

Anton Wolfand

# **Standardisierung von Schnittstellen und Modularisierung von Vorrichtungen eines Prüfstands für Festigkeitsprüfungen von Drehgestellrahmen**

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

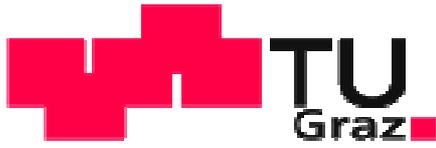
**Technische Universität Graz**

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften  
Studienrichtung: Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau

Institut für Leichtbau

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser

Graz, im März 2014



Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula- Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senats am 1.12.2008

### EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Graz, am 14.03.2014

.....  
(Unterschrift)

### STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.



Graz, 14.03.2014  
date

.....  
(signature)

Meinen Eltern gewidmet

O Leben Leben, wunderliche Zeit

O Leben Leben, wunderliche Zeit  
von Widerspruch zu Widerspruche reichend  
im Gange oft so schlecht so schwer so schleichend  
und dann auf einmal, mit unsäglich weit  
entspannten Flügeln, einem Engel gleichend:  
O unerklärlichste, o Lebenszeit.

Von allen großgewagten Existenzen  
kann einer glühender und kühner sein?  
Wir stehn und stemmen uns an unsre Grenzen  
und reißen ein Unkenntliches herein,

.....

Rainer Maria Rilke, Winter 1913/14, Paris

## **VORWORT**

Die vorliegende Diplomarbeit ist das Ergebnis von langjährigen Erfahrungen meiner Tätigkeiten für die Schweißtechnische Zentralanstalt wie auch für die Siemens AG Österreich.

Sie entstand am Institut für Leichtbau der Technischen Universität Graz unter der hervorragenden Betreuung von Herrn Ass. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Christian Moser, bei dem ich mich für sein Engagement herzlichst bedanke. Dank gebührt der SZA und meinen früheren Arbeitskollegen, dem jetzigen Leiter des SZA Festigkeitslabors Herrn Ing. Thomas Unger, wie auch seinem Stellvertreter Herrn Dipl. - Ing. Martin Stauer und Herrn Willi Rauchenberger, die mir in Prüf – und Vorrichtungsfällen eine stete Hilfe waren.

Auch gebührt mein Dank meinen Freunden und jetzigen Arbeitskollegen Herrn Alexander Meindl, Herrn Dipl. Ing. Michael Gödl und Herrn Josef Vuk, welche mir mit fachlichem Rat, aber auch durch die reale Übernahme diverser beruflicher Tätigkeiten während meines Bildungsurlaubs und meiner Bildungskarenz die Umsetzung dieser Arbeit ermöglicht haben. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Vorgesetzten Herrn Dipl.-Ing. Martin Mongold und Herrn Dipl.-Ing. Dr. Thomas Mooshammer für die Unterstützung.

Unendlicher Dank gebührt meinen Eltern Eduard und Agnes, die diesen – wenn auch von mir langwierig gestaltenden Bildungsweg – erst ermöglicht wie auch immer unterstützt und getragen haben.

Ein ganz besonderer und ebenfalls unendlicher Dank gebührt meiner Tante Zilli, die mir stets Beistand und Rückhalt war und ist.

## **KURZFASSUNG**

Hersteller von Drehgestellen für Schienenfahrzeuge müssen aus Zulassungs- und Produkthaftungsgründen für Drehgestellrahmen rechnerische und experimentelle Festigkeitsnachweise erbringen. Prüfinstitute, die im Herstellerauftrag Bauteilversuche an Drehgestellrahmen durchführen, sind ständig gefordert, diese zeit- und kostensparend zu realisieren. Die große Vielfalt an Drehgestellrahmen führt zu einem hohen Anteil an „Einwegvorrichtungen“ und damit zu hohen Einmalkosten je Laborversuch. Diese Arbeit erfasst die Möglichkeiten des bestehenden Portalprüfstands der Schweißtechnischen Zentralanstalt und erhebt Einflüsse, die sich auf Rahmenversuche unterschiedlicher Drehgestellkategorien auswirken. Auf dieser Basis wird ein Konzept zur Standardisierung von Prüfstandsschnittstellen und ein Konzept für die Modularisierung von Vorrichtungen unter Berücksichtigung von Vorgaben aus der EN 13749 mit dem Ziel der Kostensenkung und der Durchlaufzeitverkürzung festgelegt und ausgeführt. Die leichte Realisierbarkeit der Konzepte und die hohe Wiederverwendbarkeit der konzipierten Vorrichtungsmodule werden mit Beispielen von Prüfaufbauten für Drehgestellrahmenprüfungen von Straßenbahnen, Metro, Reisezugwagen, Lokomotiven und Hochgeschwindigkeitszügen nachgewiesen. Mit einer abschließenden Betrachtung der Wertschöpfungskette werden die erzielbaren Einsparungspotentiale in den verschiedenen Phasen der Wertschöpfung aufgezeigt.

## **ABSTRACT**

Manufacturers of bogies of rail vehicles must carry out strength calculations and also experimental strength tests for their bogie frames. This procedure is necessary for homologation and for product liability reasons.

The test institutes which carry out component strength tests by the manufacturer's order are constantly demanded to carry out these tests time and cost efficiently.

The enormous variety in bogie frames leads to a high number of "disposable fixtures" and therefore to high one-off costs for nearly every laboratory test. This work determines the possibilities of the existing portal test bench of the Schweißtechnische Zentralanstalt and affects the frame tests of the different bogie categories. On this basis, drafts for the standardization of test bench interfaces and the modularization of fixtures, taking into account EN 13749 requirements, are explained. The aim of this work is the reduction in costs and time. The feasibility of the drafts and the high reusability of the modularized fixtures are proved by examples of bogie frame test setups for light rails, metro, passenger carrying vehicles, locomotives and high speed trains. With a final consideration of the added value chain the potential savings are indicated in the different periods.

---

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Aufgabenstellung	4
1.4	Vorgehensweise / Aufbau der Arbeit	6
<b>2</b>	<b>FESTIGKEITSVERSUCHE AN DREHGESTELLRAHMEN</b>	<b>7</b>
2.1	Allgemeines	7
2.2	Arten und Ziele	8
2.2.1	Arten	8
2.2.2	Ziele	8
2.2.3	Statische Festigkeitsversuche	9
2.2.3.1	Versuchsaufbau	9
2.2.3.2	Versuchsdurchführung	10
2.2.3.3	Dehnungsmessung und Spannungsanalyse	11
2.2.3.4	Ermittlung von Bauteilsteifigkeiten	14
2.2.4	Ermüdungsversuche	15
2.2.4.1	Versuchsaufbau	16
2.2.4.2	Versuchsdurchführung	16
2.2.5	Validierung	19
2.2.5.1	Validierung des FE- Modells	19
2.2.5.2	Validierung Ermüdungsversuch - Betriebsfestigkeitsberechnung	21
2.2.6	Qualitätsnachweis für Auslegung, Design und Fertigung	22
2.3	Einflüsse	23
2.3.1	Regelwerke	23
2.3.2	Randbedingungen Drehgestell	25
2.3.3	Randbedingungen Prüftechnik	26
2.3.4	Randbedingungen Vorrichtungstechnik	29
2.3.5	Prüfstrategie Hersteller / Betreiber / Zulassung	30
2.3.6	Wirtschaftlichkeit	30
2.4	Festigkeitsversuche in anderen Branchen	33
2.4.1	Festigkeitsversuch mit einem „Schienenfahrzeugsimulator“	37
2.4.2	Festigkeitsversuch mit einem „Drehgestellsimulator“	38
2.4.3	Vergleich von Auto mit Schienenfahrzeug / Drehgestell	40
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN – DREHGESTELLE</b>	<b>43</b>
3.1	Allgemeines	43
3.2	Laufwerke / Fahrwerke	43
3.3	Drehgestelle	45
3.4	Drehgestelle und ihre Hauptkomponenten	48
3.4.1	Hauptbaugruppen und -komponenten eines Triebdrehgestells	48
3.4.2	Hauptbaugruppen und -komponenten eines Laufdrehgestells	49
3.4.3	Radsatz inkl. Räder	49
3.4.4	Radsatzlagergehäuse incl. Radsatzlagerung	49
3.4.5	Primärfederung	50
3.4.6	Radsatzführung	50
3.4.7	Drehgestellrahmen	51
3.4.8	Sekundärfederung	51
3.4.9	Dämpfer	51
3.4.10	Längsmitnahme (zur Anlenkung des Fahrzeugwagens)	52
3.4.11	Antriebseinheit	53
3.4.12	Bremseinheit	53
3.5	Drehgestellrahmen	54

---

<b>4</b>	<b>ERHEBUNG VON RELEVANTEN INFORMATIONEN, RANDBEDINGUNGEN UND DATEN</b>	<b>57</b>
4.1	Ausgangslage Prüfstand des Festigkeitslabors SZA	57
4.2	Prüfstände und Prüflagen	60
4.2.1	Prüfstände	60
4.2.2	Prüflage von Drehgestellrahmen	65
4.2.2.1	Betriebslage	66
4.2.2.2	Rückenlage	73
4.3	Erhebung von Geometriedaten von Fahrwerksrahmen / Drehgestellrahmen verschiedener DG- Kategorien	75
4.4	Identifizierung von Kraftereinleitungsstellen und Kraftab-leitungsstellen an Drehgestellrahmen verschiedener DG- Kategorien	78
4.4.1	Allgemein (Koppelstellen)	78
4.4.2	Haupteinleitungsstellen	79
4.4.3	Zusatzeinleitungsstellen	79
4.4.4	Kraftableitungsstellen	81
4.4.4.1	Vertikalabstützung	81
4.4.4.2	Lateraleabstützung	81
4.4.4.3	Longitudinalabstützung	82
4.5	Kraftgrößen	82
4.6	Grenzen der Laborversuche	84
4.7	Erhebung vorrichtungstechnischer Lösungen mit Beispielen	87
4.7.1	Beispiel 1:	87
4.7.2	Beispiel 2:	88
4.7.3	Beispiel 3:	89
4.7.4	Beispiel 4:	90
4.7.5	Beispiel 5:	93
4.7.6	Beispiel 6:	95
4.8	Ermittlung und Vergleich verschiedener DGR- Abmessungen zur Bestimmung des Platzbedarfs	96
<b>5</b>	<b>FESTLEGUNG DES KONZEPTS</b>	<b>97</b>
5.1	Konzept Standardisierung	99
5.2	Konzept Modularisierung	100
<b>6</b>	<b>STANDARDISIERUNG</b>	<b>101</b>
6.1	Schnittstellen	101
<b>7</b>	<b>MODULARISIERUNG</b>	<b>103</b>
7.1	Allgemein – Konstruktionsprinzipien	103
7.2	Modul Wagenkasten- Sekundärfederersatz	104
7.3	Modul Radsatzersatz	106
7.3.1	Submodul Vertikalkraftableitung und Verwindung	109
7.3.2	Submodul Primärfederersatz und Radsatzanlenkung	111
7.4	Modul Querkraftereinleitung	113
7.5	Modul Querkraftableitung	115
7.6	Modul Längskraftableitung	116
7.6.1	Lemniskatenführung	117
7.6.2	Tauchzapfen	118
7.6.3	Binärenlenker 1#	120
7.6.4	Binärenlenker 2#	121

<b>8</b>	<b>BEISPIELE VON PRÜFAUFBAUTEN</b>	<b>122</b>
8.1	Straßenbahn 1 - innengelagert	122
8.2	Straßenbahn 2 - außengelagert	125
8.3	Metro 1 - leichte Metro - TDGR	131
8.4	Metro 2 – schwere Metro - TDGR	136
8.5	Reisezugwagen 1	139
8.6	Reisezugwagen 2	144
8.7	Lokomotive 1	147
8.8	Hochgeschwindigkeitszug 1 – LDGR - Normalspur	152
8.9	Hochgeschwindigkeitszug 2 – TDGR - Breitspur	157
<b>9</b>	<b>SONDERBEISPIELE VON PRÜFAUFBAUTEN</b>	<b>160</b>
9.1	Prüfaufbau Metro 1 mit Primärkrafteinleitung aufgeständert	160
9.2	Prüfaufbau Metro 1 mit Primärkrafteinleitung abgehängt	162
<b>10</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG</b>	<b>164</b>
10.1	Phase 1	165
10.2	Phase 2	166
10.3	Phase 3	167
10.4	Phase 4	168
10.5	Betrachtung über die Kette	168
<b>11</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>171</b>
<b>12</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>174</b>
<b>13</b>	<b>VERZEICHNIS</b>	<b>175</b>
13.1	Literaturverzeichnis	175
13.2	Tabellenverzeichnis	179
13.3	Abbildungsverzeichnis	180

## **Abkürzungen und Formelzeichen**

DG	Drehgestell
TDG	Triebdrehgestell
LDG	Laufdrehgestell
DGR	Drehgestellrahmen
TDGR	Triebdrehgestellrahmen
LDGR	Laufdrehgestellrahmen
JLDGR	Jacobs Laufdrehgestellrahmen
DOF	Degree of freedom
DMS	Dehnmessstreifen
MKS	Mehrkörpersimulation
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
IIW	International Institute of Welding
BS	British Standard
AWS	American Welding Society
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
ASME	American Society of Mechanical Engineers
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
BOStrab	Straßenbahn- Bau- und Betriebsordnung
SZA	Schweißtechnische Zentralanstalt
IMA	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH (Dresden)
IFF	IFF Engineering & Consulting GmbH
ECS	Engineering Center Steyr
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MTS	MTS Systems Corporation
TU	Technische Universität
DB	Deutsche Bahn
VNIIZhT	JSC VNIIZhT - JSC Railway Research Institute / OAO ВНИИЖТ

EN	Europäische Norm
UIC	Union internationale des chemins de fer
GOST	Staatlicher Standard der russischen Föderation
AAR	Association of American Railroads
ASTM	American Standard for Testing and Materials
StB	Straßenbahn
RZW	Reisezugwagen
TFZ	Triebfahrzeug
T	Triebfahrwerk
L	Lauffahrwerk
HS	High Speed
KF	Konusfeder
CF	Chevronfeder
LF	Luftfeder
StDF	Stahldruckfeder
DL	Dreieckslenker
Sw	Schwinge (Radsatzschwinge)
BS	Bremsscheibe
P	Putzbremse
DZ	Drehzapfen
Le	Lenker
TZ	Tauchzapfen
ZDst	Zug-, Druckstange
tgef	teilgedert
vgef	vollgedert
max	maximal
min	minimal



# 1 Einleitung

Sicherheit und Zuverlässigkeit von Schienenfahrzeugen für Personen- und Güterverkehre sind die wesentlichen und unverzichtbaren Erfordernisse für Fahrgast, Betreiber, Zulasser und Hersteller. Zeitgemäßer Komfort, höchstmögliche Leistungsfähigkeit und höchste Verfügbarkeit bei gleichzeitig gesteigerter Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einsatz der Fahrzeuge über ihre gesamte Nutzungsdauer sind für Fahrgast wie Betreiber ebenfalls von zentralem Interesse.

Die teils gegenläufigen technischen, ökonomischen, ökologischen und gesetzlichen Herausforderungen erweitern die weltweit bestehenden und unterschiedlich ausgeprägten Anforderungen an Schienenfahrzeuge. Sie vergrößern die bestehende Vielfalt spurgeführter Fahrzeuge für die innerstädtischen, regionalen und überregionalen Verkehre, mit welchen weltweit ein hoher Anteil der Personen- und Güterströme ökonomisch und ökologischer als mit Automobil- oder Luftverkehren befördert werden.

Daraus erwächst für die verschiedenen Hersteller verstärkt die Notwendigkeit für das Gesamtsystem „Schienenfahrzeug“ wie auch für dessen Teilsystem „Fahrwerk“, die Prinzipien des Leichtbaus und der Betriebsfestigkeit unter Nutzung aller technischen Möglichkeiten wie z.B. innovative und energieeffiziente Konzepte und Konstruktionen, präzisere Auslegungs- und Berechnungsverfahren, Einsatz neuer oder höher festerer Werkstoffe, neue Fertigungs- und Fügeverfahren wie auch zeitgemäße, die Produkthaftung berücksichtigende über die Zulassung hinausgehende experimentelle Festigkeitsnachweise anzuwenden.

Für die im Einsatz hochbelasteten Drehgestelle und deren hochbeanspruchte Drehgestellrahmen, welche während ihrer Einsatzlebensdauer von 25 bis 40 Jahren bis zu 15 Millionen Kilometer Laufleistung erfahren und permanent einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit sowie zum Komfort und zur Wirtschaftlichkeit leisten, gilt dies im Besonderen.

## **1.1 Problemstellung**

Die hohe Varianz und Vielfalt von Schienenfahrzeugen und von Drehgestellen und -rahmen verursacht bei Herstellern, wie auch bei ausführenden Prüfinstituten, welche aus Zulassungs- und aus Produkthaftungsgründen an Drehgestellrahmen Festigkeitsversuche unter Laborbedingungen durchführen, hohe planungs- und prüftechnische wie auch wirtschaftliche Anforderungen an Abwicklung und Durchführung. Sie provoziert teils „Einwegvorrichtungen“ oder reduziert und beschränkt die kosteneffiziente Wiederverwendung von Vorrichtungen und Vorrichtungssätzen.

Die Reduktion der Durchlaufzeit ist kaum möglich, da zumeist ein vollständiger Durchlauf von Konzeption, Konstruktion, Detaillierung und Erstellung der Fertigungs- und Montageunterlagen, der Beschaffung und des Einkaufs, der Fertigung, der Montage des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung erforderlich wird.

Die hohe Vielzahl an unterschiedlichen Prüfaufbauten sowie die Vielfalt an Vorrichtungen lassen eine systematische Entwicklung und kontinuierliche Qualitätssteigerung nur in beschränktem Ausmaß zu. Die Erfahrung und Kenntnis von Handhabbarkeit, von Stärken und Schwächen bei Montage und Versuchsdurchführung sowie vom Verhalten während der Versuchsdurchführung bleibt gering.

Vorrichtungsunterschiede erschweren die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus experimentellen Versuchen und / oder aus Versuchssimulationen.

### **Zusammenfassung:**

- Hohe Vielfalt an unterschiedlichen Prüfaufbauten
- Hoher Anteil an Einwegvorrichtungen bzw. geringer Anteil an wiederverwendbaren Vorrichtungen verursachen je Versuch hohe Einmalkosten über die Wertschöpfungskette
- Qualität der Versuche zufolge Vorrichtungsvielfalt unterschiedlich
- Kaum systematische Weiterentwicklung und Optimierung
- Potential für kontinuierliche Qualitätsverbesserungen wenig genutzt

## 1.2 Zielsetzung

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist es die Kosten für Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen, bestehend aus statischen Versuchen und Ermüdungsversuchen, zu senken.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Reduktion der Durchlaufzeit\* sowie der Versuchsdauer\*\*.

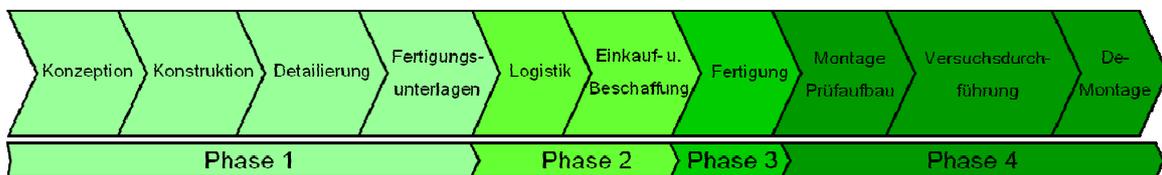


Abbildung 1 Wertschöpfungskette

*\*Durchlaufzeit: Der betrachtete Zeitraum besteht aus folgenden vier Phasen.*

**Phase 1:** Konzeption, Konstruktion, Detaillierung, Erstellung von Fertigungs- und Montageunterlagen, Erstellung der Dokumentation (Berichtslegung)

**Phase 2:** Logistik, Einkauf und Beschaffung

**Phase 3:** Fertigung (Eigen- und / oder Fremdfertigung)

**Phase 4:** Montage von Sub- und Hauptmodulen, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung (Durchführung von Vorversuchen, statischen Versuchs- und Ermüdungsprogramm), Demontage des Versuchsaufbaus und Dokumentation zur Berichtslegung.

*Versuchsdauer\*\*:* entspricht dem Zeitraum der Phase 4.

Die Qualitätssteigerung der Festigkeitsversuche ist als drittes Ziel anzustreben.

**Zusammenfassung:**

- ▶ Senkung der Versuchs- und Vorrichtungskosten (über die Wertschöpfungskette betrachtet)
- ▶ Reduktion der Durchlaufzeit / der Versuchsdauer
- ▶ Steigerung der Qualität der Festigkeitsversuche (Versuchsaufbau / Vorrichtungen)
  - Verbesserung der Reproduzierbarkeit durch bessere Handhabbarkeit
  - Optimierung der Stärken / Reduktion der Schwächen
  - Systematische Weiterentwicklung Vorrichtungen / Versuchsaufbau

### **1.3 Aufgabenstellung**

Zur Erreichung der Ziele Kostensenkung und Durchlaufzeitverkürzung werden zwei Teilaufgaben mit ihren Aufgabenstellungen für die Arbeit definiert.

Als erste Teilaufgabe ist ein Konzept auszuarbeiten, welches den bestehenden Portalprüfstand, welcher sich aus Spannfeld und Portal zusammensetzt, analysiert und mögliche Schnittstellen zwischen Prüfstand und Vorrichtungsmodule definiert und damit eine Standardisierung ermöglicht.

Die zweite Teilaufgabe befasst sich mit der Vorrichtungskonzeption zur Krafftein- und -ableitung und der Modularisierung derselben. Die Module sind unter Berücksichtigung der Verwendbarkeit für Versuche an unterschiedlichen Drehgestellkategorien zu konzipieren. Dabei ist das Augenmerk auf einen transparenten Prüfaufbau, eine hohe Variabilität und Wiederverwendbarkeit zu legen.

Beispielhaft sind nachfolgend sieben Kategorien nach EN 13749 angeführt.  
(Siehe EN 13749; A.6 Drehgestell- Klassifizierung, S 16)

- **Kategorie B-I** angetriebene und nicht angetriebene Drehgestelle für Vollbahnfahrzeuge und Intercity-Reisezugwagen sowie Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge;
- **Kategorie B-II** angetriebene und nicht angetriebene Drehgestelle für S-Bahnfahrzeuge;
- **Kategorie B-III** angetriebene und nicht angetriebene Drehgestelle für U- und S-Bahnfahrzeuge;
- **Kategorie B-IV** Drehgestelle für Stadtbahn- und Straßenbahnfahrzeuge;
- **Kategorie B-V** Drehgestelle für Güterwagen mit einstufiger Federung;
- **Kategorie B-VI** Drehgestelle für Güterwagen mit zweistufiger Federung;
- **Kategorie B-VII** Drehgestelle für Lokomotiven

### **Zusammenfassung:**

1. Ausarbeitung eines Konzepts zur Standardisierung von Schnittstellen eines bestehenden Portalprüfstands des Festigkeitslabors der Schweißtechnischen Zentralanstalt SZA zu Vorrichtungsmodulen
2. Konzeptionelle Modularisierung von Vorrichtungen für Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen von Drehgestellen mit zwei Radsätzen in Betriebslage gemäß EN 13749.

## **1.4 Vorgehensweise / Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit beschreibt in ersten beiden Kapiteln 2 und 3 die Grundlagen für Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen und von Drehgestellen. Im Kapitel 4 sind erhobene Informationen zusammengestellt, welche die Basis für die Festlegung des Konzepts unter Berücksichtigung der bestehenden Prüfstandsmöglichkeiten bilden und in Absprache mit dem Festigkeitslabor der Schweißtechnischen Zentralanstalt erfolgt sind.

Kapitel 5 legt das Konzept fest und definiert dessen Teilaufgaben zur Standardisierung und Modularisierung.

Kapitel 6 und 7 umfassen die Konzepte für die Standardisierung der Prüfstandsschnittstellen und der Modularisierung der festgelegten Module zur Krafftein- und -ableitung.

Im Kapitel 8 werden Beispiele für Prüfaufbauten von fünf verschiedenen Kategorien von Drehgestellrahmen präsentiert.

Das nachfolgende Kapitel 9 zeigt auch die Variabilität der Vorrichtungsmodule bei primärseitiger Kraffteinleitung in zwei Varianten. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Vorgehensweise erfolgt im zehnten Kapitel. Die Zusammenfassung und die Ergebnisse sind im Kapitel 11 dargestellt und im abschließenden Kapitel 12 erfolgt ein Ausblick auf weiterführende Fragen und Aufgabenstellungen.

## 2 Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen

### 2.1 Allgemeines

Die rechnerische Auslegung und konstruktive Gestaltung eines Bauteils erfolgt im Allgemeinen unter folgenden zwei Gesichtspunkten. Einerseits ist sicherzustellen, dass das Bauteil seine Funktionen während seiner gesamten Nutzungsdauer (Produktlebensdauer) erfüllt und alle möglichen vorzeitigen Ausfalls- und Versagensarten ausgeschlossen werden können.

Andererseits ist sicherzustellen, dass die bauteilsichere Gestaltung und Bemessung ohne Überdimensionierungen und ohne unnötigen Fertigungsaufwand auf wirtschaftliche Weise realisiert werden kann.

Sind alle relevanten Einflußgrößen und die während der Produktlebensdauer auftretenden Betriebs- und Sonderbelastungen, sowie Umgebungseinflüsse ausreichend bekannt und in der Gestaltung und Auslegung berücksichtigt, so kann ein rechnerischer Nachweis genügen.

Die Bauteil - oder Gestaltsfestigkeit - kann auch experimentell am bestehenden Bauteil durch Aufprägung anwendungsspezifischer Belastungen ermittelt werden.

Diese Möglichkeit wird vor allem als Ergänzung zum rechnerischen Nachweis bei Serienteilen mit hohen Stückzahlen und unter Berücksichtigung statistischer Grundlagen genutzt. Auch bei ungenauer Kenntnis der relevanten Einflußgrößen oder von werkstoff- und / oder fertigungsbedingten Einflüssen wird der Versuchsweg beschritten.

Handelt es sich beim Bauteil um ein hochbeanspruchtes und sicherheitsrelevantes Bauteil, welches bei Ausfall oder Versagen eine Gefährdung für Menschen und Umwelt darstellt, oder hohen wirtschaftlichen Schaden verursacht, so ist zumeist aus Zulassungsgründen ein experimenteller Festigkeitsversuch verpflichtend durchzuführen. Auch Produkthaftungsüberlegungen veranlassen die Hersteller Versuche durchzuführen.

## 2.2 Arten und Ziele

### 2.2.1 Arten

Grundsätzlich unterscheidet man nach der Geschwindigkeit der Belastungsaufprägung:

- Statische Festigkeitsversuche
- Ermüdungsversuche (dynamische Festigkeitsversuche, Schwingversuche)

Ermüdungsversuche, oft auch als Schwingversuche bezeichnet, werden als Dauer- oder Betriebsfestigkeitsversuche ausgeführt. Nachfahrversuche oder Restlebensdauerversuche zählen ebenfalls zu den Ermüdungsversuchen.

### 2.2.2 Ziele

Ziele von Festigkeitsversuchen am Bauteil sind:

- Experimenteller Nachweis der Bauteilfestigkeit<sup>1</sup> (statisch und dynamisch)

**statische Festigkeit** — d. h. Bewertung gegen Instabilität, Bruch und bleibende Verformung, welche die Funktionalität der Komponente verletzt;

**Ermüdung** — d. h. Bewertung gegen Ermüdungsversagen (Brucheinleitung) auf Grund von zyklischen Belastungen.

- Validierung der FEM- Rechnung
- Qualitätsnachweis für Design und Fertigung

---

<sup>1</sup> EN 13749:2011; E.4.4; S34

### 2.2.3 Statische Festigkeitsversuche

Die Durchführung von statischen Laborversuchen erfolgt mit dem Ziel die statische Bauteilfestigkeit der Drehgestellrahmen experimentell nachzuweisen.

Das Bauteil erfüllt die statischen Festigkeitsanforderungen hinreichend, wenn durch die experimentellen Versuche folgende Bedingungen hinreichen erfüllt sind:

- keine Überschreitung der Streckgrenze ( $R_{eH}$  oder  $R_{p\ 0,2}$ )
- keine bleibenden Verformungen (bzw. innerhalb der Toleranzen)
- keine Instabilität
- kein Bruch

#### 2.2.3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau muss derart gestaltet sein, dass am Drehgestellrahmen bei Aufprägung der Belastungsprogramme die gleichen Beanspruchungen erzeugt werden, wie sie das im Betrieb befindliche Fahrzeug real am eingebauten Drehgestellrahmen hervorruft.

Durch den Prüfaufbau und die vorrichtungstechnische Einspannung des Rahmens dürfen keine Einschränkungen in der Verformbarkeit des Prüfobjekts hervorgerufen werden, welche abweichenden Beanspruchungen bewirken.

Die Umsetzung dieser Anforderungen ist einerseits durch Prüfstands- und vorrichtungstechnische und andererseits durch wirtschaftliche Grenzen limitiert.

Der Versuchsaufbau und der Umfang des statischen Versuchsprogramms sind vom Hersteller spezifiziert und berücksichtigt im Allgemeinen Normen und Regelwerke sowie Herstellerinterne Vorgaben.

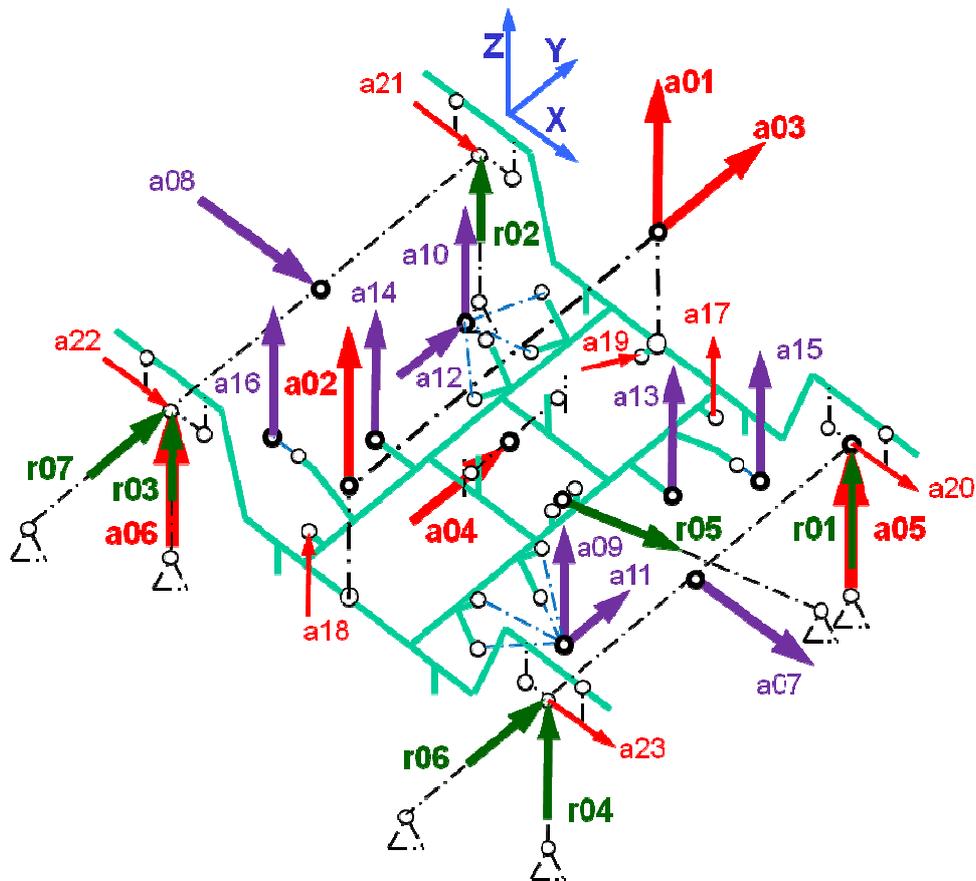


Abbildung 2 Schema Versuchsaufbau für statische Versuche

Abbildung 2 skizziert die Kräfteinleitungsstellen an welchen rote oder violette mit „a und einer fortlaufenden Nummer“ gekennzeichnete Pfeile die durch Aktuatoren aufzubringenden Aktionskräfte darstellen. Rote Pfeile stehen für aufzuprägende Hauptlasten, violette Pfeile für Zusatzlasten.

Grüne mit „r und einer fortlaufenden Nummer“ gekennzeichneten Pfeile skizzieren die abzuleitenden Kräfte und stellen die mittels Kraftmessenrichtungen wie z. B. Kraftmessdosen zu ermittelnden Reaktionskräfte dar.

### 2.2.3.2 Versuchsdurchführung

Bei statischen Versuchen werden unterschiedliche Belastungszustände (Einzellasten oder Lastkombinationen) simuliert und zeitlich konstant dem im Versuchsaufbau aufgespannten Drehgestellrahmen aufgeprägt.

Simuliert werden:

- Im Betrieb auftretende Normallasten
- Im Betrieb maximal auftretende Kräfte
- Lasten durch Anbauteile (Dämpfer, Massen von Anbauteilen, Antrieb, Bremsen, etc.)
- Lastkombinationen
- Sonderlastfälle (z. B. Motorkurzschluss, 3g oder 5g Stoß)

### 2.2.3.3 Dehnungsmessung und Spannungsanalyse

Die Aufprägung dieser zumeist mehrachsigen Belastungsfälle verursacht am Bauteil Spannungen und Verformungen. Spannungszustände an lastfreien Oberflächen können nur ein- oder zweiachsig sein. Daher werden an, meist auf Basis der FE- Berechnung ausgewählten, hochbeanspruchten Stellen des Drehgestellrahmen (Abbildung 4) Dehnungsmessstreifen (Abbildung 3a, b unidirektionale DMS und Rosetten DMS) appliziert. Mit diesen werden die durch die aufgeprägten Belastungen verursachten Beanspruchungen gemessen und aufgezeichnet. Die Spannungen und Verformungen werden anschließend aus den Messergebnissen errechnet und mit den definierten Kriterien wie z. B. der zulässigen Werkstoffstreckgrenze verglichen und bewertet.

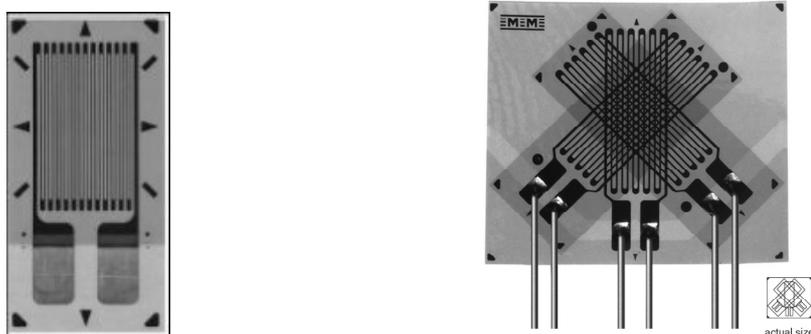


Abbildung 3a,b a. unidirektionaler DMS und b. DMS Rosette (Quelle: Vishay)

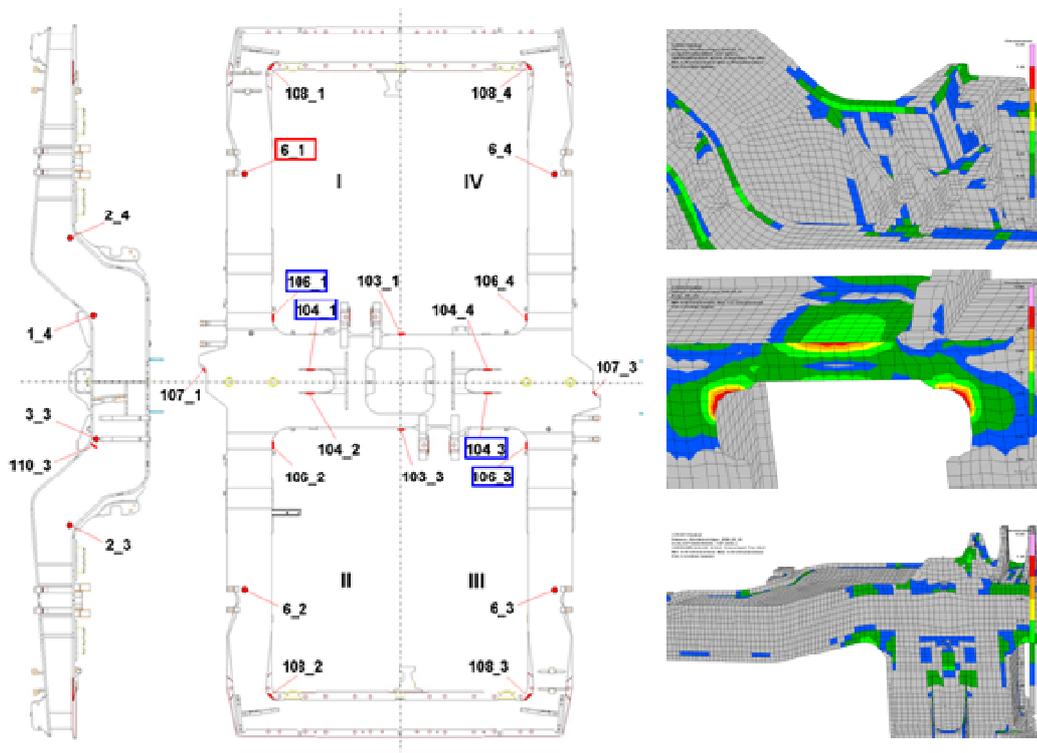


Abbildung 4 Messstellenauswahl und Messstellenplan (Quelle: Siemens)

### Formelwerk für die experimentelle Spannungsanalyse

Die mittels unidirektionalen Dehnmessstreifen gemessenen Dehnungen werden mit dem Hook'schen Gesetz in Spannungen umgerechnet.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Die mittels DMS Rosetten ermittelten Dehnungen lassen sich unter Berücksichtigung des verwendeten DMS Typs über die Beziehungen des ebenen Spannungszustands in Spannungen umrechnen:

Berechnung der Hauptdehnungen  $\varepsilon_{1,2}$  aus den Gitterdehnungen  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  [ $\mu\text{m/m}$ ]

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

Bestimmung des Hauptdehnungswinkels  $\alpha$  [°]

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan(\psi) \left( \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right)$$

Berechnung der maximalen Schubdehnung  $\gamma_{12}$  [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

$$\gamma_{12} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Berechnung der Hauptspannungen  $\sigma_{1,2}$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

Berechnung der maximalen Schubspannung  $\tau_{12}$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$$\tau_{12} = G\gamma_{12}$$

Berechnung der Vergleichsspannung nach von MISES  $\sigma_v$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] für den ebenen Spannungszustand mit Hauptnormal- und Hauptschubspannungen

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau_{12}^2}$$

### 2.2.3.4 Ermittlung von Bauteilsteifigkeiten

Im Rahmen der statischen Versuche werden auch funktionale Bauteilparameter (Abbildung 5), wie die Verwindesteifigkeit oder Biegesteifigkeiten, des Drehgestellrahmen ermittelt. Die Verwindesteifigkeit der Drehgestellrahmen findet bei der Bestimmung der Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen Verwendung.<sup>2</sup>

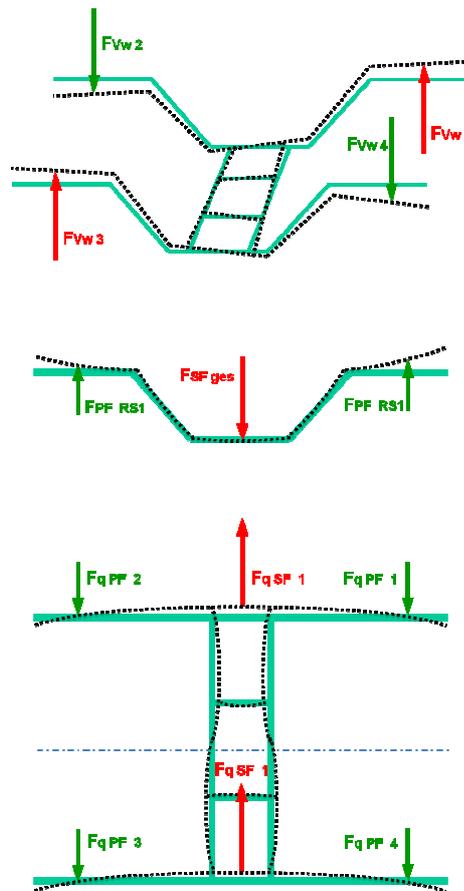


Abbildung 5 Schema Verwindungssteifigkeit, Vertikalbiegesteifigkeit, Querbiegesteifigkeit

Durch Belastungen hervorgerufene Durchbiegungen müssen auf ein Maß beschränkt sein, damit die Funktionalitäten des Rahmens, aber auch die der angrenzenden Komponenten und Anbauteile sowie des Teilsystems Drehgestell sichergestellt sind.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> DIN EN 14363:2005;

<sup>3</sup> EN 13749:2011; S37

## 2.2.4 Ermüdungsversuche

Bauteilversagen durch Materialermüdung stellt für Bauteile, welche zeitlich oder örtlich veränderlichen und häufig wiederholten Beanspruchungen unterliegen, eine Gefahr dar. Ermüdungsfestigkeitsversuche sind auf den Eisenbahningenieur August Wöhler zurückzuführen. Er beschäftigte sich bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit dem Phänomen des Ermüdungsversagens und entwickelte den nach ihm benannten Schwingversuch.

*„Der Bruch des Materials läßt sich auch durch vielfach wiederholte Schwingungen, von denen keine die absolute Bruchgrenze erreicht, herbeiführen. Die Differenzen der Spannungen, welche die Schwingungen eingrenzen, sind dabei für die Zerstörung des Zusammenhanges maßgebend.“*

*Wöhler 1871, Auszug Aufsatz in Zeitschrift für Bauwesen*

Die Durchführung von Ermüdungsversuchen im Labor erfolgt mit dem Ziel die Bauteilermüdungsfestigkeit der Drehgestellrahmen experimentell für die geplante Einsatzlebensdauer von beispielsweise 30 Jahren nachzuweisen.

Ein Vorteil des experimentellen Ermüdungsversuchs gegenüber der Rechnung wird wie folgt beschrieben.

*„Ein Dauerversuch ist die einzige Art eines Typtests, die physikalische Schädigung auf der Gesamtstruktur verursacht.“<sup>4</sup>*

Das Bauteil erfüllt die dynamischen Festigkeitsanforderungen hinreichend, wenn durch die experimentellen Versuche folgende Bedingungen hinreichen erfüllt sind:

- keine Ermüdungsrisse
- kein Ermüdungsversagen (Ermüdungsbruch)

---

<sup>4</sup> EN 13749:2011; S45

### *2.2.4.1 Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau entspricht im Wesentlichen dem Aufbau für die statischen Versuche. Die Anzahl der Krafteinleitungspunkte muss sich aber aus Prüfstandstechnischen wie wirtschaftlichen Gründen auf relevante Betriebsbelastungen reduzieren. Sie fokussieren sich auf jene Bereiche am Drehgestellrahmen, welche während der gesamten Betriebsdauer schädigungs- und ermüdungsrelevanten Beanspruchungen ausgesetzt sind.

### *2.2.4.2 Versuchsdurchführung*

Ermüdungsprogramme können als Einstufen- oder als Mehrstufenversuche oder als Betriebsfestigkeitsversuche durchgeführt werden.

Als Basis für die Belastungs- Zeitverläufe werden Normen und Regelwerke herangezogen oder sie werden aus Messergebnissen von Streckenversuchen generiert.

Nachfolgend sind die für Drehgestellrahmenversuche etablierten Ermüdungsprogramme nach EN 13749 und nach GOST mit ihren Kriterien skizziert.

#### **Ermüdungsprogramm EN13749**

In der Europäischen Norm EN13749 bzw. in den UIC- Merkblättern 515-4 und 615-4 wird für Drehgestellrahmen ein dreistufiger Versuch empfohlen:

Die Hauptlasten in vertikaler und lateraler Richtung und der vertikale Hauptweg (Verwindung) werden in der ersten Stufe mit sechs Millionen Lastwechseln bei 100% Nominallast aufgebracht. Nach 6 Millionen Lastwechseln wird die Amplitude um 20% erhöht, nach 8 Millionen erfolgt eine weitere Erhöhung um 20 %.

1. Laststufe (6 Mio. LW, 100% Nominallast)
2. Laststufe (2 Mio. LW, 120% Amplitudenerhöhung)
3. Laststufe (2 Mio. LW, 140% Amplitudenerhöhung)

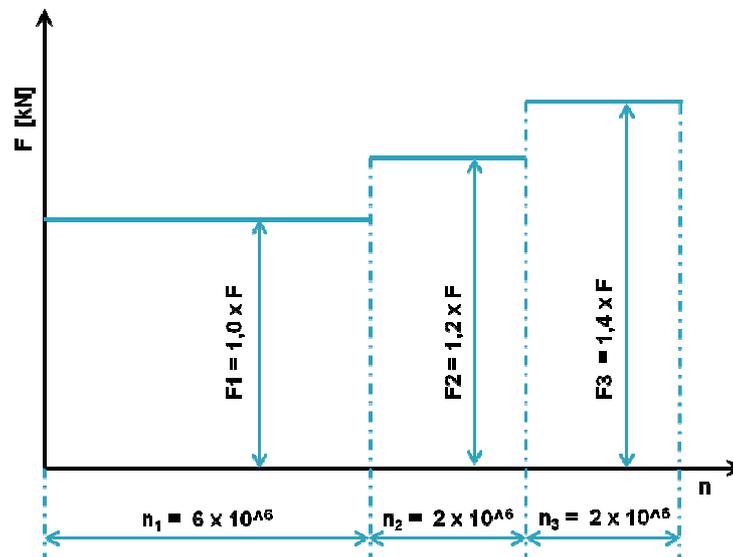


Abbildung 6 Schema Ermüdungsprogramm EN13749 dreistufig

Kriterium - Auszug aus EN13749<sup>5</sup>:

*Der Drehgestellrahmen wird als ausreichend fest befunden, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:*

- ✓ *es treten am Ende der ersten beiden Stufen keine Risse auf;*
- ✓ *im Verlauf der dritten Stufe sind sehr kleine Risse zulässig, die keine sofortige Reparatur erfordern würden, falls sie im Betrieb auftreten sollten.*

Diese Norm erlaubt während der ersten beiden Laststufen keine Ermüdungsrisse. Während der dritten Laststufe erlaubt sie kleine Ermüdungsrisse, diese sind hinsichtlich ihres Ortes und ihrer Größe zu analysieren.

Der Nachweis ob Riss- und Anzeigenfreiheit vorliegt, erfolgt durch zerstörungsfreien Rissprüfungen (Magnetpulververfahren<sup>6</sup> oder dem Farbeindringverfahren<sup>7</sup>). Üblicherweise wird nach jeder Laststufe eine vollständige Rissprüfung am Drehgestellrahmen durchgeführt.

<sup>5</sup> EN 13749; S49

<sup>6</sup> DIN EN ISO 9934-1 und DIN EN 1290

<sup>7</sup> DIN EN ISO 3452-1:2013:09

Ermüdungsprogramm GOST:

Dieses Ermüdungsprogramm fordert einen einstufigen Versuch. Dem Drehgestellrahmen werden zehn Millionen Lastzyklen von vertikalen und lateralen Maximallasten<sup>8</sup> aufgeprägt, welche während der betriebsdynamischen Festigkeitsuntersuchungen auf Gleisstrecken (Streckenversuche) gemessen wurden.

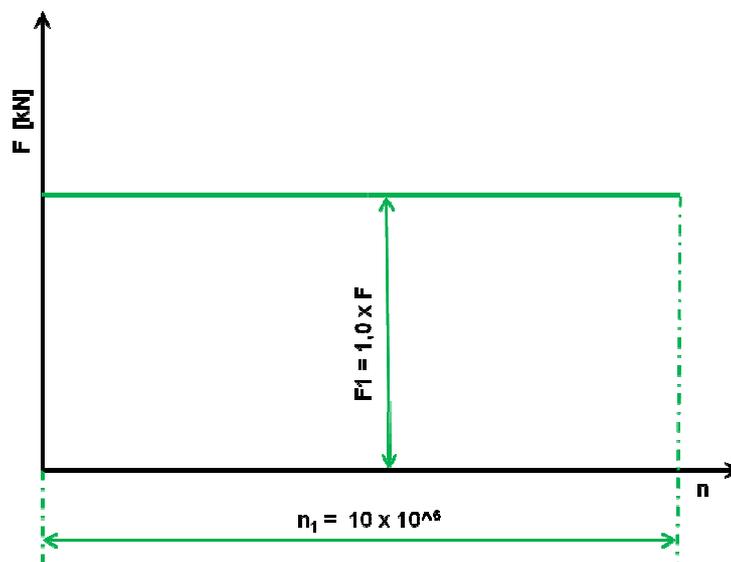


Abbildung 7 Schema Versuchsprogramm GOST einstufig

Kriterium Auszug aus NBZht CT 03-98<sup>9</sup>

*„Die Übereinstimmung des Prüfobjektes mit den Kennwertanforderungen wird durch fehlende Ermüdungsrissse am Objekt nach 10 Mio. Beanspruchungszyklen nachgewiesen.“*

Der Nachweis ob Riss- und Anzeigenfreiheit vorliegt, erfolgt durch entsprechende zerstörungsfreien Oberflächenprüfverfahren.

---

<sup>8</sup> Tskipurishvili; Welding International, 7:4, S 308-310

<sup>9</sup> NB Zht CT 03-98 Version 2009; A.11; S181

## 2.2.5 Validierung

### 2.2.5.1 Validierung des FE- Modells

Die Auslegung und Berechnung von Drehgestellrahmen erfolgt mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM), welche das Prinzip der virtuellen Verschiebungen beziehungsweise das Prinzip der virtuellen Arbeit nutzt. Bei der Modellbildung wird der Rahmen vollständig nachgebildet und es wird mit Hilfe von Einheitslastfällen und der Superposition von Ergebnissen die Festigkeit als Verhältnis von vorhandenen zu zulässigen Spannungen errechnet.

Die Ermittlung der zulässigen Spannungen erfolgt im Allgemeinen nach unterschiedlichen Regelwerken wie FKM, IIW, BS, AWS oder DVS.

Für einen Vergleich von rechnerisch ermittelten Dehnungen / Spannungen und beim Laborversuch gemessenen Dehnungen bzw. den daraus errechneten Spannungen ist eine Prüfstandssimulation erforderlich. Die Simulation muss das bestehende FE Modell des Drehgestellrahmen einbinden und den realen Prüfstand mit seinen Krafftein- und -ableitungsvorrichtungen sowie den realisierten Einspannungsbedingungen in einer technisch und wirtschaftlich sinnvollen Tiefe abbilden.

