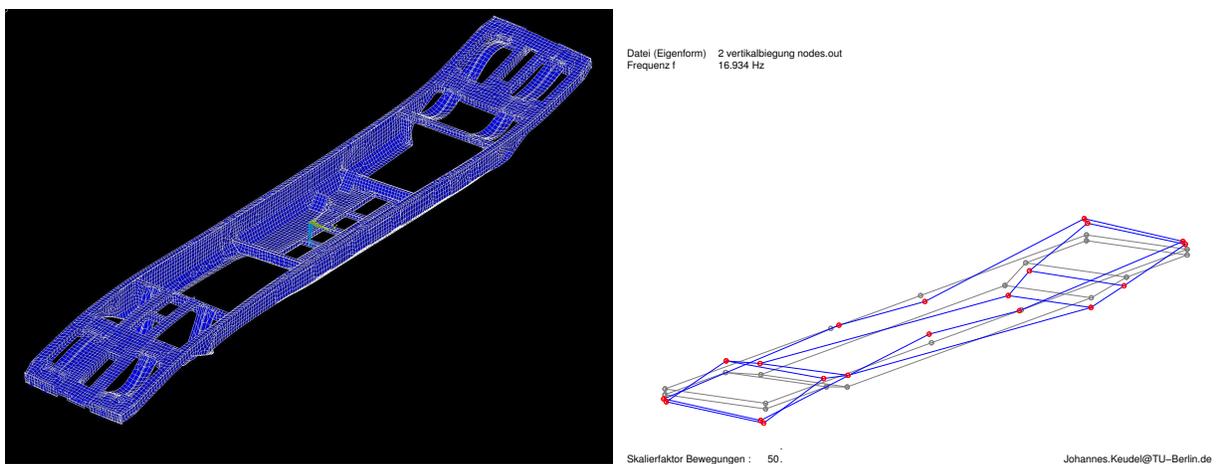


Abbildung 1.30: Zweite Vertikalbiege-Eigenform

Kapitel 2

Massenbilanz sowie statische Kräfte und Einsenkungen

2.1 Massenbilanz

Die Tabelle 2.1 zeigt die Zusammensetzung der Masse des LEILA-DG und seiner Komponenten. Dazu ist jeweils die projektinterne Quelle dieser Information angegeben. Zur Bewertung der Drehgestellmasse kann vergleichend die Masse des Standardfahrwerks Y25 herangezogen werden, wobei sich die Masse des Y25 je nach Ausführung der Bremseinrichtung, der zulässigen Geschwindigkeiten und auch je nach Hersteller zum Teil deutlich unterscheiden:

- 4720 kg für UIC-Standard Y25 Lsd 1
(DB Bauart 628, 629) nach DB AG [4, S. 600]
- 4521 kg für Y25 Lsif-K inkl. Handbremse
(eingesetzt unter dem Taschenwagen T.4 der HUPAC SA)

In der Tabelle 2.2 ist die Zusammensetzung der Massenträgheitsmomente wiedergegeben.