Die von Klaus Gradl 2013 verfasste Diplomarbeit *„Validierung der Finite-Elemente Festigkeitsberechnung mit Daten aus dem Laborversuch“* beschäftigt sich mit diesem Thema und untersucht wie die Übereinstimmung zwischen Laborversuchsergebnissen und Prüfstandssimulationen verbessert werden kann. Die Problematik der Prüfstandsmodellierung<sup>10</sup> wird darin folgendermaßen skizziert:

*„Die größte Schwierigkeit bei der Versuchsrechnung ist, alle wesentlichen Einflussfaktoren des Laborversuches wahrzunehmen und diese so weit als möglich in das Simulationsmodell zu integrieren. Einflussfaktoren, welche kaum*

---

<sup>10</sup> Gradl; S27

beziehungsweise nur unter großem Aufwand berücksichtigt werden können, sind zum Beispiel:

- Exakte Reibungswerte von Gelenken
- Steifigkeiten von Abstützstangen
- Einfluss von Vorspannkräften durch Anbauten
- Kontaktprobleme (überall dort, wo mittels einer Platte Kräfte auf das Bauteil eingeleitet werden)
- Eigenspannungen des Prüfobjektes

Deshalb ist es unumgänglich, bei der Erstellung des Simulationsmodells gewisse Vereinfachungen zu treffen.“

Nachfolgende Abbildung illustriert ein gut übereinstimmendes Ergebnis<sup>11</sup> dieser Arbeit.

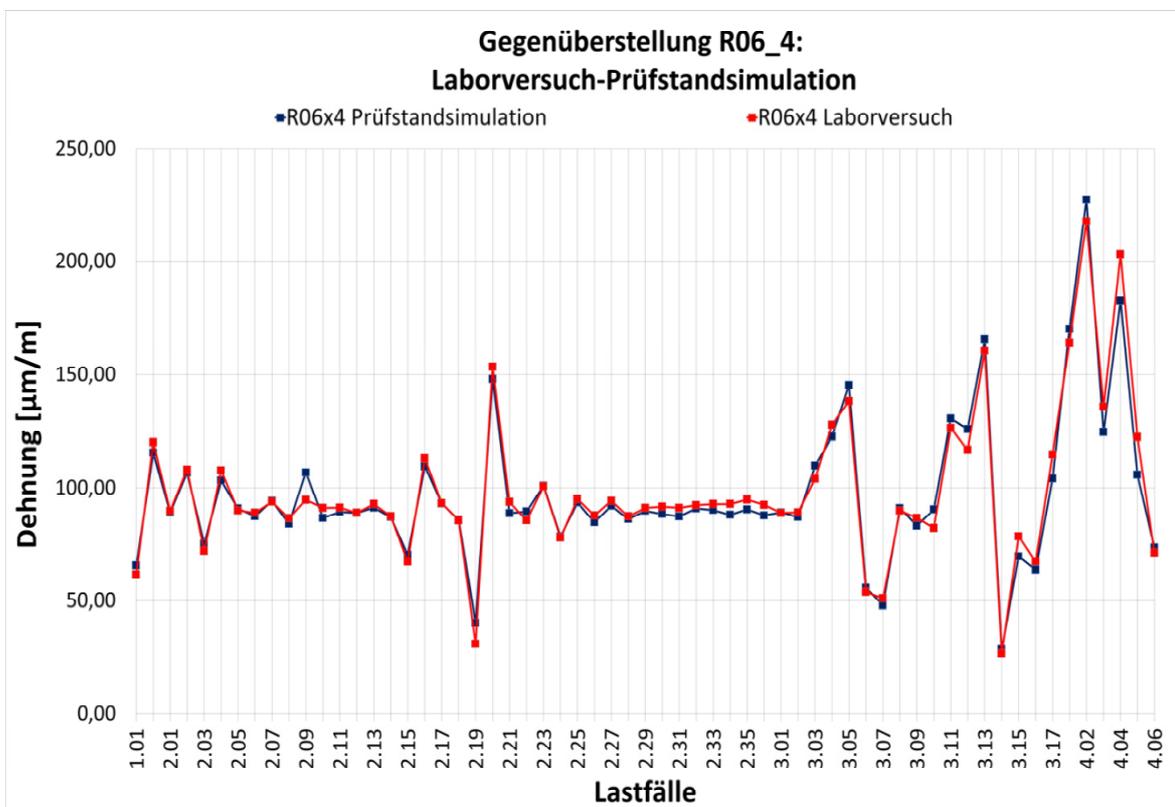


Abbildung 8 Vergleich Dehnungen gemessen – Dehnungen errechnet

<sup>11</sup> Gradl; Abbildung 30; S42

Die EN 13749 definiert umfassend die Validierungsziele<sup>12</sup> der statischen Laborversuche und die damit verbundenen Aufgaben.

*Die durch statische Laborversuche erreichbaren Validierungsziele sind:*

- *Ermittlung der realen Beanspruchung an den Messstellen unter synthetischen Lasten;*
- *Ermittlung funktionaler Parameter der Strukturkomponenten (z. B. Verwindesteifigkeit des Drehgestellrahmen);*
- *Verifikation statischer Festigkeitsanforderungen (einschließlich in Fällen, bei denen die Verifikation durch Simulation unmöglich oder nicht praktikabel ist);*
- *Verifikation des Simulationsmodells;*
- *Verifikation des Versuchsaufbaus (einschließlich des Aufbaus für den Ermüdungsversuch);*
- *Lebensdauerabschätzung, basierend auf gemessenen Beanspruchungen unter synthetischen Lasten und einer theoretischen Ermüdungshypothese.*

#### 2.2.5.2 Validierung Ermüdungsversuch - Betriebsfestigkeitsberechnung

Die Validierung der Betriebsfestigkeitsberechnung durch den Ermüdungsversuch erfolgt unter Nutzung der gemessenen Beanspruchungen und mittels einer theoretischen Ermüdungshypothese.

Die EN 13749 definiert umfassend die Validierungsziele<sup>13</sup> der Ermüdungsversuche und die damit verbundenen Aufgaben.

---

<sup>12</sup> EN 13749:2011; S38

<sup>13</sup> EN 13749:2011; S45

*Die durch Ermüdungsversuche zu erreichenden Validierungsziele sind:*

- *Verifikation und/oder Ermittlung des Ermüdungsverhaltens der Bauteilkomponenten unter synthetischen Lasten;*
- *Verifikation der Konstruktionsannahmen bezüglich Ermüdungsverhalten der tatsächlichen Einzelteile und ihrem erzeugten Qualitätsniveau (z. B. Verifikation der Bewertungsklassifizierung und empirischer Beurteilung der Herstellungsmängel).*

### *2.2.6 Qualitätsnachweis für Auslegung, Design und Fertigung*

Die Festigkeitsversuche am Drehgestellrahmen bestehend aus statischen Laborversuchen und Ermüdungsversuchen sowie die anschließende Validierung experimentell ermittelter Beanspruchungen ermöglichen Aussagen zur Güte des Auslegungs- und Fertigungsprozesses.

In einer Veröffentlichung<sup>14</sup> von Schabert und Moser wird dieser kombinierte Qualitätsnachweis folgendermaßen beschrieben.

*„Der versuchstechnische Bauteilnachweis ist die Qualitätskontrolle für die Berechnung und die Fertigung.“*

---

<sup>14</sup> Schabert, Moser; ZEV + DET Glas Ann 124 (2000) 4

## 2.3 Einflüsse

Im Wesentlichen erfüllt ein zeitgemäßer Festigkeitsversuch die teilweise unterschiedliche Anforderungen von:

- Betreiber
- Zulassung
- Hersteller (interne Richtlinien)

Weitere, ebenfalls z. T. gegensätzliche Einflüsse sind bei der Durchführung von Festigkeitsversuchen zu berücksichtigen:

- Regelwerke
- Randbedingungen Drehgestell
- Randbedingungen Prüftechnik
- Randbedingungen Vorrichtungstechnik
- Prüfstrategie Hersteller
- Wirtschaftlichkeit

### 2.3.1 Regelwerke

Abhängig vom geographischen Ziel- und Einsatzgebiet der Schienenfahrzeuge sind entsprechende Normen und Regelwerke gültig. Je nach Betreiber- und Zulassungsanforderungen sind diese bei der Berechnung und Versuchsdurchführung zu berücksichtigen.

- AAR (Association of American Railroads)
- GOST (Staatlicher Standard der russischen Föderation)
- UIC-Merkblätter (Union internationale des chemins de fer)

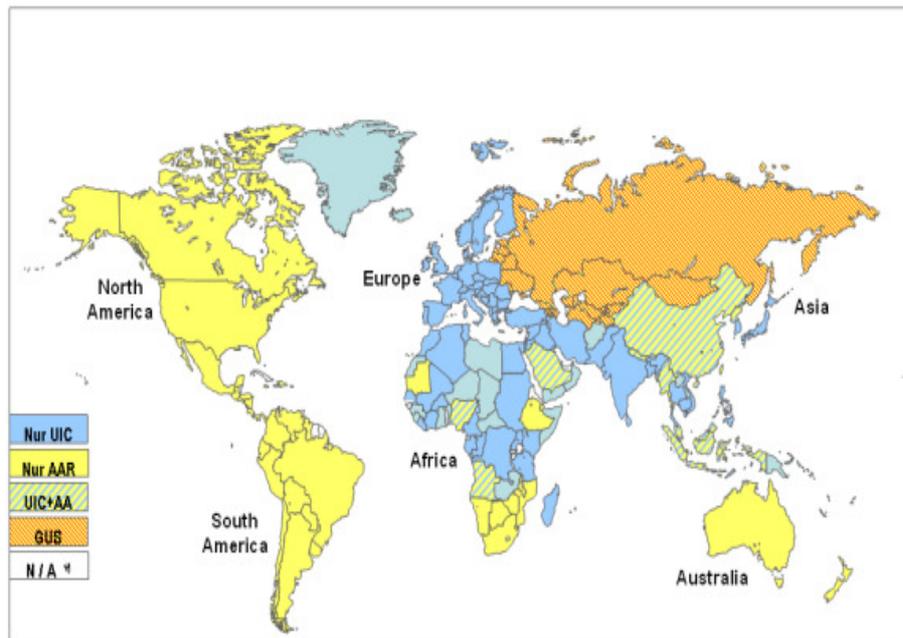


Abbildung 9 Weltkarte - Gültigkeit von Standards

Zusätzlich können neben nationalen und internationalen Gesetzen, Normen, und Richtlinien auch andere technischen Regelwerke Gültigkeit besitzen, welche teils voneinander abweichende, teils widersprüchliche oder nicht mehr zeitgemäße Forderungen für die Versuchsdurchführung erheben. Daher ist eine frühzeitige Abklärung zwischen Betreiber, Zulassung und Hersteller zu empfehlen.

Im Europäischen Raum sind beispielsweise folgende Regelwerke, welche zum Teil im Gesetzesrang stehen, gültig und zu berücksichtigen.

- TSI Highspeed
- TSI Loc&Pas
- EN 13749:2011 / EN 13749:2005
- EN 15827:2011
- UIC 515-4
- UIC 615-4
- GM/RT 2100 – Structural Requirements for Railway Vehicles
- VDV 152
- BOSTRAB

Die Europäische Norm *EN 13749:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen* ist für Hersteller von Drehgestellrahmen verbindlich.

Im Kapitel 6.2 Validierungsprogramm dieser Norm sind vier Validierungsstufen angeführt:

- Berechnungen
- Statische Laborversuche
- Ermüdungsversuche im Labor
- Streckenversuche

Für eine vollständige Beurteilung der Bauteilfestigkeit eines Drehgestellrahmen sind alle vier Stufen des Validierungsprogramms durchzuführen.

### *2.3.2 Randbedingungen Drehgestell*

Wie im Kapitel 3.5 Drehgestellrahmen ab S54 ausgeführt, weist ein Rahmen zum Drehgestell bis zu 60 Koppelstellen auf. An diesen Koppelstellen findet die Kraft- und Momentenübertragung zwischen Drehgestell und Drehgestellrahmen statt.

Das Wissen um die realen „Einspannungsverhältnisse“ eines Drehgestellrahmen im Drehgestell bzw. um Freiheitsgrade in den Koppelstellen, um Steifigkeiten und Dämpfungsverhalten der angebauten Komponenten, um Vorspannungen durch Anbauten und um Eigenspannungen beim Drehgestellrahmen selbst ist ungenügend.

Dadurch ist keine genaue Kenntnis der im Betrieb tatsächlich auftretenden Belastungen und den dadurch tatsächlich hervorgerufenen Beanspruchungen am Drehgestellrahmen vorhanden.

Der Versuchsaufbau soll aber derart gestaltet sein, dass er die gleichen Beanspruchungen verursacht, wie sie im realen Betrieb auftreten.

Auch ist es nicht hundertprozentig möglich an allen Koppelstellen des Drehgestellrahmen die Belastungen realitätsnah ein- und abzuleiten, da Prüf- und Vorrichtungstechnik sowie Wirtschaftlichkeitsüberlegungen die „bedienbare“ Anzahl an Koppelstellen beschränken.

Daher ist eine Reduktion auf die statisch und dynamisch relevanten Belastungen und die davon betroffenen Beanspruchungsbereiche erforderlich.

Die Reduktion bedingt naturgemäß eine Abweichung von den tatsächlichen Verhältnissen.

Die Abbildung zeigt zur Veranschaulichung ein Rahmenmodell mit seinen nummerierten Koppelstellen.

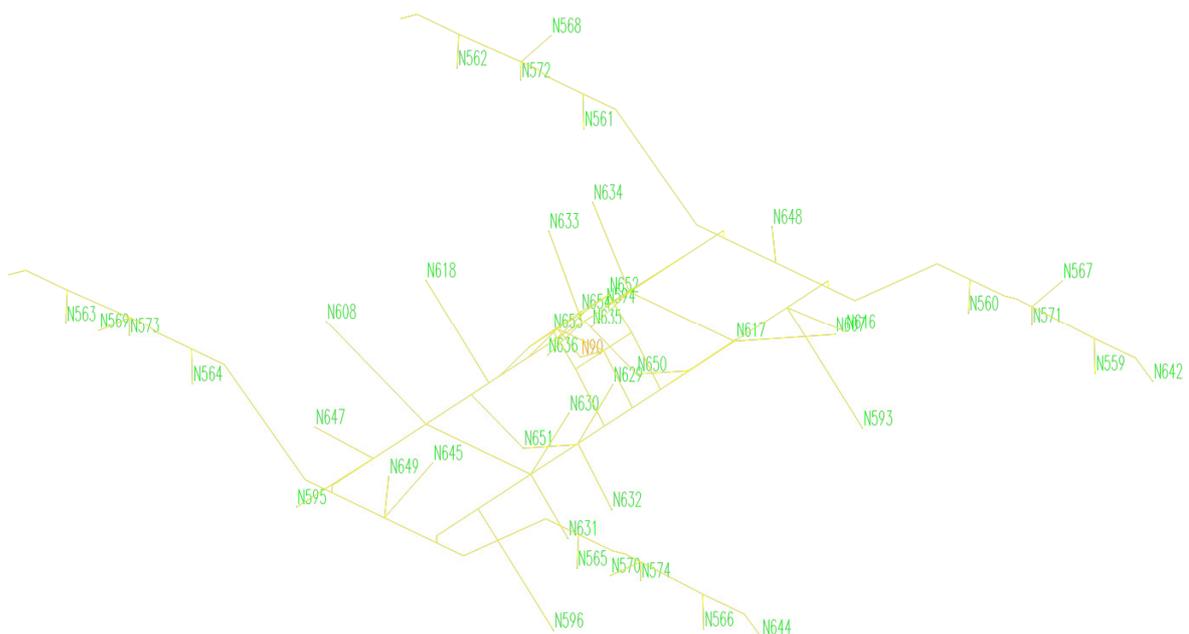


Abbildung 10 Lastannahmen Modell Drehgestellrahmen – Koppelstellen

(Quelle: Siemens)

### 2.3.3 Randbedingungen Prüftechnik

Die verfügbare Prüftechnik gibt prüftechnische Randbedingungen vor. Diese beeinflussen technisch wie wirtschaftlich den Prüfstands Aufbau sowie die statische und dynamische Versuchsdurchführung. Selten wirkt die Prüftechnik

direkt auf das Prüfobjekt ein. Im Allgemeinen werden zwischen Prüfobjekt und Prüftechnik Vorrichtungen eingesetzt. Daraus resultieren Schnittstellen zwischen Prüftechnik und Vorrichtungen. Die verfügbare Prüftechnik und die verwendete Vorrichtungstechnik müssen jedenfalls aufeinander abgestimmt sein. Über die gemeinsamen Schnittstellen müssen die aufzuprägenden Kräfte und Wege idealerweise reibungsfrei und spielfrei übertragen werden.

Prüftechnische Randbedingungen sind abhängig von:

- Prüfstandsdesign: Einzelnes Portal, mehrere Portale kombiniert, Prüfgruben
- Prüfstandshard- und software: Art und Anzahl der Zylinder, maximale Zylinderprüfkräfte (begrenzt realisierbaren Prüfumfang bzw. beschränkt die Anzahl der „bedienbaren“ Krafteinleitungsstellen)
- Mess- und Regeltechnik
- Servohydraulische Anlage oder Pulsatoranlage.

Nachfolgende Abbildungen sollen einen ersten Eindruck über unterschiedliche Prüfstandsdesigns geben.

Die erste Abbildung zeigt den servohydraulisch betriebenen Portalprüfstand der SZA (Wien), der im Wesentlichen aus zwei Stützen und einer höhenverstellbaren Brücke besteht.

Die zweite Abbildung zeigt ein komplexeres Design eines ebenfalls höhenverstellbaren Pulsatorprüfstandes (VNIIZhT, Moskau).



Abbildung 11 Portalprüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: SZA)



Abbildung 12 Prüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT)

### 2.3.4 Randbedingungen Vorrichtungstechnik

Die Vorrichtungen spielen eine zentrale Rolle beim Prüfstands Aufbau und während der Versuchsdurchführung.

Die Vorrichtungen stellen das „Bindeglied“ zwischen Prüftechnik und Prüfobjekt dar. Sie müssen das geplante Versuchsprogramm, bestehend aus statischem Programm, wie auch aus Ermüdungsprogramm zum Prüfobjekt bringen und es idealerweise exakt und ohne Verluste übertragen.

Vorrichtungen weisen im Allgemeinen zwei Schnittstellen auf. Die erste Schnittstelle bildet jene zum Prüfobjekt. Hier soll die Vorrichtung die reale Komponente oder den realen Anbau soweit nachbilden, dass sie mit den gleichen Geometrien, Funktionalitäten und Randbedingungen wie z. B. Steifigkeiten die Kräfte übertragen. Versteifungen oder gegenteilige Effekte sollen nicht hervorgerufen werden.

Die zweite Schnittstelle ist jene zwischen Vorrichtung und Prüftechnik. Sie kann die Anbindung zur Kraft- oder Wegeinleitung mittels Aktuator oder die Kraftableitung- oder Abstützungsseite betreffen.

Jedenfalls muss die Vorrichtung derart ausgeführt sein, dass die aktiv einzuleitenden Belastungen idealerweise verlust- und spielfrei über beide Vorrichtungsschnittstellen Prüftechnik- Vorrichtung und Vorrichtung- Prüfobjekt zum Prüfling übertragen und diesem aufgeprägt werden. Oder dass die Reaktivkräfte über die Schnittstellen Prüfobjekt – Vorrichtung und Vorrichtung- Prüftechnik vollständig verlust- und spielfrei abgeleitet werden.

Vorrichtungen müssen die wirtschaftlichen ebenso wie die technischen Anforderungen erfüllen.

### *2.3.5 Prüfstrategie Hersteller / Betreiber / Zulassung*

Art, Inhalte und Umfang der Festigkeitsversuche hängen auch von den Zielen und den Prüfstrategien der Hersteller ab.

Im Allgemeinen wird der Hersteller danach trachten die Zulassungsanforderungen effizient zu erfüllen. Hersteller unterliegen auch dem Produkthaftungsgesetz, wodurch es zu zusätzlichen, über die Zulassung hinausgehenden Anforderungen kommen kann. Manche Betreiber bringen sich auf Basis interner Vorgaben mit konkreten Forderungen und Vorstellungen ein, sodass weitere Anforderungen an die Versuche und die Versuchsdurchführung erwachsen. Der Hersteller oder das durchführende Prüfinstitut ist gefordert alle Anforderungen aufzunehmen, genau zu analysieren, abzustimmen und eine gründliche Konzeption von Prüfaufbau und Versuchsdurchführung vorzunehmen. Zusätzlich ist eine detaillierte Versuchsplanung erforderlich, die, wenn erforderlich die voneinander abweichenden „Versuchsprogramme“ für Zulassung, Betreiber und Hersteller berücksichtigt. So kann das zu realisierende Versuchsprogramm in mehrere Lastabschnitte gegliedert sein um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden und um eine effiziente Versuchsdurchführung zu gewährleisten.

### *2.3.6 Wirtschaftlichkeit*

In allen Phasen der Versuchsabwicklung und -durchführung sind die Festigkeitsversuche in Inhalt und Umfang am Wirtschaftlichkeitsprinzip ausgerichtet und müssen Zielsetzungen bezüglich Kosten, Zeit und Qualität erfüllen.

Wie allgemein bekannt ist, werden 60 bis 70 % der Kosten im Maschinenbau bereits in der Entwicklungs-, Konzeptions- und Konstruktionsphase festgelegt.

„Der Entwicklungsprozess als solcher hat im Maschinenbau durchschnittlich einen Anteil von 9 % an den in einem Unternehmen verursachten Kosten. Wesentlich größer ist aber der Anteil der durch die Produktentwicklung festgelegten Herstellkosten eines Produktes.

Dieser Anteil liegt im Maschinenbau bei durchschnittlich 70 %.<sup>15</sup>“

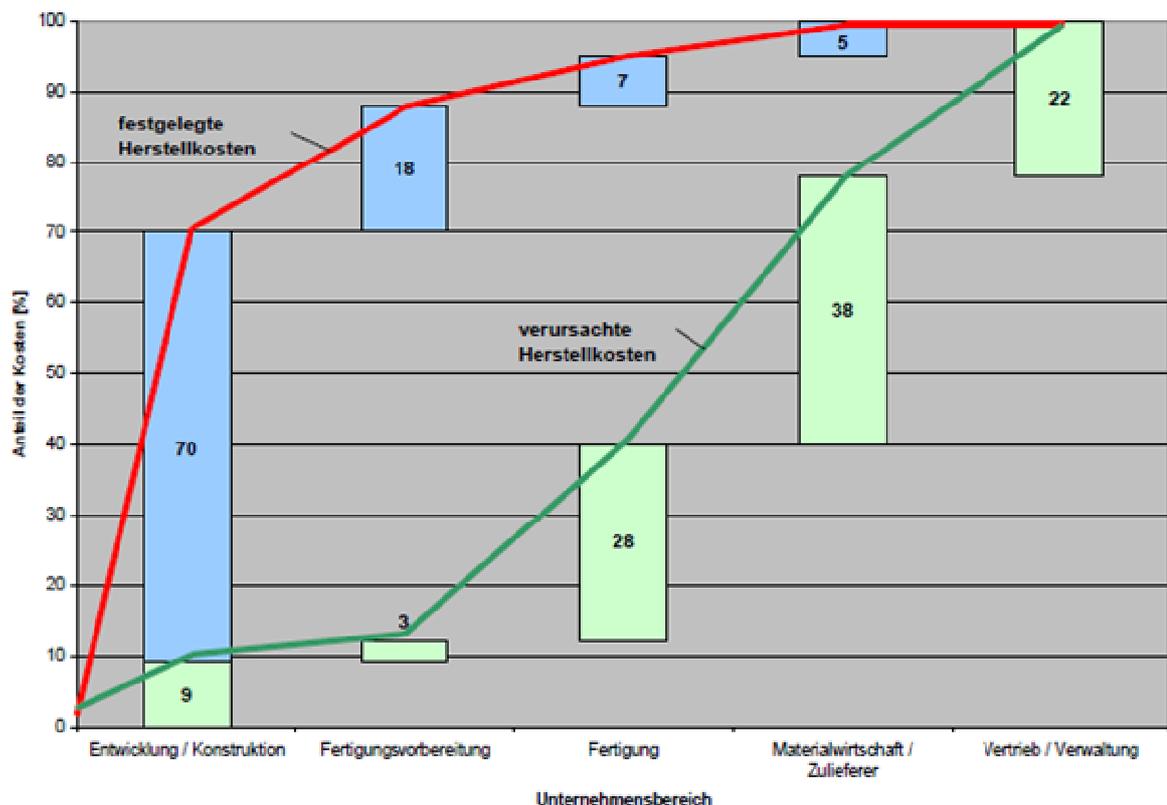


Abbildung 13 Durch einzelnen Unternehmensbereiche verursachte und festgelegte Herstellkosten eines Produktes – Durchschnittswerte für den Maschinenbau<sup>16</sup>

Der mechanische Prüfstands Aufbau mit den Vorrichtungen beeinflusst die Versuchsdurchführung wesentlich. Werden grundlegende Konstruktionsprinzipien bei der Konstruktion der Vorrichtungen missachtet, kann dies beispielsweise die Versuchsfrequenz deutlich senken und damit die angestrebte Prüfzeit erhöhen und die geplanten Prüfkosten erhöhen

<sup>15</sup> Engeln; Skriptum 2007/2008, Kapitel 1 Seite 2

<sup>16</sup> Engeln; Skriptum 2007/2008, Kapitel 1 Seite 2

Bereits bei der Konzeption sollte daher ein Gesamtoptimum des Prüfstands bestehend aus Prüf-, Regel- und Messtechnik, Vorrichtungen, Versuchsaufbau mit Krafftein- und -ableitungen, Aufspannung des Prüfobjekts, statisches und dynamisches Versuchsprogramm, etc. angestrebt werden. Teiloptimierungen von einzelnen Hard- oder Softwareeinheiten führen nicht zwingend zur allgemeinen Verbesserung des Gesamtsystems und zu einer Zeit- und Kostensenkung oder zu qualitativ höherwertigen Ergebnissen.

Das Maximal- oder Minimalprinzip als Ausprägungen des Wirtschaftlichkeitsprinzips ist bei dieser Komplexität eines Prüfstands wenig zielführend. Die Realisierung des Extremumprinzips scheint hier zielführender zu sein, da hier versucht wird ein optimales Verhältnis zwischen den eingesetzten Mitteln und dem angestrebten Nutzen zu erreichen. Prüfstandsbetreiber und Auftraggeber profitieren bei Umsetzung technisch wie wirtschaftlich.

## 2.4 Festigkeitsversuche in anderen Branchen

Die unterschiedlichen Hersteller der Automobilbranche nutzen für die Bauteilnachweise der Prototypen, Komponenten-, Teil- und Gesamtsysteme spezifische, mehraxiale servohydraulische Prüfstände. Gesteigerte Kundenansprüche an Sicherheit, Qualität und Komfort einerseits und die stete Verkürzung von Entwicklungszeiten und Modellzyklen andererseits erfordern zur Risikominimierung frühzeitig die Durchführung von Betriebsfestigkeitsversuchen. Komplexe Belastungszustände des realen Fahrbetriebs werden mit servohydraulischen Straßensimulatoren nachgestellt.

Folgende Komponenten sind prüfbar:

- Fahrwerk und Fahrwerkskomponenten (Achs- und Achskomponenten)
- Karosserie und Karosseriekomponenten (Schweißpunkte)
- Gesamtfahrzeug



Abbildung 14 Straßensimulator ( MTS 329) der Toyota Motorsport GmbH<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Toyota Motorsport GmbH, Broschüre, Abbildung S2

Abhängig von den prüftechnischen Anforderungen der Automobilhersteller können die Straßensimulatoren 3, 4, 5 und 6 Freiheitsgrade der Bewegung je Rad simulieren. Je vollständiger und genauer die Simulation der Vertikal-, Quer- und Längsbewegungen sowie der Momente wie Brems-, Lenk- und Sturzmoment je Rad am Prüfstand durchgeführt werden, umso realitätsnäher und aussagekräftiger ist der experimentelle Betriebsfestigkeitsversuch.

Im Vergleich von Straßenerprobung und Laborversuch werden Zeit und Kosten gesenkt.

*“This simulator significantly reduces test time and saves money. It is 10 to 20 times faster than street testing, and 4 to 10 times faster than test track testing.”<sup>18</sup>*

Das nachfolgende Bild zeigt beispielhaft eine Prüfstandsecke vom Typ MTS 329 6DOF der Firma MTS Systems Corporation mit welcher alle 6 möglichen Bewegungen des Rades im Labor realisierbar sind.



Abbildung 15 Prüfstandsecke<sup>19</sup> des Straßensimulator MTS 329 6DOF

---

<sup>18</sup> MTS Broschüre (Multiaxial 329), 2004, S10

<sup>19</sup> MTS Broschüre (MTS Durability Testing Solutions), 2010, S4

Abhängig vom Frequenzbereich der Lastsimulationen kann zwischen Kurz- und Langhubsimulationen unterschieden werden.

- < 2 Hz      Langhubsimulation
- > 2 Hz      Kurzhubsimulation

Es werden verschiedene Fahrmanöver<sup>20</sup> wie Schlechtweg, Bremsen mittels Kurzhub und Karosseriefesselung und Bremsen mittels Langhub sowie Kurvenfahrt nachgestellt, um die daraus resultierenden Lasten zu simulieren.

Schlechtweg: stellt einen wichtigen Teil der Betriebsfestigkeitssimulation dar; simuliert z. B. Fahrten über Kopfsteinpflaster und enthält hochfrequente Signalanteile (1 – 50 Hz); die Regelung aller 6 Freiheitsgrade eines Rades ist vorteilhaft, geregelte Lenk- und Sturzmomente verhindern prüfstandsbedingte Überlastungen des Fahrwerks, welche durch Eigenfrequenzen des Rad-Radersatz- Prüfstandssystems angeregt sein können.

Die Massen des Ersatzsystems sind deutlich höher als die echte Radmasse.

Bremsen: Längskräfte und Bremsmoment tragen maßgeblich zur Schädigung bei, weisen niederfrequente Anteile aus Bremsvorgang und -verzögerung auf, besitzen hochfrequente Anteile aus dem Überfahren von Unebenheiten der Fahrbahn oder aus Regelungsvorgängen des ABS- Systems.

Bremsen mittels Kurzhub und Karosseriefesselung: die Karosserie wird am Stoßstangenquerträger festgehalten; niederfrequente Vorgänge und längere Bremsmanöver sind in Echtzeit simulierbar; durch die Fesselung sind die eingebrachten Lasten und ihre Lastpfade verfälscht, Fesselung wirkt gegen die träge Fahrzeugmasse; Fehler durch Überlastungen beim Versuch werden akzeptiert, da Karosserien nicht betriebsfest, sondern chrashfest ausgelegt sind.

---

<sup>20</sup> Ullrich, Wildhagen, S150

Bremsen mittels Langhub: realere Lasten und Lastpfade, da keine externen Kräfte auf die Karosserie wirken; quasistationär bedingte Kräfte sind nicht aufprägbar, daher ist eine Raffung der Bremsmanöver in Abhängigkeit des möglichen Längshubs erforderlich. Die Raffung bedingt auch faktorielle Erhöhung der höherfrequenten Anteile; Karosseriebeanspruchungen sehr gut realisierbar.

Kurvenfahrt mittels Langhub: quasistationär bedingte Kräfte sind wie beim Langhubbremsen nicht aufprägbar, daher ebenfalls Raffung erforderlich; beliebige Kurvenfahrten simulierbar; Wankbewegungen bzw. Ein- und Ausfederungswege sehr gut nachfahrbar; keine hochfrequenten Ereignisse mit hohem Schädigungsbeitrag (z. B. Schlagloch oder Hindernis in der Kurve) simulierbar.

Betriebsfestigkeitsversuche mittels Straßensimulator werden an Karosserien oder an Kraftfahrzeugen mit einem Fahrzeuggesamtgewicht von bis zu 3500 kg durchgeführt. Auch leichte und schwere Kraftfahrzeuge mit einem Gewicht bis zu 6000 kg werden ebenfalls betriebsfest geprüft.

Je nach Ziel der experimentellen Untersuchungen sind folgende Konfigurationen des Straßensimulators möglich:

**Schwimmend gelagerte Karosserie:** für genaue Analysen der Belastungsverteilung bei lenkkraftfreien Ereignissen am Gesamtfahrzeug; Nutzung von bis zu 29 Kanälen.

**Fest gelagerte Karosserie:** Nutzung von bis zu 15 Kanälen für Einzelachsaufhängungsprüfungen einschließlich der Simulation von Brems- und Kurvenfahrtmanövern.

**Halbschwimmend gelagerte Karosserie:** Nutzung von bis zu 14 Kanälen für Einzelachsaufhängungsprüfungen und Teil- Karosserieprüfungen, einschließlich der Simulation von Bremsmanövern.

### 2.4.1 Festigkeitsversuch mit einem „Schienenfahrzeugsimulator“

Soll ein vergleichbarer Versuch an einem Schienenfahrzeug durchgeführt werden, so kann ein Aufbau wie folgt konzipiert sein.

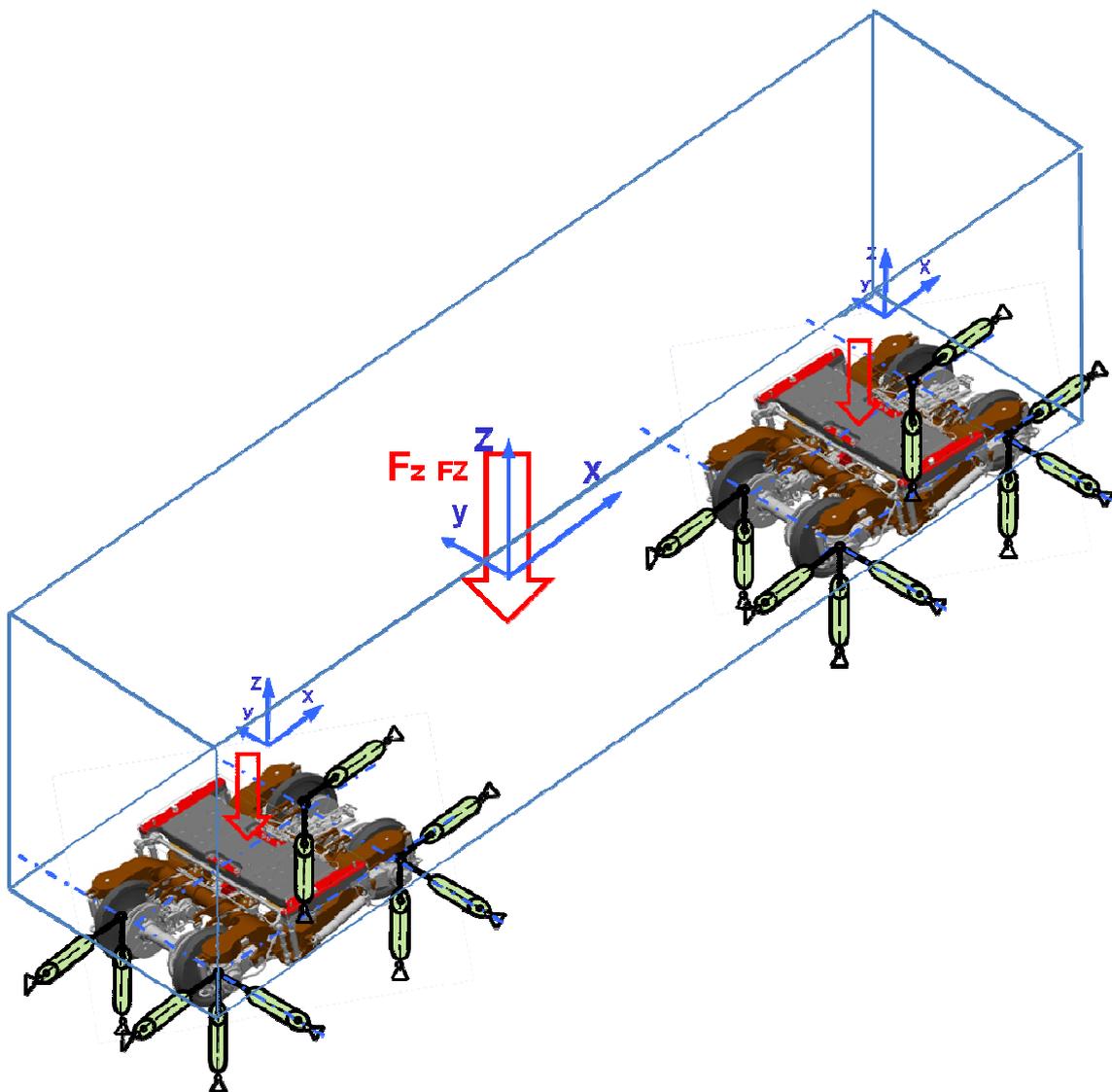


Abbildung 16 Schema Schienenfahrzeugsimulator

Der gesamte Fahrzeugwagen samt beiden Drehgestellen ist an den Radsätzen (oder an den Radsatzersätzen) auf Vorrichtungen montiert. Über diese Vorrichtungen werden je Radsatz und je Rad drei Translationsbewegungen eingeleitet. Das heißt über jeweils 5 Aktuatoren sind Radsatzbewegungen in Vertikal-, Lateral- und Longitudinalrichtung möglich.

In Summe benötigt ein solcher Prüfstand für beide Drehgestelle mit jeweils zwei Radsätzen 20 Aktuatoren. Mit diesen können die Bewegungen der beiden Radsätze je Drehgestell simuliert werden.

Der Platzbedarf für den Prüfaufbau ist entsprechend groß.

Fahrzeugwagen von Schienenfahrzeugen sind je nach Art bis zu 27m lang, 3,4 m breit und bis zu 4,4 m hoch.

Der Drehgestell Mittenabstand kann zwischen 6 m und 20 m liegen.

Die einzelnen Prüfstandseinrichtungen müssen eine hohe Variabilität und Flexibilität aufweisen.

Der Prüfstandsversuch ist ein Gesamtfahrzeugversuch. Es wird neben den Teilsystemen Drehgestell auch der Fahrzeugrahmen bzw. der Wagenkasten durch die Simulation beansprucht.

Straßenbahnfahrzeug:     ca. 18 t Fahrzeuggewicht (einschließlich LDG´s)  
                                  ca. 21 t Fahrzeuggewicht (einschließlich TDG´s)

Lokomotive:                bis zu 100 t Fahrzeuggewicht

Das Gesamtgewicht eines Fahrzeugs beträgt bis zu 100 Tonnen (Lokomotive).

#### *2.4.2 Festigkeitsversuch mit einem „Drehgestellsimulator“*

Ein dem Betriebsfestigkeitsversuch am Auto vergleichbarer Versuchsaufbau an einem einzelnen Drehgestell kann folgendermaßen konzipiert sein.

Vereinfachend werden je Radsatz und je Rad über Vorrichtungen drei Translationsbewegungen simuliert. Das heißt über jeweils 5 Aktuatoren sind Radsatzbewegungen in Vertikal-, Lateral- und Longitudinalrichtung möglich.

In Summe benötigt ein solcher Prüfstand für ein Drehgestell mit zwei Radsätzen 10 Aktuatoren. Mit diesen können die Bewegungen der beiden Radsätze simuliert werden.

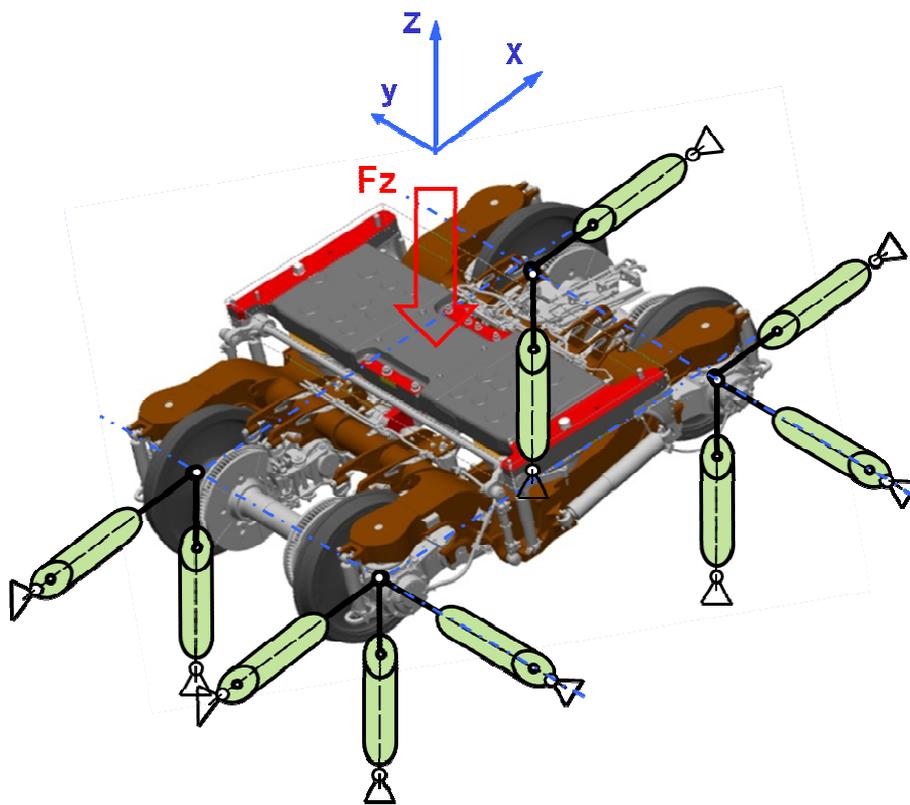


Abbildung 17 Schema Drehgestellsimulator

Der Platzbedarf für den Prüfaufbau ist ähnlich dem eines Automobils.

Drehgestelle sind je nach Art bis zu 5,0 m lang, 3,4 m breit und einschließlich Federung bis zu 1,7 m hoch.

Die einzelnen Prüfstandseinrichtungen müssen aufgrund der Vielfalt an Drehgestellen eine hohe Variabilität und Flexibilität aufweisen.

Die Prüfstandssimulation beansprucht nur das Teilsystem Drehgestell.

Straßenbahnfahrzeug: ca. 3,2 t Gewicht LDG  
ca. 4,9 t Gewicht TDG

Lokomotive: ca. 18 t Gewicht DG

Für Prüfstandsversuche sind aber die halben Fahrzeuggewichte relevant.

Straßenbahnfahrzeug: ca. 9 t halbes Fahrzeuggewicht (einschließlich LDG´s)  
ca. 10,5 t halbes Fahrzeuggewicht  
(einschließlich TDG´s)

Lokomotive: bis zu 50 t halbes Lokomotivgewicht  
(einschließlich DG´s)

### 2.4.3 Vergleich von Auto mit Schienenfahrzeug / Drehgestell

Nachfolgend werden Daten eines Autos mit Daten einer Straßenbahn und einer Lokomotive verglichen.

Rahmen	Auto	Strassen- bahn	Lokomotive
Länge [mm]	5000	2600	5000
Breite [mm]	1870	1600	3400
Höhe [mm]	1600	500	1200
Radsatzabstand [mm]	-	1800	3000
Gewicht [kg]	1000	800	3300 / 7000*

Tabelle 1 Auto- und Rahmenabmessungen, Massen

Drehgestell	Auto	Strassen- bahn	Lokomotive
Gewicht [t]	-	3,2 / 4,9	18
Fahrzeug	Auto	Strassen- bahn	Lokomotive
Federweg [mm]	30 bis 50	40*	60
Gewicht [t]	3,5	18,0 / 21,5	100

Tabelle 2 Federwege, Drehgestell- und Fahrzeugmassen

## Federwege in der Primär- und Sekundärfederstufe

Der prozentuelle Anteil der Primärfederung an der Gesamtfederung beträgt 20 % bis 30 %<sup>21</sup>, der Anteil der Sekundärfederung beträgt daher 70 % bis 80 % der Gesamtfederung.

Hanneforth<sup>22</sup> gibt für den Primärfederanteil 10% bis 30% und 70% bis 90% für den Sekundärfederanteil an.

### Federwege in der Primärfederung

10 – 30 % der Gesamtfederung

- z-Richtung 7 - 20 mm
- y-Richtung 5 - 10 mm „freies Spiel“
- x-Richtung 2 - 5 mm
- 

### Federwege in der Sekundärfederung

70 – 90 % der Gesamtfederung

- z-Richtung 49 – 63 mm
- y-Richtung 10 - 20 mm „freies Spiel“ (bis 60 mm federnde Queransschläge)
- x-Richtung 5 - 15 mm

**Gesamtfederweg:** 65 bis 70 mm (für Personen und- Güterwagen)<sup>23</sup>

Setzt man den notwendigen Energieaufwand für ein Auto als Vergleichsbasis an und ermittelt man Federweg- und Massenverhältnisse von Straßenbahn zu Auto bzw. von Lokomotive zu Auto, so lässt sich quantitativ der Energieaufwand einer Straßenbahn bzw. einer Lokomotive im Verhältnis zum Auto faktoriell beschreiben.

---

<sup>21</sup> Janicki, Fischer, Rüffer, 2013, S105

<sup>22</sup> Hanneforth, Fischer 1986, S48

<sup>23</sup> Hanneforth, Fischer 1986, S21

Fahrzeug	Auto	Straßenbahn	Lokomotive
Federweg [mm]	30 bis 50	40	70
Gewicht [t]	3,5	18,0 / 21	100
Energieaufwand Fzg.	1	ca. 4 - 8 fach	ca. 40- 67 fach
Energieaufwand DG	1	ca. 2 - 4 fach	ca. 20 – 33,5 fach

Tabelle 3 Federwege, Massen, Energieaufwand Fahrzeug / Drehgestell

Es zeigt sich, dass der Energieaufwand für eine Gesamtfahrzeugprüfung im „Schienenfahrzeugsimulator“ für eine Straßenbahn ca. um das 4 bis 8 fache höher liegt. Eine Gesamtfahrzeugprüfung einer Lokomotive mit einem Gesamtgewicht von 100 t erfordert den 40 bis 67 fachen Energieaufwand.

Betrachtet man die Teilsystemprüfung des Drehgestells im „Drehgestellsimulator“ unter der Berücksichtigung der real wirkenden halben Fahrzeugmassen so reduziert sich der Energieaufwand um die Hälfte. Der Energieaufwand im Vergleich zum Automobil liegt für eine Straßenbahn um das 2 bis 4 fache höher. Der einer Lokomotive liegt beim 20 bis 34- fachen eines Autos mit einer Masse von 3,5 t.

Der große Vorteil des Simulators liegt in der realitätsnahen Beanspruchung der Struktur durch Massenkräfte. Der Nachteil aber besteht im großen Energieaufwand. Die durchgeführte Betrachtung berücksichtigt keine anderen Kostenfaktoren wie beispielsweise Infrastruktur, Prüf- und Vorrichtungstechnik oder Prüfzeiten.

Daher ist der Betrieb eines Schienenfahrzeug- oder eines Drehgestellsimulators für Betriebsfestigkeitsprüfungen aus wirtschaftlicher Sicht nicht interessant.

## 3 Grundlagen – Drehgestelle

### 3.1 Allgemeines

Schienenfahrzeuge konventioneller Bahnen<sup>24</sup> sind spurgebundene „Fahrzeuge, die von mit Spurkranz versehenen Rädern auf Gleisen einer bestimmten gleichbleibenden Spurweite geführt und getragen werden“.<sup>25</sup> Im Wesentlichen lassen sie sich wie folgt unterteilen:

1. Eisenbahnfahrzeuge: Dienen dem Personen- und Güterverkehr und werden im Nah- und Fernbereich eingesetzt. Dazu zählen Triebfahrzeuge (Lokomotive, Triebkopfwagen, Triebzugwagen) und nichtgetriebene Wagen wie Reisezugwagen oder Güterwagen.
2. Straßenbahnfahrzeuge: Dienen überwiegend der Beförderung von Personen im Orts- und Nahbereich. Zu dieser Fahrzeugkategorie zählen Straßenbahn, Untergrundbahn (U-Bahn) und Hochbahn (H- Bahn), sowie Stadtbahn (S- Bahn).

### 3.2 Laufwerke / Fahrwerke

Die Spurbindung bzw. Spurführung des Fahrzeugs erfolgt über die Teilsysteme „Laufwerke“, welche die drei wesentlichen Funktionen Tragen, Führen und Antreiben bzw. Bremsen erfüllen müssen.

*„Das Laufwerk ist der Teil eines Schienenfahrzeugs, mit dem das Fahrzeug auf den Schienen fährt und geführt wird. Es trägt den Fahrzeugkasten und überträgt die Antriebs- bzw. Bremskräfte auf das Gleis“.*<sup>26</sup>

---

<sup>24</sup> Haigermoser, 2002, S7

<sup>25</sup> DIN 25003 „Systematik der Schienenfahrzeuge“

<sup>26</sup> Hanneforth, Fischer; S8

Laufwerke, sind Fahrwerke, welche nach ihrer Achszahl unterscheidbar sind:

1. Einzelachsfahrwerk: Ein Radsatz, der in seiner Ausführung als freier Lenkradsatz mit dem Fahrzeug bzw. Fahrzeuguntergestell gefedert gekoppelt ist.
2. Mehrachsfahrwerk: Das Drehgestell besteht aus mindestens zwei oder mehreren in einem Rahmen angeordneten Radsätzen und ist unter dem Fahrzeugkasten um seine Hochachse drehbar.



Abbildung 18 Einachsiges Fahrwerk (Quelle: Wikipedia) / Dreiaxsiges Fahrwerk

(Quelle: Siemens)

Eine weitere Fahrwerksvariante ist das Einzelradfahrwerk (Losradlaufwerk), welches sich dadurch auszeichnet, dass sich die Räder im Gegensatz zum Radsatz unabhängig voneinander um ihre Querachse drehen können.



Abbildung 19 Losradlaufwerk Fahrwerk (Quelle: TALGO)

### 3.3 Drehgestelle

Das Drehgestell ist ein wesentliches Teilsystem eines Schienenfahrzeuges und zeichnet sich durch seine Mehrachsigkeit als spezifisches Laufwerk aus.

Forderungen nach höherer Tragfähigkeit und höheren Geschwindigkeiten bei gleichzeitig besseren Laufeigenschaften führten dazu, dass heute der Großteil der konventionellen Schienenfahrzeuge mit Drehgestellen ausgerüstet ist.

Weitere Vorteile<sup>27</sup> im Vergleich zu den Einzelachsfahrwerken sind:

- *Besseres Bogenlaufverhalten*
- *Abbau vom Gleis verursachter vertikaler und horizontaler Störungen*
- *Möglichkeit des Einbaus einer mehrstufigen Federung*
- *Eignung für Fahrzeuge mit hohen Geschwindigkeiten und hohem Fahrkomfort*
- *Höhere Entgleisungssicherheit*
- *Kleinere Anlaufwinkel*
- *Kleinere Richtkräfte*
- *Geringerer Spurkranzverschleiß*

Abhängig ob Drehgestelle getrieben oder ungetrieben ausgeführt sind unterscheidet man:

- *Triebdrehgestell: zumeist werden alle Radsätze angetrieben / gebremst*
- *Laufdrehgestell: ist antriebslos und wird gebremst*

Als weitere Art ist das Jakobsdrehgestell zu nennen. Im Unterschied zu den üblichen Drehgestellen befindet es sich zwischen zwei Fahrzeugwägen und trägt diese. Jakobsdrehgestelle sind als Trieb- oder als Laufdrehgestelle ausgeführt.

---

<sup>27</sup> Hanneforth, Fischer; 1986, S40

Trieb- und Laufdrehgestelle lassen sich auch in Abhängigkeit von der Position der Langträger des Drehgestellrahmen bzw. der Primärfederung zur Position der Räder unterscheiden:

- Innengelagert
- Außengelagert

Ein Vorteil der innengelagerten Drehgestellrahmen liegt darin, dass die Drehgestellmasse deutlich gesenkt wird.

Der Nachteil liegt im ebenfalls deutlich verringerten Bauraum, welcher für die Drehgestellkomponenten zur Verfügung steht.

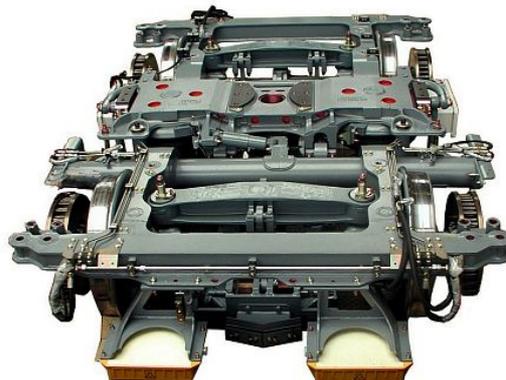


Abbildung 20 innengelagertes Drehgestell (Quelle: Bombardier)

Schienenfahrzeuge fahren spurgebunden auf Gleisen einer bestimmten gleichbleibenden Spurweite. Weltweit entwickelten und etablierten sich unterschiedliche Spurweiten. Den größten prozentuellen Anteil aller Spurweiten am Welteisenbahnnetz<sup>28</sup> nimmt mit ca. 66 % die sogenannte „Normalspur“ mit einer Weite von 1435 mm oder 4' (eng. Fuß) bzw. 8 ½`` Zoll ein.

- < 1435 mm Schmallspur (verbreitet sind z. B. 1000 mm, 1067 mm)
- 1435 mm Normalspur
- > 1435 mm Breitspur (verbreitet sind z. B. 1676 mm, 1520)

---

<sup>28</sup> Haigermoser, 2002, S82

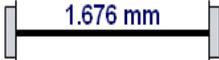
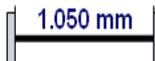
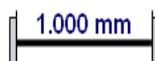
Breitspur		Schmalspur	
	1.676 mm Indien, Sri Lanka, Argentinien, Chile, Pakistan		1.067 mm Indonesien, Japan, Süd- und Ostafrika, Sudan, Ghana, Nigeria, Süd-, West- und Nordaustralien, Tasmanien, Neuseeland
	1.668 mm Portugal, Spanien		1.050 mm Algerien, Libanon, Jordanien, Syrien
	1.600 mm Irland, Brasilien, Südastralien		1.000 mm Belgien, Schweiz (zusätzlich zu Normalspur), Griechenland, Indien, Pakistan, Burma, Malaysia, Thailand, Kambodscha, Vietnam, Westafrika, Südamerika (verschiedene)
	1.524 mm GUS, Finnland, Türkei, Panama		950 mm Italien
	1.520 mm Rußland		914 mm Kolumbien, Mexiko
	1.445 mm zusätzlich zur Normalspur in Italien		891 mm zusätzlich zur Normalspur in Schweden
<b>Normalspur</b>			762 mm Ägypten, Indien
	1.435 mm alle europäischen Staaten außer Russische Föderation, Spanien, Portugal und Irland; ferner Türkei, Ägypten, Iran, China, USA, Kanada, Mexiko, Kuba, Peru, Argentinien, Uruguay, Süd- und Westaustralien, Neusüdwales		760 mm ("Bosnische Spur") Jugoslawien
			600 mm Wales (England), Indien, Südamerika

Abbildung 21 Verbreitung von Spurweiten (Quelle: Siemens)

So lassen sich Schienenfahrzeuge bzw. Drehgestelle auch nach dem Abstand Gleise bzw. der Spurweite kategorisieren.

- Drehgestell für Schmalspur
- Drehgestell für Normalspur
- Drehgestell für Breitspur

### 3.4 Drehgestelle und ihre Hauptkomponenten

Drehgestelle setzen sich aus folgenden Baugruppen zusammen:

- Radsatz inkl. Räder
- Radsatzlagergehäuse incl. Radsatzlagerung
- Primärfederung
- Radsatzführung
- Drehgestellrahmen
- Sekundärfederung
- Dämpfer
- Längsmithnahme
- Antriebseinheit (Motor, Kupplung und Getriebe)
- Bremseinheit

#### 3.4.1 Hauptbaugruppen und -komponenten eines Triebdrehgestells

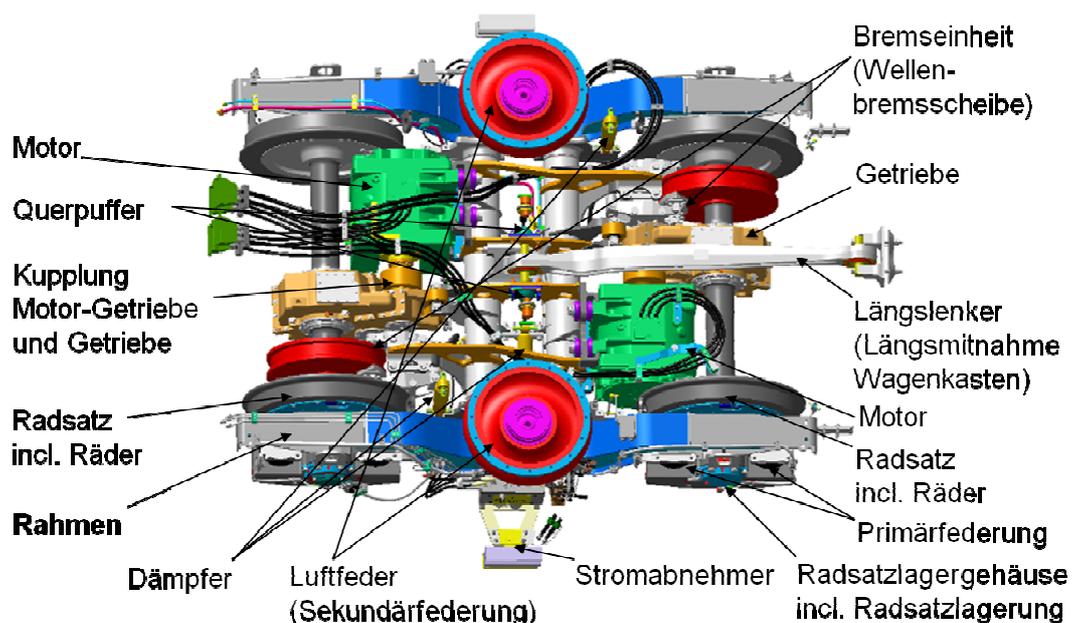


Abbildung 22 Triebdrehgestell - Hauptkomponenten (Quelle: Siemens)

### 3.4.2 Hauptbaugruppen und -komponenten eines Laufdrehgestells

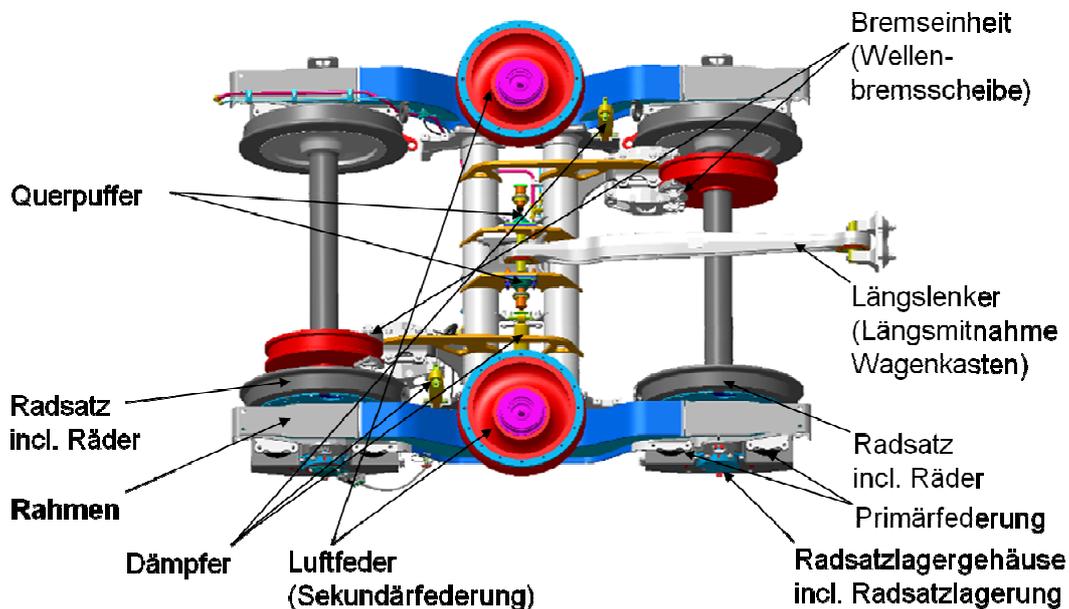


Abbildung 23 Laufdrehgestell - Hauptkomponenten (Quelle: Siemens)

### 3.4.3 Radsatz inkl. Räder

Der Radsatz besteht aus Radsatzwelle und kraftschlüssig montierten Rädern.

Bei Treibradsätzen ist ein Antriebsmitnehmer montiert, bei Laufradsätzen sind bis zu vier Wellenbremsscheiben montiert, oder die Räder sind mit Radbremsscheiben versehen.

Die Räder bzw. der vollständige Radsatz ist ungedeutet und überträgt und führt die Fahrzeuglasten. Bei Triebdrehgestellen überträgt sie kraftschlüssig die Antriebs- und Bremskräfte, beim Laufdrehgestell die Bremskräfte.

### 3.4.4 Radsatzlagergehäuse incl. Radsatzlagerung

Die Radsatzlagerung besteht aus Gehäuse, Wälzlager, Lagerdeckel, Dichtungs- und Sicherungsteilen und Anbauten wie Drehzahlgeber.

Radsatzlager gehören zu den am höchsten beanspruchten Schienenfahrzeugkomponenten, da neben den statischen Kräften des Fahrzeugs und seiner Beladung auch hohe dynamische Kräfte auftreten.

### 3.4.5 Primärfederung

Als Primärfederung wird die Federung zwischen Radsatz und Drehgestellrahmen bezeichnet. Bei Drehgestellen beträgt sie bis zu 30 % der Gesamtfederung. Federn sind als Blatttragfedern, Stahldruckfedern oder Gummifedern ausgeführt. Diese Federstufe ist für die Entgleisungssicherheit in Gleisverwindungen relevant. Vertikale und horizontale Störungen und Anregungen (Beschleunigungsspitzen) aus Gleisirregularitäten werden stark abgeschwächt und gelangen nicht zum Drehgestellrahmen bzw. zum Fahrzeugkasten.

### 3.4.6 Radsatzführung

Die sichere Führung der Radsätze im Drehgestell ist die Hauptfunktion dieser Baugruppe.

Es existieren viele unterschiedliche Ausführungen<sup>29</sup>. Manche Ausführungen kombinieren die Radsatzführung und Primärfederung.

- *Starre Führung*
- *Offene Gleitführung mit Radsatzhaltern*
- *Geschlossene Zapfenführung mit Gleitelementen*
- *Zapfenführung mit Schubgummifeder*
- *Lenkerführung mit Federblattlenker*
- *Lenkerführung als Schwinge*
- *Lenkerführung mit Lemniskaten*
- *Lenkerführung über binärer Lenker*
- *Lenkerführung mit Dreiecks- Lenker*
- *Gummifeder- Führung – Kegelfedern*
- *Gummifeder - Führung – Chevronfeder*
- *Gummifeder – Gummirollfeder (Clouthfeder)*

---

<sup>29</sup> Haigermoser, 2002, S188 bis S194

*„Beim Entwurf einer Radsatzführung kommt der Abstimmung der horizontalen Elastizitäten auf das verwendete Radprofil zur Erzielung eines ruhigen Fahrzeuglaufs, geringen Spurkranzverschleißes und niedriger Führungskräfte eine besondere Bedeutung zu.“<sup>30</sup>*

### 3.4.7 Drehgestellrahmen

Siehe Kapitel 3.5

### 3.4.8 Sekundärfederung

Als Sekundärfederung wird die Federung zwischen Drehgestellrahmen und Fahrzeugwagen bezeichnet. Bei Drehgestellen beträgt sie von 70 bis zu 90 % der vertikalen Gesamtfederung. Diese Federstufe findet bei Güterwagendrehgestellen größtenteils keine Verwendung, sodass diese meist nur einstufig gefedert sind.

Stahldruckfedern, Gummifedern oder Luftfedern werden zur Sekundärfederung verwendet.

Diese Federstufe stützt und trägt den Fahrzeugwagen.

Ergänzung zur Vertikalfederung (Primär- und Sekundärfederung):

Auch in Lateral- und Longitudinalrichtung sind Federungen vorzusehen. Es ist eine Querverfederung und abhängig von der Wagenkastenlenkung eine Längsfederung auszuführen. Harte Anschläge an bogenabhängigen Festansschlägen zur Querbegrenzung werden durch eine progressive Federung vermieden.

### 3.4.9 Dämpfer

Mit Dämpfern werden bei Schienenfahrzeugen Schwingungen abgebaut. Der Schwingungsvorgang soll nach 3 Schwingungen abgeklungen sein. Es werden hydraulische Dämpfer oder Reibungsdämpfer eingesetzt.

---

<sup>30</sup> Hanneforth, Fischer, 1986, S50

Beispiele für den Einsatz von Dämpfern:

- Primärdämpfer: Dämpfer im Primärfederbereich, Hauptwirkung in Vertikalrichtung
- Sekundärdämpfer: Dämpfer im Sekundärfederbereich, Hauptwirkung in Vertikalrichtung
- Sekundärdämpfer: Dämpfer im Sekundärfederbereich, Hauptwirkung in Querrichtung

### *3.4.10 Längsmitnahme (zur Anlenkung des Fahrzeugwagens)*

Es ist zu unterscheiden ob die Fahrzeugwagenabstützung funktionell mit der Anlenkung verbunden oder getrennt ist. Bei Güterdrehgestellen überträgt beispielsweise die Drehpfanne sowohl die vertikalen wie auch die horizontalen Kräfte zwischen Drehgestell und Fahrzeugwagen. Bei Eisenbahnfahrzeugen für höhere Geschwindigkeiten (>140 km/h) und bei Triebfahrzeugen sind Fahrzeugabstützung und -anlenkung funktionell größtenteils voneinander getrennt.

Folgende Konstruktionsprinzipien<sup>31</sup> sind zu unterscheiden:

- *Drehpfanne mit gefederten Gleitstücken*
- *Drehzapfen mit Wiege und Gleitstücken*
- *Drehzapfen mit Flexicoil –federn*
- *Längslenker mit Flexicoil – federn*
- *Wiege mit Rollkranz*

Die Längsmitnahme überträgt die Zug- oder Schubkräfte in Längsrichtung beispielsweise über einen oder zwei Binärenlenker, Tauchzapfen oder einer Drehzapfen- oder Lemniskatenführung.

---

<sup>31</sup> Haigermoser, 2002, S206 bis S208

### 3.4.11 *Antriebseinheit*

Die verbreitetsten Traktionsarten sind Diesel- und Elektrotraktion. Dampftraktion und Gasturbinenantriebe spielen eine untergeordnete Rolle.

Dieselfahrzeuge sind mit dieselmechanischen, dieselhydraulischen oder dieselektrischen Antrieben ausgestattet.

Bei elektrisch getriebenen Fahrzeugen bzw. Drehgestellen werden verschiedene Prinzipien der Drehmomentenübertragung von Motor zu Treibradsatz genutzt. Motoren können in Längs- oder in Querrichtung angeordnet sein.

Übliche elektrische Antriebe<sup>32</sup> sind Tatzlagermotoren und Schwebemotoren, welche sich in ihrer Art der Aufhängung unterscheiden. Tatzlagermotoren zählen zu den teilabgefederten Antrieben und finden für Geschwindigkeiten bis 140 km/h Verwendung. Schwebemotoren wie Gummiringfederantrieb, Gummiringfederantrieb mit Radsatzhohlwelle oder Ritzelhohlwellenantrieb sind vollabgefederte, fahrzeug- und fahrwegschonende Antriebe und werden bei höheren Geschwindigkeiten eingesetzt.

Es finden auch halbgefederte Querantriebe mit Bogenzahnkupplung oder Antriebe mit fahrzeugkastenfesten Motoren im Hochgeschwindigkeitsverkehr ihre Anwendung.

Die Antriebe haben je nach Ausführung mit dem Rahmen gemeinsame Koppelstellen für Motor und Getriebestütze (Drehmomentenstütze). Über diese werden die Kräfte an den Rahmen übertragen.

### 3.4.12 *Bremseinheit*

Bei Schienenfahrzeugen finden verschiedene Bremssysteme Verwendung. Man unterscheidet kraftschlüssig oder kraftschlussunabhängig wirkende Bremsen.

---

<sup>32</sup> Janicki, Reinhard, Rüffer, 2013; S233 -S239

Kraftschlussabhängige Bremsen übertragen die Bremskraft über den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene. Dazu zählen Klotzbremsen, Scheibenbremsen und generatorische Bremsen. Es gibt auch Trommelbremsen und hydrodynamische Bremsen, diese spielen aber bei Schienenfahrzeugen eine untergeordnete Rolle.

Kraftschlussunabhängige Bremsen wie Magnetschienenbremsen und lineare Wirbelstrombremsen übertragen die Bremskraft direkt auf die Schienen. Zu dieser Kategorie zählen auch aerodynamische Bremsen.

Die Bremskomponenten sind am Drehgestellrahmen montiert und übertragen über ihre Koppelstellen entsprechende Kräfte an den Rahmen bzw. das Drehgestell. Triebwerksbremsen wie elektrodynamische oder hydrodynamische Bremsen wirken im Triebwerk, diese Kräfte werden über Drehmomentenstützen in den Rahmen geleitet.

### 3.5 Drehgestellrahmen

Die konstruktive Gestaltung richtet sich nach dem verfügbaren Bauraum und den Schnittstellen zum Fahrzeugwagen sowie nach den Festigkeitsanforderungen. Das Drehgestell mit seinen Komponenten wird im Einsatz hochbelastet, der Drehgestellrahmen ist hohen Beanspruchungen ausgesetzt und muss diesen als sicherheitsrelevante Komponente über seine gesamte Einsatzzeit von 25 bis 40 Jahren standhalten.

Er bildet eine Kernstruktur des Drehgestelles, da er

- über die Primärfederung die Radsätze aufnimmt und führt
- über seine Verwindesteifigkeit im Falle eines geringen Primärfederanteils die Entgleisungssicherheit in Gleisverwindungen gewährleistet
- über die Sekundärfederung und Dämpfer den Wagenkasten trägt und stabilisiert

- über die Ausführungen als Längslenker oder Drehzapfen / Querpuffer oder als Drehpfanne die längs und quer auftretenden Horizontalkräfte überträgt
- die gesamten Antriebs- und Bremsenergien überträgt

Ein Drehgestellrahmen ist eine Schweißverbundkonstruktion aus kalt oder warm geformten Blechen, gewalzten Halbzeugen, Schmiede- und Stahlgussteilen welche in einer Kastenbauweise aufgebaut sind und sich in zwei Langträger und einen Querträger gliedert.

Als Rahmenformen gibt es die H- Form mit ein oder zwei Querverbindungen (Mittelteil) oder einen geschlossener Rahmen mit Kopfträgern.

Bei, für erhöhter Entgleisungssicherheit ausgelegten, verwindeweichen Drehgestellrahmen bestehen die Träger aus in sich verwindungsweichen offenen T-, L-, I- oder U- Profilen.

Drehgestellrahmen werden auch gegossen.

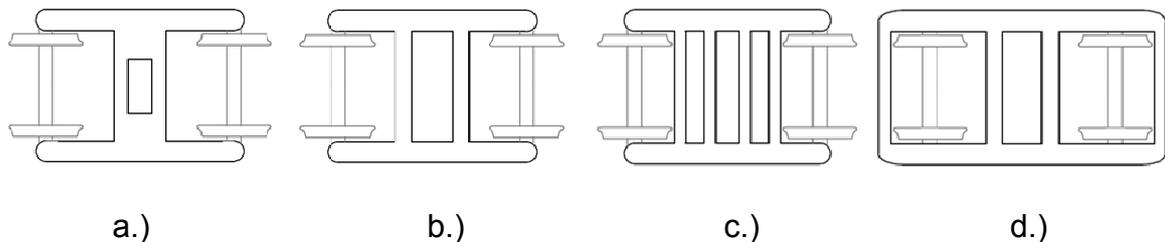


Abbildung 24 Bauformen Rahmen (Quelle: Rubel<sup>33</sup>)

- a.) H- Form
- b.) Doppel H- Form
- c.) H- Form mit 2 Querträger
- d.) H- Form mit Kopfträger

<sup>33</sup> Rubel, Abb. 1.5, S8

Drehgestellrahmen weisen je nach Drehgestellkategorie große Unterschiede in ihren Abmessungen auf.

Nachfolgend sind Abmessungen zweiachsiger Drehgestellrahmen angeführt. Sie beinhalten die Rahmenabmessungen für Straßenbahn, Metro, Reisezugwagen, Lokomotive und Hochgeschwindigkeitszug

Abmessungen:      Länge: 2,6 bis 5,0 m  
                            Breite: 1,5 bis 3,4 m  
                            Höhe: 0,5 bis 1,1 m

Gewicht:             0,8 bis 3,3 t (geschweißt)  
                            bis 7 t (gegossen)

Zusammenfassung Drehgestellrahmen:

Zwischen Rahmen und Drehgestell gibt es bis zu 60 Schnittstellen, nachfolgend als Koppelstellen bezeichnet. Drehgestellkomponenten wie z. B. Federn, Dämpfer, Radsatzanlenkungen, Anschläge, Motor, Getriebe, Bremsen, Längslenker Längsmitnahme zu Wagenkasten, etc. übertragen an diesen Koppelstellen abhängig von der Art der Anbindung (starr, elastisch, gelenkig) im Allgemeinen die im Betrieb auftretenden äußeren und inneren Kräfte und Momente.

Diese verursachen am Rahmen lokal oder global Beanspruchungen.

## **4 Erhebung von relevanten Informationen, Randbedingungen und Daten**

In diesem Kapitel wird die, durch das Prüfportal vorgegebene Ausgangslage erhoben. In weiterer Folge werden Rechercheergebnisse zum Thema Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen aus den beiden Bereichen Prüfstand und Drehgestellrahmen zusammengefasst.

Gemeinsam mit der Ausgangslage bilden diese Informationen, Randbedingungen und Daten die gemeinsame Entscheidungsbasis für die anschließende Festlegung des Konzepts.

### **4.1 Ausgangslage Prüfstand des Festigkeitslabors SZA**

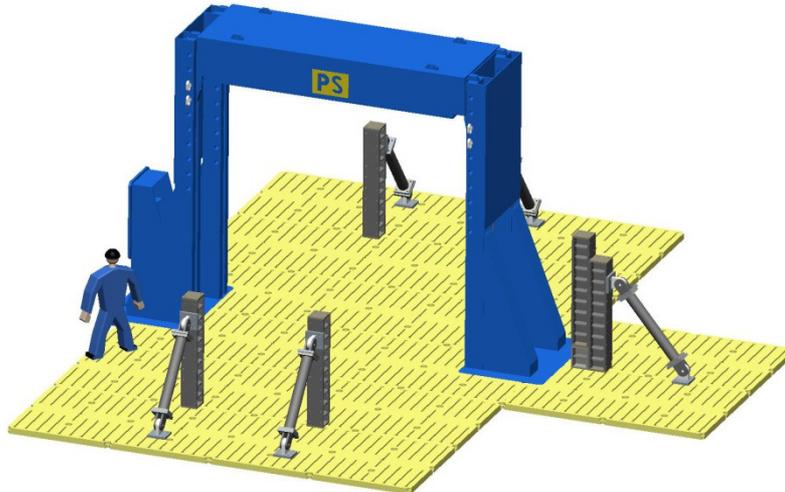


Abbildung 25 Prüfportal 1 Festigkeitslabor SZA

Dem SZA Festigkeitslabor steht ein 20 x 13 m großes Spannfeld zur Verfügung. Dieses ruht vollständig auf einem Schwingfundament. Auf dieser Spannfläche stehen 2 Prüfportale (Prüfportal 1 und Prüfportal 2) für Festigkeitsprüfungen an Großkomponenten, Bauteilen bzw. Bauteilgruppen.

Das in dieser Arbeit betrachtete Prüfportal 1 der SZA besteht aus dem unmittelbaren Spannfeld und einem Portal. Das zugehörige Spannfeld besteht aus dem Portalhauptbereich von 12 x 7 m und einen erweiterbaren Zusatzbereich von 4 x 4 m auf. Das Portal besteht aus zwei am Spannfeld fest montierten Stützen und einer höhenverstellbaren Brücke.

Abmessungen Prüfportal 1:

Spannfeld: 12x7m + 4x4m

Portal: 4,5 x 4,2 x 1,5 m Innenabmessung  
7,0 x 5,0 x 1,5 m Außenabmessung

Ergänzendes Equipment (Stützen, Vorrichtungssätze und -teile für Drehgestellrahmenprüfungen) oder Bauteilprüfungen sind verfügbar.

Servohydraulische Anlage:

Zur statischen oder zyklischen Kraft-, Wegaufprägung stehen bis zu 50 Aktuatoren mit 20kN bis maximal 650 kN für mehraxiale Bauteilbelastungen zur Verfügung.

Für Ermüdungsversuche steht ein digitaler Servohydraulik- Regler mit 16 Regelkanälen sowie ein weiterer Regler mit 8 Regelkanälen zur Verfügung. Bei Master-Slave-Betrieb kann die Anzahl der Aktuatoren auf maximal 32 Zylinder erhöht werden (2 Zylinder je Regelkanal). Hydraulikversorgung 210bar, Hochdruckpumpen beliebig verschaltbar, insgesamt 205kW Pumpenleistung, Literleistung 450l/min

Messtechnik:

Zur Verfügung steht ein rechnergesteuertes Brückenverstärker- und Datenerfassungssystem mit 240 Messkanälen für DMS- bzw. DMS- Aufnehmer-Signale (Messkanäle für Kraft-, Weg-, Dehnungsmessungen, etc.). Bei Ermüdungsversuchen ist eine Permanentmessung von 240 Messkanälen möglich. ermöglicht.

- Messgeräte
  - Kraftmessung: 4 Datenerfassungssysteme der Dewetron GmbH mit Brückeneingangsmodulen,
  - Trägerfrequenzeingangsmodulen,
  - Potentiometereingangsmodulen,
  - Spannungseingängen, etc.
  
- Sensoren
  - Kraftmessung: Kraftmessdosen 20kN, 50kN, 100kN, 250kN, 500kN, 650kN (DMS-Vollbrücken-Sensoren)
  - Wegmessung: US-basierte Wegsensoren (MTS Temposonics), Optische Sensoren auf Triangulationsbasis, Seilzugpotentiometer, LVDT- Wegaufnehmer
  - Dehnungsmessung: Linear-, XY- und Rosetten-DMS, inkl. DMS-Applikation und Signalkonditionierung, Eigenspannungsmessung, Optische Dehnungsmessung (ARAMIS)
  - Beschleunigungsmessung
  - Temperatur
  - Druck, etc.

## **4.2 Prüfstände und Prüflagen**

### *4.2.1 Prüfstände*

In einem ersten Schritt wird erhoben, welche Prüfstandsmodelle weltweit für Festigkeitsprüfungen an Drehgestellrahmen im Einsatz sind und verwendet werden. Nachfolgend finden sich auf den nächsten Seiten die Rechercheergebnisse zu Prüfstandsaufbauten für Drehgestellrahmenprüfungen.

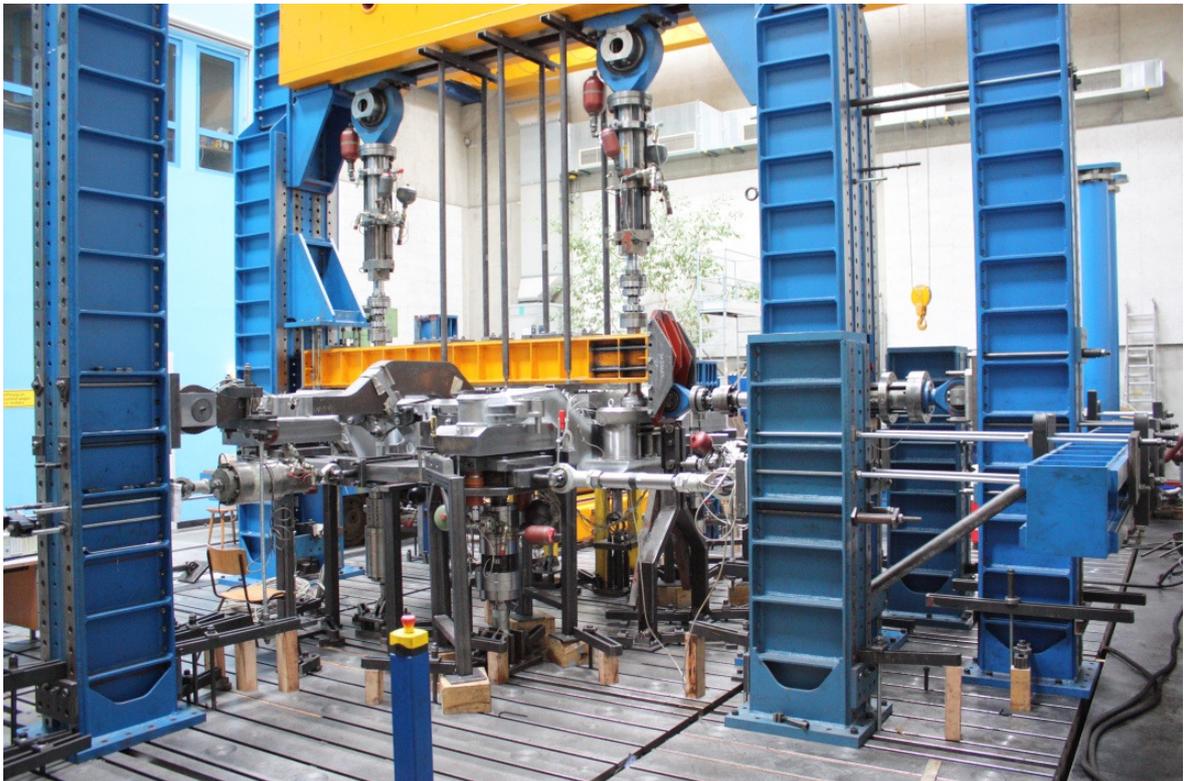


Abbildung 26 Prüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: TU Graz)



Abbildung 27a,b Prüfstand zur Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT / Wolfand)

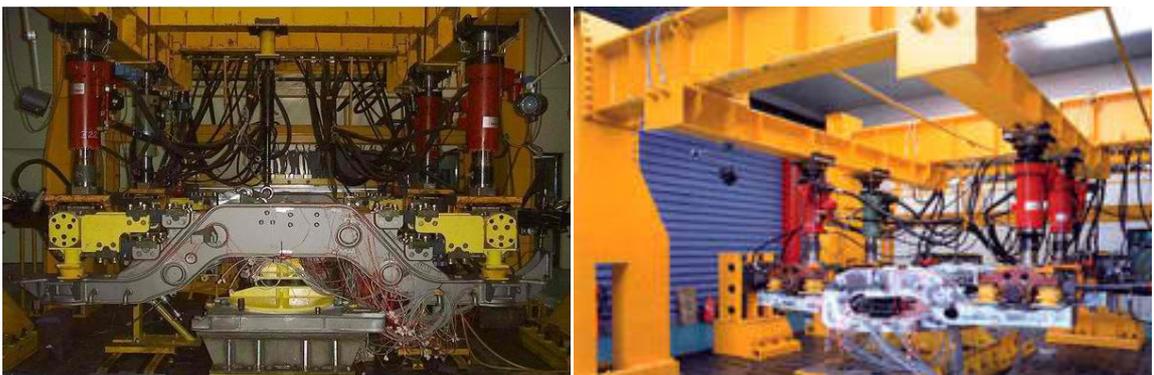


Abbildung 28a,b Prüfstand (Quelle: a. CETEST / b. CAF)



Abbildung 29a,b Prüfstand (Quelle: a. Sifang Rolling Stock Institute / b. Tabor)

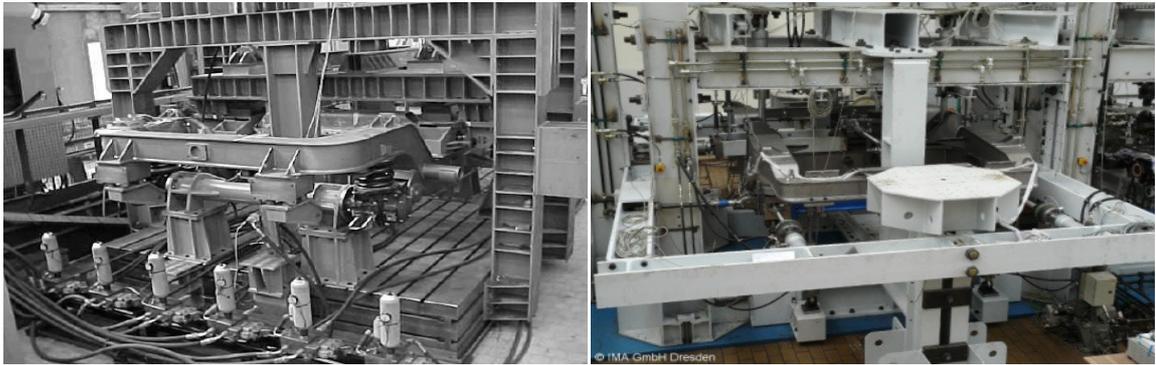


Abbildung 30a,b Prüfstand (Quelle: a. Politecnico di Milano / b. IMA Dresden)



Abbildung 31a,b Prüfstand (Quelle: a. ECS / b. IFF Leipzig)



Abbildung 32a,b Prüfstand (Quelle: a. und b. Mitsubishi Heavy Industries)



Abbildung 33a,b Prüfstand (Quelle: a. Nippon Steel & Sumitomo Metal Cooperation / b. DB Systemtechnik Minden)



Abbildung 34 Prüfstand (Quelle: Alstom<sup>34</sup>)

---

<sup>34</sup> Alstom; S6



Abbildung 35a,b Prüfstand (Quelle: a. TU Graz / b. ASME<sup>35</sup>)

Die unterschiedlichen Ausprägungen der Prüfstände, ihres Designs und damit zum Teil verbunden der Aufbau des Drehgestellrahmen und seine Einbaulage sind aus den Abbildungen 11, 12, 25 bis 33 zu entnehmen.

Es finden „einfache“ Portale (Abb. 11, 30a, 30b, 31a, 31b, 32a, 33a) bestehend aus zwei Hauptstützen und einer Brücke Verwendung wie auch „erweiterte“ Portale (Abb. 28a, 29a, 32b, 33b) mit weiteren Zusatzstützen oder variabel einzusetzenden Zusatzportalen. Auch sehr komplexe Prüfstände, wie in den Abb. 12, 27a, 27b, 28a und 29a dokumentiert sind, werden verwendet.

Sie bestehen aus mindestens zwei fix montierten Portalen, wobei jeweils zwei Hauptstützen mit einem horizontalen Querträger fest verbunden sind. An den Querträgern dieser festen Portale sind variabel montierbaren Horizontalträger montierbar, wodurch ein Überbau geschaffen wird. Dieser Überbau kann fest oder variabel ausgeführt sein und nach Bedarf mit zusätzlichen Trägern in Längs- und Querrichtung erweitert werden.

---

<sup>35</sup> Morschek, Roller, JRC2013-2426; Figure 7

Die Abb. 28a und 29a zeigen sehr komplexe Prüfstände, welche durch ihre Konstruktion eine sehr hohe Steifigkeit aufweisen. Hier wird dem Umstand Rechnung getragen, dass auch von Seiten des Prüfstands ein Einfluss auf den Gesamtaufbau wirkt und sich dieser Einfluss auf die praktische Regelung und Steuerung der Prüftechnik bei Versuchsdurchführung hinsichtlich Eigenfrequenz des Gesamtsystems auswirken kann.

Wie sich aus den Abbildungen ebenfalls erkennen lässt, ist die Lösungsvielfalt auch bei den Vorrichtungen eine sehr hohe und es werden unterschiedlichste Prinzipien verwirklicht.

Vor allem die große Vielfalt der Radsatzanlenkungen und der Primärfederungen bei Drehgestellen wirkt sich auf die Ersatzvorrichtung des Radsatzes mit Primärfederung und Radsatzführung aus und bietet naturgemäß eine hohe Anzahl für Lösungsmöglichkeiten.

#### *4.2.2 Prüflage von Drehgestellrahmen*

Beim Festigkeitsversuch am Drehgestellrahmen gibt es zwei Möglichkeiten der Einbau- oder Prüflage:

- Betriebslage
- Rückenlage

Diese Möglichkeiten werden weltweit auch genutzt, wie die Abb. 12, 26, 27a und 27b zeigen. Im Geltungsbereich der EN 13749 sind ebenfalls beide Varianten möglich, da in der Norm keine bestimmte Prüflage definiert wird.

#### *4.2.2.1 Betriebslage*

Die Betriebslage als Einbaulage ist durch die Entwicklung und ständigen Verbesserung der servohydraulischen Prüftechnik sehr verbreitet.

Zudem entspricht diese Einbaulage der realen Situation des im Drehgestell verbauten Drehgestellrahmen.

Für diese Prüflage gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Kraftereinbringung. Daher gibt es unterschiedliche Prüfaufbauten.

##### 4.2.2.1.1 Sekundärfederseitige Kraftereinleitung der vertikalen Hauptlasten

Die Vertikalen Hauptlasten werden je nach Lösung über eine Wagenkasten- und Sekundärfederersatzvorrichtung eingebracht. In Abbildung 11 wird eine Möglichkeit gezeigt. Die Sekundärvertikalkraft wird mit einem Aktuator eingeleitet und über die Sekundärfederersatzvorrichtung auf die zwei Sekundärfederbasen anteilmäßig richtig aufgeteilt und übertragen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von zwei Aktuatoren wie sie beispielsweise in Abbildung 26 gezeigt wird. Die aufzuprägenden Sekundärfedervertikalkräfte werden über die Sekundärfederersatzvorrichtung auf die Sekundärfederbasen aufgebracht. Diese Variante ist vorteilhafter, da durch die zwei Aktuatoren das Wanken des Fahrzeugs simuliert werden kann. Zudem erfolgt die Kraftereinleitung im Bereich der Sekundärfeder oder der Sekundärfedern, wodurch die Vorrichtung niedrig baut.

Die sekundärseitig eingebrachten Vertikalkräfte werden über primärseitig wirkende Abstützungen abgeleitet. Die Abstützungen sind beidseitig gelenkig gelagert wodurch die Verformbarkeit des Drehgestellrahmen sichergestellt wird.

#### 4.2.2.1.2 Primärfederseitige Krafeinleitung der vertikalen Hauptlasten

Die Krafeinleitung der vertikalen Hauptlasten erfolgt primärseitig über den Primärfederersatz an allen vier Primärfederbasen.

Variante 1:

Bei der ersten Variante sind vier Aktuatoren am Spannfeld aufgeständert und wirken direkt über den Primärfederersatz auf die Federbasen.

Beispiele sind in den Abbildungen Abbildung 125, Abbildung 126 und Abbildung 127 dargestellt.

Variante 2:

Die andere Möglichkeit erfolgt mit vier am Prüfstandsüberbau abgehängten Aktuatoren, welche an einer Primärfederersatzvorrichtung wirken, welche derart gestaltet ist, dass sie den Primärfederbereich des Langträgers umfasst, damit die Lasten über die Federbasen aufprägbar sind.

Diese Variante ist zB. in den Abbildungen Abbildung 27a,b Prüfstand zur Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT / Wolfand), Abbildung **27a,b** Prüfstand zur Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT / Wolfand), Abbildung **28a,b** Prüfstand (Quelle: a. CETEST / b. CAF) 28b umgesetzt.

Die Abstützung erfolgt über die Sekundärfederbasen und über zwei Ersatzvorrichtungen „Sekundärfederseitige Vertikalabstützung“.

Der Vorteil liegt in der Abhängung der Aktuatoren, welche zufolge der wirkenden Gravitation bei Auslenkung „freiwillig“ in ihre Ausgangslage zurückkehren.

Aufgeständerte Aktuatoren kehren bei Auslenkung nur durch prüf- und vorrichtungstechnische Maßnahmen in ihre Ausgangslage zurück.

Beispiele finden sich in Abbildung 128, Abbildung 129 und Abbildung 130.

#### 4.2.2.1.3 Querpuffer- / Queranschlagseitige Krafteinleitung der lateralen Hauptlasten

Die Querkraft wird zentral mit einem Aktuator an die Querkraftersatzvorrichtung übertragen und mit dieser je Drehgestellausführung im Bereich der Queranschläge oder zentrisch an den Querpufferersatzvorrichtungen am Rahmen eingeleitet.

Die Abstützung erfolgt radsatzseitig über die Radsatzersatzvorrichtungen, welche ebenfalls die Radsatzlenkung und die Primärfeder ersetzen.

#### 4.2.2.1.4 Primärfederseitige Krafteinleitung der lateralen Hauptlasten

Die Querkraft wird realitätsnah radsatzseitig mit je einem Aktuator an die vordere und hintere Radsatzersatzvorrichtung übertragen und leitet diese über den Radsatzlenkerersatz und / oder den Primärfederersatz an den Drehgestellrahmen. Die Ableitung erfolgt je Drehgestellausführung im Bereich der Queranschläge oder der Querpuffer über eine Querkraftersatzvorrichtung.

#### 4.2.2.1.5 Wegeinleitung des vertikalen Hauptverwindeweges

Die Verwindung wird weggeregelt aufgebracht. Es gibt mehrere Möglichkeiten für die Anordnung des oder der Aktuatoren. Der Verwindeweg kann mit einem Aktuator aufgebracht werden.

Werden zwei Aktuatoren zur Verwindung eingesetzt so können sie an den Primärfederbasen eines Langträgers wirken oder sie sind diagonal am Rahmen angeordnet und wirken beispielsweise an der vorderen Primärfederbasis des einen Langträgers und an der hinteren Primärfederbasis des zweiten Langträgers.

Es gibt aber darüber hinaus weitere Lösungsmöglichkeiten die in dieser Arbeit nicht näher skizziert werden.

Anhand von zwei verbreiteten Lösungen gemäß EN13749 werden nachfolgend beispielhaft deren Prüfschemen beschrieben.

Die ausgewählten Prüfschemen beschreiben den Prüfaufbau und die aufzuprägenden Hauptlasten gemäß EN13749. Sie unterscheiden sich in der Realisierung der Querkrafteinleitung bzw. in der Querkraftableitung.

Die im Betrieb auftretenden Querkräfte sind vor allem beim Ermüdungsversuch aufzubringen. Die erste Variante (Abbildung 36) bringt die Querkraft mit einem Aktuator (a03) zentral am Querpuffer über eine Pufferersatzvorrichtung ein.

Die Abstützung der Querkraft erfolgt über die Radsatzersatzvorrichtungen, welche den vorderen und den hinteren Radsatz mit Primärfederung und Radsatzlenkung ersetzen und die um, mit Kraftmesseinheiten ausgestatteten Querkraftableitungsvorrichtungen, erweitert sind. Die Reaktionskraftmessung erfolgt an den Kraftmesseinheiten r06 und r07.

Die zweite Variante (Abbildung 37) leitet die Querkraft mit je einem Aktuator an der vorderen (a03) und hinteren Radsatzersatzvorrichtung (a04) ein, die Querkraft wird wie in Abbildung 34 über Primärfederersatz und Radsatzlenkerersatz am Drehgestellrahmen eingeleitet. Die Ableitung in Abbildung 37 erfolgt über eine am Querpuffer angreifende Querkraftableitungsvorrichtung (r06). Auch hier erfolgt eine Reaktionskraftmessung.

Alle anderen in den beiden Prüfschemen skizzierten Kraftein- und -ableitungen unterscheiden sich nicht bzw. nur durch ihre Benennung.

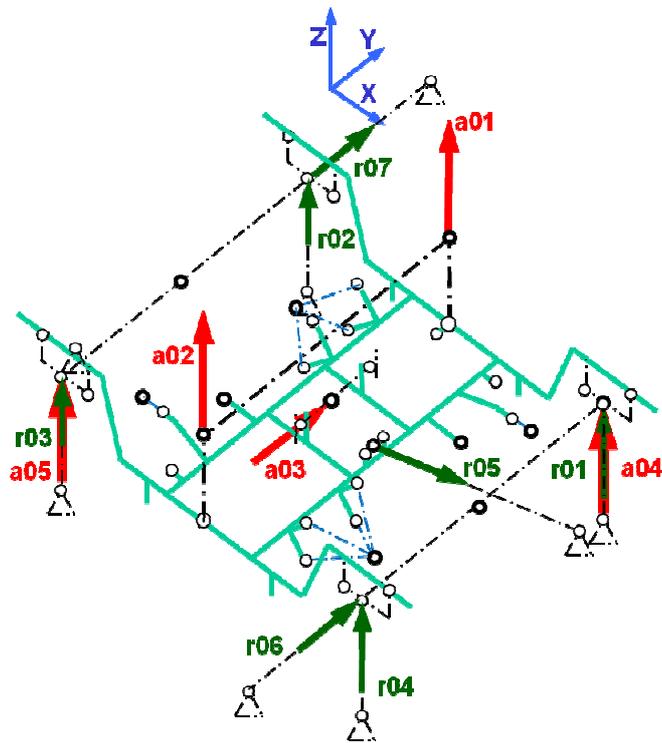


Abbildung 36 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Hauptlasten mit Querkräfteinleitung zentral am Querpuffer

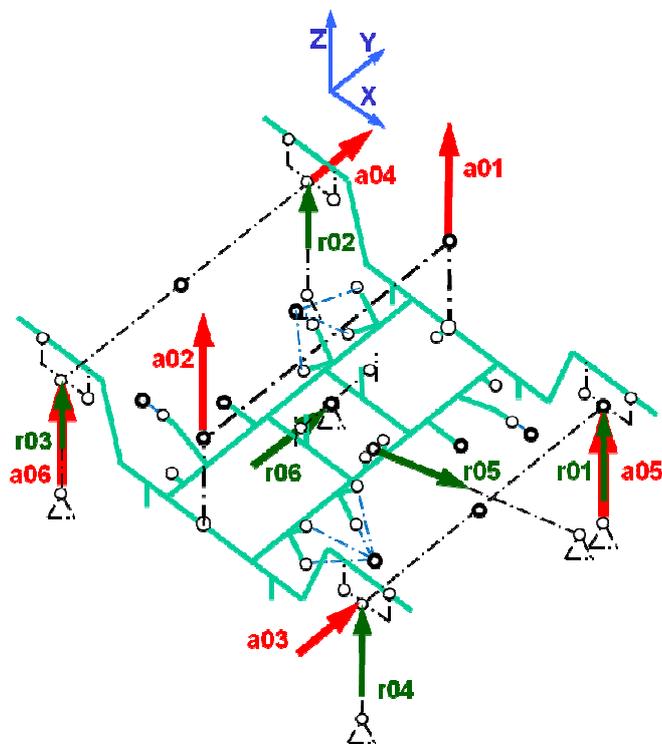


Abbildung 37 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Hauptlasten mit Querkräfteinleitung an den Radsatzersatzvorrichtungen

Die wesentlichen Unterschiede bestehen darin, dass die Vorrichtungen zur Querkraftein- und -ableitung, je nach Schema ausgeführt, sich in ihrer Ausführung unterscheiden. Auch genügt für die erste Variante ein Aktuator, während die zweite Variante zwei Aktuatoren zur Querkrafteinleitung verwendet.

Sind am Drehgestellrahmen zusätzlich zur Aufprägung von Hauptlasten, welche gemäß EN 13749 Mindestanforderungen darstellen, auch Zusatzlasten aufzuprägen, so erweitert sich der Prüfaufbau beträchtlich.

Die zusätzlichen Lasten simulieren beispielsweise Längskräfte, Quer- und Vertikalkräfte von Relevanz mit dem Ziel das Prüfobjekt Rahmen umfassend für die durch Motor- und Getriebe, Bremsen, Dämpfer, etc. beanspruchten Bereiche hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens zu prüfen.

Trotz zusätzlicher Lastaufprägung ist es prüftechnisch nicht vollständig möglich alle real vorhandenen Koppelstellen zwischen Rahmen und Drehgestell zu belasten. Die Auswahl, welche relevanten Zusatzlasten zu berücksichtigen sind, erweist sich schwierig und erfolgt vor allem hinsichtlich des aufzubringenden Belastungs- Zeit- Verlaufs mit Hilfe einer Prüfstandssimulation.

Nachfolgende Abbildungen basieren auf den vorigen Abbildungen und sind um Zusatzlasten erweitert. Sie sollen die Komplexität und die Unterschiede in den Prüfaufbauten veranschaulichen.