Pos.	Komponente / Baugruppe	Masse in kg	Anzahl je DG	Masse je DG in kg	Quelle LEILA-Daten
Pos. 1	Radsatz inkl. mitbewegter Anbauteile				
		<i>je Radsatz</i>			
	1x Radsatzwelle	350,0 kg			Zeich. BVV, Zeich.-Nr. 1RW 8480.302 vom 2004-10-02
	2x Vollrad ohne Radbrems scheiben	732,0 kg			Zeich. BVV, Zeich.-Nr. 1RW 8480.401 vom 2004-07-16
	4x Bemsscheiben inkl. Befestigung, etc.	126,0 kg			Bremsscheiben inkl. Befest. 63 kg je Rad (telefonisch bestätigt durch Herrn Ruppert 26.04.2004)
	2x 2xInnenring, Rollenkranz, Polrad, Laby.ring	44,0 kg			Email Herr Neuhaus 21.04.2004
	2x Deckel, Schutz für ungenutzte Wellenenden	2,0 kg			BVV Stückliste 4RW 8480.911 vom 2004-10-02
Radsatzlagergenerator 1x40kg je Wagen	10,0 kg			gewogen JMR 03.-04.11.2004	
	Summe	1264,0 kg	2 je DG	2528. kg	
Pos. 2	Lagergehäuse inkl. mitbewegter Anbauteile sowie Primärfederkomponenten				
		<i>je Lagergeh.</i>			
	1x Lagergehäuse	94,0 kg			4-Seitiges Dokument "Bestimmung Massenträgheiten...", FAG FIASWE-LBHD, Schubert, 15.03.2005
	2x Außenringe	7,0 kg			Email Herr Neuhaus 21.04.2004
	2x Dämpfer inkl. Dämpferaugen	28,0 kg			(Herr Pfaff, Schweinfurt 15.03.2004)
	2x Buchsenfedern	3,8 kg			(Herr Pfaff, Schweinfurt 15.03.2004)
	1x Vertikal-Schichtfeder	18,0 kg			Freudenberg Zeichnung 4818 vom 01.09.2003 (Präsentation Treffen 02.09.2003 + Schw. 15.03.04)
	Summe	150,8 kg	4 je DG	603. kg	
Pos. 3	Kreuzanker				
	1x Ankerstange inkl. 2 Anlenkbuchsen (5kg je Anlenkbuchse)	34,5 kg			telefonisch Hr. Schnabel: 69 kg beide Stangen inkl. Gummilager - 04.03.2005
	Summe	34,5 kg	2 je DG	69. kg	
Pos. 4	Drehgestellrahmen inkl. mitbewegter Anbauteile (OHNE Primär- und Sekundärfesselung)				
	Drehgestellrahmen inkl. Bremssupport	714,0 kg			Email Herr Fackler 13.04.2005
	4x Bremszangen mit -Zylinder + Bolzen etc.	276,0 kg			gewogen JMR 03.-04.11.2004
	Diagnose/Elektronik	15,0 kg			Herr Keschwari, Schweinfurt 15.03.2004
	Batterie	5,0 kg			Herr Keschwari, Schweinfurt 15.03.2004
	Summe	1010,0 kg	1 je DG	1010. kg	
Pos. 5	Pfannengrund + Sekundärfeder (OHNE Gelenkkugel analog DB AG-Angaben für Y25)				
	(Pfannengrund = das Bauteil, das sich oberhalb der Sekundärfeder befindet und nach oben die Pfanne des Drehgelenks ausbildet.)				
	Pfannengrund	87,9 kg			Massenzusammenstellung JMR 02.02.2005 abzüglich Gummifeder in nachfolgender Position
	Sekundärfeder	38,6 kg			Freudenberg Zeichnung 4818 vom 01.09.2003 (Präsentation Treffen 02.09.2003 + Pfaff 15.03.04)
	2x seitliche Gleitstücke	20,0 kg			Gewogen im Original Keudel 11.09.2003
	Summe	146,5 kg	1 je DG	147. kg	
Summe			Summe	4360. kg	

Tabelle 2.1: Massenzusammenstellung

Pos.	Komponente / Baugruppe	Masse in kg	Massenträgheitsmomente bezogen auf SWP der Baugruppe			Abst. SWP Abst. SWP Abst. SWP			Massenträgheitsmomente bezogen auf EIN des MKS-Körpers			Quelle LEILA-Daten		
			Jxx in kg/m²	Jyy in kg/m²	Jzz in kg/m²	in x in m	in y in m	in z in m	Jxx in kg/m²	Jyy in kg/m²	Jzz in kg/m²			
Pos. 1	Radsatz inkl. mitbewegter Anbauteile	350.0 kg	93.0 kg/m²	1.6 kg/m²	93.0 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	93.0 kg/m²	1.6 kg/m²	93.0 kg/m²	4-Excalibur60.04-04-21..._0101.xls		
		732.0 kg	45.6 kg/m²	94.0 kg/m²	45.6 kg/m²	0.000 m	0.750 m	0.000 m	457.4 kg/m²	94.0 kg/m²	457.4 kg/m²	NEUZUSTAND - 4-Excalibur04-04-21..._0101.xls		
		126.0 kg	5.2 kg/m²	10.4 kg/m²	5.2 kg/m²	0.000 m	0.750 m	0.000 m	76.1 kg/m²	10.4 kg/m²	76.1 kg/m²	CAD-Daten SAB Wabco		
		44.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m	0.550 m	0.000 m	13.3 kg/m²	0.0 kg/m²	13.3 kg/m²	Email Herr Neuhauz 21.04.2004, (eigene Massentätigkeit vernachlässigbar gering)		
		2.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		10.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		Summe	1264.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²				640 kg/m²	106 kg/m²	640 kg/m²		
		Pos. 2	Lagergehäuse inkl. mitbewegter Anbauteile sowie Primärfederkomponenten	94.0 kg	1.5 kg/m²	3.6 kg/m²	3.9 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	1.5 kg/m²	3.6 kg/m²	3.9 kg/m²	4-Selbiges Dok. - Bestimmung Massentätigkeiten... FAG FIASWELBHD, Schubert, 15.03.2005
				7.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m	0.230 m	0.000 m	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	
28.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
3.8 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.185 m	0.230 m	0.000 m	0.1 kg/m²	0.2 kg/m²	0.3 kg/m²			
18.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.236 m	0.0 kg/m²	1.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
0.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
0.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
Summe	150.8 kg			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²				3 kg/m²	6 kg/m²	6 kg/m²		
Pos. 3	Kreuzanker 1x Ankerstange inkl. 2 Anlenkbuchsen (5kg je Anlenkbuchse)			34.5 kg	0.1 kg/m²	6.9 kg/m²	6.9 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	0.1 kg/m²	6.9 kg/m²	6.9 kg/m²	Email Herr Schmaabel 05.04.2004, telefonisch Herr Schmaabel 08.03.2005
				0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		Summe	34.5 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²				0.1 kg/m²	6.9 kg/m²	6.9 kg/m²		
		Pos. 4	Drehgestellrahmen inkl. mitbewegter Anbauteile (OHNE Primär- und Sekundärfesselung)	714.0 kg	176. kg/m²	289. kg/m²	445. kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	176.0 kg/m²	289.0 kg/m²	445.0 kg/m²	Email Herr Fackler Worddatei: Masseneigenschaften 13.04.2005
				276.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			181.7 kg/m²	0.0 kg/m²	173.0 kg/m²	
0.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
0.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
0.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
15.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
5.0 kg	0.0 kg/m²			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
Summe	1010.0 kg			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²				358 kg/m²	315 kg/m²	618 kg/m²		
Pos. 5	Planenrund + Sekundärfeder (OHNE Gelenkkugel analog DB AG-Angaben für Y25) (Planenrund = das Bauteil, das sich oberhalb der Sekundärfeder befindet und nach oben die Platte des Drehgelenks ausbildet.)			87.9 kg	3.3 kg/m²	3.3 kg/m²	6.5 kg/m²	0.000 m	0.000 m	0.000 m	3.3 kg/m²	3.3 kg/m²	6.5 kg/m²	Summation aus Einzelmassen CAD - Zeichnung Fackler Email
				38.6 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	
		20.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		0.0 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.000 m			0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²			
		Summe	146.5 kg	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²	0.0 kg/m²				3 kg/m²	3 kg/m²	7 kg/m²		

Tabelle 2.2: Massen-Trägheitsmomente

2.2 Statische Kräfte und Einsenkungen

Die statischen Kräfte je Drehgestellkomponente respektive die Einsenkungen der Federstufen hängen ab von

- den beteiligten Massen,
- den anteiligen Steifigkeiten von Primärbuchse und Vertikalschichtfeder bzw. Sekundärfeder sowie
- der Gummiversteifung infolge Alterungs- und Temperatureinfluss und der
- Vorspannung der gefederten Gleitstücke.

Die beteiligten Massen sind der Tabelle 2.1 (Seite 39) zu entnehmen. Die derzeit verfügbaren Steifigkeitskennlinien sind in den Abschnitten 1.2.3 (ab Seite 8) und 1.2.6 (ab Seite 25) dargelegt. Für die Vorspannung der Gleitstücke werden für das Leerfahrzeug (ca. 22t) 16 kN je Gleitstück angesetzt. Dies entspricht dem heute üblichen Wert beim Y25. Während diese statische Vorspannung beim Y25 infolge der großen Steifigkeit der Drehpfanne unabhängig vom Beladungszustand nahezu konstant bleibt, nimmt sie beim LEILA-DG infolge der (allerdings geringen) Nachgiebigkeit der Sekundärfeder mit der Beladung in geringem Maße zu.