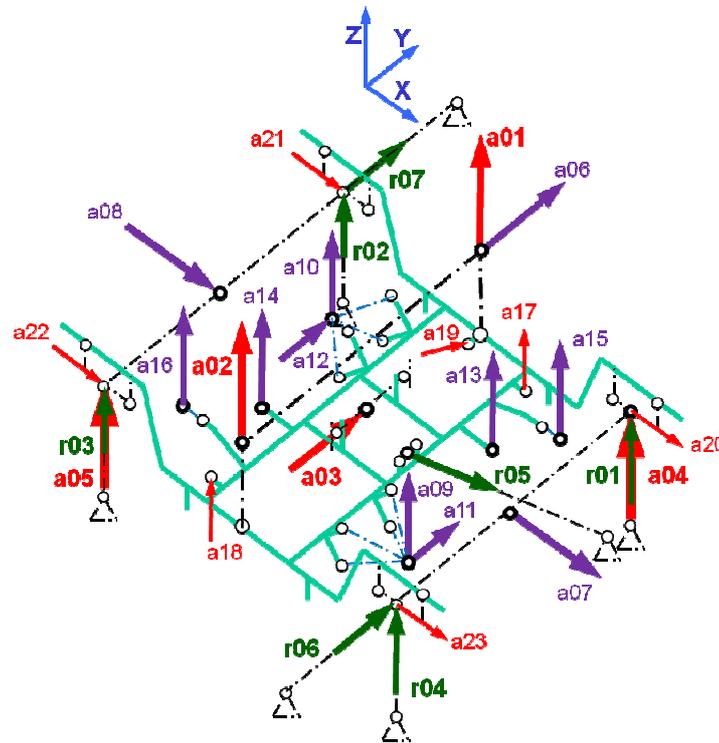


Abbildung 38 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung zentral am Querpuffer

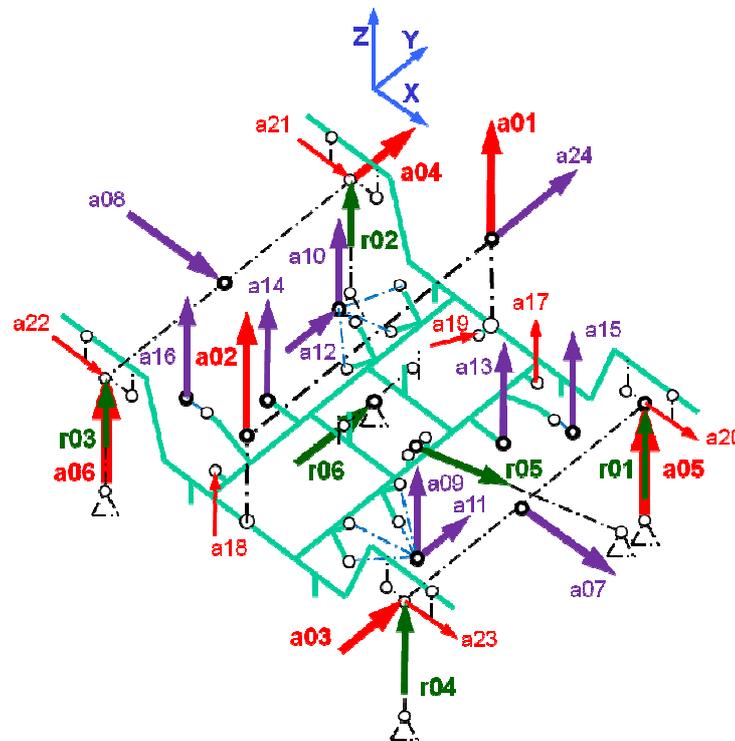


Abbildung 39 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung an den Radsatzersatzvorrichtungen

#### 4.2.2.2 Rückenlage

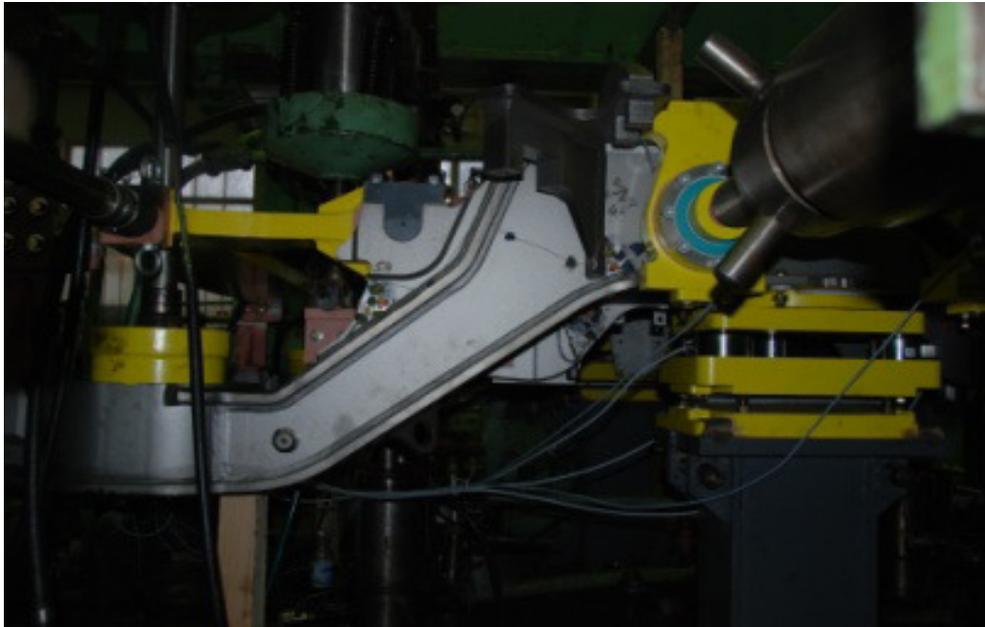


Abbildung 40 Drehgestellrahmenprüfung in Rückenlage (Quelle: VNIIZhT / Wolfand)

Diese Prüflage ist historisch vor allem der weltweiten Verfügbarkeit von Pulsatoranlagen geschuldet. Die Kräfteinleitungen werden über einseitig wirkende Hydraulikzylinder übertragen. Wechselnde Belastungen werden durch Vorspannung oder durch zwei gegeneinander wirkende Hydraulikzylinder aufgebracht.

Die Kräfteinleitung der vertikalen Hauptlasten erfolgt hier primärseitig über vier Aktuatoren, welche über Primärfederersatzvorrichtungen an den rahmenseitigen Primärfederbasen ihre Lasten aufprägen. Die Kraftableitung erfolgt sekundärfederseitig über zwei Vertikalabstützungen, welche idealerweise Kraftmesseinrichtungen besitzen, mit welchen die Reaktionskräfte gemessen werden. Querkräfte werden wechselnd über einer Radsatzersatzvorrichtung am Rahmen eingeleitet. Die Ableitung erfolgt entweder über die Querpuffer oder, wie in obiger Abbildung erkennbar, durch zwei seitlich positionierte und spielfreie Abstützungen in den Bereichen der Sekundärfederauflage, die Verdrehungen um die Hochachse unterbinden. Derartige Abstützungen befinden sich auf beiden Drehgestellrahmenseiten.

Sind Zusatzlasten aufzuprägen, so werden diese über entsprechende Ersatzvorrichtungen an den entsprechenden Koppelstellen eingeleitet. Nachfolgende Abbildungen zeigen Prüfschemen mit Haupt- sowie mit Haupt- und Zusatzlasten.

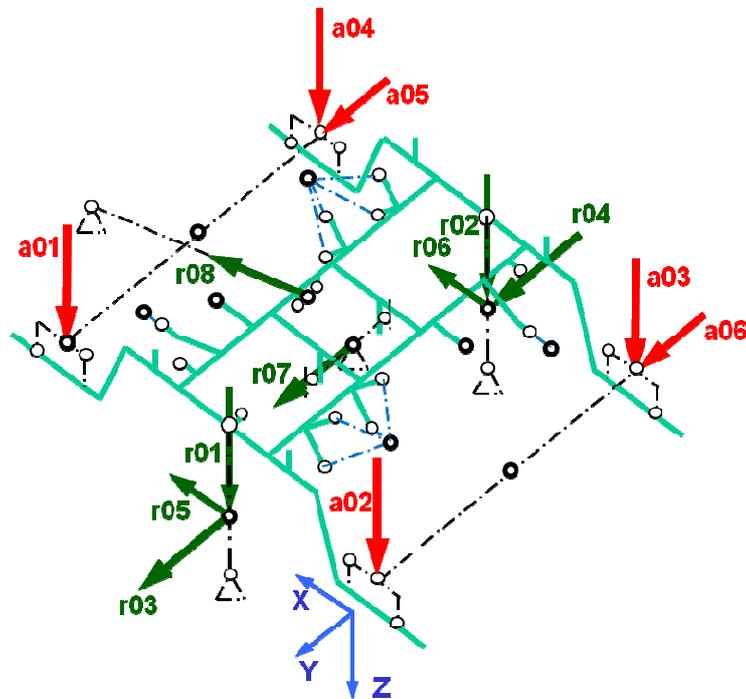


Abbildung 41 Schema Versuchsaufbau Rückenlage für Hauptlasten

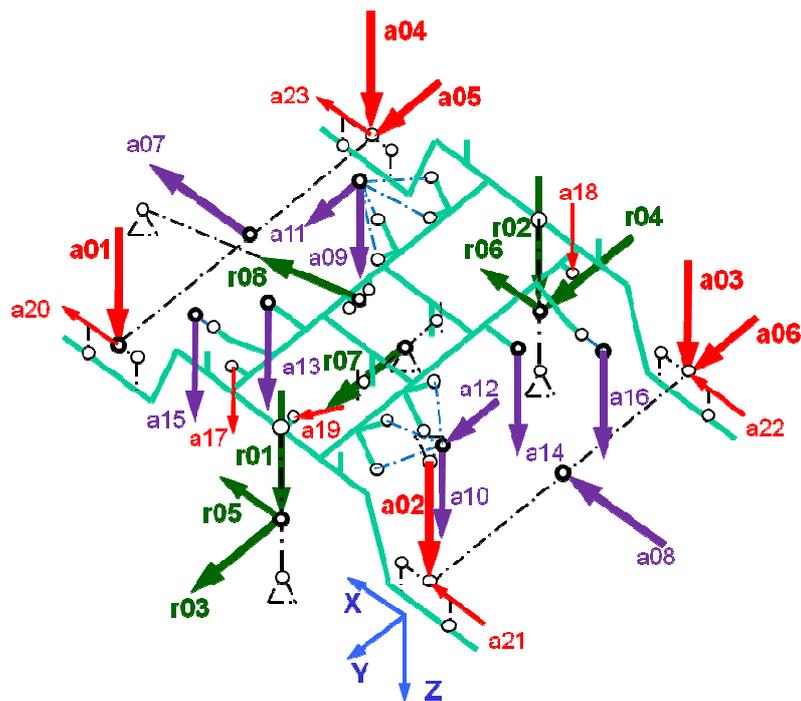


Abbildung 42 Schema Versuchsaufbau Rückenlage für Haupt- und Zusatzlasten

### 4.3 Erhebung von Geometriedaten von Fahrwerksrahmen / Drehgestellrahmen verschiedener DG- Kategorien

Nachfolgende Daten basieren auf dem umfassenden Katalog<sup>36</sup> „Fahrwerke erster Klasse“ des in Graz Eggenberg angesiedelten Weltkompetenzzentrums Fahrwerk der Siemens Infrastructures & Cities / Rail Systems Division mit Stand vom August 2008 und auf weiteren Siemens Quellen.

<b>Bezeichnung</b>		<b>StB 1</b>	<b>StB 2</b>	<b>RZW</b>	<b>TFZ</b>
<b>Ausführung</b>		<b>T, L</b>	<b>T</b>	<b>L</b>	<b>T, L</b>
Geschwindigkeit Fahrzeug	km / h	80	120	160	160
Gewicht DG gesamt t	t	4,9	5,7	8	9,1 / 6,8
Radsatzlast max.	t	10,5	2x10,5	19	18
Spurweite	mm	1435	1435	1425	1435
Radsatzabstand	mm	1800	1900	2500	2300
Primärfederabstand y- Richtung	mm	1110	1866	2050	2204
Sekundärfederabstand y- Richtung	mm	1110	2070	1800	1600
Wankstützlagerabstand y- Richtung	mm	982	-	2640	2438
Schlingerdämpfer y- Richtung	mm	-	-	2640	2600
Radsatzanlenkung Mitte y- Richtung	mm	1110	1866	2000	2042
Sekundäre Längskraftübertragung	-	-	DZ	L	TZ
Primärfederung	-	KF	CF	Schw	Schw
Radsatzanlenkung	-	KF	CF	StDF	StDF
mechanische Bremse	-	-	BS	BS	BS
Antrieb	-	längs	tgef	-	tgef
Sekundärfederung	-	KF	-	LF	LF
Wankstütze	-	2	-	ja	ja
Schlingerdämpfer	-	-	-	2 od. 4	2
Primärvertikaldämpfer	-	-	-	4	4
Sekundärvertikaldämpfer	-	4	-	2	2
Sekundärquerdämpfer	-	-	-	1	1
Gewicht Rahmen	kg	818	1104	1483	1896
Länge Rahmen	mm	2600	-	3060	3749
Breite Rahmen	mm	1610	-	2677	2720
Höhe Rahmen	mm	535	-	701	645

Tabelle 4 Drehgestell und – rahmendaten für Straßenbahn und Reisezugwagen

<sup>36</sup> Siemens Katalog „Fahrwerke erster Klasse“; August 2008

<b>Bezeichnung</b>		<b>Lok 1</b>	<b>Lok 2</b>	<b>Lok 3</b>	<b>Lok 4</b>
<b>Ausführung</b>					
Geschwindigkeit Fahrzeug	km / h	140	160	200	200
Gewicht DG gesamt t	t	17,3	13,8	16,7	17,9
Radsatzlast max.	t	22	22	22,5	24,8
Spurweite	mm	1425	1425	1425	1425
Radsatzabstand	mm	2900	2700	3000	3000
Primärfederabstand y-Richtung	mm	2100	2140	2100	2100
Sekundärfederabstand y-Richtung	mm	2080	2000	2080	1943
Wankstützlagerabstand y-Richtung	mm	-	-	-	-
Schlingerdämpfer y-Richtung	mm	2800	2740	2810	2810
Radsatzanlenkung Mitte y-Richtung	mm	2100	2140	2100	2100
Sekundäre Längskraftübertragung	-	DZ	DZ	DZ	ZDst
mechanische Bremse	-	BS	BS	BS	P
Antrieb	-	tgef	tgef	vgef	vgef
Primärfederung	-	StDF	StDF	StDF	StDF
Radsatzanlenkung	-	DL	DL	DL	DL
Sekundärfederung	-	StDF	StDF	StDF	StDF
Wankstütze	-	nein	nein	nein	nein
Schlingerdämpfer	-	2	2	2	2
Primärvertikaldämpfer	-	4	4	4	4
Sekundärvertikaldämpfer	-	2	2	2	2
Sekundärquerdämpfer	-	1	1	2	2
Gewicht Rahmen	kg	2746	2587	2963	3260
Länge Rahmen	mm		4305	4877	4775
Breite Rahmen	mm	2486	2860	2813	2813
Höhe Rahmen	mm		960	928	955

Tabelle 5 Drehgestell und – rahmendaten für Lokomotive

<b>Bezeichnung</b>		<b>Metro</b>	<b>Metro</b>	<b>HS</b>	<b>HS</b>	<b>HS</b>
<b>Ausführung</b>		<b>T, L</b>	<b>T, L</b>	<b>T, L</b>	<b>T</b>	<b>T, L</b>
Geschwindigkeit Fahrzeug	km / h	90	80	350	250	250
		6,7 /	8,1 /			
Gewicht DG gesamt t	t	5,0	6,1	9,2 / 7,5	9,2	9,2
Radsatzlast max	t	13	17	17	17	17
Spurweite	mm	1435	1435	1435	1520	1520
Radsatzabstand	mm	2100	2300	2500	2500	2600
Primärfederabstand y-Richtung	mm	1900	2100	2000	2000	2100
Sekundärfederabstand y-Richtung	mm	1860	1900	1900	1900	2000
Wankstützlagerabstand y-Richtung	mm	-	2476	2540	2525	2700
				2550/		2710/
Schlingerdämpfer y-Richtung	mm	-	-	2734	-	2900
Radsatzanlenkung Mitte y-Richtung	mm	1900	1900	2040	2080	2144
Sekundäre Längskraftübertragung	-	ZDst	ZDst	L	L	L
mechanische Bremse	-	BS	BS	BS	BS	BS
Antrieb	-	tgef	tgef	tgef	tgef	tgef
Primärfederung	-	KF	KF	Schw	Schw	Schw
Radsatzanlenkung	-	KF	KF	StDF	StDF	StDF
Sekundärfederung	-	LF	LF	LF	LF	LF
Wankstütze	-	nein	ja	ja	ja	ja
Schlingerdämpfer	-	-	-	4	4	4
Primärvertikaldämpfer	-	-	-	4	4	4
Sekundärvertikaldämpfer	-	2	2	2	2	2
Sekundärquerdämpfer	-	1	1	2	2	2
Gewicht Rahmen	kg	990	1589	1527/1490	1896	2300
Länge Rahmen	mm	3092	3176	3180	3180	3360
Breite Rahmen	mm	2145	2607	2796	2920	3069
Höhe Rahmen	mm	557	685	709	727	815

Tabelle 6 Drehgestell und – rahmendaten für Metro und Hochgeschwindigkeitszug

## **4.4 Identifizierung von Kraffteinleitungsstellen und Kraftableitungsstellen an Drehgestellrahmen verschiedener DG-Kategorien**

### *4.4.1 Allgemein (Koppelstellen)*

Wie bereits im Kapitel 3 Grundlagen – Drehgestelle bzw. 3.4 Drehgestelle und ihre Hauptkomponenten näher beschrieben wurde, weisen Drehgestelle zahlreiche Schnittstellen zwischen Drehgestellrahmen und den Drehgestellkomponenten auf. Im Kapitel 4.2.2 Prüflage von Drehgestellrahmen wurden unterschiedliche Einbaulagen behandelt bzw. verschiedene Möglichkeiten für Prüfaufbauten skizziert.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte und der vorgegebenen Randbedingungen (z. B. Prüfstandsdesign, Anzahl der verfügbaren Aktuatoren, Prüfstrategien der Hersteller, Regelwerken, etc.) müssen aus den vorhandenen Drehgestellrahmenkoppelstellen die Kraffteinleitungsstellen ausgewählt und festgelegt werden. Diese Festlegungen beeinflussen die Auswahl der Kraftausleitungsstellen am Rahmen bzw. bestimmen die Kraftableitungsbereiche.

Die Einbaulage des Prüfobjekts bestimmt die Festlegung der Kraffteinleitungsstellen maßgeblich. Ihre Festlegung und die Festlegung, der mit Aktuatoren aktiv zu belastenden Bereiche am Drehgestellrahmen, bestimmt den Umfang des Prüfaufbaus und wirken sich auf die Konzeption und Konstruktion der Vorrichtungen aus. Damit werden Kosten, wie bereits in Kapitel 2.3.6 Wirtschaftlichkeit beschrieben, sehr frühzeitig festgelegt.

Grundsätzlich werden an den ausgewählten Kraffteinleitungsstellen je nach dem Ziel der Festigkeitsuntersuchungen und der Relevanz des Bereiches statische, oder statische und dynamische Lasten aufgeprägt.

Kraffteinleitungsstellen lassen sich nach der Art der aufzuprägenden Lasten einteilen:

- Haupteinleitungsstellen
- Zusatzeinleitungsstellen

#### *4.4.2 Haupteinleitungsstellen*

Haupteinleitungsstellen sind Stellen an denen Hauptlasten (statisch, statisch und dynamisch) aufgeprägt werden.

**Hauptlasten:** Sind jene wesentlichen Lasten in Vertikal-, Lateral- und Longitudinalrichtung, welche festigkeitsrelevante Beanspruchungen am gesamten Drehgestellrahmen hervorrufen. Dazu zählen Vertikal-, Quer- und Verwindungskräfte zufolge Betriebs- oder Sonderereignissen.

#### *4.4.3 Zusatzeinleitungsstellen*

Zusatzeinleitungsstellen sind Stellen an denen Zusatzlasten (statisch, statisch und dynamisch) aufgeprägt werden.

**Zusatzlasten:** Sind Lasten die im Wesentlichen nur lokale Beanspruchungen am Drehgestellrahmen bewirken.

Sie werden beispielsweise durch Komponenten wie Dämpfer, Bremsen oder Anbauten (Massen der Anbauteile) übertragen oder durch Längskräfte aus Traktion oder Bremsen hervorgerufen.

Nachfolgender Abbildung entspricht der Abbildung 38 und zeigt schematisch die definierten Haupt- und Zusatzlasten für den Triebdrehgestellrahmen Metro 1.

Krafteinleitungsstellen mit roten oder violetten, mit „a und einer fortlaufenden Nummer“ gekennzeichnete Pfeile definieren die durch Aktuatoren aufzubringenden Aktionskräfte. Rote Pfeile stehen für aufzuprägende Hauptlasten, violette Pfeile für Zusatzlasten. Grüne mit „r und einer fortlaufenden Nummer“ gekennzeichneten Pfeile skizzieren die abzuleitenden Kräfte und stellen die zu ermittelnden Reaktionskräfte dar. Dünne Pfeile entsprechen statisch aufzuprägenden, dicke Pfeile entsprechen statisch und dynamisch aufzuprägenden Kräften.

Detaillierte Bezeichnungen der „Kraft übertragenden Stellen“ siehe Legende.

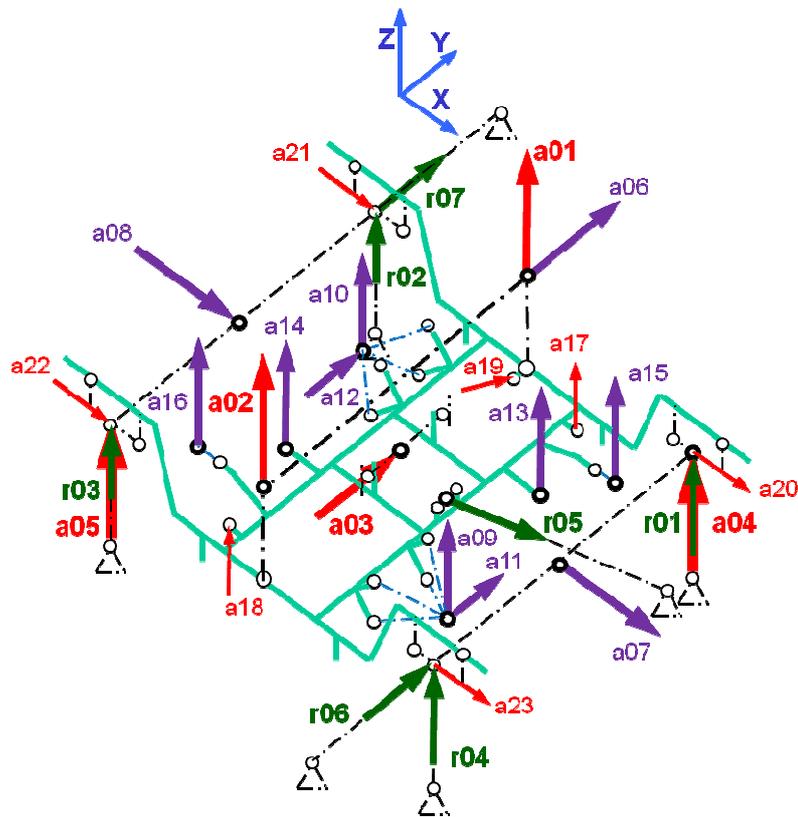


Abbildung 43 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkräfteinleitung zentral am Querpuffer

- |                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| a 01 Sekundärfeder 1 Vertikalkraft | a 17 Sekundärvertikaldämpferkraft 1   |
| a 02 Sekundärfeder 2 Vertikalkraft | a 18 Sekundärvertikaldämpferkraft 2   |
| a 03 Querpuffer Querkraft          | a 19 Sekundärquerdämpferkraft 1       |
| a 04 Verwindung Quadrant 1         | a 20 Längskraft Quadrant 1            |
| a 05 Verwindung Quadrant 2         | a 21 Längskraft Quadrant 2            |
| a 06 Sekundärfeder 1+2 Querkraft   | a 22 Längskraft Quadrant 3            |
| a 07 Längskraft Radsatz 1          | a 23 Längskraft Quadrant 4            |
| a 08 Längskraft Radsatz 2          |                                       |
| a 09 Motor 1 Vertikalkraft         | r 01 Vertikalabstützung 1             |
| a 10 Motor 2 Vertikalkraft         | r 02 Vertikalabstützung 2             |
| a 11 Motor 1 Querkraft             | r 03 Vertikalabstützung 3             |
| a 12 Motor 2 Querkraft             | r 04 Vertikalabstützung 4             |
| a 13 Getriebestützkraft 1          | r 05 Längsabstützung (Längsmithnahme) |
| a 14 Getriebestützkraft 2          | r 06 Querabstützung Radsatz 1         |
| a 15 Bremse 1 Vertikalkraft 1      | r 07 Querabstützung Radsatz 2         |
| a 16 Bremse 2 Vertikalkraft 2      |                                       |

Abbildung 44 Legende Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkräfteinleitung zentral am Querpuffer

#### *4.4.4 Kraftableitungsstellen*

Über die Kraftausleitungsstellen am Rahmen werden die eingeleiteten Aktionskräfte aus dem Rahmen aus und über die jeweiligen Vorrichtungen abgeleitet.

Wie auch für die Krafteinleitungen gilt, dass die Kraftableitungen transparent und eindeutig ausgeführt sein sollen. Daher erfolgen die Ableitungen in den drei Koordinatenhauptrichtungen.

So lassen sie sich wie folgt unterscheiden:

##### *4.4.4.1 Vertikalabstützung*

Überträgt alle vertikal aufgeprägten Kräfte und leitet diese verlust- und spielfrei ab. Für einen in Betriebslage zu prüfenden Drehgestellrahmen erfolgt die Kraftableitung über vier, im Schnittbereich von Radsatzersatz und Primärfederbasen, befindlichen Vertikalabstützungen (siehe r01, r02, r03 und r04 ; Abbildung 43).

Für den Fall der Prüflage „Rückenlage“ erfolgt die Abstützung über zwei im Bereich der Sekundärfederbasen befindlichen Vertikalabstützungen (siehe Abbildung 40 auf Seite 73).

##### *4.4.4.2 Lateralabstützung*

Überträgt alle Querkräfte in Abhängigkeit auf welche Weise die Querkrafteinleitung erfolgt und leitet diese verlust- und spielfrei ab.

Für den Fall der in Betriebslage durchgeführten Prüfung und der gemäß Abbildung 43 zentral eingeleiteten Querkräfte erfolgt die Ableitung über den Radsatzersatz an den Stellen r06 und r07.

Für den Fall der Prüflage „Rückenlage“ erfolgt die Abstützung beispielsweise über zwei im Bereich der Sekundärfederbasen befindlichen Querabstützungen (siehe Abbildung 40 auf Seite 73). Oder sie erfolgt über eine zentrale Querkraftabstützung (r03, r04 und r07) wie in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt.

### **4.4.4.3 Longitudinalabstützung**

Sie überträgt die wirkenden Längskräfte zumeist über die Koppelstelle bzw. die Koppelstellen der Wagenkastenanklenkung bzw. der Längsmithnahme verlust- und spielfrei. Dies erfolgt für den Fall dass die Längskräfte je Radsatzersatz über die Radsatzanklenkungsvorrichtungen am Rahmen eingeleitet werden.

Die Ableitung der Longitudinalkräfte erfolgt über eine mit einer Kraftmesseinheit versehenen Längskraftabstützung (siehe r05; Abbildung 43)

Bei Prüfungen in „Rückenlage“ kann die Abstützung ebenfalls (siehe Abbildung 40 auf Seite 73) über eine Längskraftabstützung, welche an der Koppelstelle der Wagenkastenanklenkung bzw. der Längsmithnahme angreift, erfolgen.

Es werden auch teilweise keine Längskräfte eingeleitet, sodass auftretende Längskräfte über die bestehenden Vertikal- und Querabstützungen abgeleitet werden müssen. Dieses Vorgehen nimmt ungenügend bekannte Kraftflüsse in Kauf und ist hinsichtlich des möglichen Fehlers zu bewerten.

## **4.5 Kraftgrößen**

Die Europäische Norm 13749 verlangt im Rahmen ihres Validierungsprogramms<sup>37</sup> für Drehgestellrahmen zur Validierung der Festigkeitsanforderungen beide Nachweisverfahren:

- Statische Laborversuche
- Ermüdungsversuche im Labor

---

<sup>37</sup> EN 13749:2011; 6.2; S9

Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über minimal und maximal aufzuprägende Aktuatorkräfte für das statische und für das dynamische Versuchsprogramm. Die Kräfte wurden für die Drehgestellfamilie der Lokomotivdrehgestelle aus verschiedenen Siemensquellen ermittelt und orientieren sich ihrer Benennung nach weitgehend an Abbildung 43 und Abbildung 44.

<b>Hauptlasten</b>					
<b>Nr.</b>	<b>Aktuator / Zylinder</b>	<b>statisch</b>		<b>dynamisch</b>	
		<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>
<b>a 01</b>	Sekundärfeder 1 vertikal	-40,0 kN	-400,0 kN	-50,0 kN	-240,0 kN
<b>a 02</b>	Sekundärfeder 2 vertikal	-40,0 kN	-400,0 kN	-50,0 kN	-240,0 kN
<b>a 03</b>	Querkraft Querpuffer	140,0 kN	-140,0 kN	100,0 kN	-100,0 kN
<b>a 04</b>	Verwindung	10,0 ‰	-10,0 ‰	7,0 ‰	-7,0 ‰
<b>a 05</b>	Verwindung	10,0 ‰	-10,0 ‰	7,0 ‰	-7,0 ‰
<b>a 06</b>	Sekundärfeder 1+2 Querkraft	50,0 kN	-50,0 kN	70,0 kN	-70,0 kN

Tabelle 7 Hauptlasten - statisch und dynamisch

<b>Zusatzlasten</b>					
<b>Nr.</b>	<b>Aktuator / Zylinder</b>	<b>statisch</b>		<b>dynamisch</b>	
		<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>
<b>a 07</b>	Längskraft Radsatz 1	400,0 kN	-400,0 kN	150,0 kN	-150,0 kN
<b>a 08</b>	Längskraft Radsatz 2	400,0 kN	-400,0 kN	150,0 kN	-150,0 kN
<b>a 09</b>	Motor 1 Vertikalkraft	150,0 kN	-150,0 kN	50,0 kN	-80,0 kN
<b>a 10</b>	Motor 2 Vertikalkraft	150,0 kN	-150,0 kN	50,0 kN	-80,0 kN
<b>a 11</b>	Motor 1 Querkraft	40,0 kN	-40,0 kN	42,0 kN	-42,0 kN
<b>a 12</b>	Motor 2 Querkraft	40,0 kN	-40,0 kN	42,0 kN	-42,0 kN
<b>a 13</b>	Getriebestützkraft 1	300,0 kN	-300,0 kN	120,0 kN	-120,0 kN
<b>a 14</b>	Getriebestützkraft 2	300,0 kN	-300,0 kN	120,0 kN	-120,0 kN
<b>a 15</b>	Bremse 1 Vertikalkraft	30,0 kN	-40,0 kN	42,0 kN	-56,0 kN
<b>a 16</b>	Bremse 2 Vertikalkraft	30,0 kN	-40,0 kN	42,0 kN	-56,0 kN
	Drehdämpferkraft	40,0 kN	40,0 kN	56,0 kN	-56,0 kN
	Primärvertikaldämpferkraft	50,0 kN	-50,0 kN	-	-
	Sekundärvertikaldämpferkraft	40,0 kN	-40,0 kN	-	-
	Sekundärquerdämpferkraft	25,0 kN	-25,0 kN	-	-
	Motorquerdämpferkraft	20,0 kN	-20,0 kN	-	-

Tabelle 8 Zusatzlasten – statisch, statisch und dynamisch

## **4.6 Grenzen der Laborversuche**

Prüfaufbauten für Laborversuche sind nur unter Beachtung unterschiedlicher und zum Teil gegenläufiger Randbedingungen, wie in Kapitel 2.3 Einflüsse beschrieben, realisierbar. Ein Prüfaufbau ist die technisch und wirtschaftlich bedingte Summe aus Vereinfachungen und Kompromissen.

Um einen Drehgestellrahmen im Labor realitätsnah zu belasten bzw. zu beanspruchen ist ein hoher technischer und wirtschaftlicher Aufwand notwendig, ohne dass die tatsächlich im realen Betrieb unter sich ändernden Umwelteinflüssen auftretenden und stetig wechselnden Beanspruchungen in einer vernünftigen Prüfzeit verwirklicht werden können<sup>38</sup>.

Werden Gesamtfahrzeug oder Drehgestell, wie in Kapitel 2.4.1 und 2.4.2 skizziert, am Simulator geprüft, so findet der Rahmen „all seine realen Einspannungsverhältnisse im Drehgestell vor“, aber es ist nicht möglich nur den Drehgestellrahmen allein zu prüfen. Bei diesen experimentellen Prüfstandssimulationen werden die Massenkräfte des Rahmens und der anderen Drehgestellkomponenten mit einem geeigneten Belastungs- Zeitprogramm hervorgerufen und verursachen entsprechende Beanspruchungen.

Werden aber, wie international üblich und dem Stand der Technik entsprechend, im Labor Festigkeitsuntersuchungen am einzelnen Drehgestellrahmen durchgeführt, so ist es unmöglich alle Einspannungs-, Steifigkeits- und Dämpfungsbedingungen des im Drehgestell verbauten Drehgestellrahmen nachzubilden und damit eine unter Betriebsbedingungen auftretende und realitätsnahe Beanspruchung der Struktur hervorzurufen.

So bleiben beispielsweise Massenkräfte des Rahmens oder Beanspruchungen die durch die Massenträgheiten von Anbauten oder sonstigen Drehgestellkomponenten, wie die im Einsatz hervorgerufenen translatorischen und / oder rotatorischen Radsatzmassenträgheitskräfte unberücksichtigt.

---

<sup>38</sup> Haibach, 2006; S96

Zur Kraffteinleitung und zu Kraftaus- und -ableitung werden üblicherweise Ersatzsysteme verwendet. Diese Ersatzsysteme sind vereinfachte Vorrichtungen der zu ersetzenden und meist sehr komplexen Teilsysteme wie Federungen, Radsätze und Radsatzanlenkungen, Antriebs- und Bremsenheiten, Längsmitnahmen, Dämpfer, Puffern und Festanschlägen etc.

Aus diesen notwendigen Vereinfachungen erwächst eine Vielzahl an Fehlermöglichkeiten.

Der sehr komplexe Prüfaufbau und die etwaig damit verbundenen baulichen Abweichungen oder aus Vorrichtungs- und Fertigungstoleranzen resultierende Abweichungen bilden ein großes Reservoir für Fehler und Ungenauigkeiten. Durch Vorrichtungen verursachte Verspannungen am Rahmen, bei den Vorrichtungen oder im Aufbau können ebenfalls zu beträchtlichen Abweichungen führen.

Auch die Massen der Vorrichtungen sind in die Betrachtungen mit einzubeziehen und durch entsprechende Kompensation zu berücksichtigen.

Der gesamte Prüfaufbau mit seiner Prüf- und Vorrichtungstechnik, seiner Mess- und Regelungstechnik, dem eingespannten Prüfobjekt, etc. bildet ein schwingungsfähiges Gesamtsystem, welches abhängig vom Ermüdungsprogramm und den aufzuprägenden mehraxialen Prüfkräften unter Umständen Einfluss auf die am Rahmen hervorgerufenen Beanspruchungen hat. Diese Prüfstandeigenschwingungen und -frequenzen können lokal oder auch global zu anderen als zu den erwarteten Ergebnissen führen.

Weitere und tiefer gehende Fehlerbetrachtungen sind nicht Bestandteil dieser konzeptionellen Arbeit. Sie sind aber bei der Umsetzung von Prüfaufbauten und bei der Durchführung von Festigkeitsversuchen jedenfalls zu berücksichtigen.

Die EN 13749 berücksichtigt die „realen“ Prüfstandsverhältnisse und nimmt zu den Grenzen bei Laborversuche Stellung.

Nachfolgend werden die in der EN 13749 beschriebenen Grenzen für statische und Ermüdungsversuche zitiert:

Auszug aus EN 13749:2011; Anhang F, F.1 Allgemeines; S36

*Grenzen für statische Laborversuche:*

- *Versuche werden mit synthetischen Lasten durchgeführt, daher können die Versuchsergebnisse niemals ein besseres Vertrauensniveau als die zu Grunde liegenden Lastannahmen haben;*
- *aufgebrachte Lasten sind durch die technischen Grenzen des Versuchsaufbaus limitiert;*

Auszug aus EN 13749:2011; Anhang G, G.1 Allgemeines; S45

*Grenzen der Laborermüdungsversuche:*

- *die während des Versuchs aufgebrachten Lasten werden durch technische Grenzen des Versuchsaufbaus eingeschränkt (z. B. ist eigentlich die reale Lastverteilung viel komplexer, als es ein Versuchsaufbau mit begrenzter Anzahl von Aktuatoren simulieren kann, insbesondere in Bezug auf die Trägheitslasten;*
- *die Vorrichtungen stellen normalerweise nur eine Vereinfachung des wirklichen mechanischen Drehgestellsystems dar (z. B. haben die Federungen (Lagerung) in der Versuchseinrichtung oft eine höhere Steifigkeit, um die mögliche Versuchsfrequenz zu erhöhen und praktikable Zeitpläne zu erreichen).*

## **4.7 Erhebung vorrichtungstechnischer Lösungen mit Beispielen**

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Lösungen für einzelne Vorrichtungsbaugruppen erhoben. Diese Beispiele bilden vor allem für die konzeptionelle Modularisierung von Vorrichtungen eine Entscheidungsbasis.

### *4.7.1 Beispiel 1:*



Abbildung 45 Sekundärfederersatz und Radsatzersatz - SZA

In obiger Abbildung erkennt man eine Sekundärfederersatzvorrichtung über die ein Aktuator die Vertikalkraft einleitet. Diese Kräfte werden über zwei Federersatzvorrichtungen dem Rahmen aufgeprägt. Die Vorrichtungsbrücke baut im Bereich der Kräfteinleitung hoch und ist entsprechend schwer ausgeführt.

Im Vordergrund ist der Radsatzersatz mit dem einzelnen Anschluss für die Längskrafteinleitung in der Vorrichtungsmitte zu erkennen, wodurch auch der Radsatzersatz entsprechend massiv ausgeführt sein muss. Weiters fallen die kurzen Längen der vertikalen und der lateralen Abstützungen auf.

Dies führt im Falle von Rahmenauslenkungen zu großen Auslenkwinkeln, sodass die in Bezug auf das feste Koordinatensystem des Prüfstands verursachten Querkraftanteile der resultierenden Abstützkraft recht groß werden. Dies kann je nach Lagerungsart zu größeren Reibungsverlusten führen.

### 4.7.2 Beispiel 2:

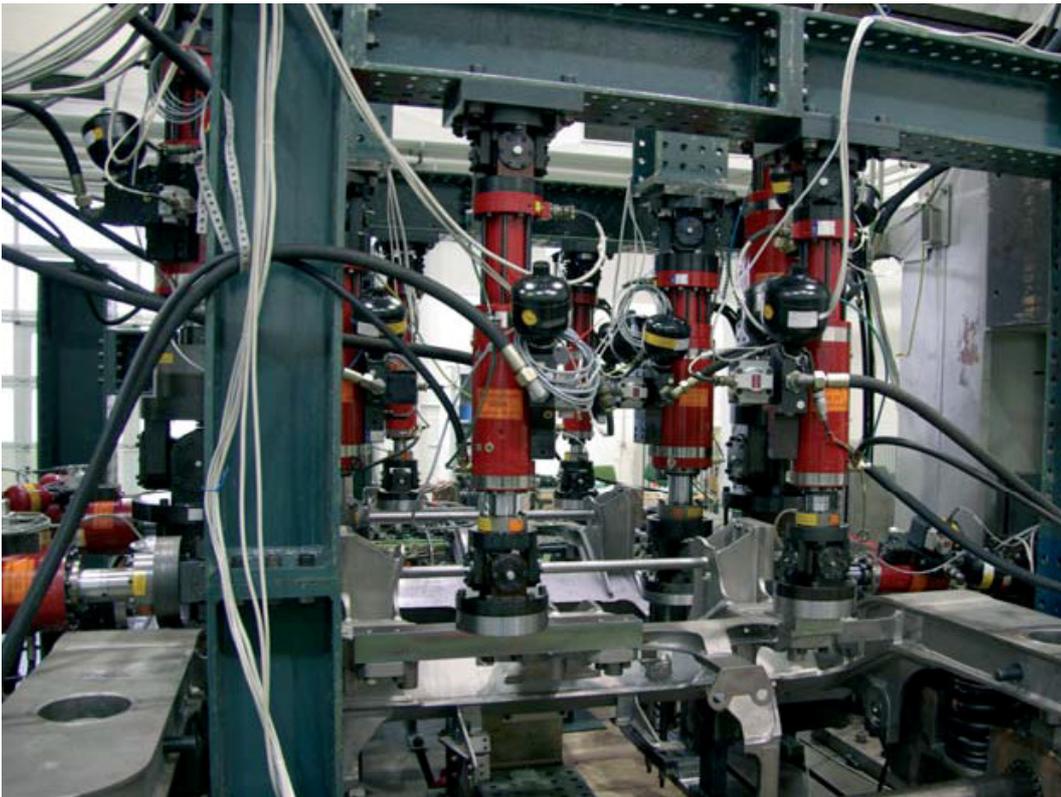


Abbildung 46 Prüfung mit Primärfeder (Quelle: DB Systemtechnik<sup>39</sup>)

In der Abbildung 46 werden im Primärfederbereich Federn verwendet. Auch beim Prüfaufbau der Abbildung 30a kann man den Einsatz von Federn erkennen. Der Einsatz der Federung entspricht den Randbedingungen des realen Drehgestells, allerdings bedeutet dies auch, dass entsprechend große Federwege in Kauf genommen werden. Die Wege reduzieren die Prüffrequenz und verlängern die Prüfzeiten. Bei ihrer Verwendung wird auch mehr Energie zur Versuchsdurchführung benötigt. Anstelle der Originalfedern werden auch

---

<sup>39</sup> DB Systemtechnik; Brochüre Zulassungsmanagement, Prüfung und Zertifizierung; 2012; S19

Ersatzfedern mit drei bis sechsfachen Steifigkeiten eingesetzt, wodurch die Frequenz erhöht, die Prüfzeiten verkürzt und der Energiebedarf gesenkt wird. Die Beschaffung der Ersatzfedern ist zumeist langwierig und teuer.

*4.7.3 Beispiel 3:*

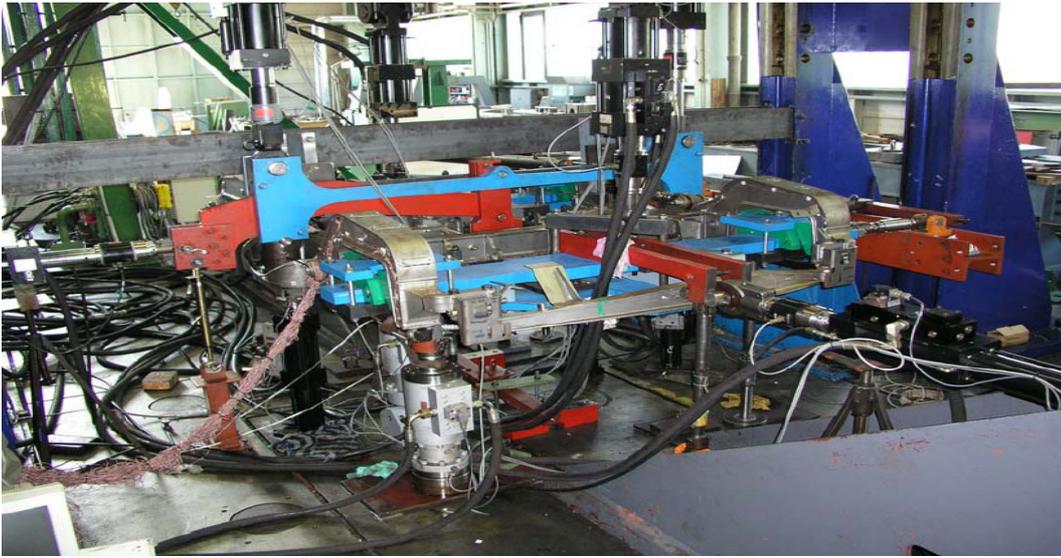


Abbildung 47 Prüfaufbau Straßenbahn – SZA



Abbildung 48 Prüfaufbau Straßenbahn - SZA

Die Abbildungen Abbildung 47 und 48 zeigen anschaulich den Prüfaufbau zur Festigkeitsprüfung eines Straßenbahndrehgestellrahmen. Die Baugruppen für die Aufprägung der Hauptlasten sind:

Sekundärfederersatz (blau), die am Sekundärfederersatz abgehängte Querkrafteinleitung (rot), die Radsatzersatzachse (blau) mit Chevronfederersatz (grün) und Längskrafteinleitung (rot) mit gelenkig gelagerter Querkraftableitung.

Die Farbcodierung der Vorrichtungen erleichtert das Erkennen und die Zuordnung der Vorrichtungsteile. Die Hauptlasten sind mit dem in Abbildung 47 zu sehenden Aktuator für Verwindung vervollständigt.

Der Sekundärfederersatz ist nur für einen Sekundärfederabstand in  $y$ -Richtung ( $y_{SF}$ ) ausgeführt. Die Querkrafteinleitung kann nur in Kombination mit dem Sekundärfederersatz verwendet werden, die Höhenverstellbarkeit für die Querkrafteinleitung ist nicht gegeben.

Die Wiederverwendbarkeit des Radsatzersatzes ist ebenfalls sehr eingeschränkt. Die verwendete Ersatzplatte (blau) lässt nur Längskräfte für Straßenbahnrahmen bzw. ähnlichen Drehgestellrahmen zu. Der Abstand der Primärfedern in  $y$ -Richtung ( $y_{PF}$ ) ist durch die innengelagerte Aufständerung zufolge des Achsschlüssels nur geringfügig veränderbar. Die Querkraftabstützung mittels mit Gelenkköpfen versehenen Stangen ist leicht und unaufwendig gestaltet, allerdings legt die Länge der Ersatzplatte eine Schnittstelle fest, welche nicht mehr für breitere Rahmenkonstruktionen (z. B. Lokomotivrahmen oder Breitspurrahmen) verwendet werden kann.

#### 4.7.4 Beispiel 4:

Dieser Prüfaufbau zur Lokomotivdrehgestellrahmenprüfung zeigt über alle Vorrichtungsmodule hinweg den bereits konzeptionell optimierten Versuchsaufbau für die Aufprägung von Hauptlasten, da alle Krafteinleitungen mit Aktuatoren dort

erfolgen, wo die Lasten aufzuprägen sind. Die Kraftableitungen in vertikaler, lateraler und longitudinaler Richtung befinden sich ebenfalls in diesen Kraffteinleitungsbereichen, wodurch sich deren Dimensionen durch den vorteilhaften Kraftfluss sehr beschränken. Einzig die Längskraftabstützung fällt massiver aus, allerdings muss sie auch die statische Sonderlast eines 3g Stoßes übertragen.

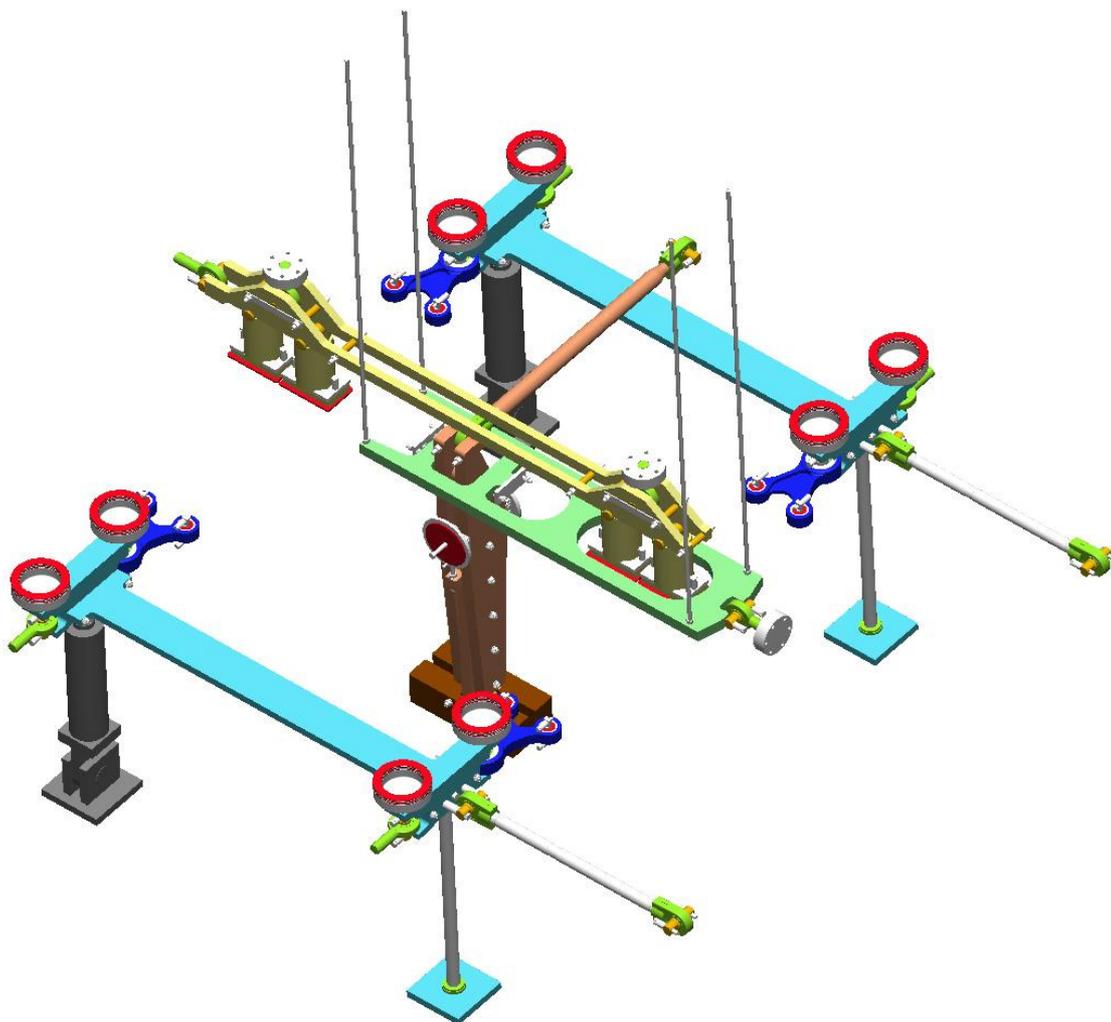


Abbildung 49 Prüfaufbau BR189 (Quelle: Wolfand)

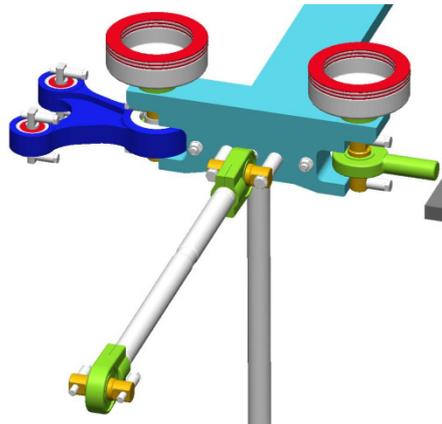


Abbildung 50 Detail BR 189 - Primärfederersatz mit Dreieckslenker  
(Quelle: Wolfand)

Die Kombination aus Radsatzersatz, Radsatzlagergehäuseersatz mit Querkraftablenkung, Radsatzanlenkung mit originalem Dreieckslenker und Längskrafteinleitung baut sehr leicht. Die Vertikalkräfte werden über die beiden Primärfederersatzvorrichtungen ein und über die gelenkig gelagerte Aufständerung abgeleitet. Die Verwindung wird in umgekehrter Richtung über den Lagergehäuseersatz und über die Primärfederersatzvorrichtungen in den Rahmen eingeleitet.

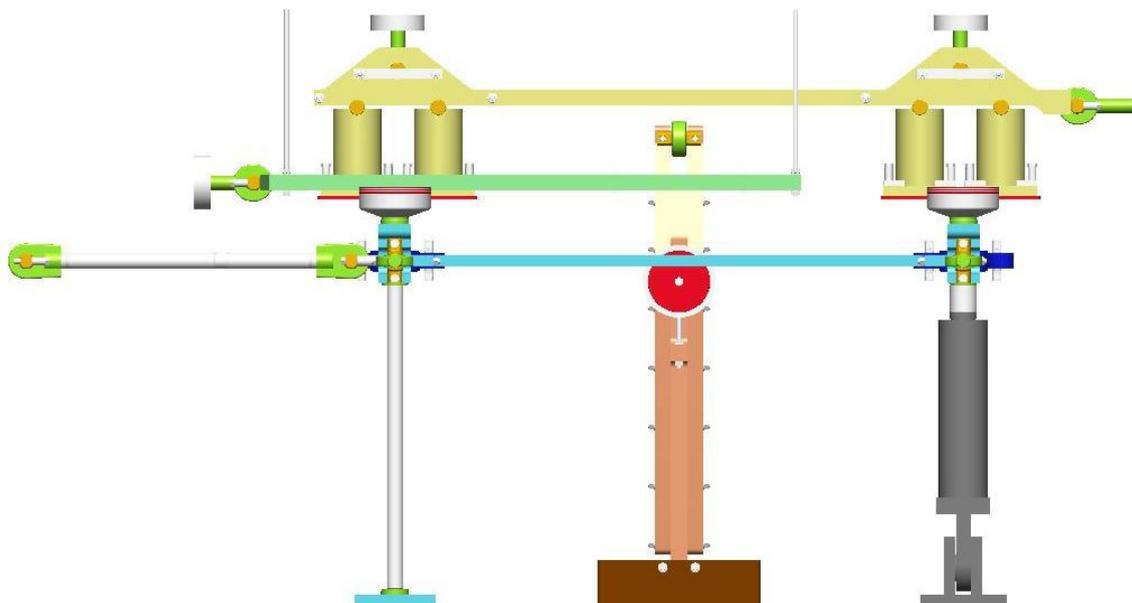


Abbildung 51 Prüfaufbau BR 189 Aufriss (Quelle: Wolfand)

Im Vergleich mit den Aufbauten in den Abbildungen Abbildung 11, Abbildung 26, Abbildung 33b oder Abbildung 45 unterscheidet sich der in Abbildung 49 und Abbildung 51 gezeigte Aufbau positiv durch seinen leicht wirkenden, einfach und transparent gestalteten Prüfaufbau und seine optimierten Vorrichtungen.

Der Nachteil dieser Vorrichtungen liegt aber gerade in ihrer Optimierung.

Ändern sich beispielsweise geometrische Schnittstellen wie Primärfederabstand in y- Richtung, Sekundärfederabstand in y- Richtung, Radsatzanlenkungsabstand in y- Richtung, Primär- oder Sekundärfederhöhen, Querpuffer – oder Längsanschlagsbereich auch nur geringfügig am selben Rahmen, so können diese Vorrichtungen nicht mehr verwendet werden.

Für Rahmenversuche an unterschiedlichen Drehgestellrahmen wie Metro oder High Speed Rahmen können lediglich Vorrichtungsteile wiederverwendet werden.

Die Vorrichtungen sind „Einwegvorrichtungen“!

#### *4.7.5 Beispiel 5:*

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen zwei Aufbauten von Drehgestellrahmen der Kategorie Reisezugwagen.

Beide Aufbauten weisen unterschiedliche Lösungen für die Sekundärfeder-Vertikalkrafteinleitung auf.

Die Radsatzersatzvorrichtungen sind unterschiedlich ausgeführt, wobei bei beiden Ausführungen idealerweise die Längskrafteinleitung mit zwei Aktuatoren je Radsatz erfolgt. Die Radsatzersatzkonstruktionen bestehen aber aus einem Brennschnitt bzw. aus miteinander verschraubten Platten und sind massiv und schwer ausgeführt, obwohl sie nur mehr Querkräfte übertragen und ableiten müssen, aber keine Biegebelastung durch einen mittig positionierten Längskraftaktor erfahren. Für die Versuche sind es unnötige Massen, welche unter Umständen zu kompensieren sind. Außerdem erschweren sie Montage und Demontage und erhöhen Kosten.

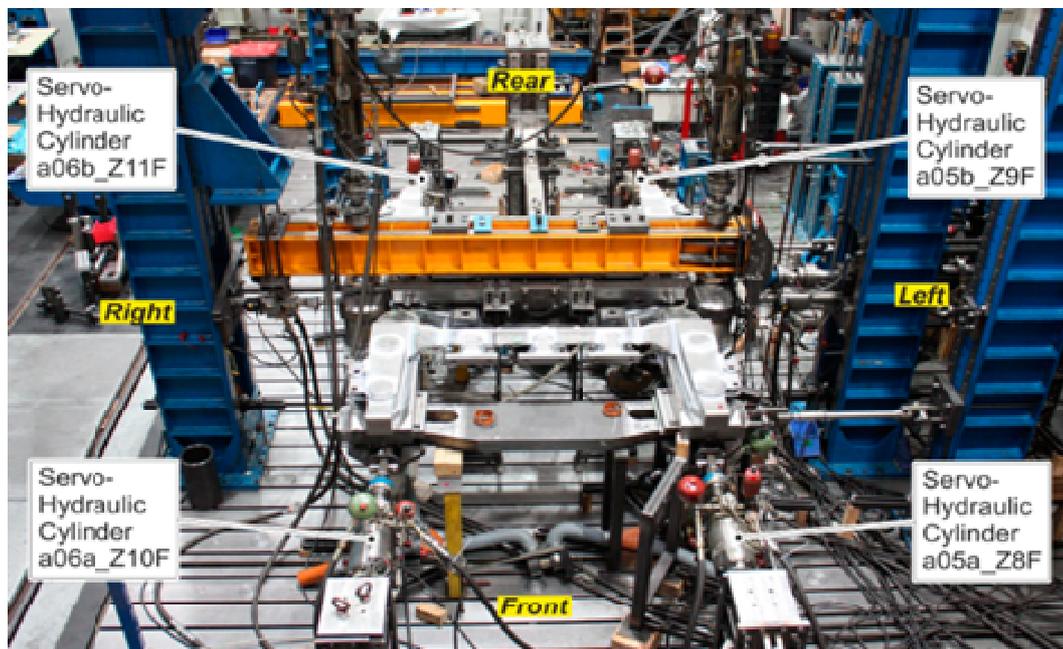


Abbildung 52 Prüfaufbau 1 (Quelle: TU Graz / Siemens)

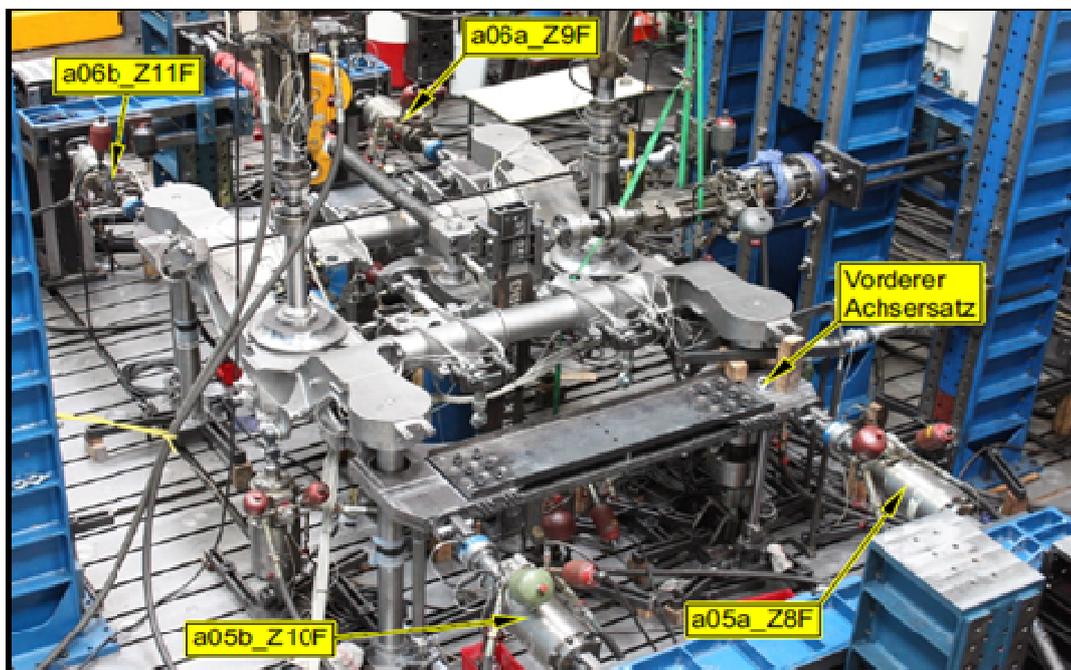


Abbildung 53 Prüfaufbau 2 (Quelle: TU Graz / Siemens)

#### 4.7.6 Beispiel 6:

Radsatzersatzvorrichtungen werden auch in Anlehnung an den realen Radsatz mit einer Achse ausgeführt. Die Variabilität für unterschiedliche Primärfederabstände in y- Richtung oder unterschiedliche Radsatzanlenkungen wird über positionier- und klemmbare Vorrichtungen, die Primärfeder und Radsatzanlenkung ersetzen, sichergestellt.

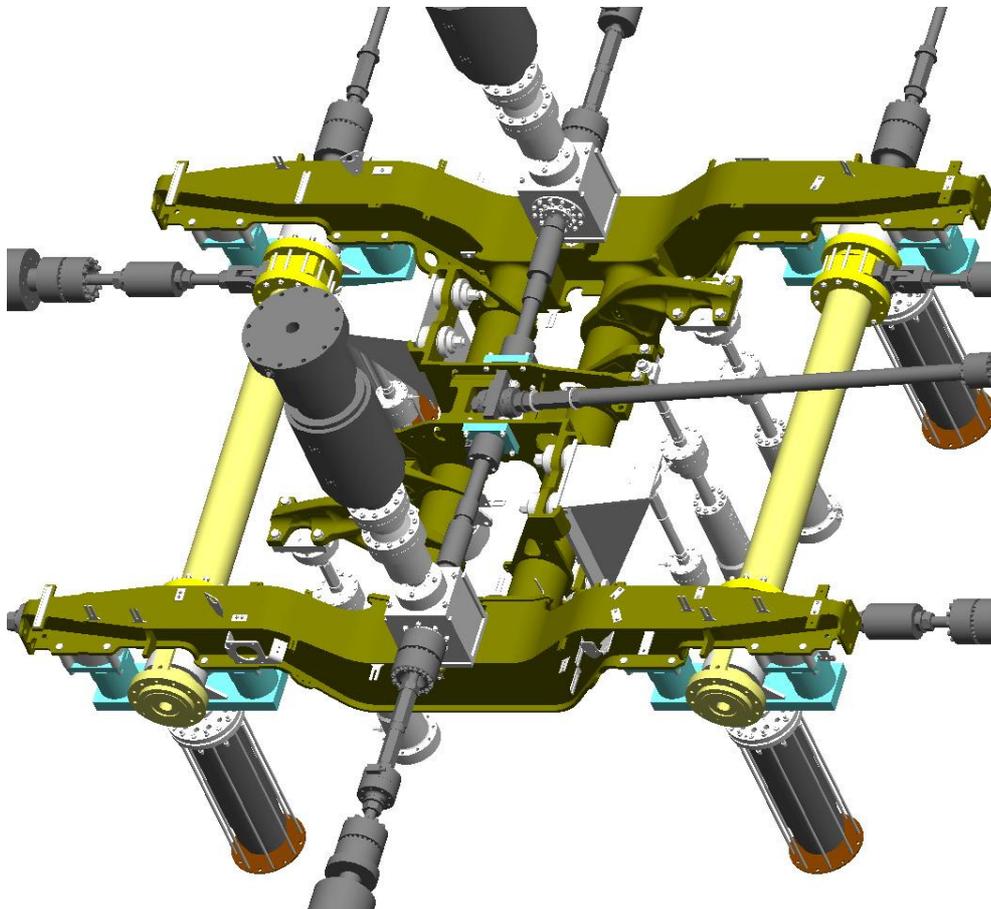


Abbildung 54 Prüfaufbau 3 (Quelle: Tabor / Siemens)

Ein weiteres Beispiel für einen achsförmigen Radsatzersatz findet man in Abbildung 35b.

#### 4.8 Ermittlung und Vergleich verschiedener DGR- Abmessungen zur Bestimmung des Platzbedarfs

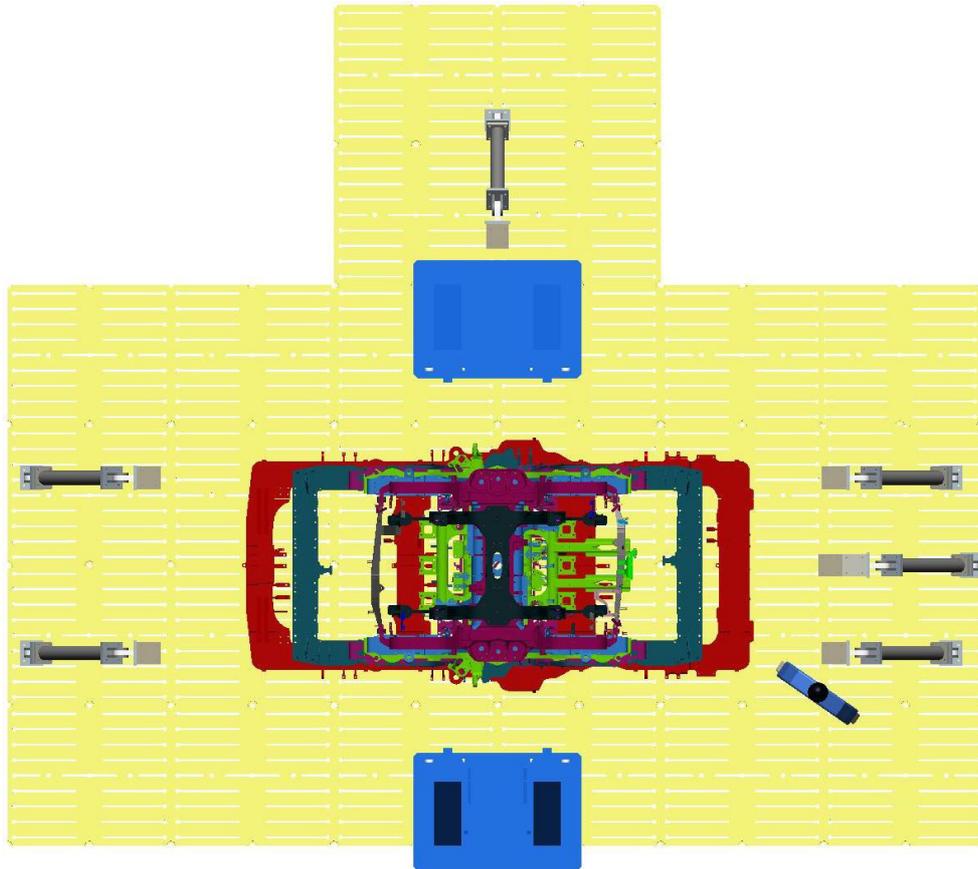


Abbildung 55 Rahmengrößen und Prüfstand Festigkeitslabor SZA

Die vorherige Abbildung zeigt den sehr unterschiedlichen Platzbedarf bei Rahmenversuchen auf. Straßenbahndrehgestellrahmen mit Abmessungen von 3,1 x 2,2 x 0,6m und einem Radsatzabstand von 1,8 m benötigen entsprechend wenig, Lokomotivrahmen mit Abmessungen von ca. 4,9 x 2,9 x 1,0 m und einem Radsatzabstand von 3,0 m entsprechend mehr.

Um auf jeden Fall Platz für andere Rahmenversuche zu gewährleisten wird zusätzlich ein Rahmen einer dreiachsigen Lokomotive mit seinen Abmessungen von ca. 6,5 x 3,3 x 1,2 m herangezogen und als Maximalvariante berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der notwendigen Abstützelemente beträgt die benötigte Größe des Spannungsfeldes mindestens 11 x 6 m. Zur Verfügung stehen 12 x 7 m.

## 5 Festlegung des Konzepts

Die Festlegungen erfolgen gemeinsam mit dem SZA- Festigkeitslabor und berücksichtigen das bestehende Spannungsfeld mit Portalprüfstand sowie vorhandenes Equipment.

1. Das Konzept ist für den bestehenden Portalprüfstand der SZA unter Berücksichtigung seiner Randbedingungen zu erstellen
2. Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen werden in Betriebslage durchgeführt
3. Es sind nur Drehgestelle mit zwei Radsätzen zu berücksichtigen
4. Drehgestelle für Straßenbahnen, Metros, Reisezugwagen, Lokomotiven und Hochgeschwindigkeitszug sind zu erfassen
5. Drehgestelle für Güterwagen werden nicht berücksichtigt
6. Konzeptionelle Standardisierung und Modularisierung nur für Hauptlasten gemäß der Belastungsanordnung der EN 13749

**Hauptlasten:** Sind jene wesentlichen statischen Lasten und Ermüdungslasten in Vertikal-, Lateral- und Longitudinalrichtung, welche festigkeitsrelevante Beanspruchungen am gesamten Drehgestellrahmen hervorrufen. Dazu zählen Vertikal-, Quer- und Verwindungskräfte zufolge Betriebs- oder Sonderereignissen.

In der EN 13749 sind Hauptlasten<sup>40</sup> wie folgt definiert:

*Hauptlasten sind Lasten, die Beanspruchungen in der gesamten Rahmenkonstruktion auslösen, d. h., Vertikalkräfte, Querkräfte und Verwindungskräfte.*

---

<sup>40</sup> EN 13749, S45

Die Hauptlasten gemäß EN 13749 werden im Bild F.1 auf S40 dieser Norm festgelegt.

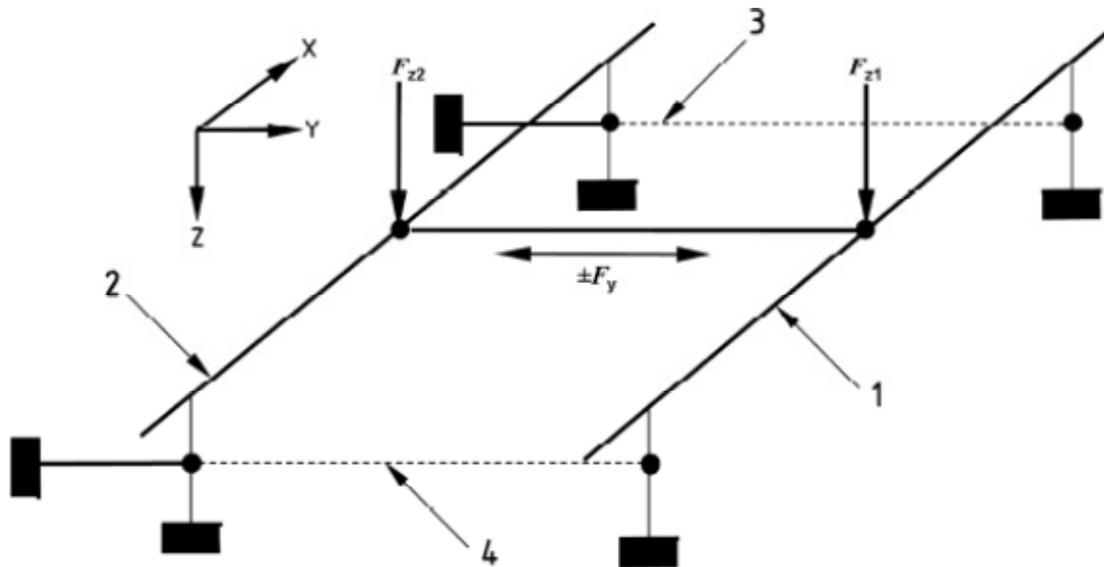


Abbildung 56 Belastungsanordnung für ein Drehgestell mit Langträgern

- Legende<sup>41</sup>:
- 1 Langträger Seite 1
  - 2 Langträger Seite 2
  - 3 Radsatz 1
  - 4 Radsatz 2

Hauptlasten:

- Fz1 Vertikalkraft auf Langträger 1 wirkend
- Fz2 Vertikalkraft auf Langträger 2 wirkend
- Fy Querkraft auf Drehgestell wirkend

Zu den Hauptlasten dieser Norm, die Drehgestellrahmen aufzuprägen ist, zählt auch die Verwindung. Sie ist definiert als „Relative Drehung der Langträger durch Kippbewegung aus der Ebene ( x- y) heraus“<sup>42</sup>. Das Koordinatensystem bezieht sich auf jenes in Abbildung 56.

<sup>41</sup> EN 13749, S40

<sup>42</sup> EN 13749, Tabelle A.5, S16

## 5.1 Konzept Standardisierung

Festlegung der Schnittstellen für Längs- Quer und Vertikalabstützung für Betriebslage und Sekundärfederseitiger Kraffteinleitung.

1. Konzeptionelle Definition der Schnittstellen Portalprüfstand – Hauptmodule
2. Kraffteinleitung Vertikalkräfte sekundärfederseitig
3. Kraftableitung Vertikalkräfte primärseitig über Stangen
4. Kraffteinleitung Querkraft Rahmenseitig am Queranschlag / Querpuffer
5. Kraffteinleitung anteiliger Sekundärfederquerkräfte an den Sekundärfederbasen
6. Kraftableitung Querkräfte Radsatzersatzseitig
7. Verwindung (weggeregelt) primärfederseitig im 1. Quadranten
8. Kraftableitung Längskräfte Rahmenseitig über jeweilige Längsmithnahme
9. Optional: Kraffteinleitung Längskräfte Radsatzersatzseitig im Bereich Radsatzanlenkungen

## **5.2 Konzept Modularisierung**

1. Modul Wagenkasten - Sekundärfederersatz
  2. Modul Radsatzersatz
  3. Modul Querkrafteinleitung
  4. Modul Querkraftableitung
  5. Modul Längskraftableitung
- 
- Verwendbarkeit der Module ohne Austausch bei statischen Versuchen und Ermüdungsversuchen
  - variable Radsatzabstände
  - variable Spurweiten
  - transparenter Prüfaufbau durch vertikale, laterale, longitudinale Kraftein- und -ableitung
  - Einspannungen realitätsnah
  - Verspannungsfreiheit des Prüfobjekts
  - keine parasitären Kraftflüsse / Kraftschlüsse
  - vollständige Aktions- und Reaktionskraftmessung

## 6 Standardisierung

### 6.1 Schnittstellen

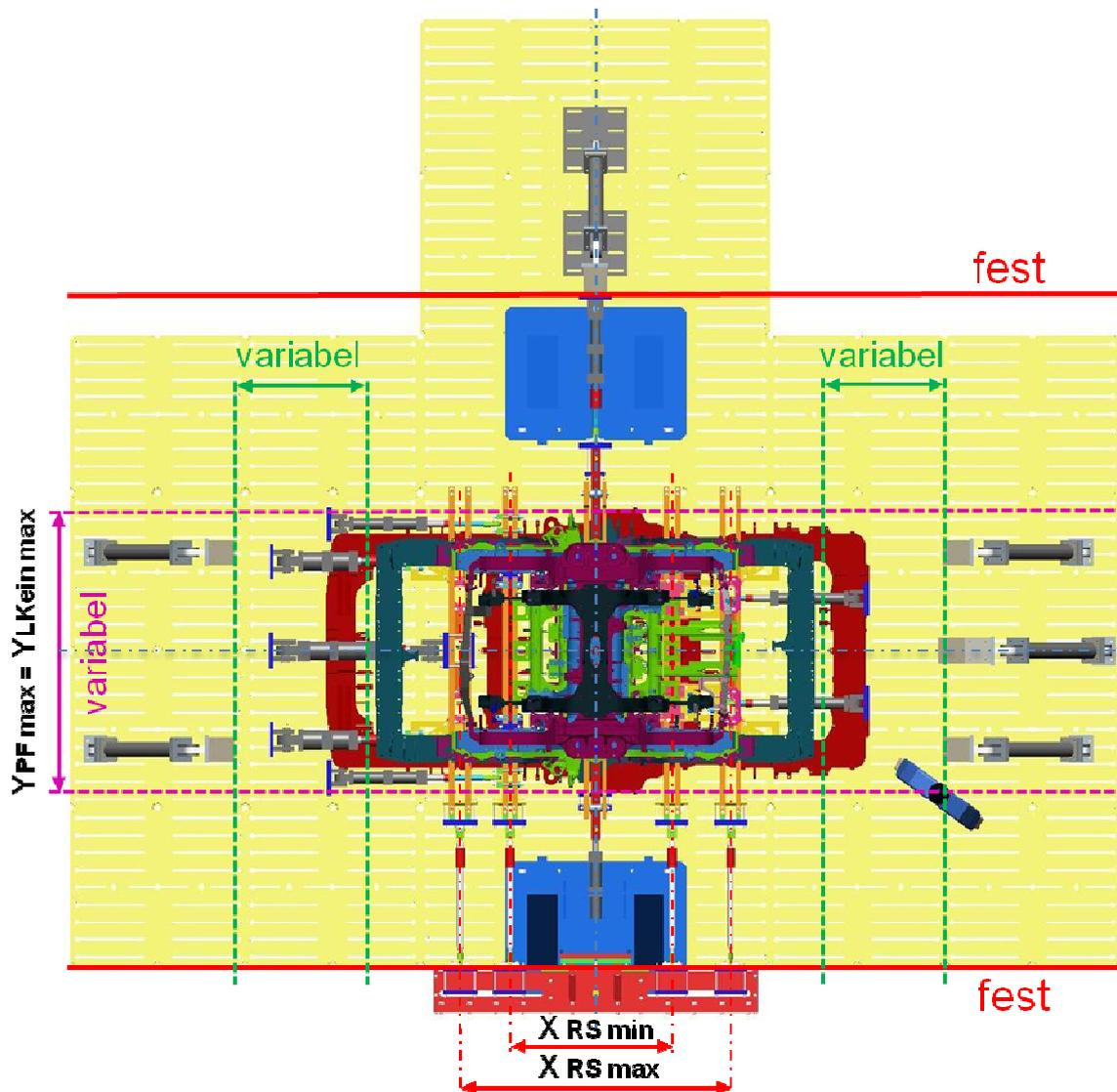


Abbildung 57 Schnittstellen Prüfstand Grundriss

Die Standardisierung erfolgte mehrstufig. Mit den erhobenen Informationen aus Kapitel 4 und mehreren Schleifen innerhalb der beiden Konzepte Standardisierung und Modularisierung konnten die Wechselwirkungen berücksichtigt und die nachfolgenden Schnittstellen definiert und festgeschrieben werden.

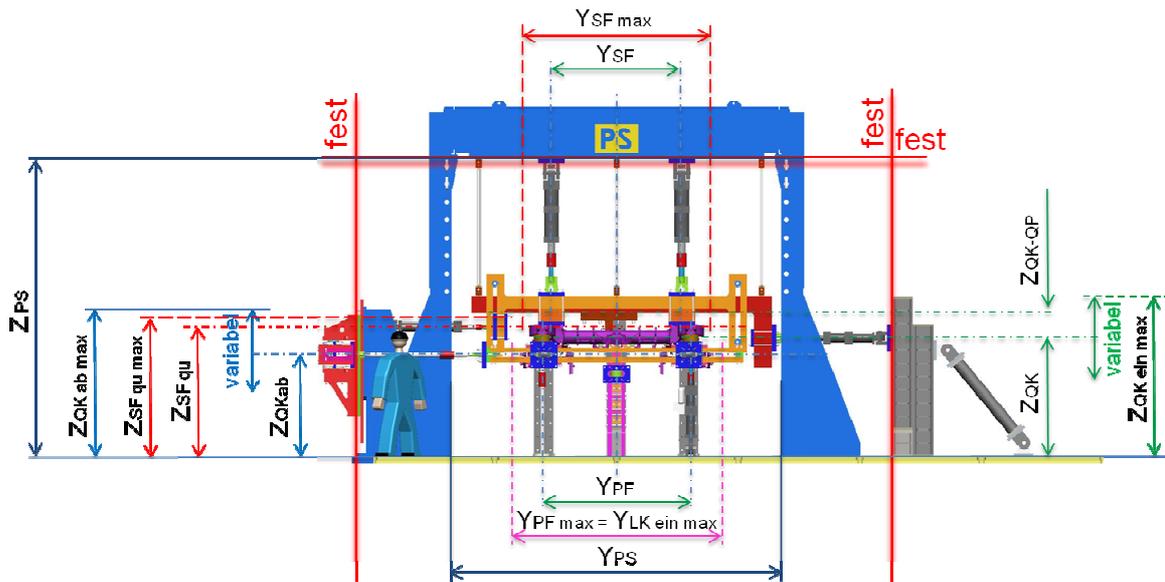


Abbildung 58 Schnittstellen Prüfstand Aufriss

	EH	Mass	Bezeichnung
$Y_{SF\ max}$	[mm]	2600	Max. Sekundärfederabstand y- Richtung
$Y_{SF}$	[mm]	2080	Sekundärfederabstand y- Richtung
$Y_{PF\ max}$	[mm]	2800	Max. Primärfederabstand y- Richtung
$Y_{PF}$	[mm]		Primärfederabstand y- Richtung
$Y_{QK-QP\ ein}$	[mm]	2000	Max. Abstand y- Richtung Querkräftersatz - Querpuffer
$Y_{QK\ ab}$	[mm]	1460*	Y- Abstand zw. Gelenken, Querableitung
$Y_{LK\ ein\ max}$	[mm]	2800	Max. y- Abstand Längskrafteinleitung
$X_{RS\ max}$	[mm]	3000	Max. Radsatzabstand x- Richtung
$X_{RS\ min}$	[mm]	1700	Min. Radsatzabstand x- Richtung
$Z_{QK\ ein\ max}$	[mm]	2000	Max. Höhe Querkräfteinleitung
$Z_{QK-QP\ ein}$	[mm]	600	Max. Abstand z- Richtung Querkräftersatz - Querpuffer
$Z_{QK\ ab\ max}$	[mm]	1600	Max. Höhe Querkräftableitung
$Z_{QK\ ab\ min}$	[mm]	500	Min. Höhe Querkräftableitung
$Z_{SF\ qu\ ein\ max}$	[mm]	1935	Max. Höhe Querkräfteinleitung Sekundärfederersatz
$X_{PS}$	[mm]	1520	Tiefe Portal
$Y_{PS}$	[mm]	4550	Breite Portal
$Z_{PS}$	[mm]	4145	Höhe Portal, Schnittstelle Portal – SF-Vertikalkrafteinleitung
$Y_{PS-QK\ ein}$	[mm]	1525	Schnittstelle Portal - Querkräfteinleitung
$Y_{PS-QK\ ab}$	[mm]	1140	Schnittstelle Portal - Querkräftableitung

Tabelle 9 Schnittstellen Prüfstand Aufriss

## 7 Modularisierung

### 7.1 Allgemein – Konstruktionsprinzipien

Das Konzipieren der verschiedenen Vorrichtungsteile und Vorrichtungsmodule erfolgt weitestgehend unter Berücksichtigung von allgemein bekannten Konstruktionsprinzipien. Dieses Vorhaben lässt sich aber nicht immer entsprechend umsetzen. So kommt es zumeist infolge von „Bauraummangel“ oder infolge von einer beschränkten Anzahl an verfügbaren Aktuatoren zu aufwändigeren Vorrichtungen. Auch die gestellte Aufgabe, dass die Vorrichtungen für möglichst viele und unterschiedlichste Drehgestellrahmenprüfungen verwendbar sein sollen und dass ihre Wiederverwendbarkeit maßgeblich gesteigert werden soll beschränkt eine „ideale Formgebung“.

Trotzdem sei hier auf Klein<sup>43</sup> verwiesen, der sinngemäß folgende Empfehlungen zu konstruktiven Prinzipien gibt:

- Das beherzigen von natürlichen Prinzipien führt meist zu intelligenten Konstruktionen
- Regeln können auch aus der Bionik abgeleitet werden:

Soweit möglich sollten folgende Möglichkeiten für die Konstruktionen genutzt werden:

- möglichst direkte Krafteinleitung und Kraftableitung
- möglichst großen Flächenträgheitswiderstandsmomentes
- Belastungsgerechte Formgebung
- Vermeidung von Kippmomenten
- Hauptbelastungsrichtung versteifen

---

<sup>43</sup> Klein, 2013, S66

## 7.2 Modul Wagenkasten- Sekundärfederersatz

Überträgt die Vertikal- und die anteilige Lateralkraft des sich über die Sekundärfeder abstützenden halben beladenen Fahrzeugkastens.

Für unterschiedliche Sekundärfederungssysteme werden nachfolgend die verbreitetsten Federungen betrachtet. Da der jeweilige Federersatz variabel sein muss wird er als Submodul ausgeführt.

Submodule für:

- Luftfeder
- Schraubendruckfeder



Abbildung 59 Sekundärfederung (Luftfederung, Schraubendruckfederung)

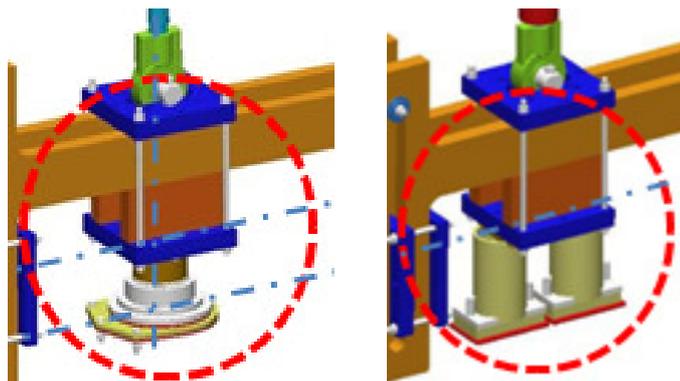


Abbildung 60 Sekundärfederersatz (Luftfederung, Schraubendruckfederung)

Der konzipierte Sekundärfederersatz besteht aus zwei etwas asymmetrischen H-förmigen Brennschnitten, welche mit Abstandshaltern zueinander positioniert werden. Die Sekundärfederquerkrafteinleitung erfolgt mit einem Aktuator.

Die eingeleitete Querkraft wird über die, den Wagenkasten nachbildende Vorrichtung auf beide Sekundärfederbasen gleichmäßig übertragen.

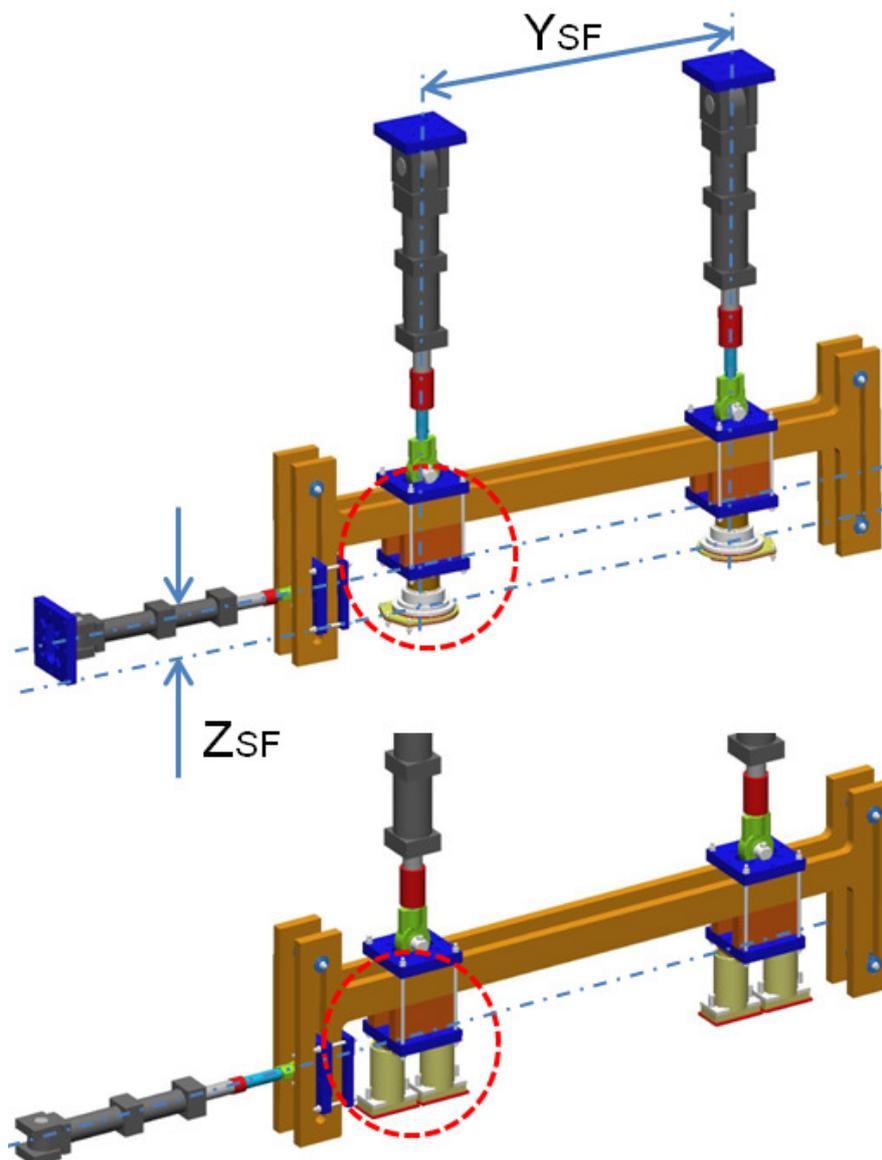


Abbildung 61 Wagenkasten- Sekundärfederersatz

Dieses Modul ermöglicht einen variablen Sekundärfederabstand in y- Richtung bis zu 2600 mm. Die Einleitungshöhe für die Sekundärfederquerkraft erfolgt auf halber Federhöhe und ist ebenfalls variabel einstellbar.

Rahmen	Straßenbahn	Lokomotive
Y SF [mm]	1110	2080
Z SF [mm]	150	400
Fz SF 1 [kN]	45	250
Fz SF 2 [kN]	45	250
Fy SF [kN]	14	75

Tabelle 10 Abmessungen, Kräfte, Sekundärfederersatz

### 7.3 Modul Radsatzersatz

Dieses Modul ersetzt die Hauptbaugruppe Radsatz, Primärfederung und Radsatzanlenkung /-führung. Das Submodul Vertikalkraftableitung leitet die Sekundärseitig eingeleiteten Vertikalkräfte ab. Die Querkraftableitung erfolgt über den Radsatzersatz. Das Submodul Verwindung leitet weggeregelt die Verwindung entweder kombiniert oder entkoppelt am DGR ein.

Die Längskrafteinleitung erfolgt je nach Bedarf an einer Krafteinleitungsstelle mittig am Radsatzersatz oder mit zwei Krafteinleitungsstellen über die Koppelstellen Radsatzanlenkung. Diese Variante ist vor allem vorteilhaft wenn statisch Lozenging simuliert werden soll. Weiters wird am Radsatzersatz keine Biegebeanspruchung verursacht.

Das Hauptmodul besteht aus jeweils zwei miteinander verschraubten quadratischen Profilen. An einer Stirnseite ist eine Lochplatte montiert, über die die zentral eingeleitete Querkraft abgeleitet wird.

Die Abstände zwischen den Profilen sind durch die Verschraubung variabel gestaltbar, wodurch sie auch für Rahmen mit weniger verfügbarem Bauraum im Bereich Radsatzlagerung, Primärfederung und Radsatzanlenkung verwendbar werden.

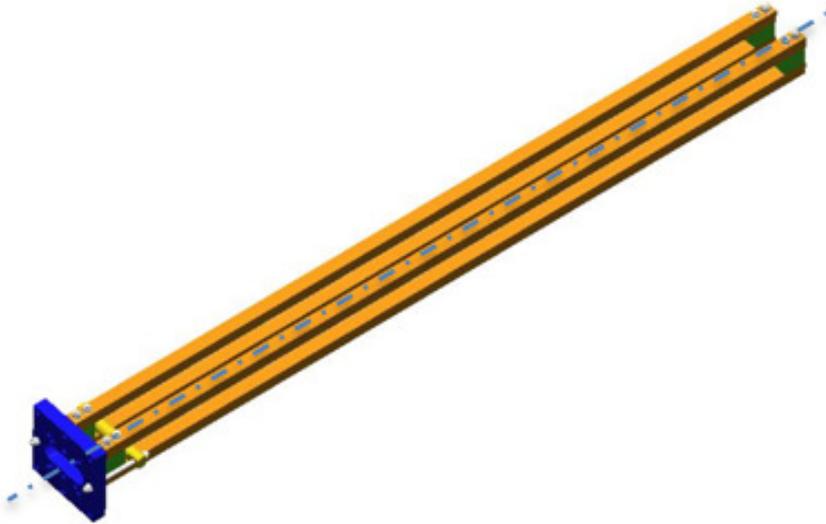


Abbildung 62 Radsatzersatz Hauptmodul

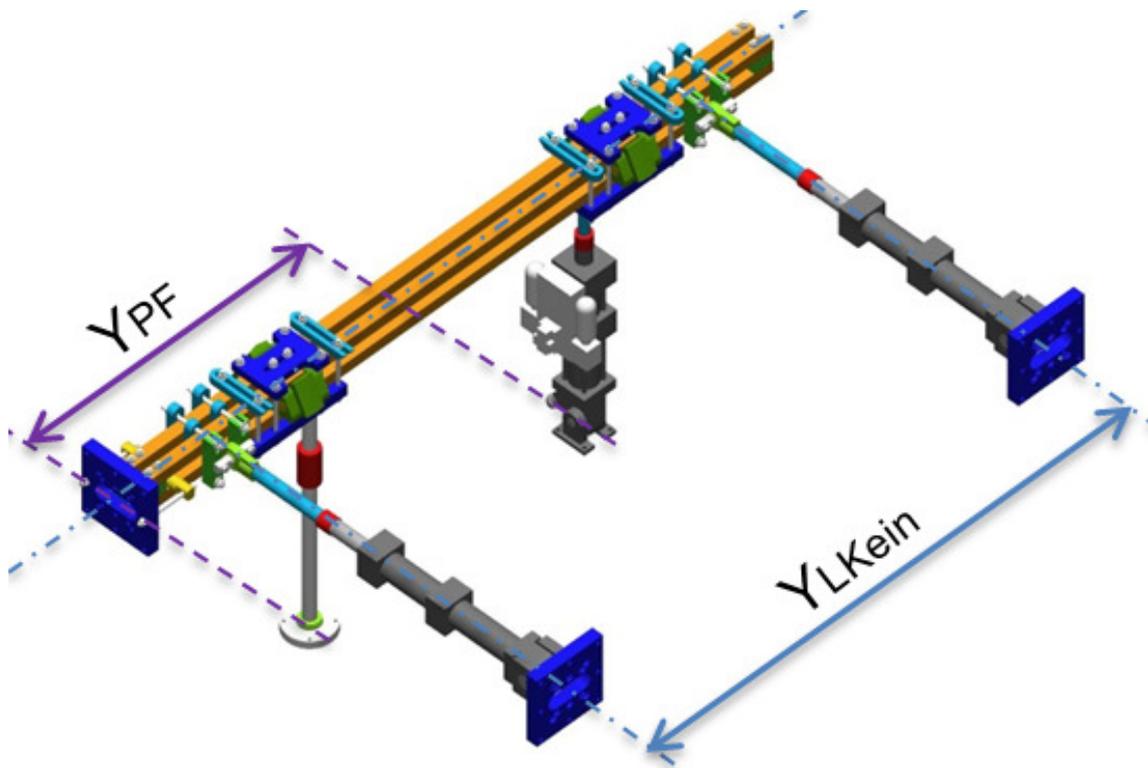


Abbildung 63 Radsatzersatz – TDGR Straßenbahn 2

Durch die Länge des Hauptmoduls sind unterschiedliche Primärfederabstände und auch unterschiedliche Längskrafteinleitungsabstände in y- Richtung realisierbar.

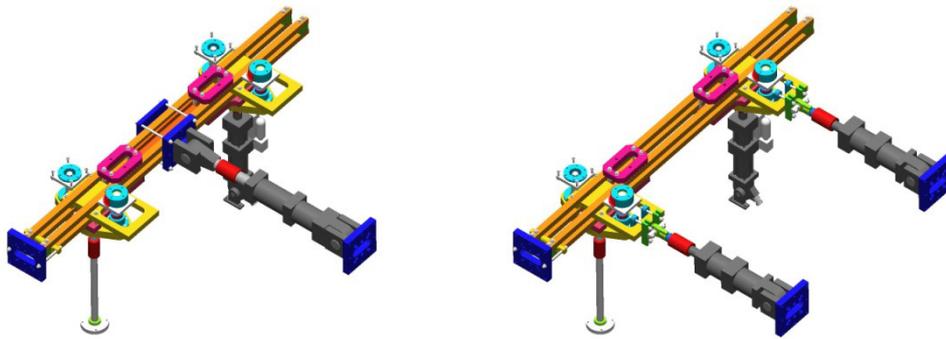


Abbildung 64 Radsatzersatz – Möglichkeiten der Längskrafteinleitung

Es besteht für die Radsatzersatzvorrichtung die Möglichkeit mit einem Aktuator die Längskraft einzuleiten. Mit einem Distanzstück zwischen den Profilen und durch Verschraubung mit Hilfe einer Spanneinheit wird der Ersatz versteift. Idealerweise erfolgt aber die Längskrafteinleitung direkt im Bereich der Radsatzanlenkung mit zwei Aktuatoren je Radsatzersatz. Bei Bedarf können die Längskräfte wie in Abbildung 63 ersichtlich auch direkt am Hauptmodul montiert werden. Mit zwei Aktuatoren können die Versuchsprogramme variabler realisiert werden und es ist kein Umbau zwischen statischen und dynamischen Versuchen notwendig.

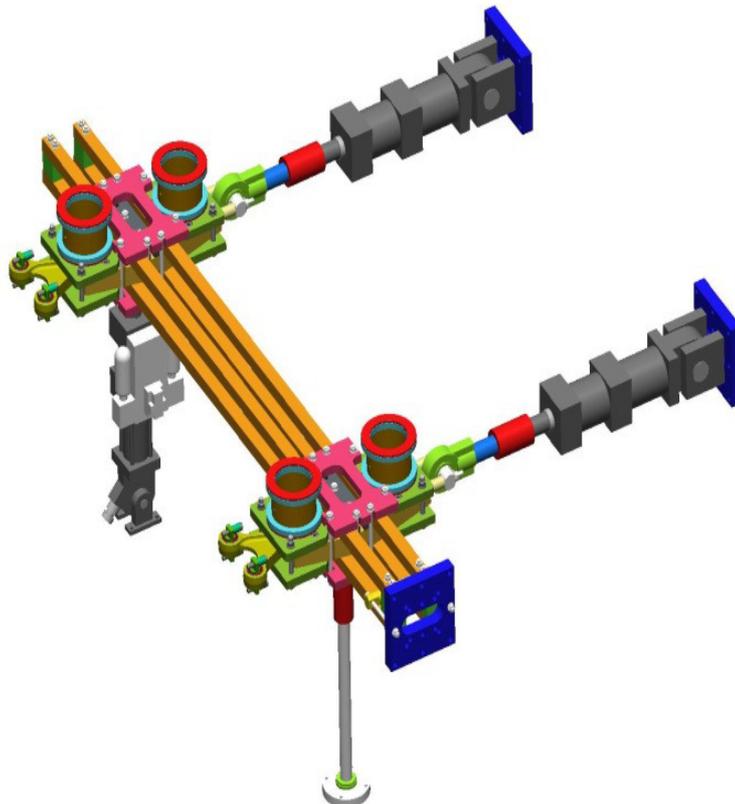


Abbildung 65 Radsatzersatz – DGR Lokomotive

### 7.3.1 Submodul Vertikalkraftableitung und Verwindung

Die sekundärseitig eingeleiteten Vertikalkräfte werden primärseitig abgeleitet. Dies erfolgt mit einer Abstützstange welche spannfeldseitig wie auch vorrichtungseitig gelenkig gelagert sein muss. In Abhängigkeit von der Ausführung der Radsatzanlenkung und der Primärfederung kann die jeweilige Subvorrichtung für die Vertikalkraft und die Verwindung mit dem Radsatz bzw. mit dem Radsatzlagerersatz gekoppelt oder entkoppelt sein.

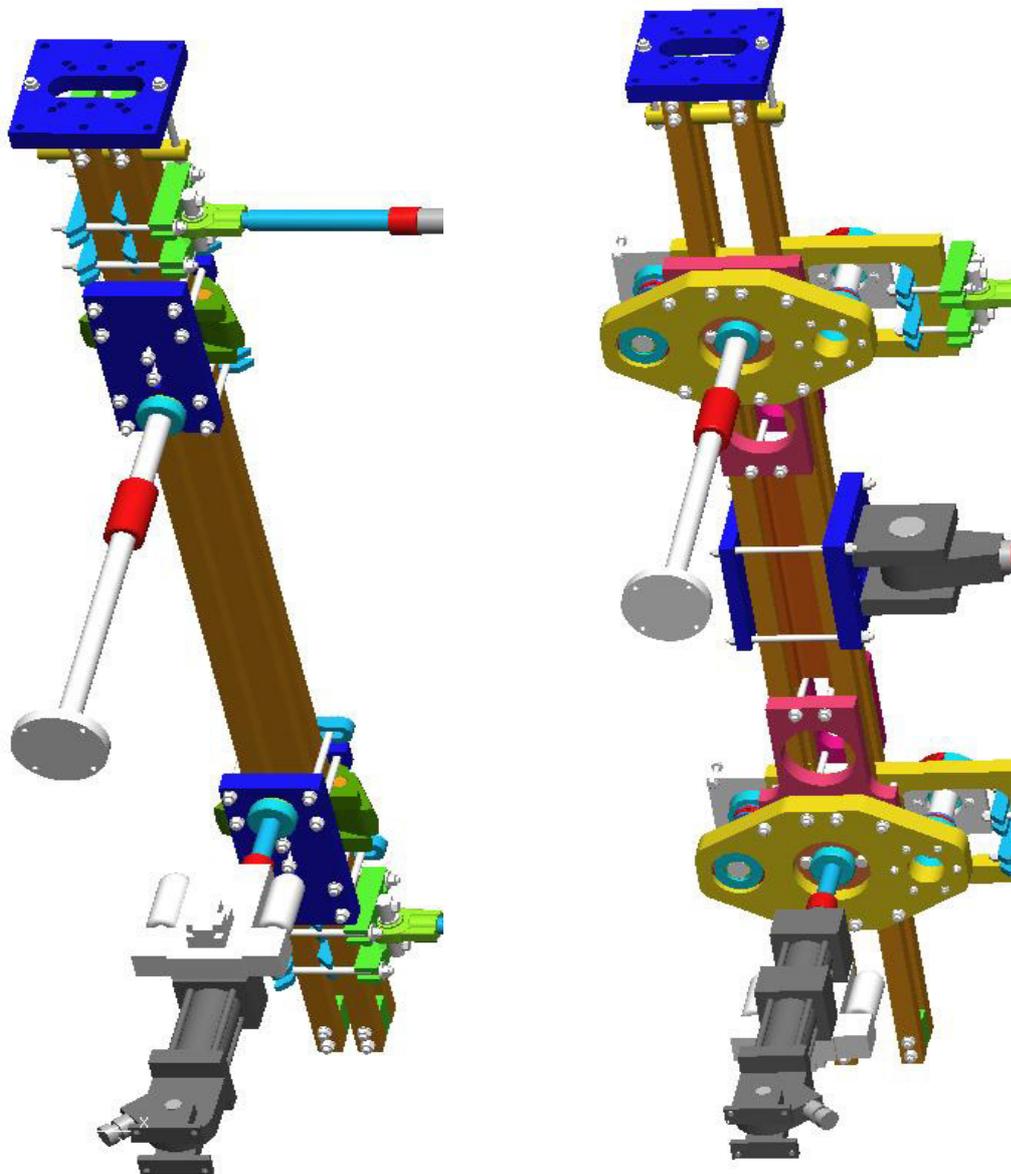


Abbildung 66a, b Radsatzersatz – Untersicht DGR Straßenbahn 2 und DGR Metro 1

Beispiele für eine Kopplung finden sich in den Abbildungen Abbildung 66 a und b, sowie in der Abbildung 67 a.