In der Tabelle 2.3 sind die resultierenden Nominallasten und statischen Einsenkungen aufgelistet.

		Primärfesselung			Sekundärfeder		Gleitstück
		statische vertikale Einsenkung in mm	statische Vertikalkraft		statische vertikale Einsenkung in mm	statische Vertikalkraft Gummi-Ringfeder in kN	Vorspannkraft in kN
			Schichtfeder in kN	Primärbuchse in kN			
Leerfahrzeug ~21,5t T.4	Gummi-Nennsteifigkeit	4.8	11.6	3.4	0.44	31.0	16.4
	2x Gummi-Nennsteifigkeit	2.4	11.1	3.7	0.28	31.2	16.0
Vollfahrzeug 90t	Gummi-Nennsteifigkeit	24.2	77.3	12.6	3.35	362.0	18.8
	2x Gummi-Nennsteifigkeit	13.2	72	15.1	1.9	364.0	18.0

Tabelle 2.3: Statische Last und Einsenkung

Literaturverzeichnis

- [1] BREMER, HARTMUT und FRIEDRICH PFEIFFER: *Elastische Mehrkoerpersysteme*. Studienbücher Mechanik. B.G. Teubner Stuttgart, 1992. ISBN 3-519-02374-1.
- [2] BVV, BITTNER: *LEILA - Vollräder für Laufradsätze*. Technischer Bericht RP04027, BVV Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH, Alleestraße 70, D-44793 Bochum, Oktober 2004.
- [3] CARSTENS, S.: *Güterwagen der DB AG - Zahlen, Fakten, Entwicklungen, Fotos*. MIBA-Verlag GmbH, Nürnberg, 1998. ISBN 3-86046-030-7.
- [4] DB SYSTEMTECHNIK TZF 31, FACHAUTOR: PRASHUHN, E.: *DS 939 05: Merkbuch für Schienenfahrzeuge - Güterwagen und Ladeeinheiten - Band 1 und 2*. Deutsche Bahn AG, Druck und Informationslogistik der Deutschen Bahn, Kriegsstraße 1, 76131 Karlsruhe, Januar 2001.
- [5] DEUTSCHE BAHN AG: *Richtlinie DB AG 984 03: Güterwagen und Container instandhalten - Drehgestelle*. Geschäftsbereich Werke, TRF-Geschäftsstelle, Werkstättenstr. 8, 04439 Engelsdorf, Januar 1995.
- [6] DEUTSCHE BAHN AG: *Die Güterwagen der Bahn*, Band 2. DB Cargo AG, Marketingkommunikation, Rheinstraße 2 55116 Mainz, Februar 2001. VGL 001.01.
- [7] DEUTSCHE BAHN AG, TZF35: *Liste der Produkte / Hersteller mit besonderer Zulassung für Güterwagen-Fahrwerke*. Deutsche Bahn DG - Forschungs- und Technologie-Zentrum, Weserglaci 2, D-32423 Minden, erhalten: 2003.
- [8] FAIGLE INDUSTRIEPLAST GMBH: *Werkstoffübersicht*. Prospekt, A-6971 Hard, Juni 2001.