Abbildung 67 b zeigt eine Entkopplung von der Vertikalabstützung bzw. vom Verwindungsaktuator und dem Radsatzersatzmodul.

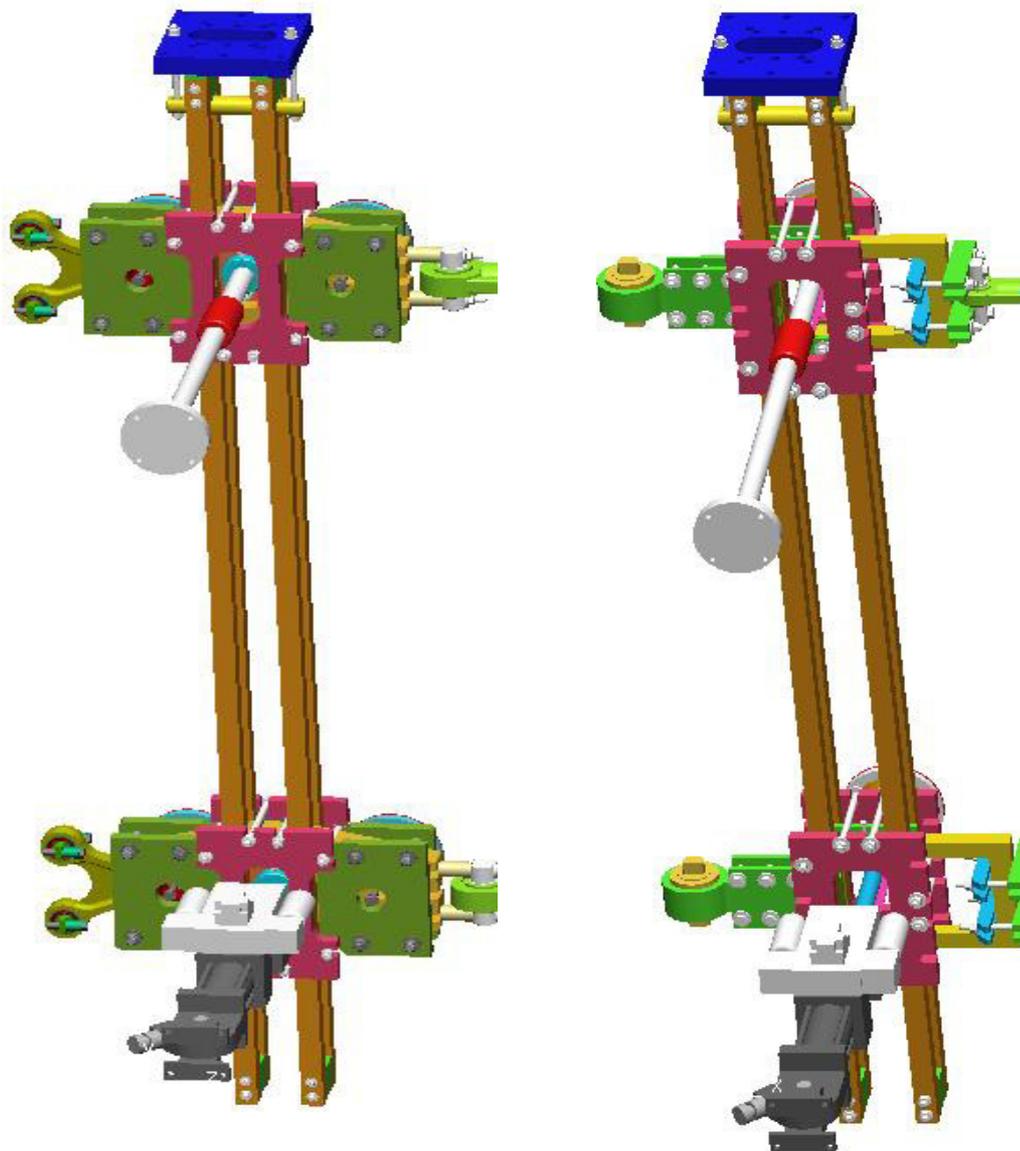


Abbildung 67a,b Radsatzersatz – Untersicht DGR Lokomotive und DGR Hochgeschwindigkeitszug 1

### 7.3.2 Submodul Primärfederersatz und Radsatzanlenkung

Diese Submodule sind für die Übertragung von Vertikal-, Quer- und Längskräften verantwortlich. Es gibt wie im Kapitel 3.4 auf Seite 48 ausgeführt zahlreiche Konstruktionsprinzipien für die Radsatzanlenkung wie auch für die Primärfederung. Stellvertretend werden für folgende Arten Submodule konzipiert.

- Primärfederersatz
  1. Schub- Druck Gummifeder
  2. Zapfenführung (FlexCoil)
  3. Schraubendruckfeder
  
- Radsatzanlenkungsersatz
  1. Dreieckslenker
  2. Zapfenführung (FlexCoil)
  3. Schwingenführung

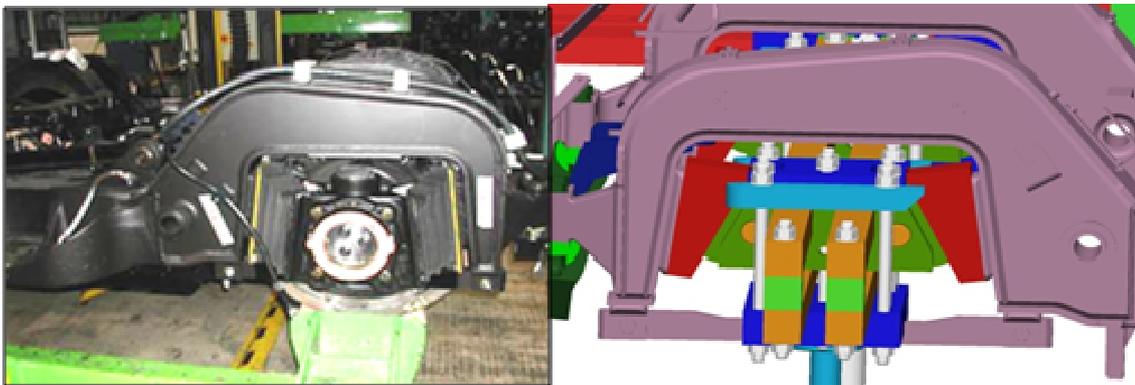


Abbildung 68 Radsatzersatzsubmodul – Chevronfederung und Ersatzvorrichtung

Chevronfedern übertragen Vertikal-, Lateral- und auch Längskräfte. Daher muss das Ersatzsystem entsprechend ausgebildet sein. Der Achsschlüssel ist bei der Prüfung jedenfalls einzusetzen, da er die Aufspreizung des Langträgers im Primärfederbereich verhindert. Bei Bedarf ist für den Ersatz auch ein Vertikalanschlag vorzusehen. Dieser kann als Anschlag oder mit einem Aktuator ausgeführt sein. Mit dem Aktuator kann eine Überlastung vermieden werden.

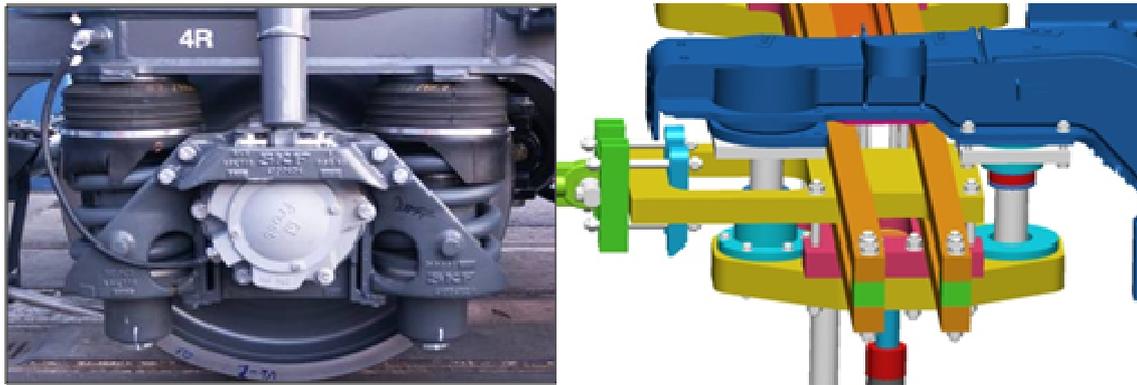


Abbildung 69 Radsatzersatzsubmodul – Zapfenführung und Ersatzvorrichtung

Die Ausführung als Zapfenführung überträgt die auftretenden Vertikal-, Lateral- und Längskräfte. Die Verschiebbarkeit in Längs und Querrichtung wird durch gelenkig gelagerte Ersatzsysteme nachgebildet. Verwendet werden Gleitlager. Längskräfte werden über die Zapfenführung bzw. über das Ersatzsystem übertragen. Die Einleitung erfolgt in Radsatzmitte im Bereich der Primärfederersatzte.

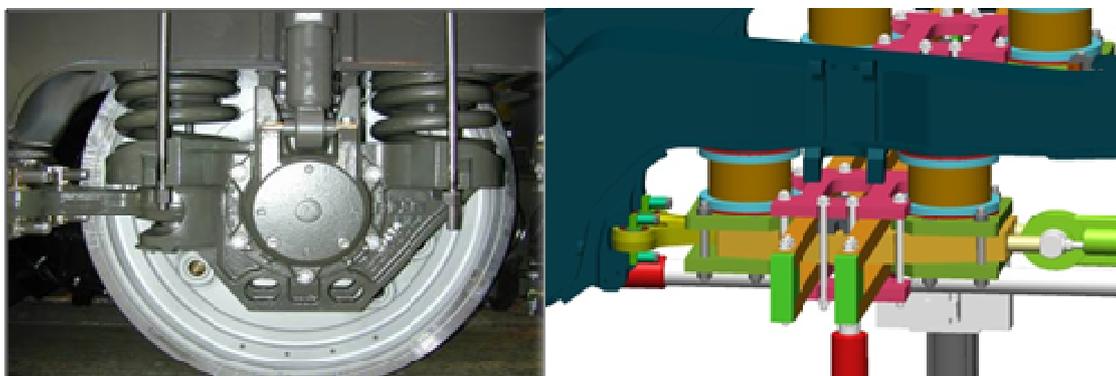


Abbildung 70 Radsatzersatzsubmodul – Dreieckslenker / Schraubendruckfederung und Ersatzvorrichtung

Diese vor allem bei Lokomotiven verwirklichte Konstruktion wird nachgebildet indem der originale Dreieckslenker auch für die Vorrichtung verwendet wird. Dadurch spiegelt die Radsatzanlenkung die Realität wieder. Die Primärfedern (Stahldruckfedern) werden durch Rohre ersetzt. Die Auflageringflächen der Federn werden nachgebildet, die gleichmäßige Verteilung der Kräfte wird mit dünnen Gummiringen oder -scheiben sichergestellt. Die Längskraft wird in Radsatzlenkerkonsolenmitte eingeleitet.

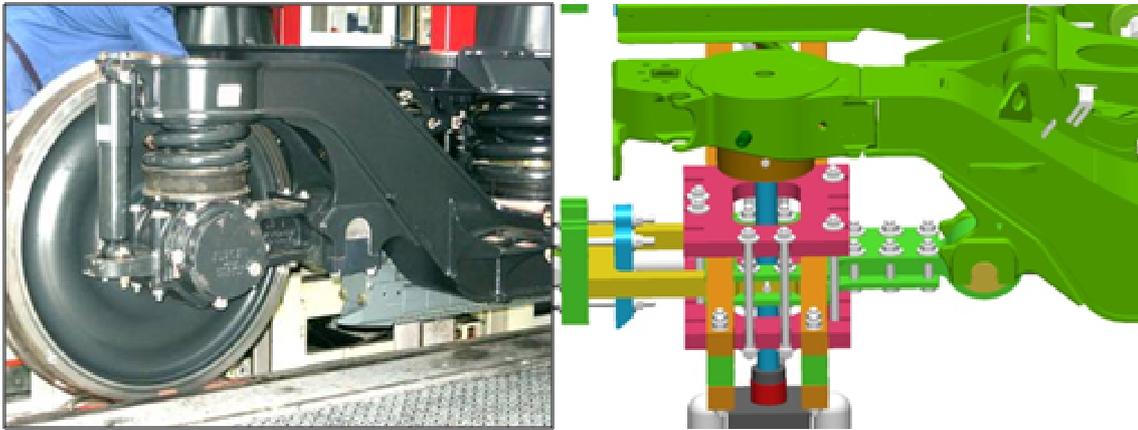


Abbildung 71 Radsatzersatzsubmodul – Schwingenführung und Ersatzvorrichtung

Beim Submodul Schwingenführung ist der Radsatzersatz mit der Ersatzschwinge für die Radsatzanlenkung vollständig vom Submodul Vertikalkraftabstützung bzw. vom Submodul Verwindung entkoppelt. Siehe auch Abbildung 67 b.

Die Vertikalabstützung erfolgt über die Federbasis am Rahmen und einem Federersatz. Rahmenseitig stellt ein Gummiring mit der Ringfläche der Stahldruckfeder die gleichmäßige Kraftaufteilung sicher.

Die Abstützung, welche mit einer Kraftmesseinheit versehen ist, wird entkoppelt vom Radsatz, zwischen den Radsatzersatzprofilen zum Federersatz geführt und ist dort gelenkig gelagert. Gleiches gilt für den zur Verwind eingesetzten Aktuator. Die Längskraft wird in Radsatzschwingenkonsolenmitte eingeleitet.

## 7.4 Modul Querkrafteinleitung

Das Hauptmodul besteht aus einem L- förmigen Brennschnitt. Das Submodul kann unterschiedlich ausgeführt sein, kann aber auch L- ähnlich ausgeführt sein. Es ist am Hauptmodul variabel positionierbar und wird mit diesem verschraubt. Die Querkrafteinleitung erfolgt mit diesem Modul an den Querpufferersatz im Querpufferzentrum. Hier ist bei Montage des Submoduls Querpuffermitnahme zu beachten, dass keine Verspannung eingebracht wird. Die Spielfreiheit ist ebenfalls zu vermeiden.

Die Querpuffermitnahme ist im Kontaktbereich ballig auszuführen, sodass es durch Quer- und Höhenbewegungen bzw. bei leichten Verdrehungen um die Hochachse zu keinen Verkantungen und damit zu ungewollten Kraftschlüssen kommen kann. Dieses Modul ist vollständig von Modul Wagenkasten-Sekundärfederersatz entkoppelt.

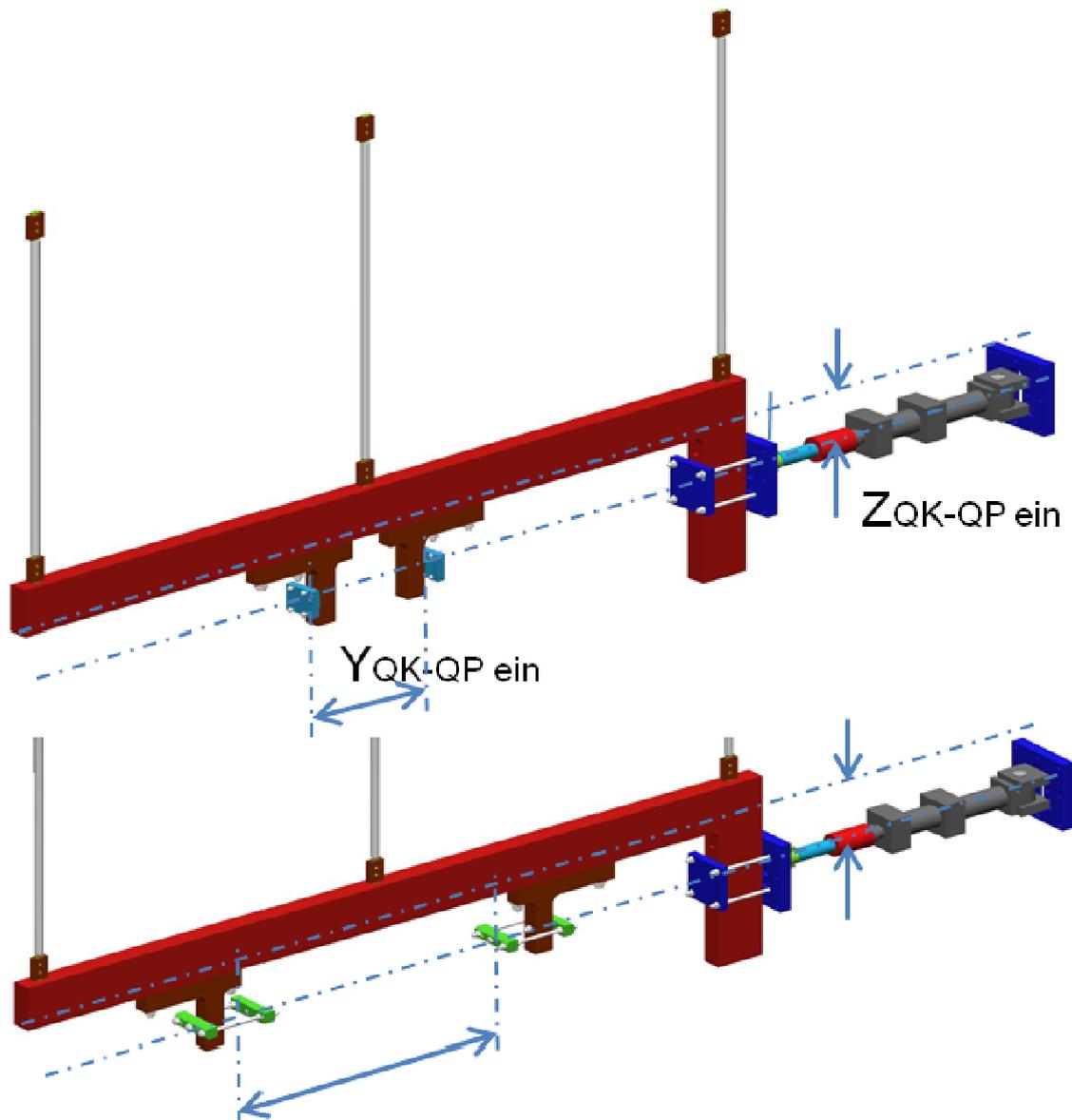


Abbildung 72 Querkrafteinleitung

Der maximal stellbare Querpufferabstand in y- Richtung beträgt 2000 mm. Die stellbare Höhe beträgt 600 mm. Die Kräfteinleitung mittels Aktuator ist variabel gestaltet und immer auf Höhe der Wirklinie des Querpufferzentrums zu stellen.

Rahmen	min	max
Y QK-QP ein [mm]	300	1600
Z QK-QP ein [mm]	150	600
Fy QK ein [kN]	30	150

Tabelle 11 Abmessungen, Kräfte, Querkrafteinleitung

## 7.5 Modul Querkraftableitung

Dieses Modul ist ortsfest positioniert und ermöglicht eine variable Kraftableitung in Radsatzersatzachsmittle des Moduls Radsatzersatz. Die ableitenden mit Kraftmesseinheiten ausgestatteten und beidseitig gelenkig gelagerten Stangen weisen zwischen den Gelenkkopfbolzen eine Länge von Y QK ab = 1460mm auf und sind feststehend. Die Radsatzabstände sind im Bereich von 1700 bis 3000 mm variabel stellbar, sodass Straßenbahnrahmen wie auch Lokomotivrahmen im Prüfstandsversuch getestet werden können. Die Höhe läßt sich um 800 mm variabel einstellen. Das ist notwendig da die unterschiedlichen Bauformen der Rahmen bzw. der Drehgestelle wesentliche Unterschiede bei Primärfederung und Radsatzanlenkung aufweisen können.

Radsatzabstand	min	max
X RS [mm]	1700	3000
Z QKab [mm]	500	1600
Fy QKab [kN]	30	150

Tabelle 12 Abmessungen, Kräfte, Querkraftableitung

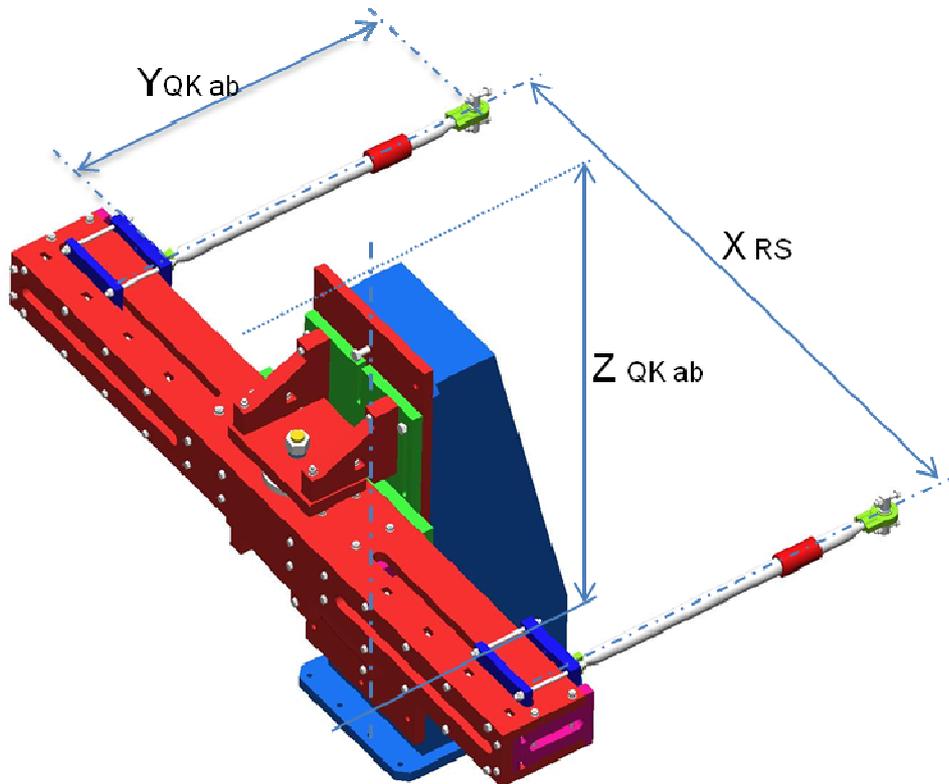


Abbildung 73 Querkraftableitung

## 7.6 Modul Längskraftableitung

Die Vielfalt der Längsmitnahmen bei Drehgestellen ist sehr groß. Für die Drehgestellrahmenversuche erfolgt die Ableitung der am Radsatzersatz eingeleiteten Längskräfte über die Längsmitnahme am Rahmen. Das heißt die Längsmitnahme ist als Längskraftableitung ausgebildet.

Nachfolgend sind vier verbreitete Varianten der Längsmitnahme als Module zur Längskraftableitung konzipiert:

- Lemniskatenführung
- Tauchzapfen
- Binärenlenker 1#
- Binärenlenker 2#

### 7.6.1 Lemniskatenführung

Lemniskaten- oder Drehzapfenführungen werden vor allem bei Drehgestellen für Reisezugwagen und bei Hochgeschwindigkeitszügen eingesetzt.

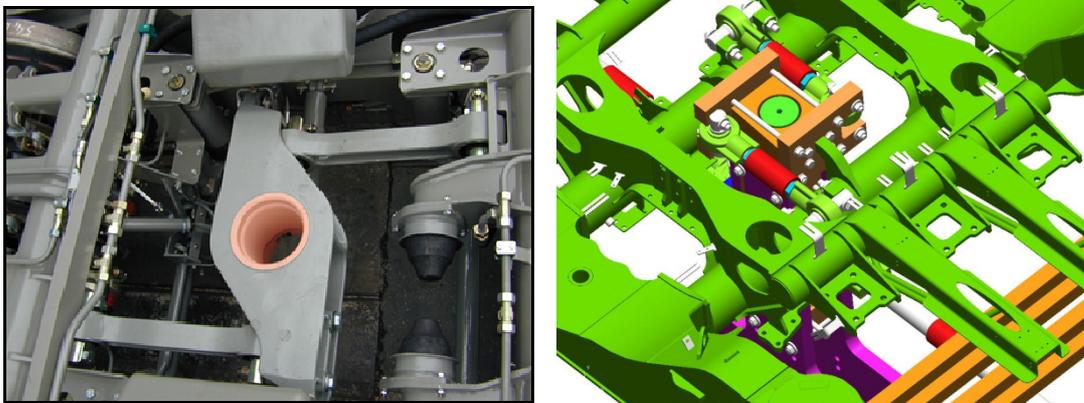


Abbildung 74a, b Lemniskate, Lemniskatenersatz

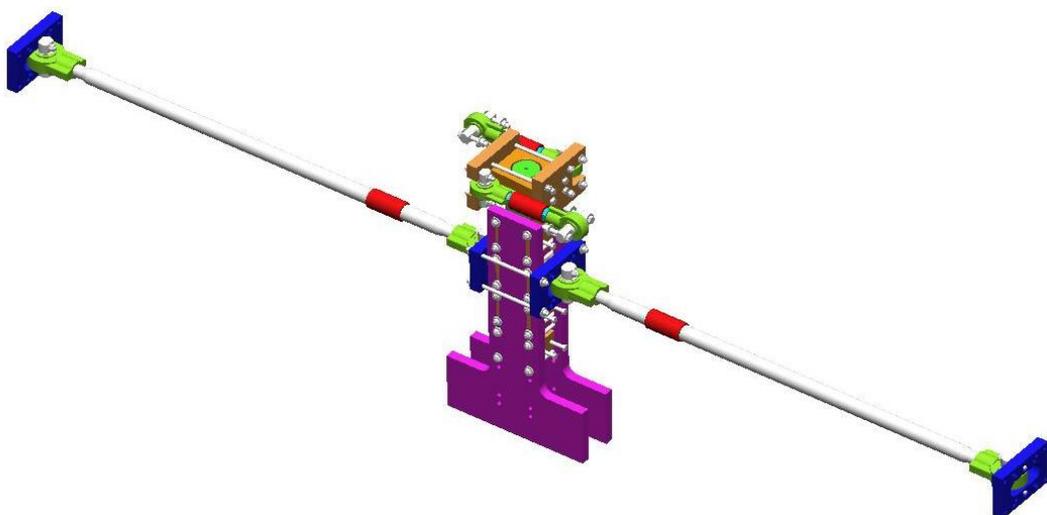


Abbildung 75 Lemniskatenersatz zur Längskraftableitung uneingebaut

Die Abstützung besteht aus zwei Brennschnitten und einem massiven Quader der rahmenseitig abgedreht ist und einen verschraubbaren Lemniskatenersatz aufnehmen kann. Die Ersatzlenker sind jeweils mit einer Kraftmesseinheit versehen. Zur Ableitung der im Versuch aufgebrauchten Längskräfte wird die Abstützung beidseitig mit gelenkig gelagerten und mit einer Kraftmesseinheit versehenen Abstützstange gesichert. Dadurch wird auch die spannfeldseitige Niederspannung entlastet.

Durch die Verschraubung der Brennschnitte mit der Lemniskatenführung ist eine Höhenstellbarkeit für andere Rahmenkategorien möglich. Auch die Ausführung des Lemniskatenersatzes ermöglicht den Einsatz von modifizierten Teilen.

### 7.6.2 Tauchzapfen



Abbildung 76 Längsanschlag

Tauchzapfen übertragen je nach Ausführung die Antriebs- bzw. die Bremskräfte zwischen Drehgestell und Wagenkasten und die Querkräfte. Es gibt auch Tauchzapfen die nur Längskräfte übertragen, die Querkräfte werden dann über Querpuffer geführt. Abhängig von diesen Varianten kann die Ersatzvorrichtung ausgeführt sein.

Da nach den definierten Konzepten für die Standardisierung und die Modularisierung die Längskraftableitung über die Längsmitnahme und die Querkrafteinleitung über die Querpuffer / Queranschlänge erfolgt, ist die Vorrichtung zu Längsabstützung vom Modul Querkrafteinleitung entkoppelt.

Die Ableitung erfolgt über einen Brennschnitt, der die Kräfte überträgt und über zwei Längsabstützungstangen, welche beidseitig gelenkig gelagert und mit einer Kraftmesseinheit versehen sind, ableitet.

Die Anschlüsse sind ballig ausgeführt, sodass durch Höhen und Querbewegungen keine oder möglichst geringe parasitäre Kräfte auftreten.

Spielfreiheit und Verspannungsfreiheit sind zu realisieren.

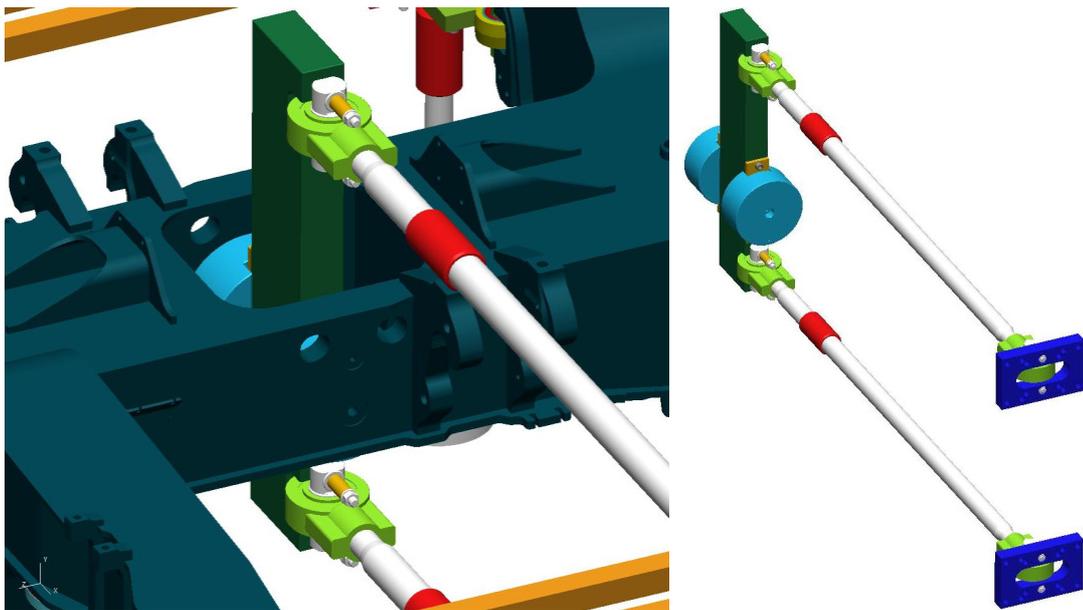


Abbildung 77a, b Tauchzapfenersatz - Längskraftableitung eingebaut / uneingebaut

### 7.6.3 Binärtenker 1#

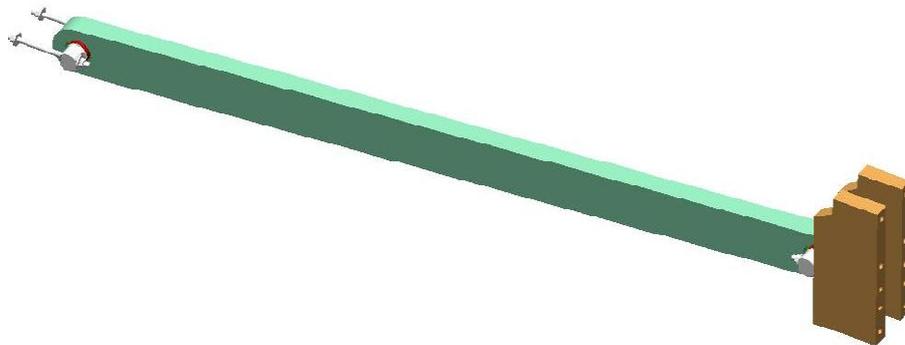


Abbildung 78 Längskraftableitung mit einem Binärtenker

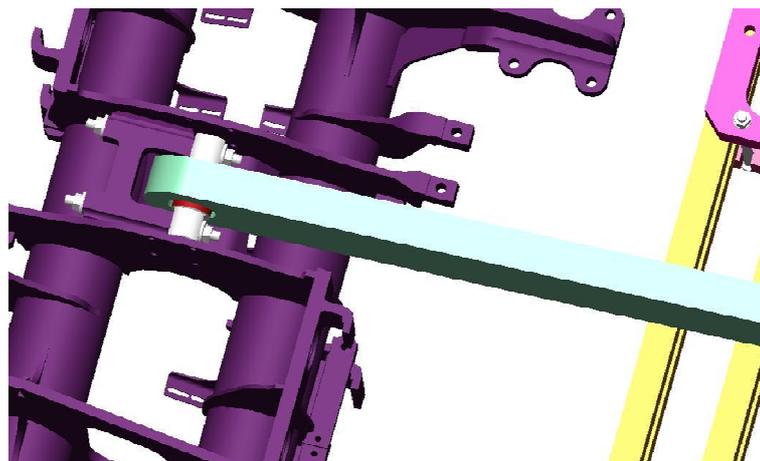


Abbildung 79 Längskraftableitung mit einem Binärtenker

Die auftretenden Längskräfte zwischen Drehgestell und Wagenkasten werden bei dieser Variante über einen Lenker übertragen.

Die Ersatzvorrichtung über die im Falle der Rahmenprüfung die Kräfte abgeleitet werden ist entsprechend auszuführen. Auf eine große Länge der Abstützung ist zu achten. Auch ist eine Kraftmesseinheit vorzusehen. Diese kann als Kraftmessbolzen ausgeführt sein oder sie ist in der Längsabstützung zu integrieren.

#### 7.6.4 Binärlinker 2#

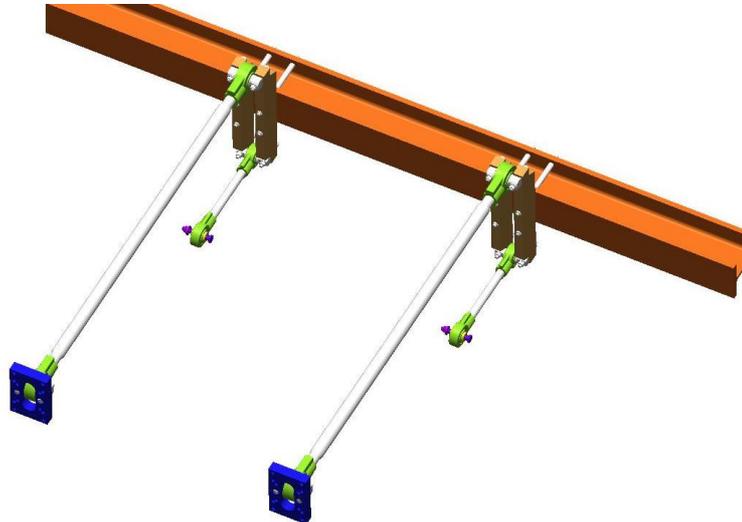


Abbildung 80 Längskraftableitung mit zwei Binärlinkern

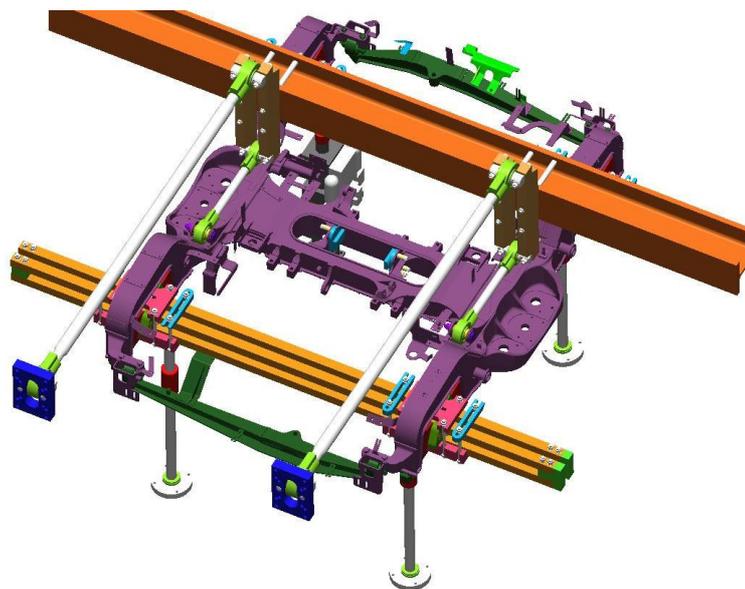


Abbildung 81 Längskraftableitung mit zwei Binärlinkern im eingebauten Zustand

Mit zwei Linkern werden die Längskräfte zwischen Wagenkasten und Drehgestell übertragen. Die Vorrichtung zur Ableitung der Längskräfte ist mit den originalen oder auch mit Ersatzlinkern umzusetzen. Die Wagenkastenkonsolen werden hier über Ersatzkonsolen, welche an einem I Träger montiert sind nachgestellt. Das eingeleitete Moment wird über zwei an den Wagenkastenersatzkonsolen gelenkig montierten Abstützstangen mit Kraftmesseinheit abgestützt.

## 8 Beispiele von Prüfaufbauten

Zur Veranschaulichung, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept der Standardisierung und Modularisierung für verschiedene Drehgestellrahmenkategorien funktioniert, wird in diesem Kapitel beginnend mit Abbildung 82 bis Abbildung 124 der Prüfaufbau von neun Drehgestellrahmen unterschiedlicher Kategorien präsentiert. Ergänzt wird der jeweilige Prüfaufbau mit einer Abbildung des gesamten Prüfstands, wodurch auch für die standardisierten Prüfstandsschnittstellen ihre Funktionalität für unterschiedliche Rahmenprüfungen nachweisen.

### 8.1 Straßenbahn 1 - innengelagert

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	80
Drehgestell Gewicht	m DG	t	4,9
Radsatzlast maximal	m RS	t	10,5
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	0,8
Länge	L DGR	mm	2600
Breite	B DGR	mm	1610
Höhe	H DGR	mm	535
Radsatzabstand	X RS	mm	1800
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1110
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1110
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	1110

Tabelle 13 Hauptabmessungen Straßenbahn 1

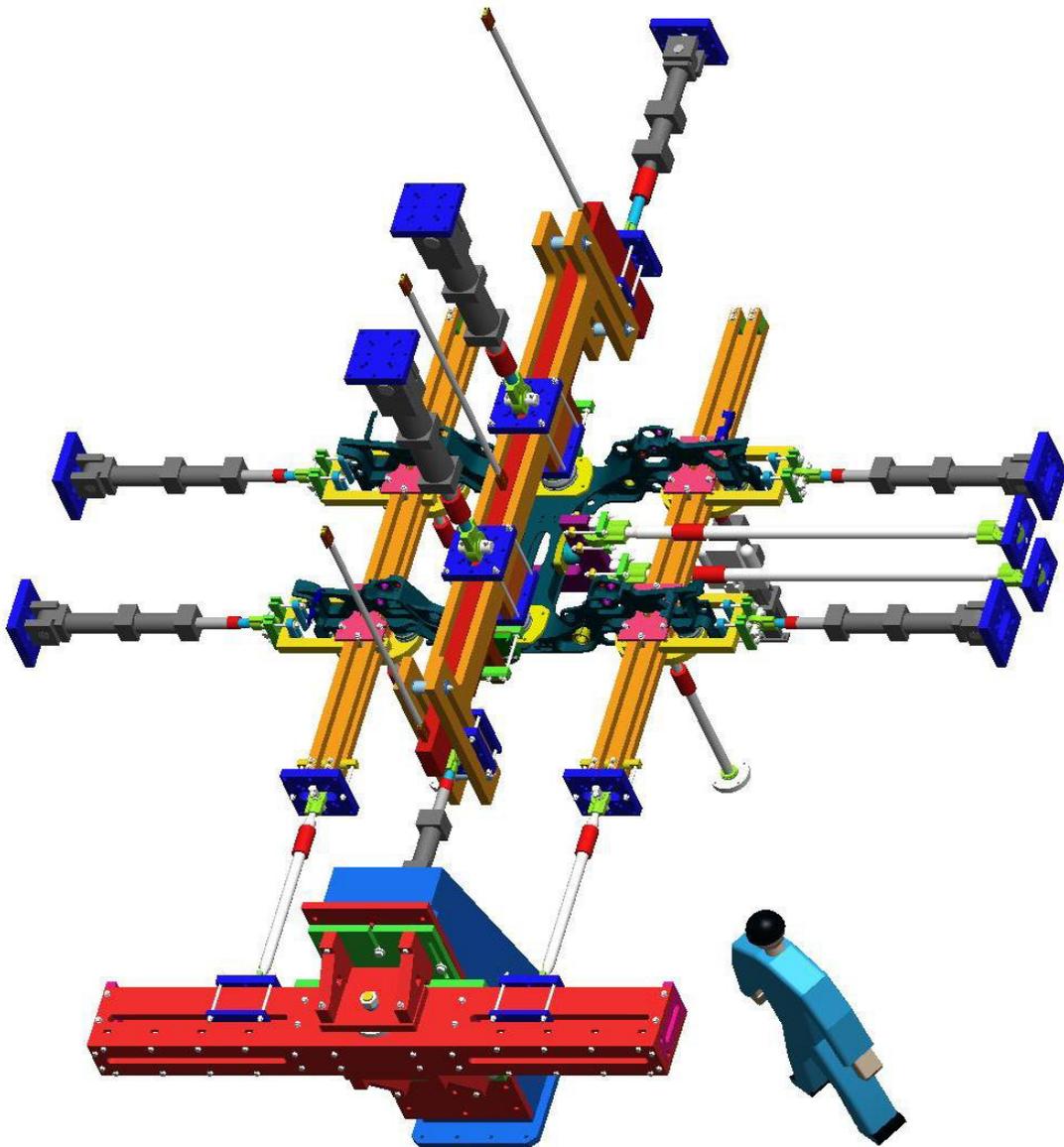


Abbildung 82 Prüfaufbau – TDGR Straßenbahn 1 (innengelagert)

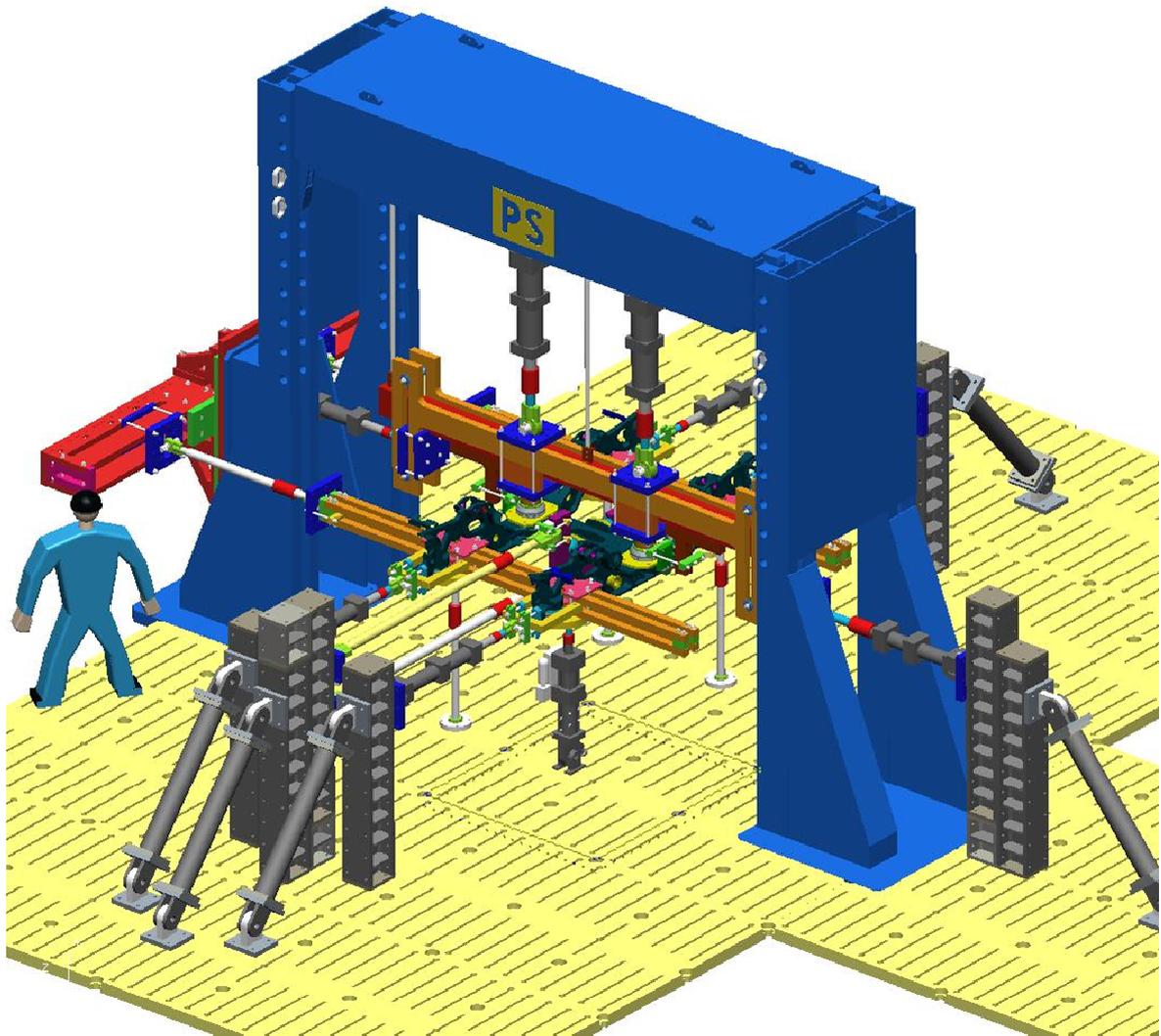


Abbildung 83 Prüfstand – TDGR Straßenbahn 1

## 8.2 Straßenbahn 2 - außengelagert

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
	Geschwindigkeit maximal	v	km/h
Drehgestell Gewicht	m DG	t	5,7
Radsatzlast maximal	m RS	t	2x10,5
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,5
Länge	L DGR	mm	3060
Breite	B DGR	mm	-
Höhe	H DGR	mm	-
Radsatzabstand	X RS	mm	1900
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1866
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2070
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	1866