- [9] FAYE, I.C.: *MEDYNA User Manual*. DLR, Inst. 515, Abt. 11, Oberpfaffenhofen, Juli 1992.
- [10] GERSTBERGER, U., K. KNOTHE und R. SIELAFF-OPOKU: *Modellierung des Schotter in der Gleisdynamik*. Eisenbahn Ingenieur, 9(54):24–30, September 2003.
- [11] GERSTBERGER, ULF: *Vertikal- und Lateralodynamik von Fahrzeuge und Gleis unter Einbeziehung des Untergrundes*. Forschungsberichte aus der Ingenieurwissenschaft. Mensch und Buch Verlag, Nordenstr. 75, 13156 Berlin, 2004. Dissertation, ISBN 3-89820-662-9.
- [12] GÖTSCH, MATHIAS: *Werkzeuge zur Simulation des Fahrverhaltens von Eisenbahnfahrzeugen*. Doktorarbeit, ETH Zürich, Juni 2000. ETH NR. 13823.
- [13] HANNEFORTH, WOLFGANG und WERNER FISCHER: *Laufwerke*. VEB Verlag für Verkehrswesen, 1086 Berlin, Französische Str. 13/14, 1. Auflage Auflage, 1986.
- [14] HECHT, M. und J. KEUDEL: *LEILA-DG - Numerische Untersuchung des Wankverhaltens versus Y25*. Technischer Bericht 15/2005, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, +++ in Bearbeitung +++ 2005.
- [15] HECHT, M., A. SCHIRMER, J. RAUBOLD und D. CORDTS: *LeiLa-Drehgestell - Prinzipentscheidung auf Basis analytischer und numerischer Untersuchungen des fahrdynamischen Verhaltens*. Technischer Bericht 02/2002, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, Dezember 2002.
- [16] IWNICK, S.: *Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation*. In: *Vehicle System Dynamics*, Nummer 3-4 in 30, Seiten 295–313. International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD), Swets & Zeitlinger, September 1998. ISSN 0042-3114.
- [17] KEUDEL, J.: *Modellierung des Güterwagendrehgestells Y25 für das Mehrkörperdynamikprogramm MEDYNA - (erweiterte Fassung der Studienarbeit)*. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Konstruktionsberechnung, September 2002.

- [18] KEUDEL, J.: *Entwicklung eines Koppелеlementes zur Darstellung einer Reib-Drehpanne in Medyna*. Technischer Bericht intern Keu01/2003, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, Mai 2003.
- [19] KIK, W. und J. PIOTROWSKI: *A fast approximate method to calculate normal load and contact between wheel and rail and creep forces during rolling*. In: *Paper presented at the 2nd Minisymposium on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Budapest*, Seiten 44–51, Juli 1996.
- [20] KNOTHE, K.: *Gleisdynamik*. Ernst & Sohn, (WILEY Company), Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, März 2001. ISBN 3-422-01760-3.
- [21] KNOTHE, K. und S. STICHEL: *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, URL: www.springer.de, 2003. ISBN 3-540-43429-1.
- [22] KVG KESSELWAGEN VERMIETGESELLSCHAFT MBH, Herrengraben 74, 20459 Hamburg: *Kesselwagen - Technische Datenblätter und Zeichnungen*, 2000-2002.
- [23] LOPEZ, JOSUÉ: *Modalanalyse eines Taschenwagens (T4.1 Hupac) +++ IN BEARBEITUNG +++*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Sek. SG14, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, Juni 2005.
- [24] NORMENAUSSCHUSS SCHIENENFAHRZEUGE (FSF): *DIN 5573 - Radprofile, Breite 135mm und 140mm*. In: *Deutsche Norm*, Schienenfahrzeuge. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstr. 4-10, 1000 Berlin 30, Juni 1995.
- [25] ÖBB ÖSTERREICHISCHE BUNDESBAHNEN: *Güterwagen - Daten und Details*. Geschäftsbereich Güterverkehr, März 2003. CI&M-Pod.-Nr. 3303752.
- [26] PIOTROWSKI, J. und W. KIK: *Calculation of creep forces for weakly curved contact of wheel and rail*. Seiten 98–109. Oktober 1998.
- [27] SACHS: *SACHS - Dämpfungssysteme für Schienenfahrzeuge + Vorgehensweise für Auswahl und Berechnung*. Technischer Bericht 01.6.001-D-0900, Sachs Automotive AG, Geschäftsbereich Schienenfahrzeugdämpfer, Bogestraße 50, D-53783 Eitorf, Dezember 2001.

- [28] SCHWARTZ, W.: *The Multibody Program MEDYNA*. In: *Multibody Computer Codes in Vehicle System Dynamics*, Nummer 22, Seiten 91–94. Kortüm, W. and Sharp, R.S., 1993.
- [29] THYSSEN: *Oberbau-Profil*. Thyssen Stahl AG, Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47161 Duisburg, September 1997.
- [30] WALLRAPP, OSKAR: *Entwicklung rechnergestützter Methoden der Mehrkörperdynamik in der Fahrzeugtechnik*. In: *Forschungsbericht DFVLR-FB 89-17*, Nummer 89-17. DFVLR - Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Institut für Dynamik der Flugsysteme, Oberpfaffenhofen, 1989. ISSN 0171-1342.