Tabelle 14 Hauptabmessungen Straßenbahn 2

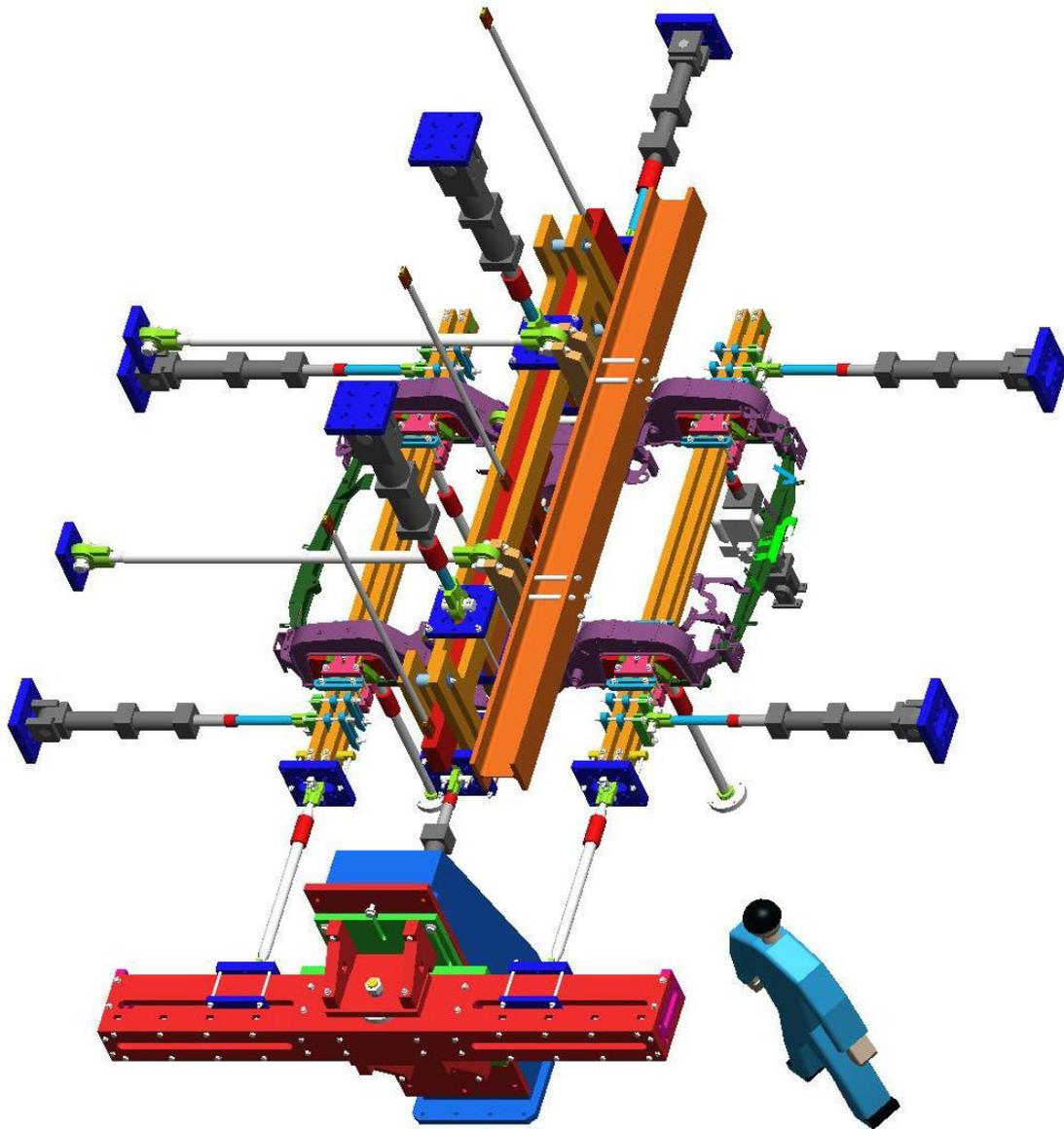


Abbildung 84 Prüfaufbau – TDGR Straßenbahn 2

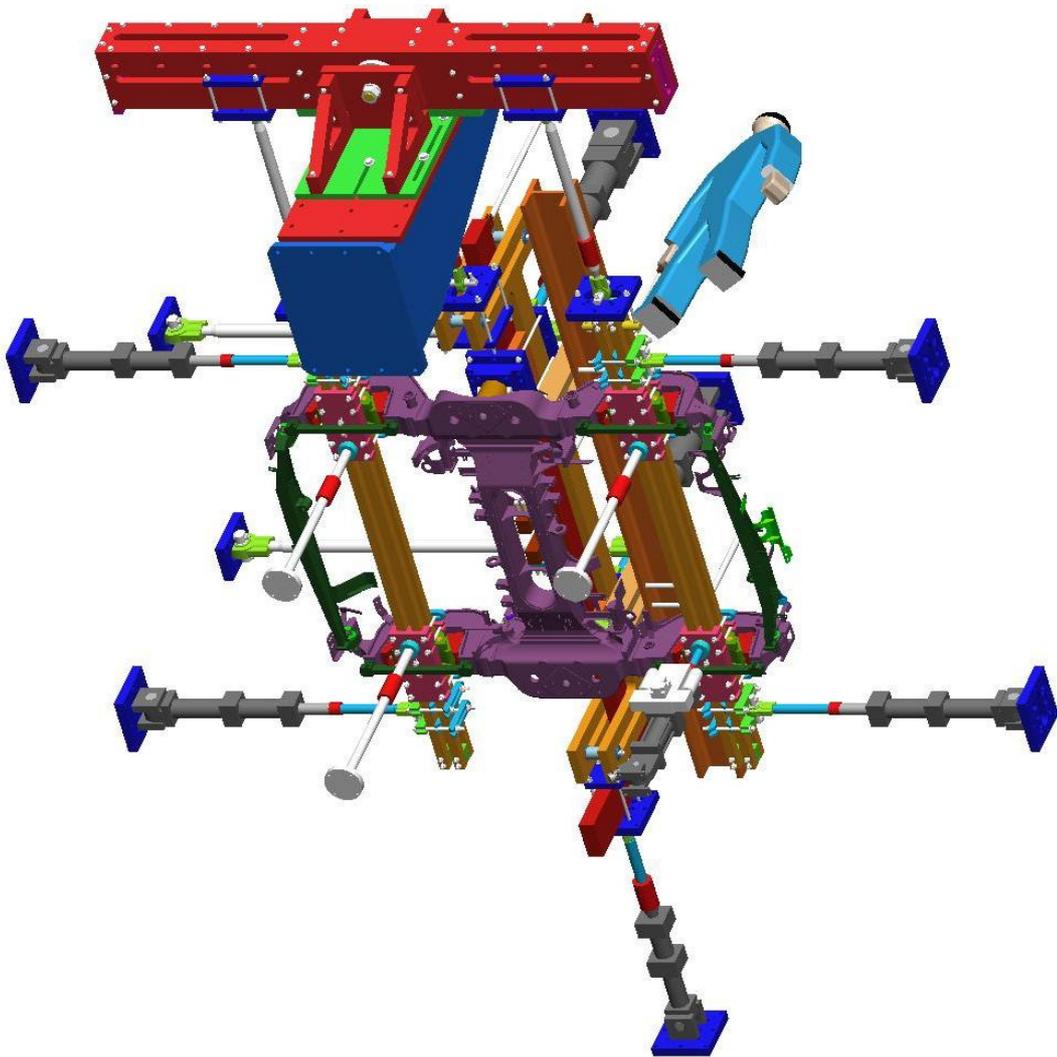


Abbildung 85 Prüfaufbau Untersicht – TDGR Straßenbahn 2

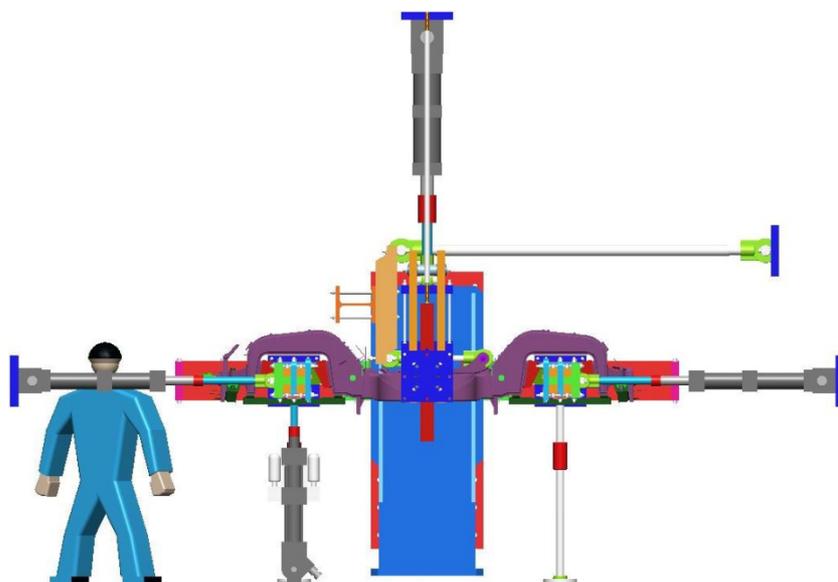


Abbildung 86 Prüfaufbau Aufriss seitlich – TDGR Straßenbahn 2

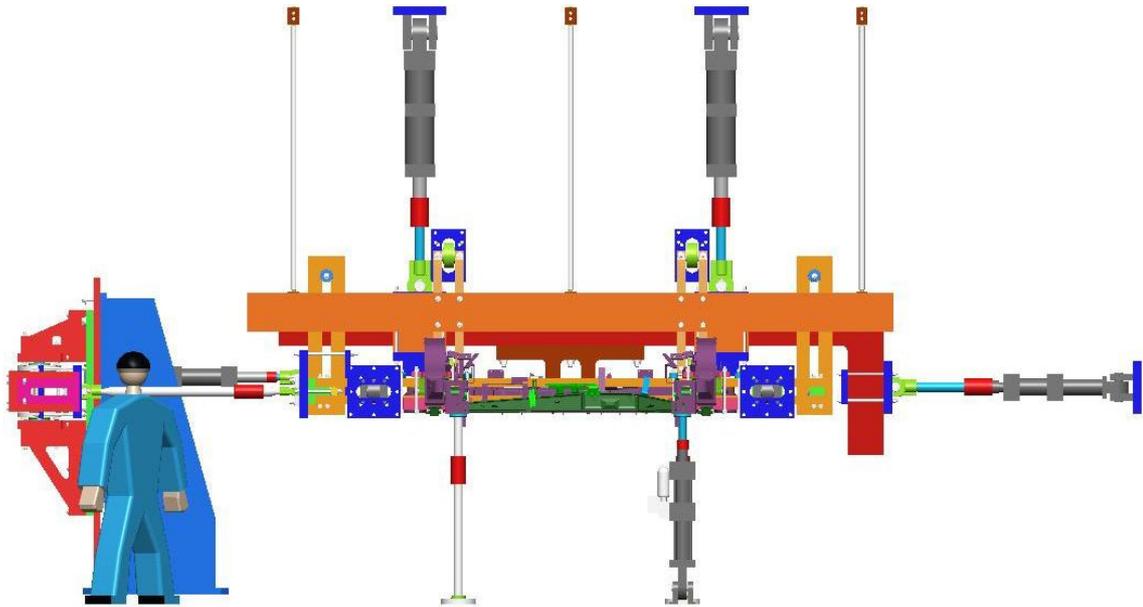


Abbildung 87 Prüfaufbau Aufriss vorn – TDGR Straßenbahn 2

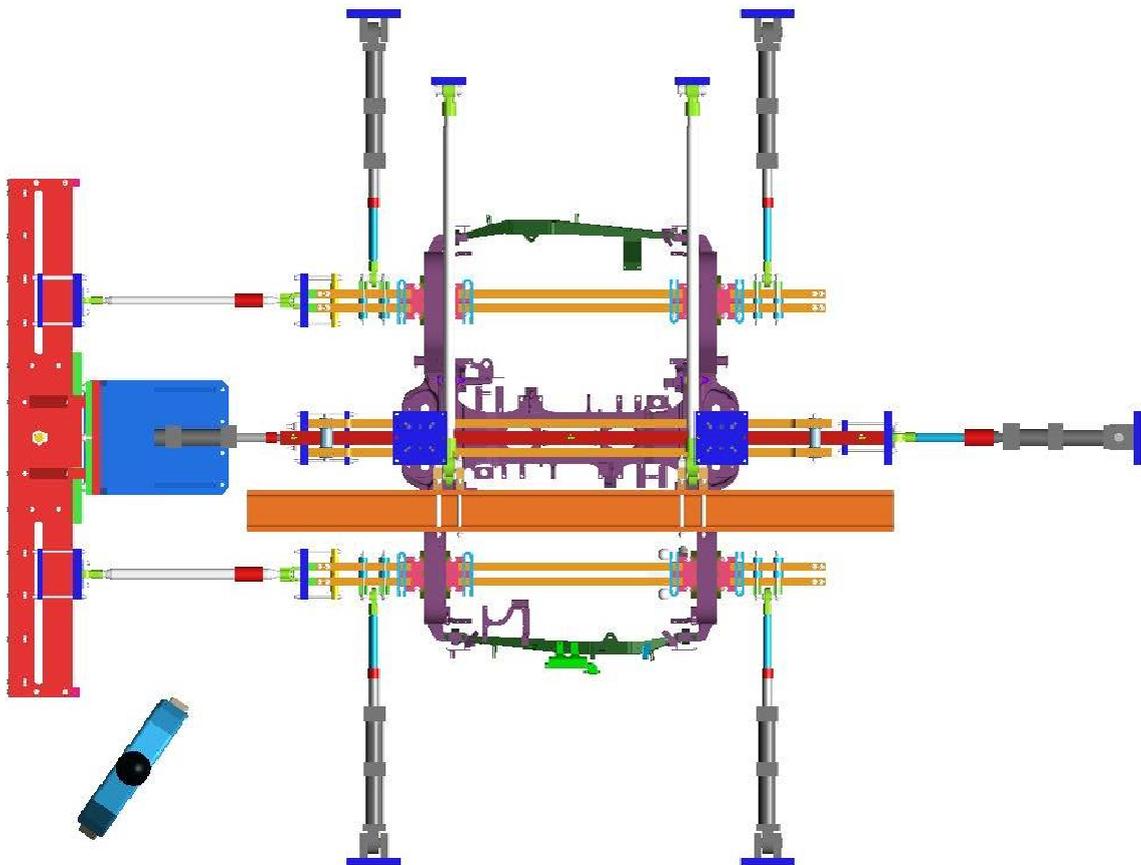


Abbildung 88 Prüfaufbau Grundriss – TDGR Straßenbahn 2

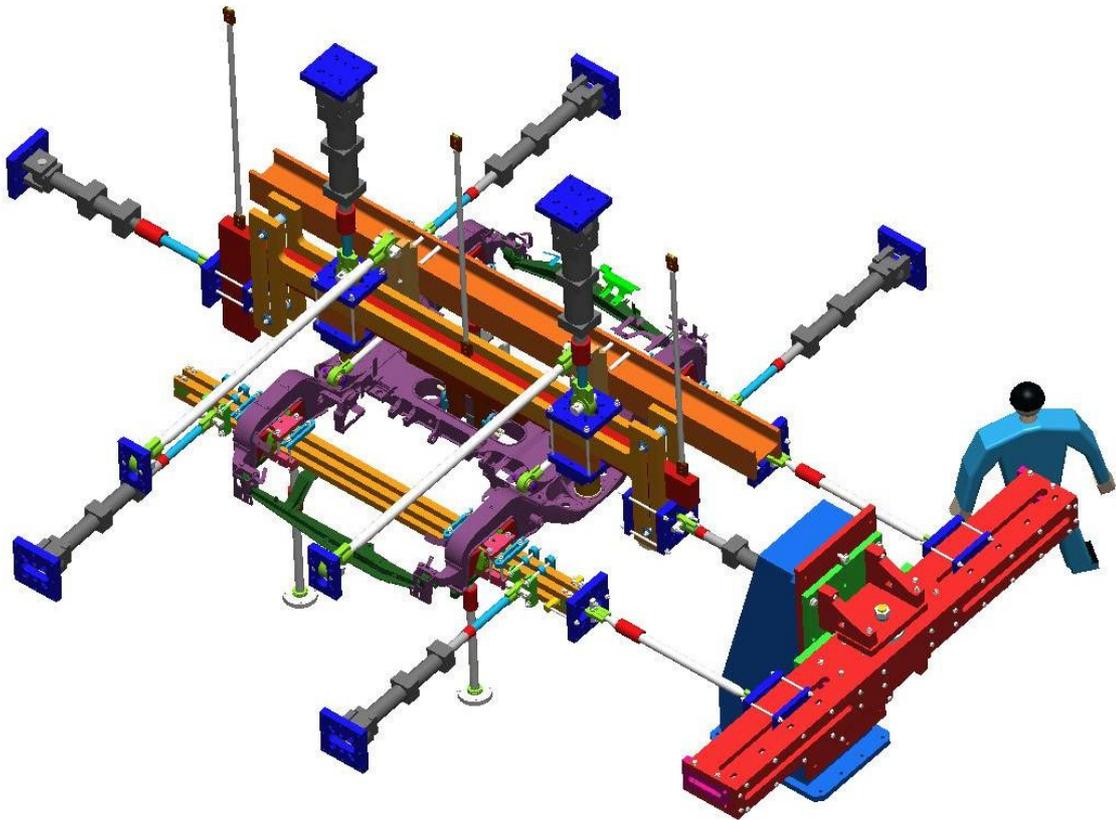


Abbildung 89 Prüfaufbau Schrägriss 1 – TDGR Straßenbahn 2

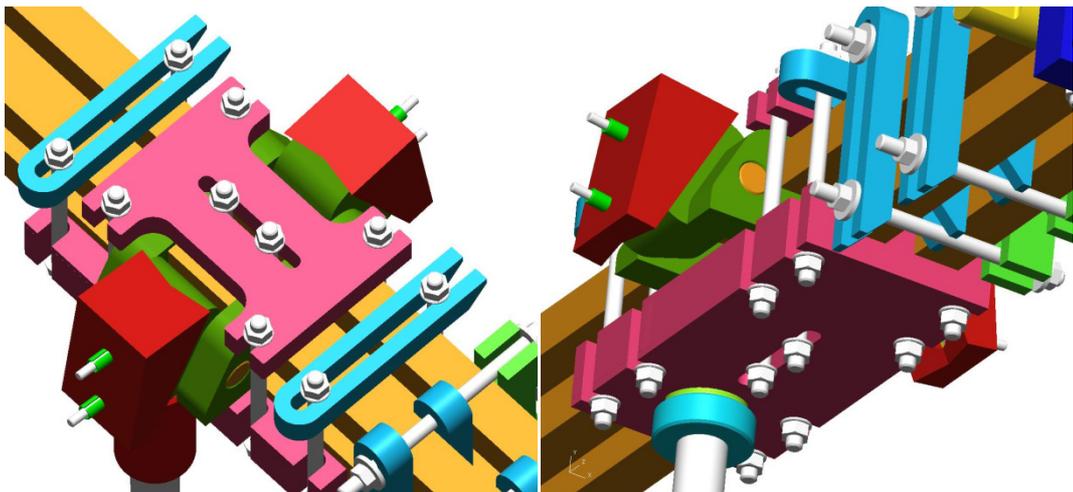


Abbildung 90 Chevronfederersatz – TDGR Straßenbahn 2

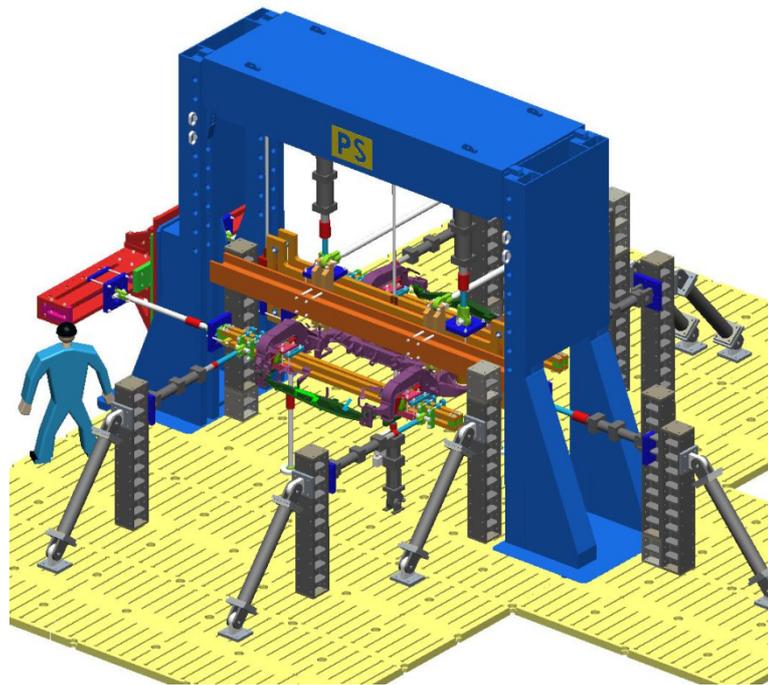


Abbildung 91 Prüfstand – TDGR Straßenbahn 2

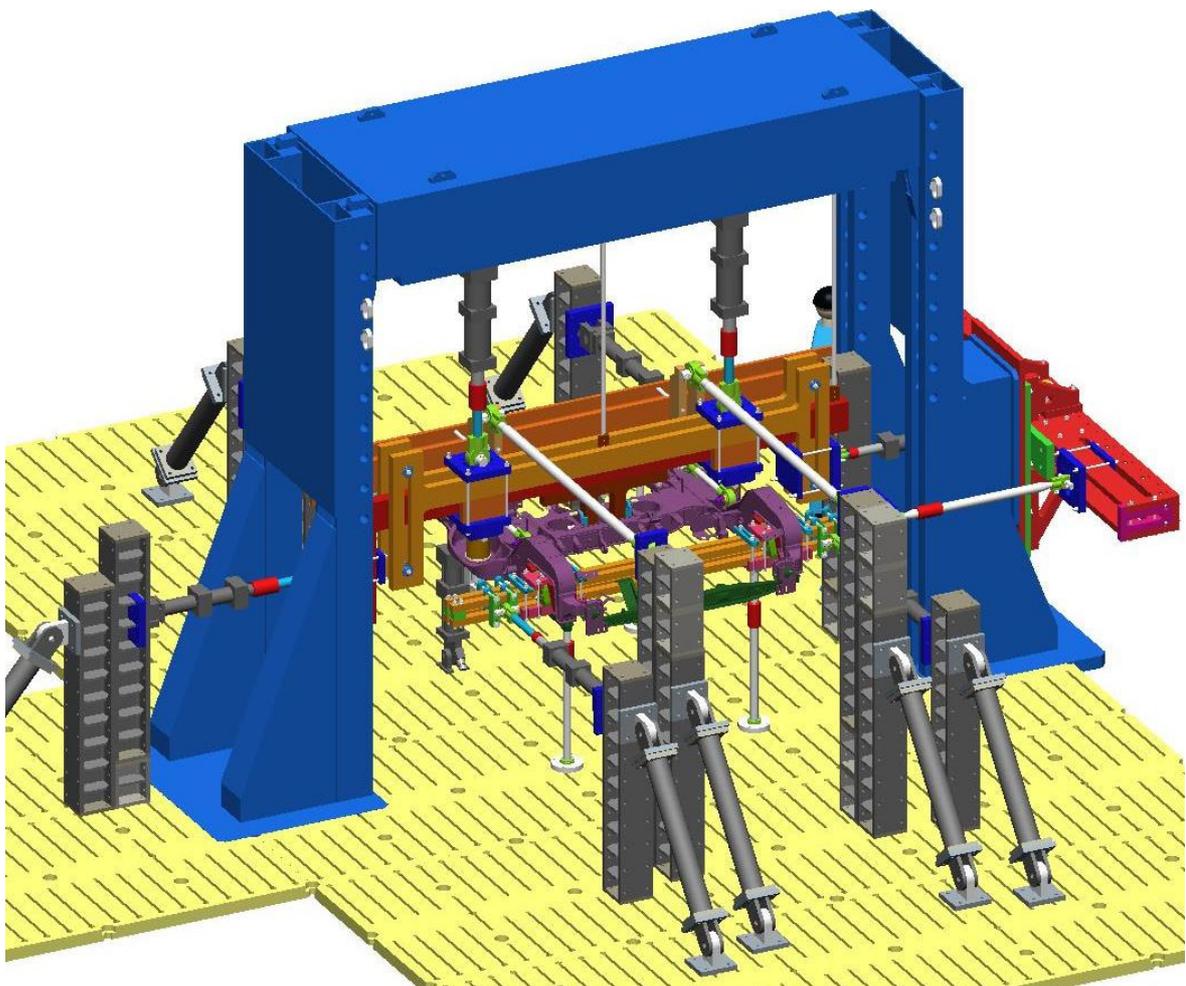


Abbildung 92 Prüfstand Ansicht 2 – TDGR Straßenbahn 2

### 8.3 Metro 1 - leichte Metro - TDGR

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
	Geschwindigkeit maximal	v	km/h
Drehgestell Gewicht	m DG	t	6,7
Radsatzlast maximal	m RS	t	13
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,0
Länge	L DGR	mm	3092
Breite	B DGR	mm	2145
Höhe	H DGR	mm	0,9
Radsatzabstand	X RS	mm	2100
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1900
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1860
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	1900

Tabelle 15 Hauptabmessungen Metro 1

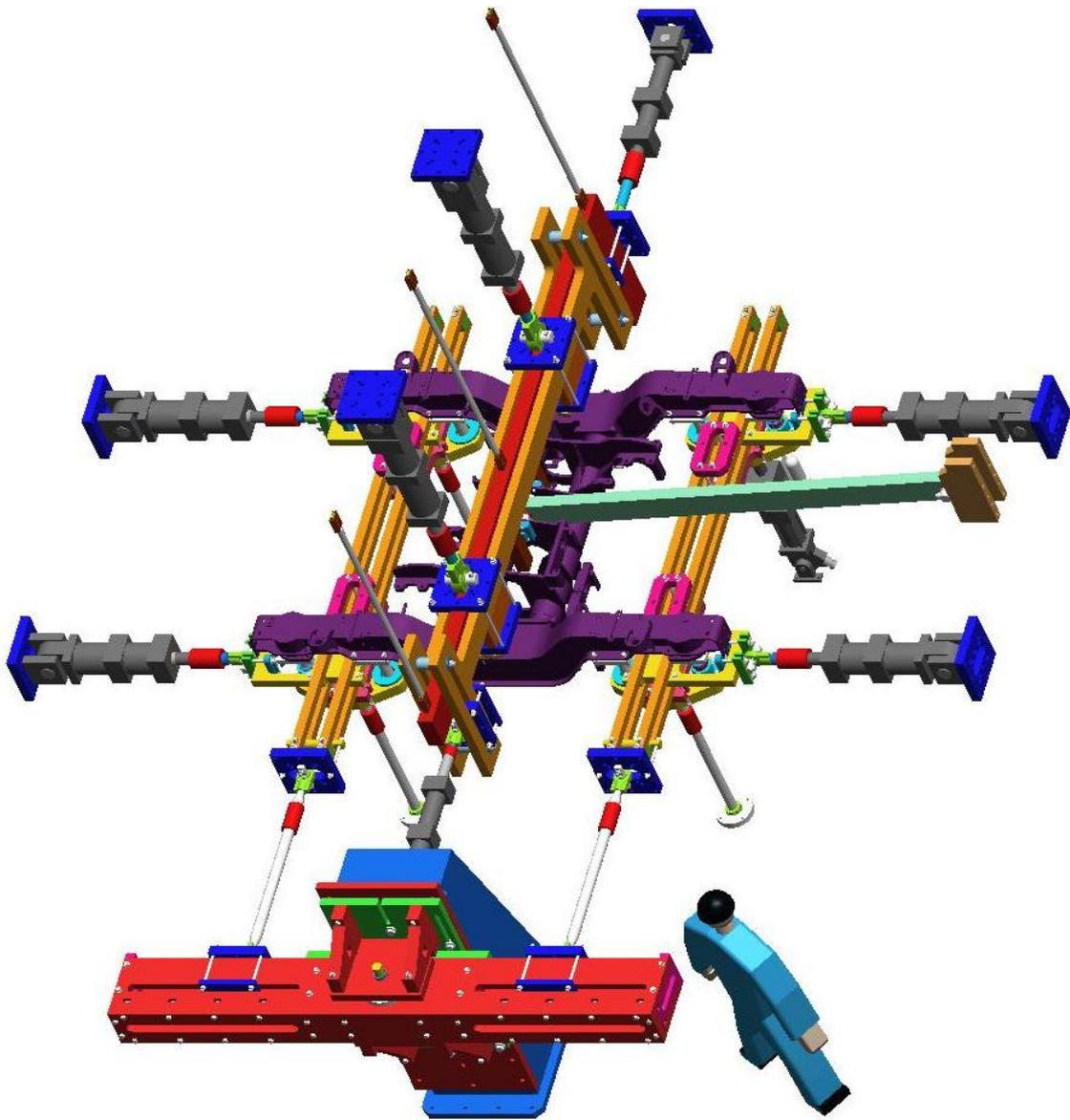


Abbildung 93 Prüfaufbau – TDGR Metro 1

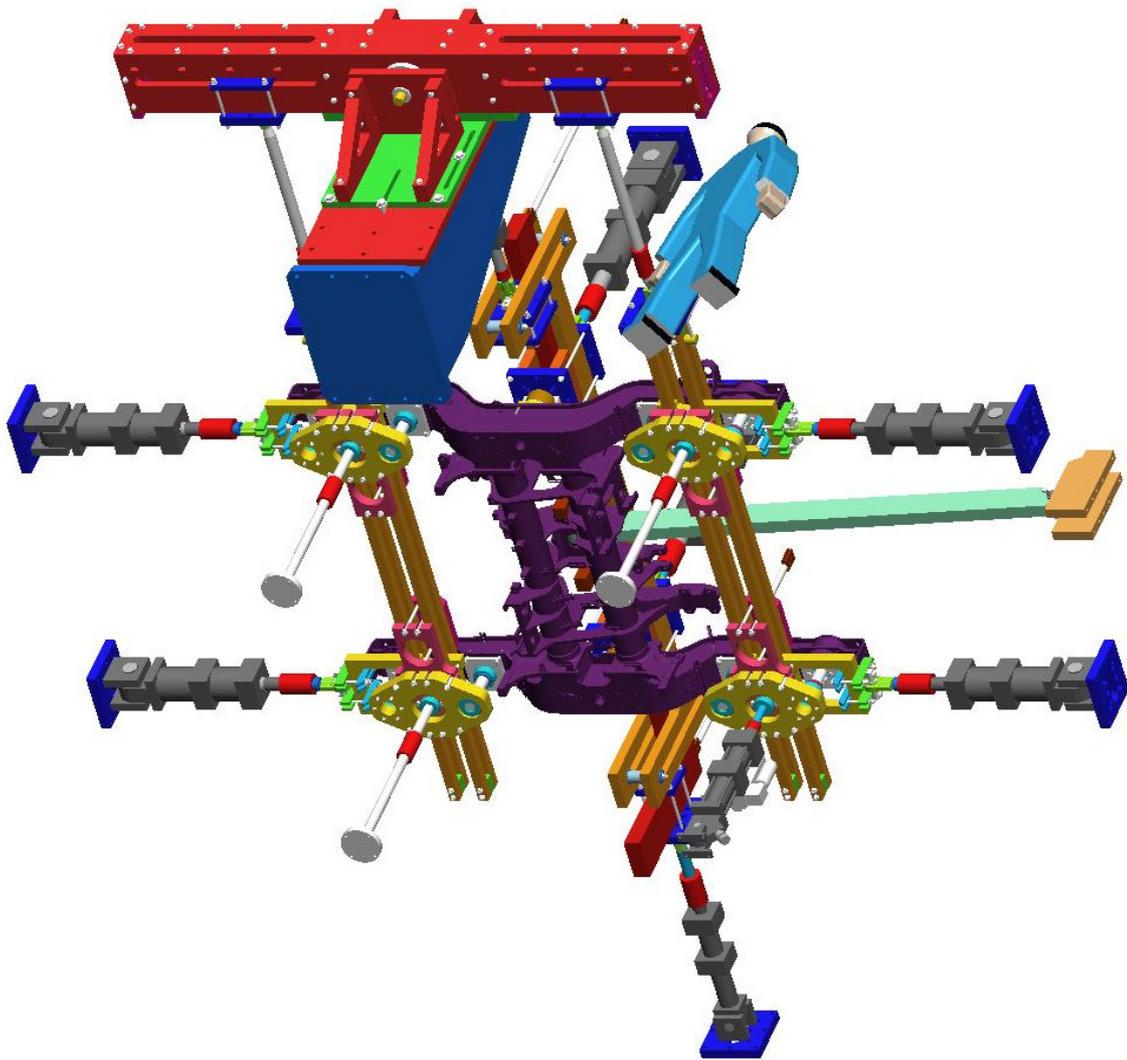


Abbildung 94 Prüfaufbau Untersicht – TDGR Metro 1

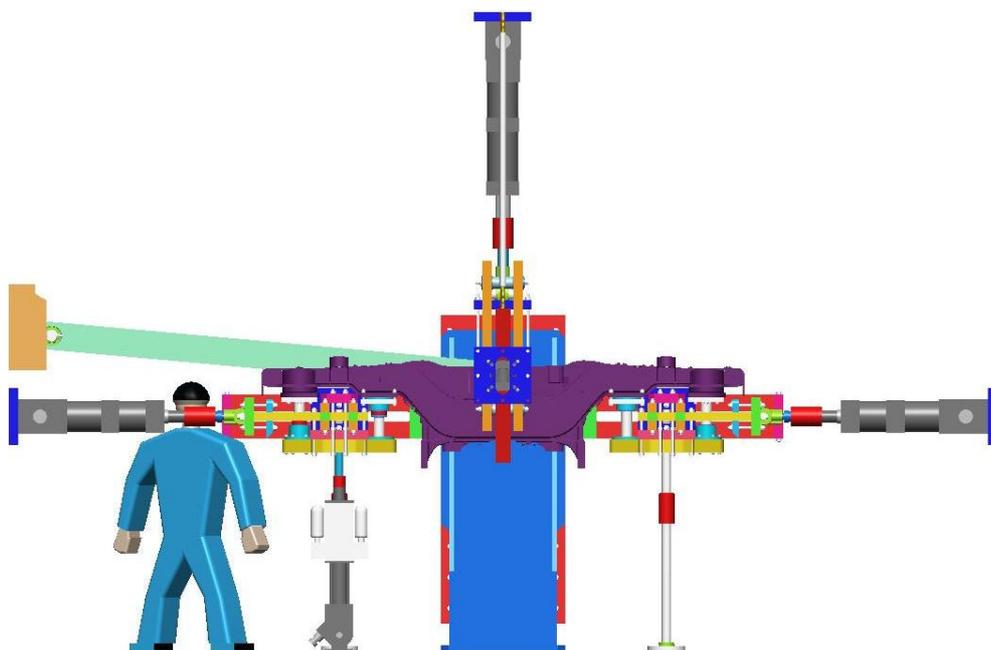


Abbildung 95 Prüfaufbau Aufriss seitlich – TDGR Metro 1

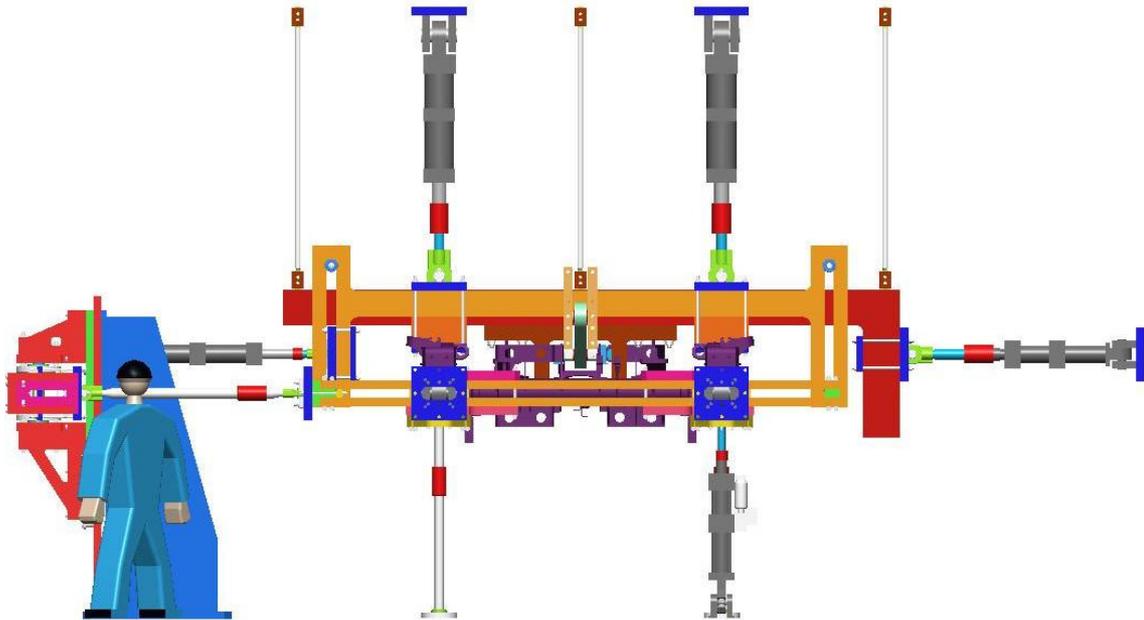


Abbildung 96 Prüfaufbau Aufriss vorn – TDGR Metro 1

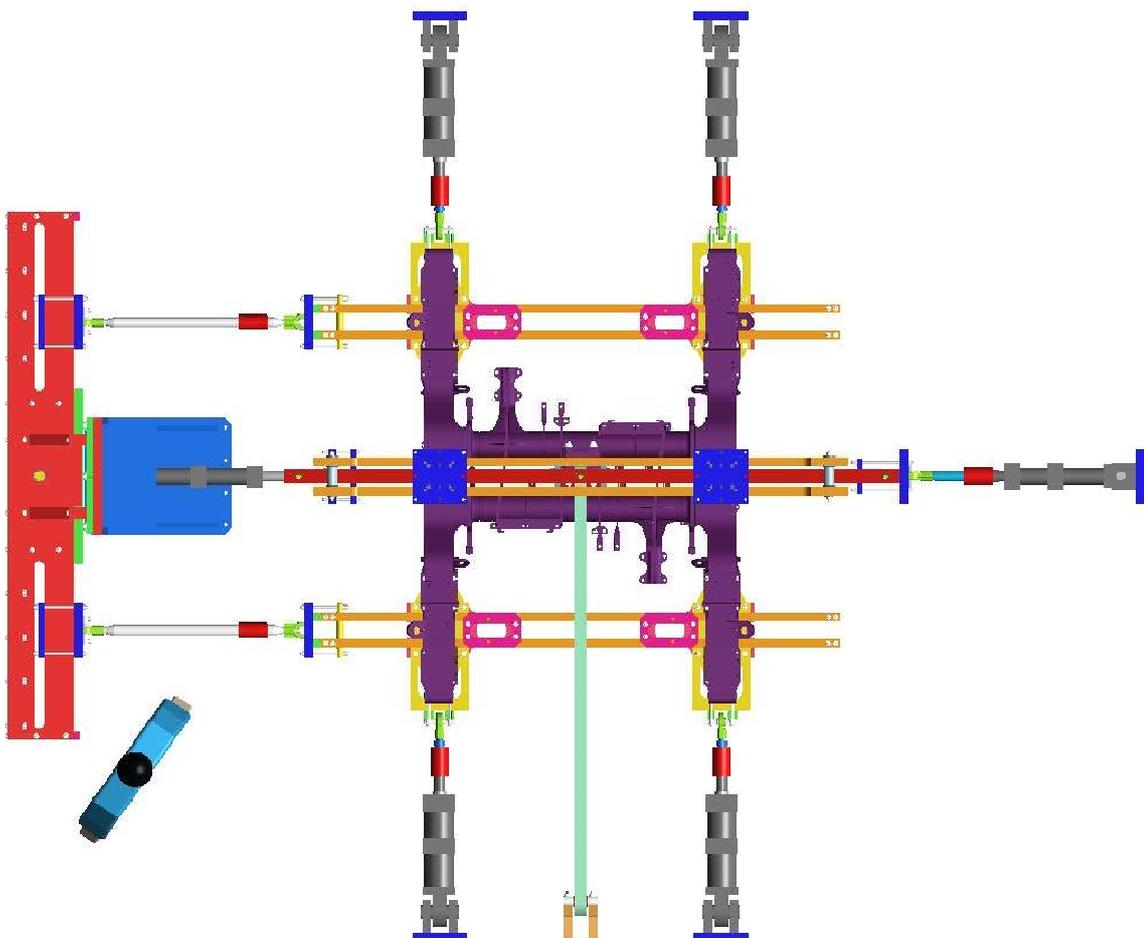


Abbildung 97 Prüfaufbau Grundriss – TDGR Metro 1

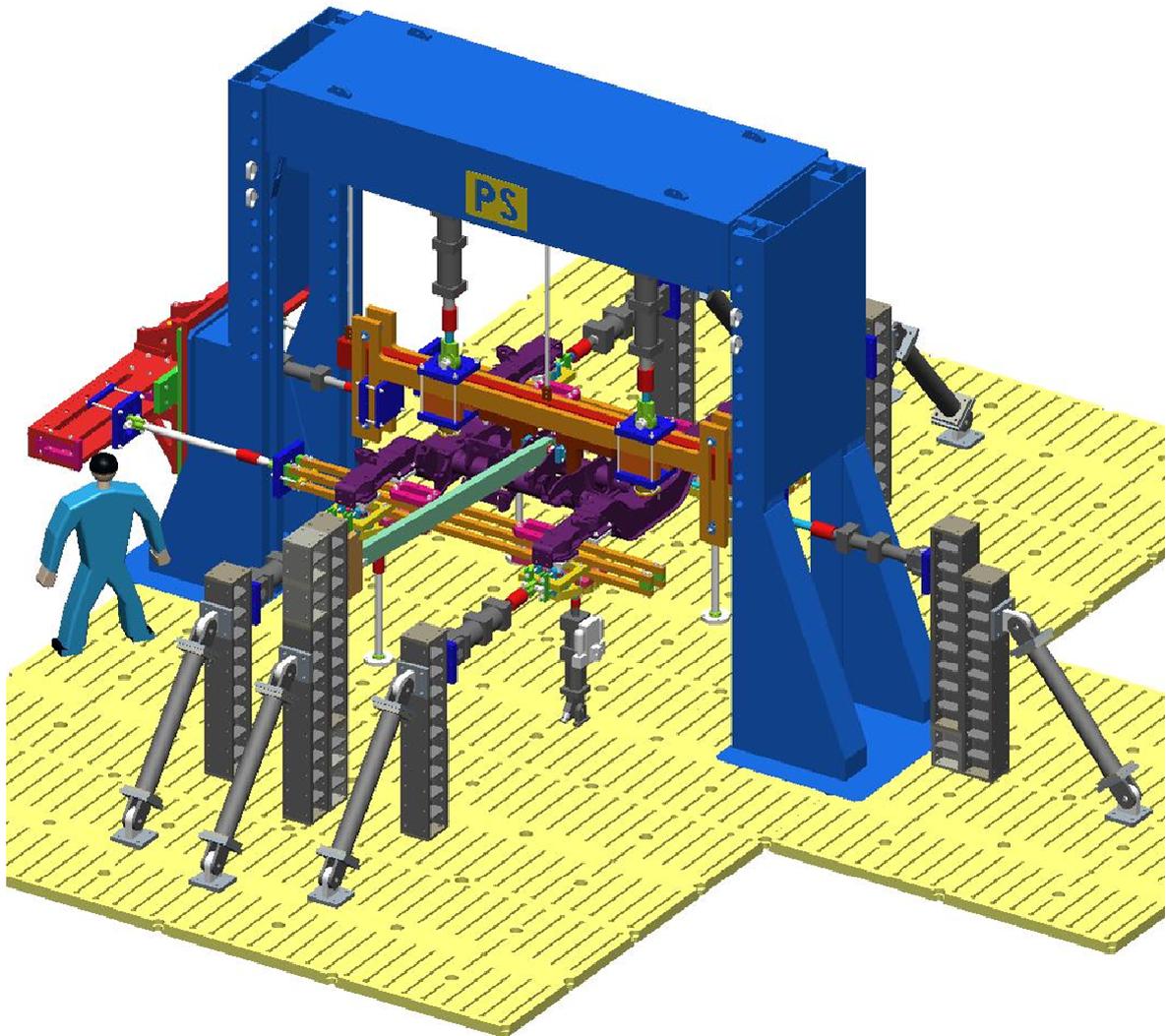


Abbildung 98 Prüfstand – TDGR Metro 1

## 8.4 Metro 2 – schwere Metro - TDGR

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	80
Drehgestell Gewicht	m DG	t	8,1
Radsatzlast maximal	m RS	t	17
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,6
Länge	L DGR	mm	3176
Breite	B DGR	mm	2607
Höhe	H DGR	mm	685
Radsatzabstand	X RS	mm	2300
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2100
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1900
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2100

Tabelle 16 Hauptdaten DGR Metro 2

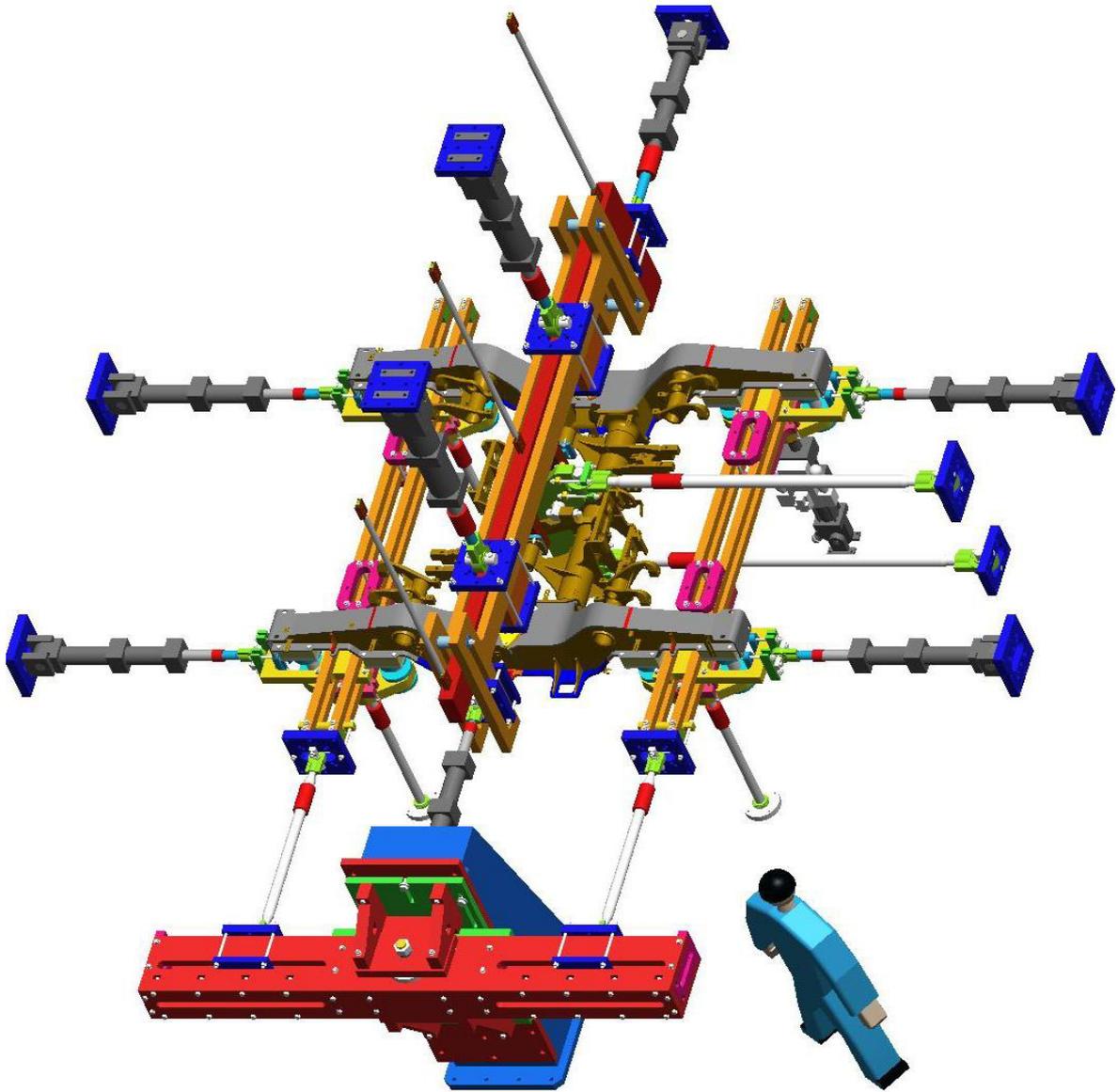


Abbildung 99 Prüfaufbau – TDGR Metro 2

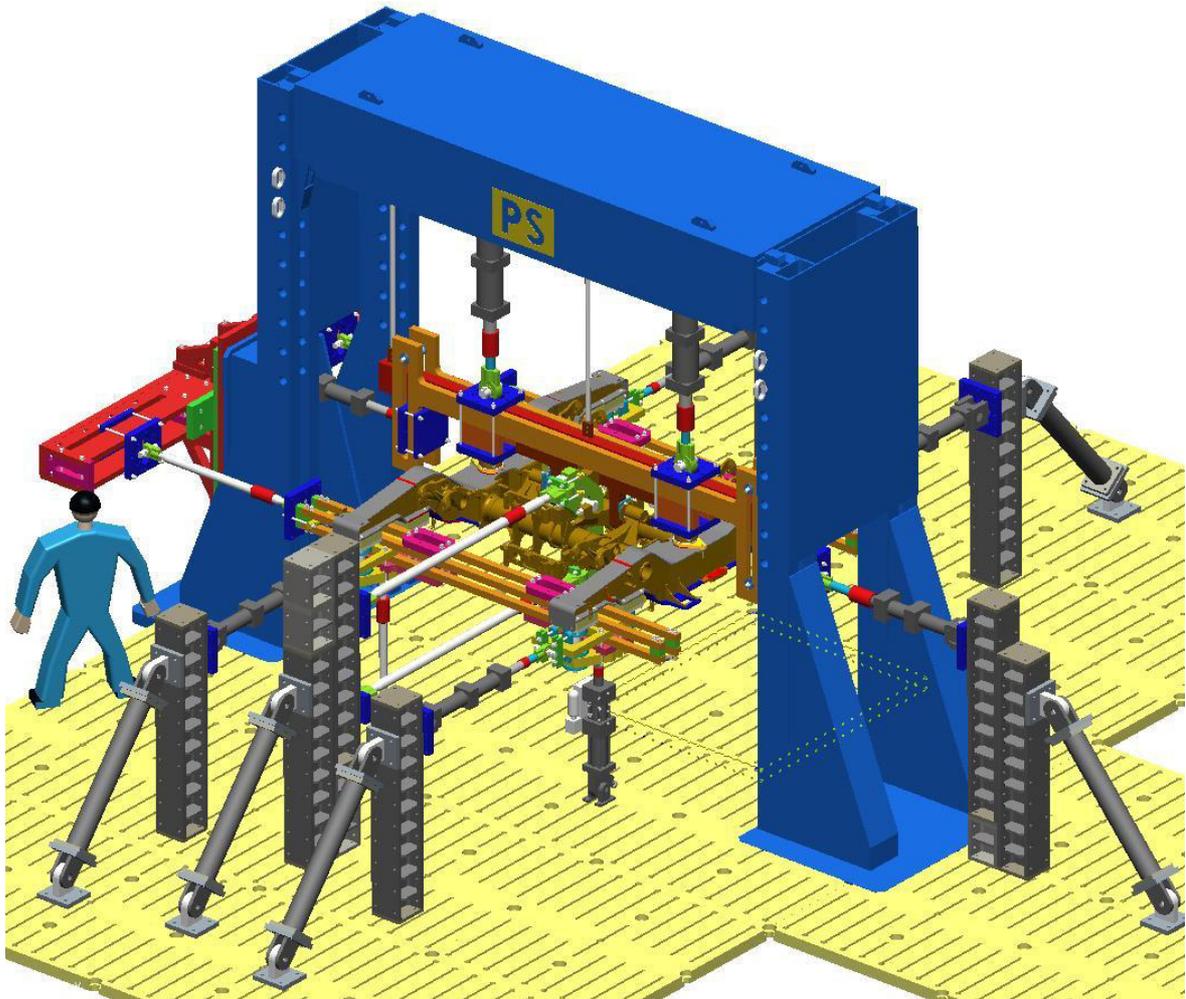


Abbildung 100 Prüfstand – TDGR Metro 2

## 8.5 Reisezugwagen 1

Drehgestelltyp	Laufdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	160
Drehgestell Gewicht	m DG	t	8,0
Radsatzlast maximal	m RS	t	19
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,5
Länge	L DGR	mm	3060
Breite	B DGR	mm	2677
Höhe	H DGR	mm	701
Radsatzabstand	X RS	mm	2500
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2050
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1800
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2000

Tabelle 17 Hauptdaten DGR Reisezugwagen 1

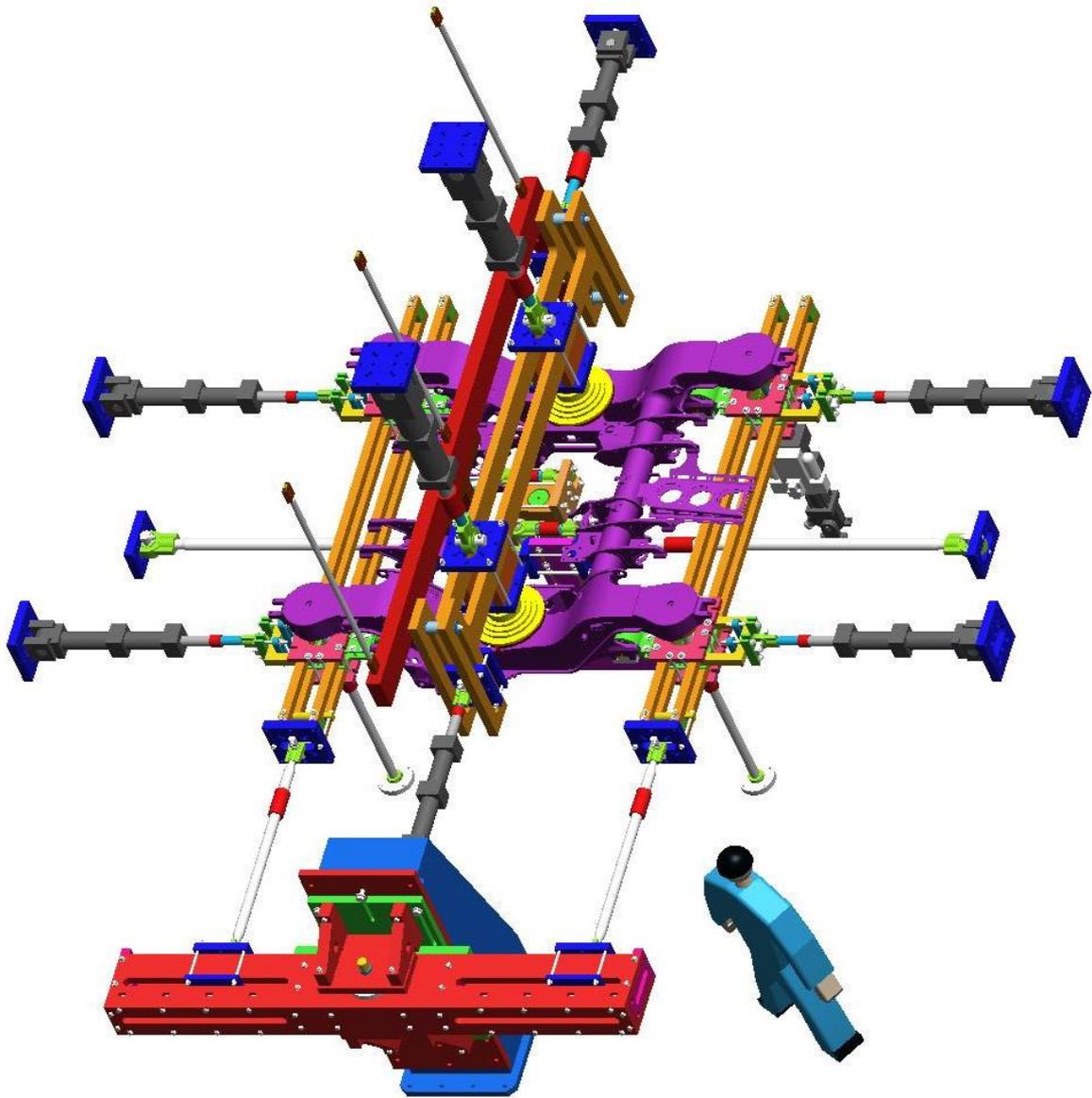


Abbildung 101 Prüfaufbau – LDGR Reisezugwagen 1

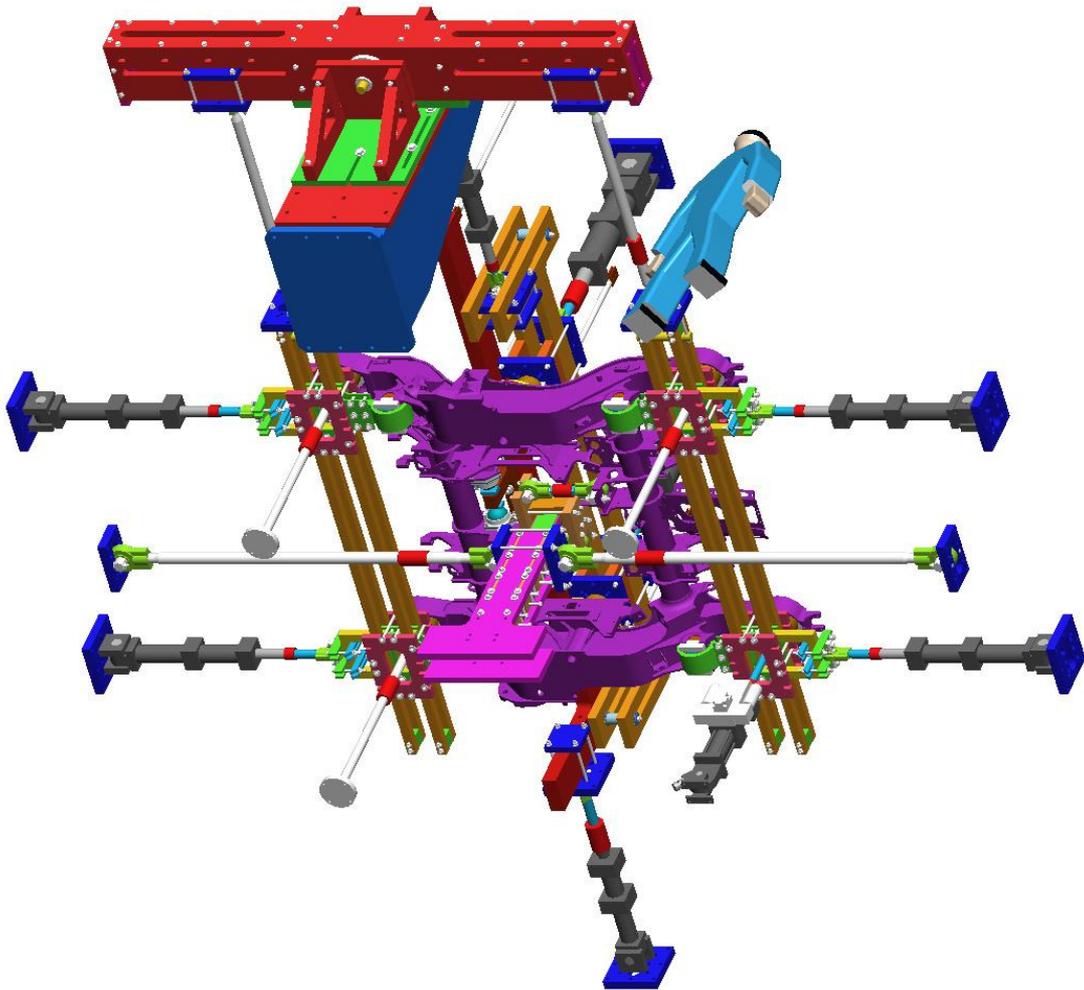


Abbildung 102 Prüfaufbau Untersicht – Reisezugwagen 1

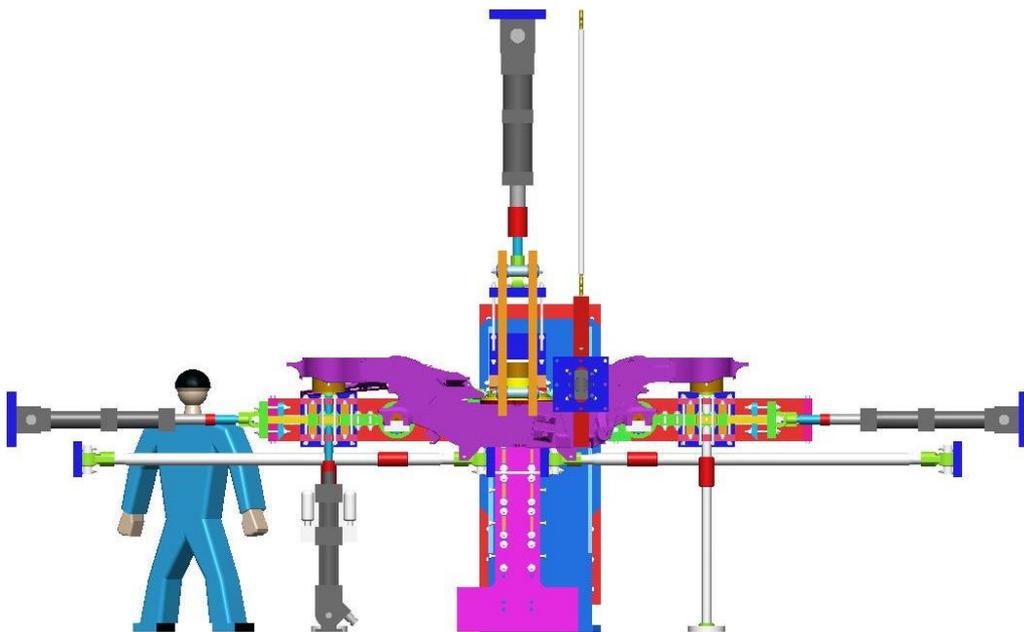


Abbildung 103 Prüfaufbau Seitris – Reisezugwagen 1

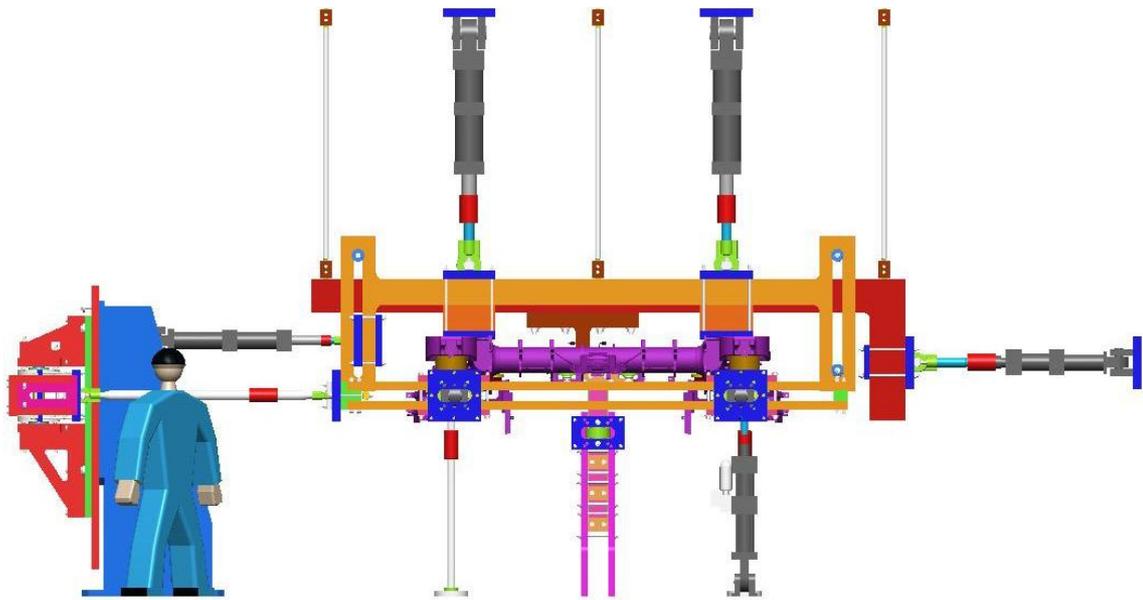


Abbildung 104 Prüfaufbau Aufriss vorn – Reisezugwagen 1

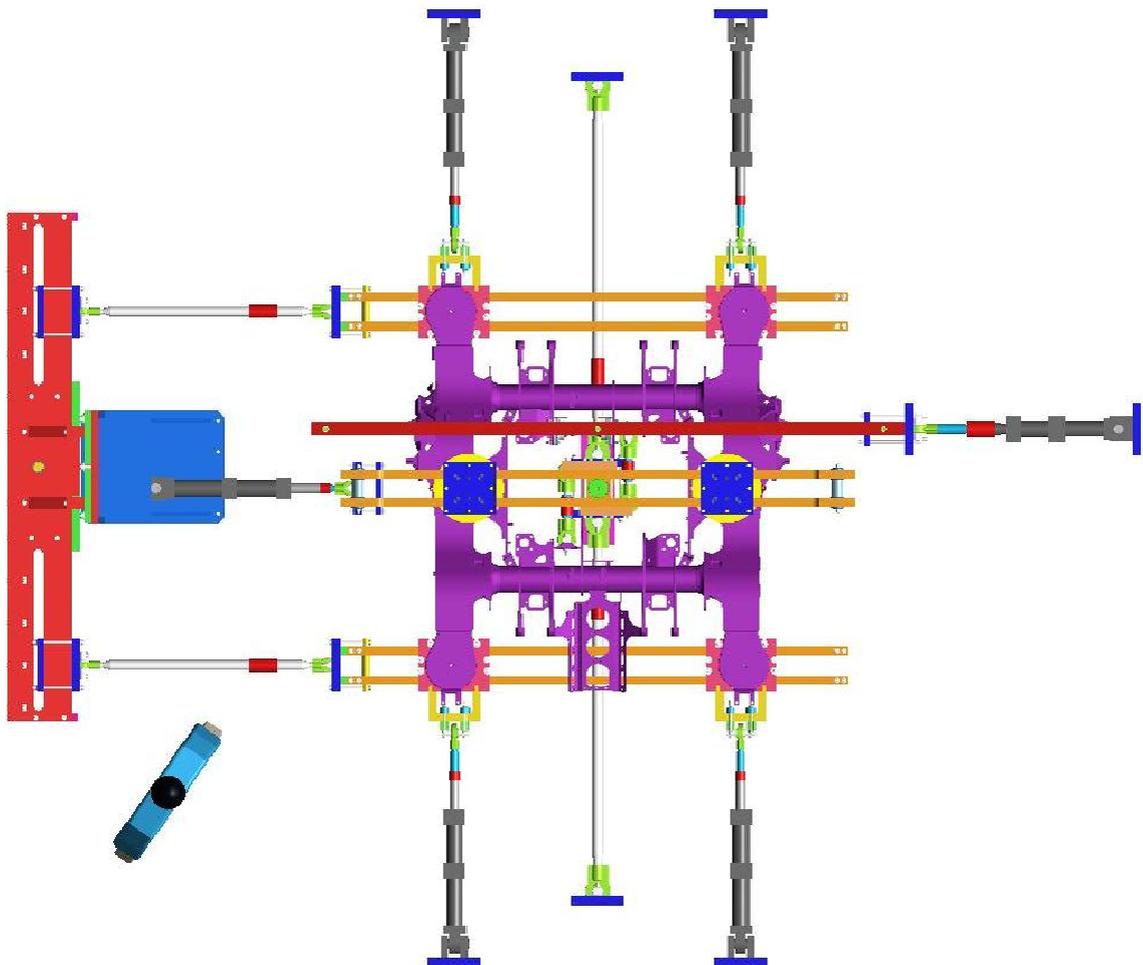


Abbildung 105 Prüfaufbau Grundriss – Reisezugwagen 1

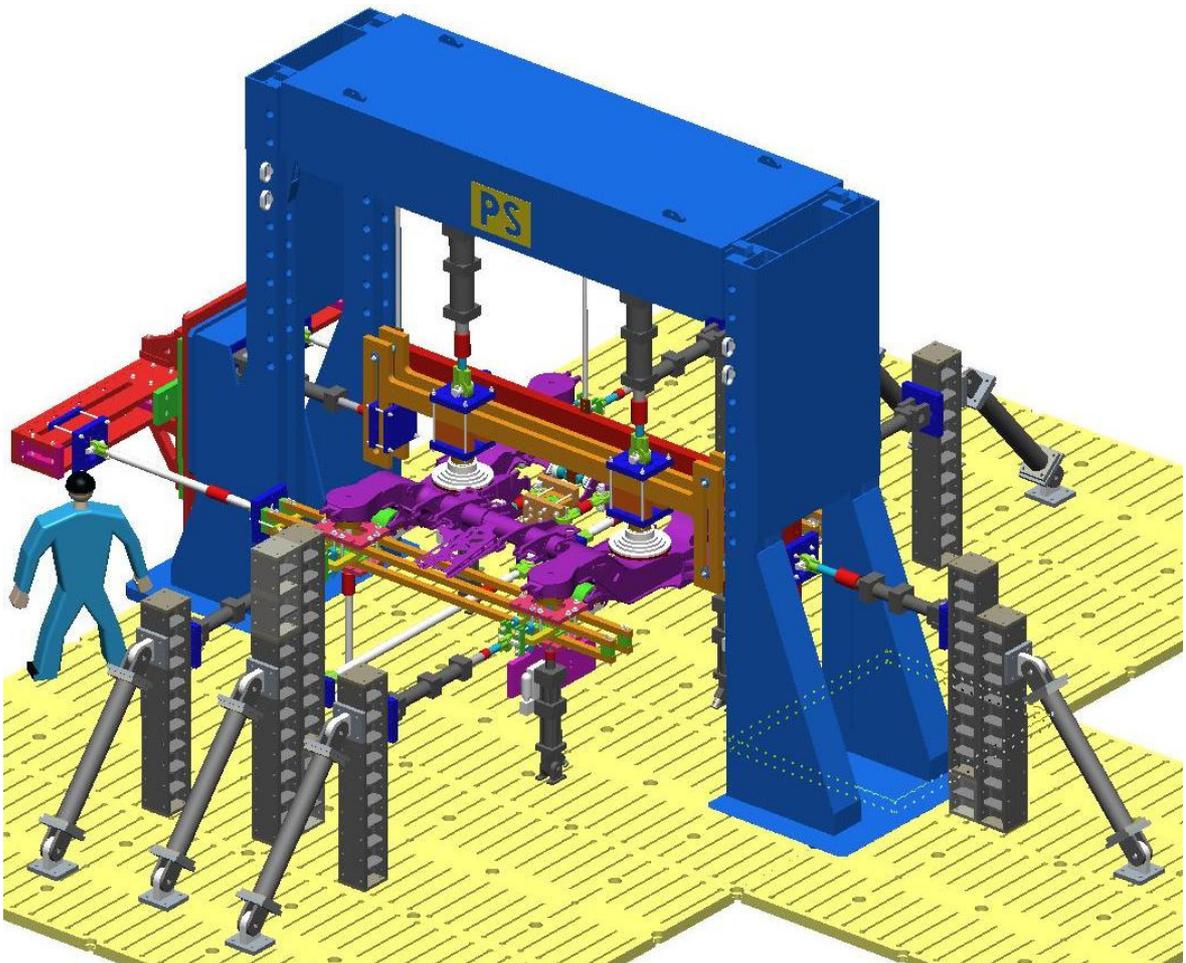


Abbildung 106 Prüfstand – Reisezugwagen 1

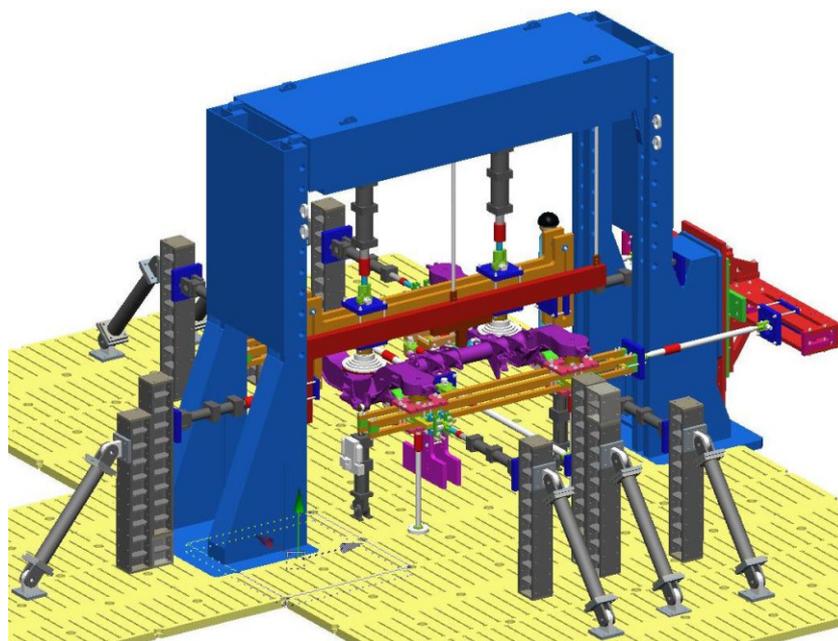


Abbildung 107 Prüfstand – Reisezugwagen 1

## 8.6 Reisezugwagen 2

Drehgestelltyp	Trieb-/Laufdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	160
Drehgestell Gewicht	m DG	t	9,1
Radsatzlast maximal	m RS	t	18
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,9
Länge	L DGR	mm	3794
Breite	B DGR	mm	2720
Höhe	H DGR	mm	645
Radsatzabstand	X RS	mm	2300
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2204
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1600
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2042

Tabelle 18 Hauptdaten DGR Reisezugwagen 2

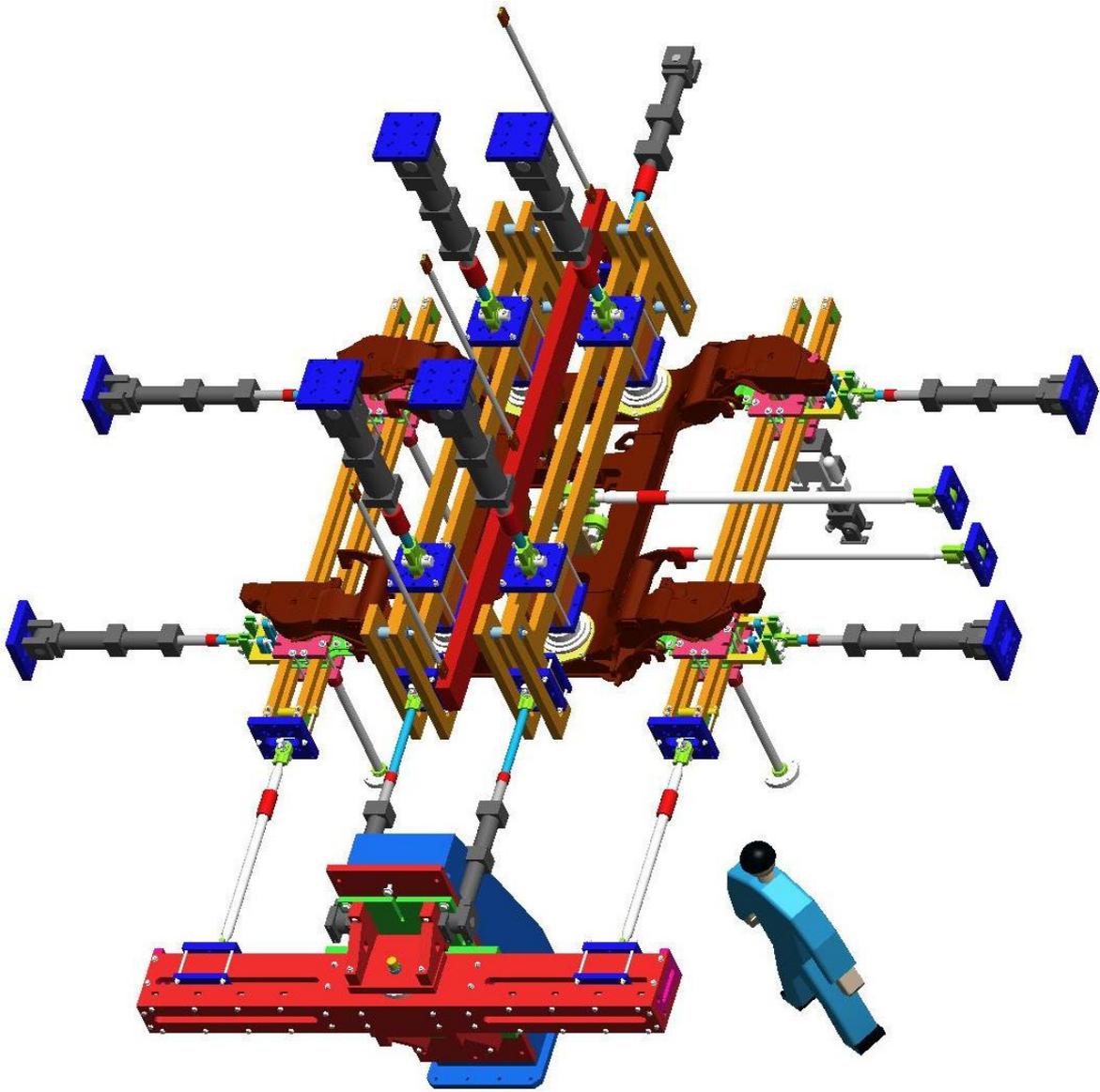


Abbildung 108 Prüfaufbau – JLDGR Reisezugwagen 2

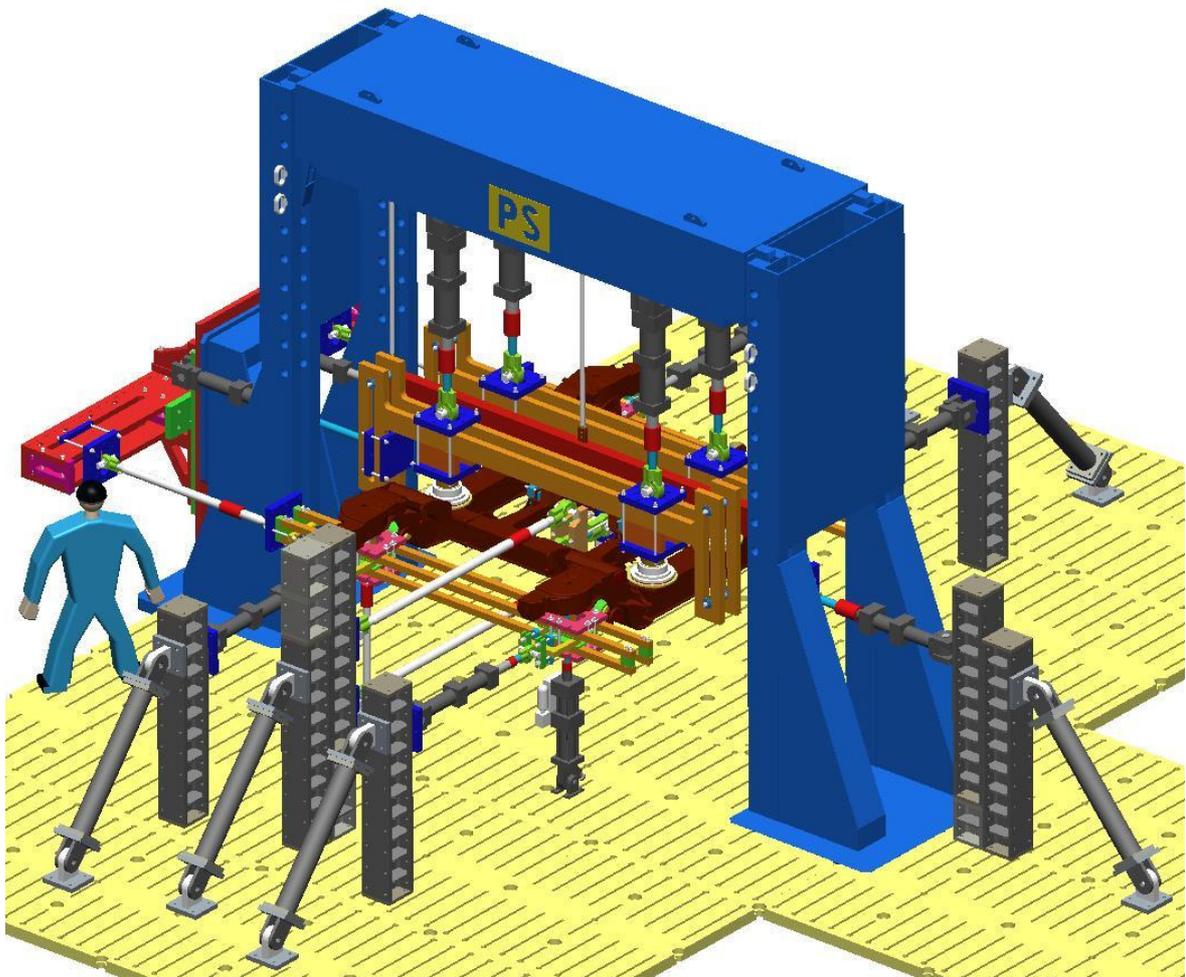


Abbildung 109 Prüfstand – JLDGR Reisezugwagen 2

## 8.7 Lokomotive 1

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	200
Drehgestell Gewicht	m DG	t	17,9
Radsatzlast maximal	m RS	t	25
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	3,3
Länge	L DGR	mm	4877
Breite	B DGR	mm	2813
Höhe	H DGR	mm	955
Radsatzabstand	X RS	mm	3000
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2100
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1943
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2100

Tabelle 19 Hauptdaten DGR Lokomotive 1

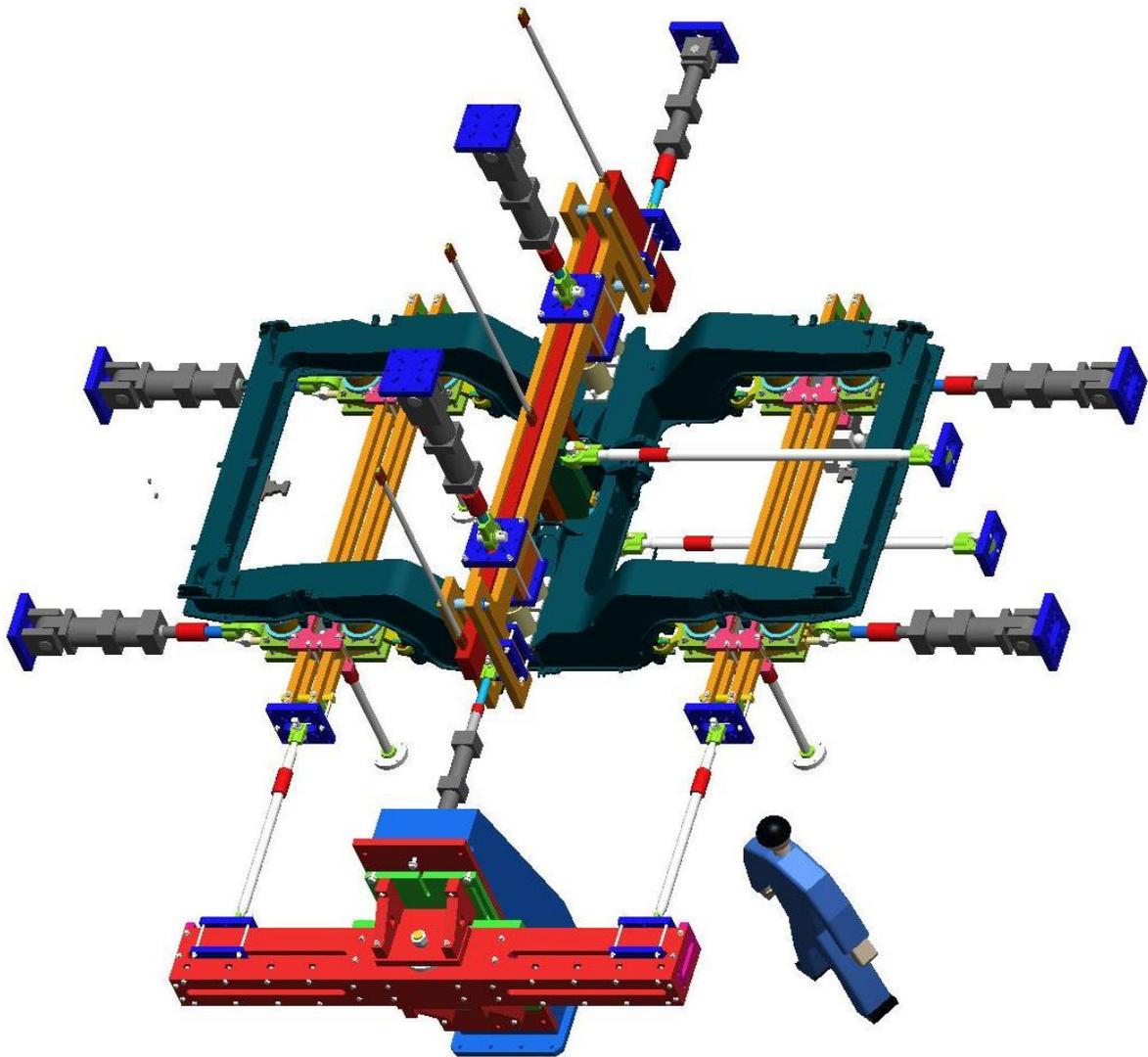


Abbildung 110 Prüfaufbau – TDGR Lokomotive 1

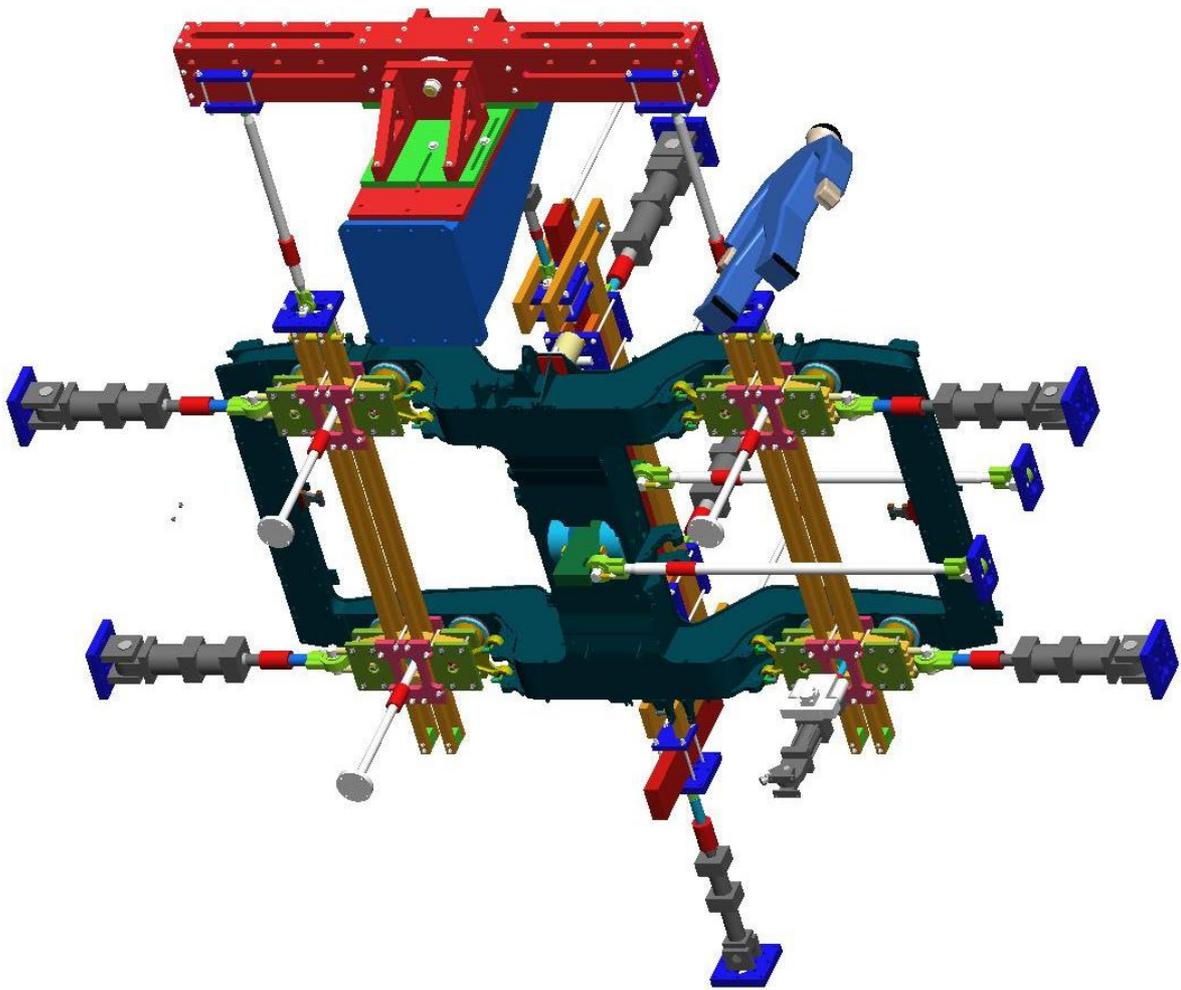


Abbildung 111 Prüfaufbau Untersicht – Lokomotive 1

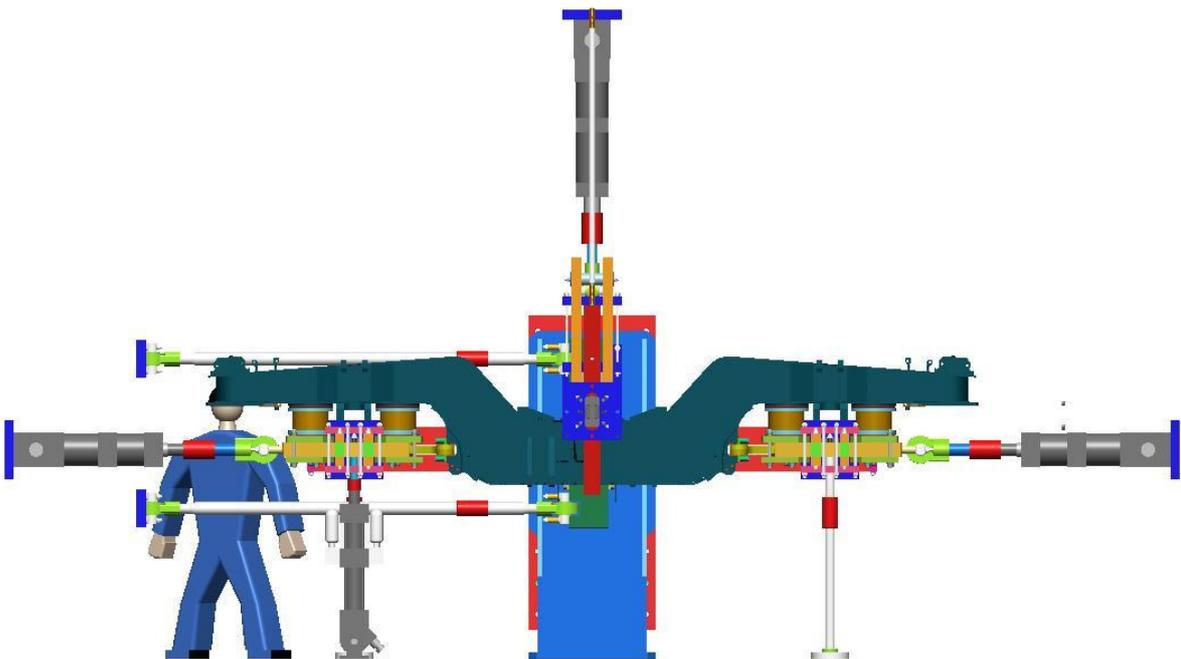


Abbildung 112 Prüfaufbau Seitriss – Lokomotive 1

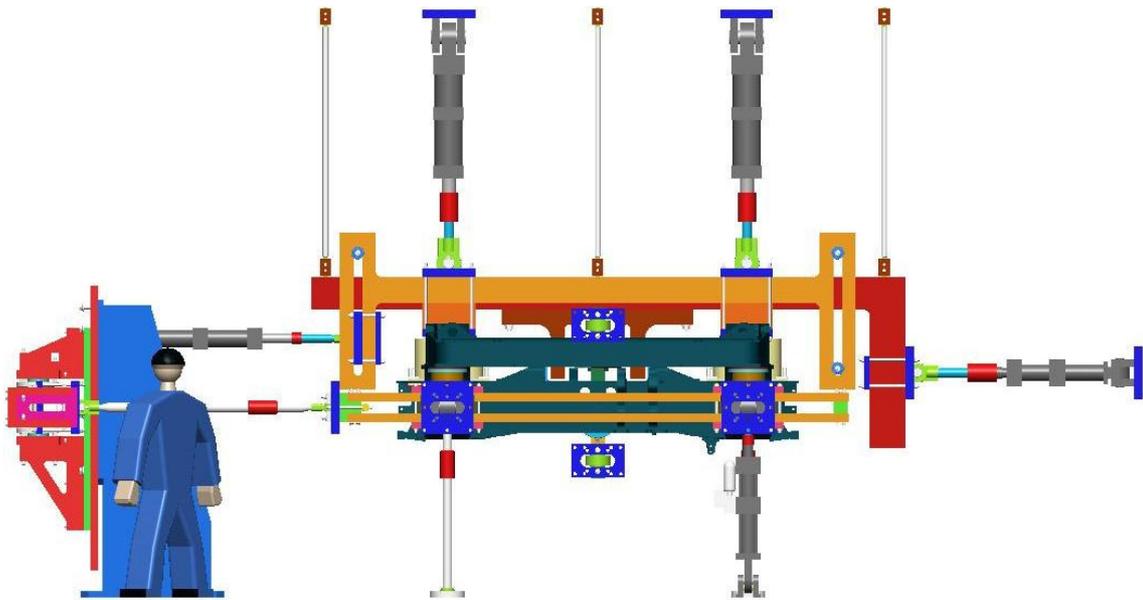


Abbildung 113 Prüfaufbau Aufriss vorn – Lokomotive 1

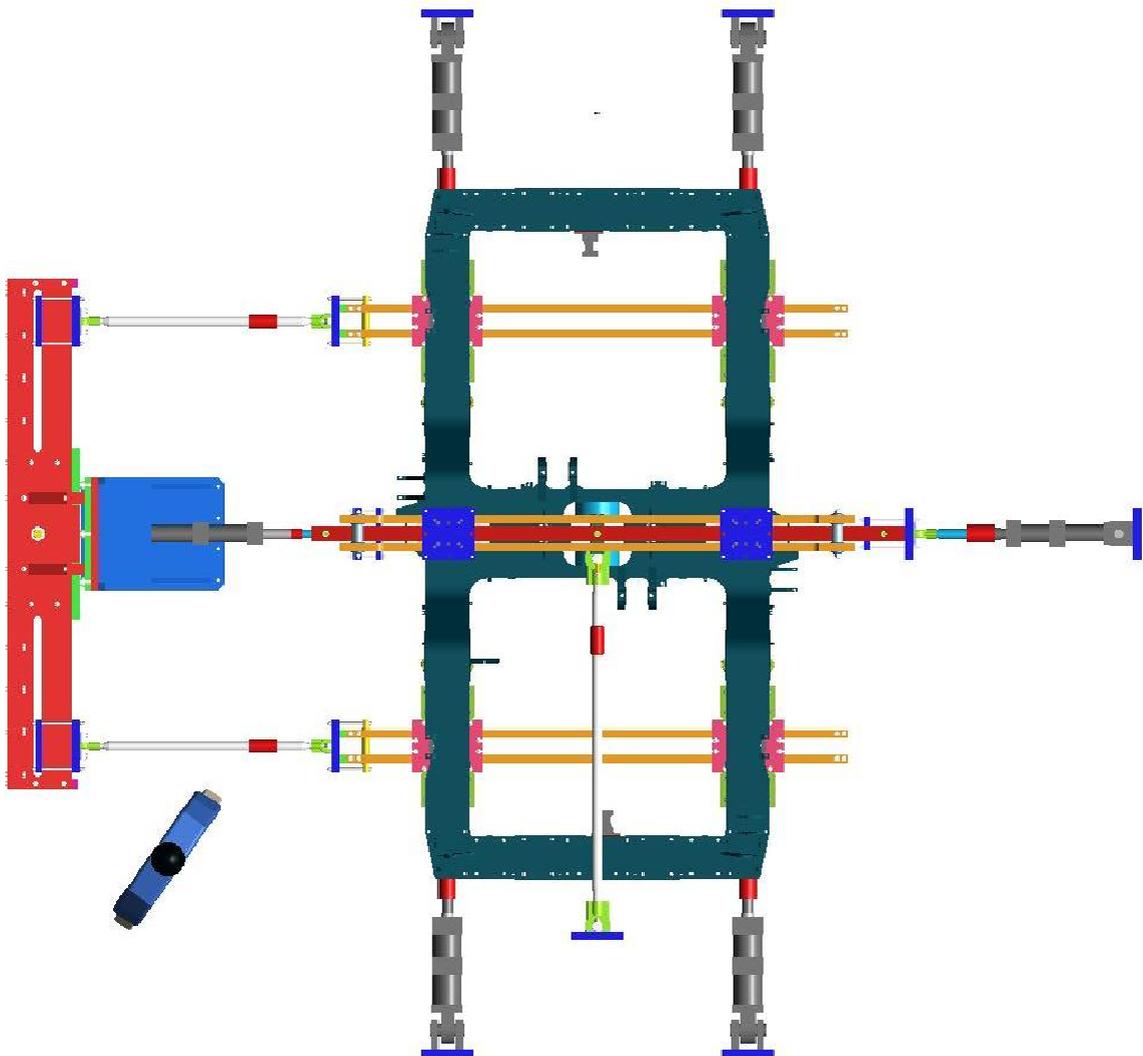


Abbildung 114 Prüfaufbau Grundriss – Lokomotive 1

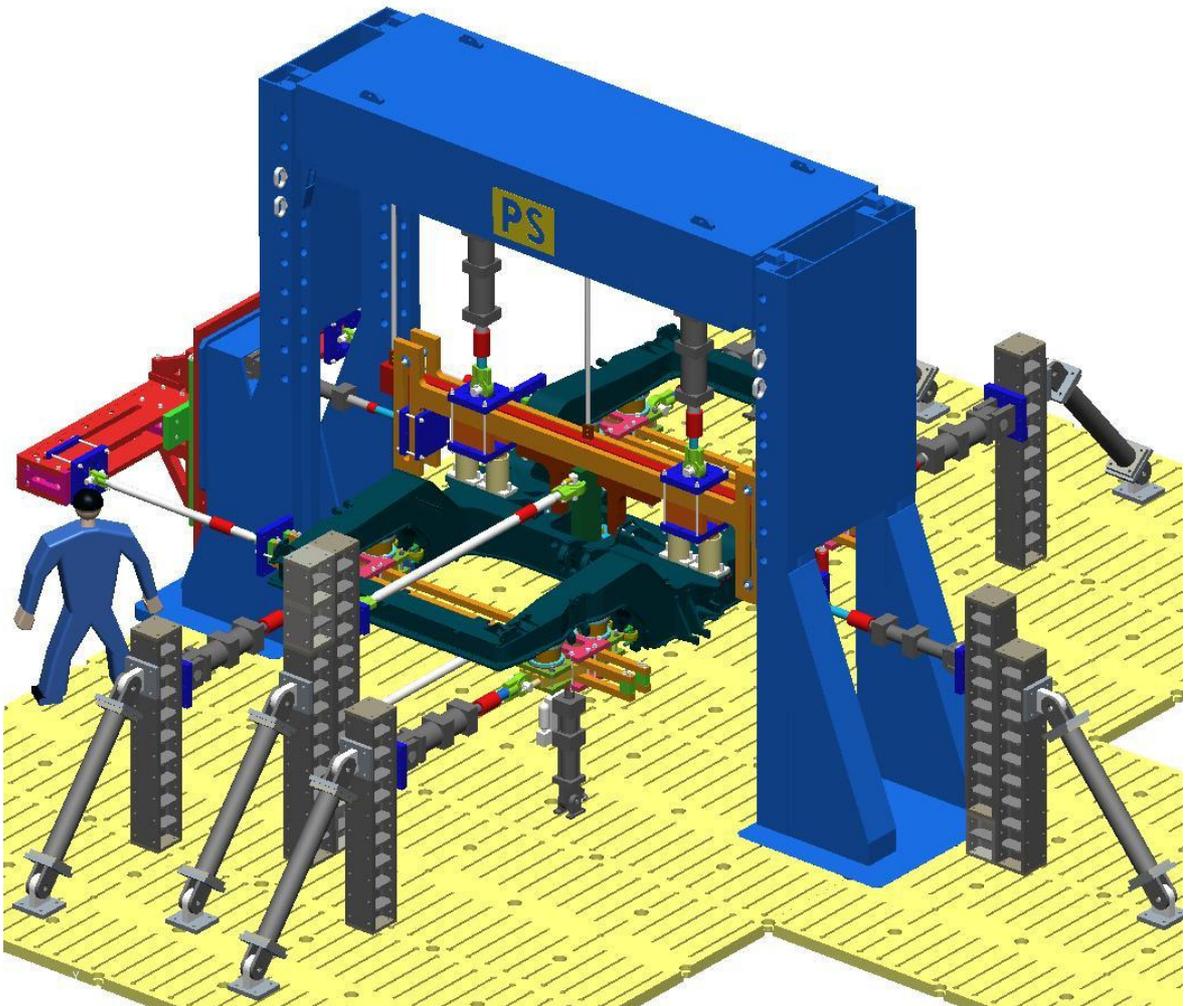


Abbildung 115 Prüfstand – Lokomotive 1

## 8.8 Hochgeschwindigkeitszug 1 – LDGR - Normalspur

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	350
Drehgestell Gewicht	m DG	t	9,2
Radsatzlast maximal	m RS	t	17
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	1,6
Länge	L DGR	mm	3180
Breite	B DGR	mm	2796
Höhe	H DGR	mm	709
Radsatzabstand	X RS	mm	2500
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2000
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	1900
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2040

Tabelle 20 Hauptdaten DGR Hochgeschwindigkeitszug 1

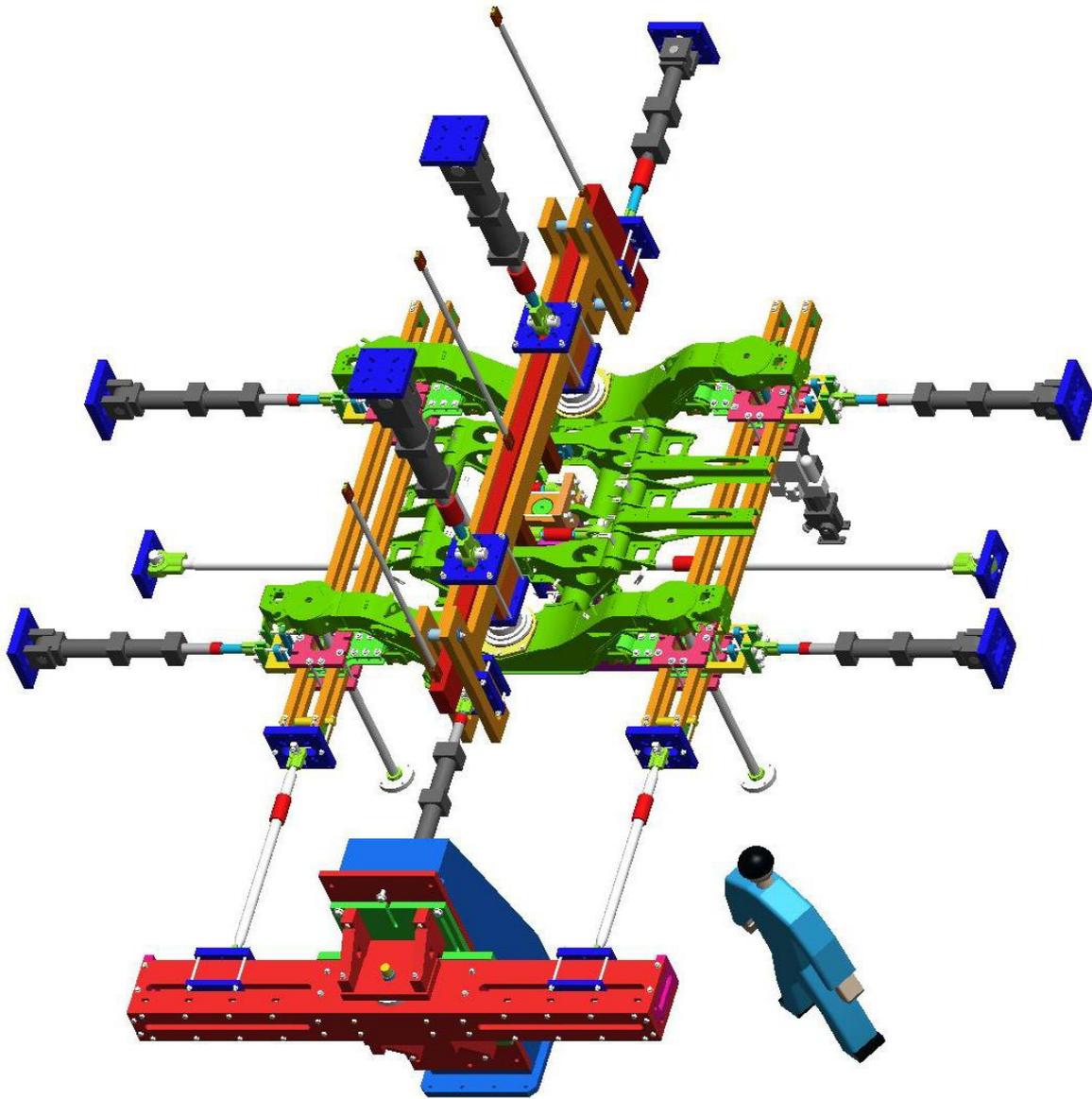


Abbildung 116 Prüfaufbau – LDGR Hochgeschwindigkeitszug (Normalspur)

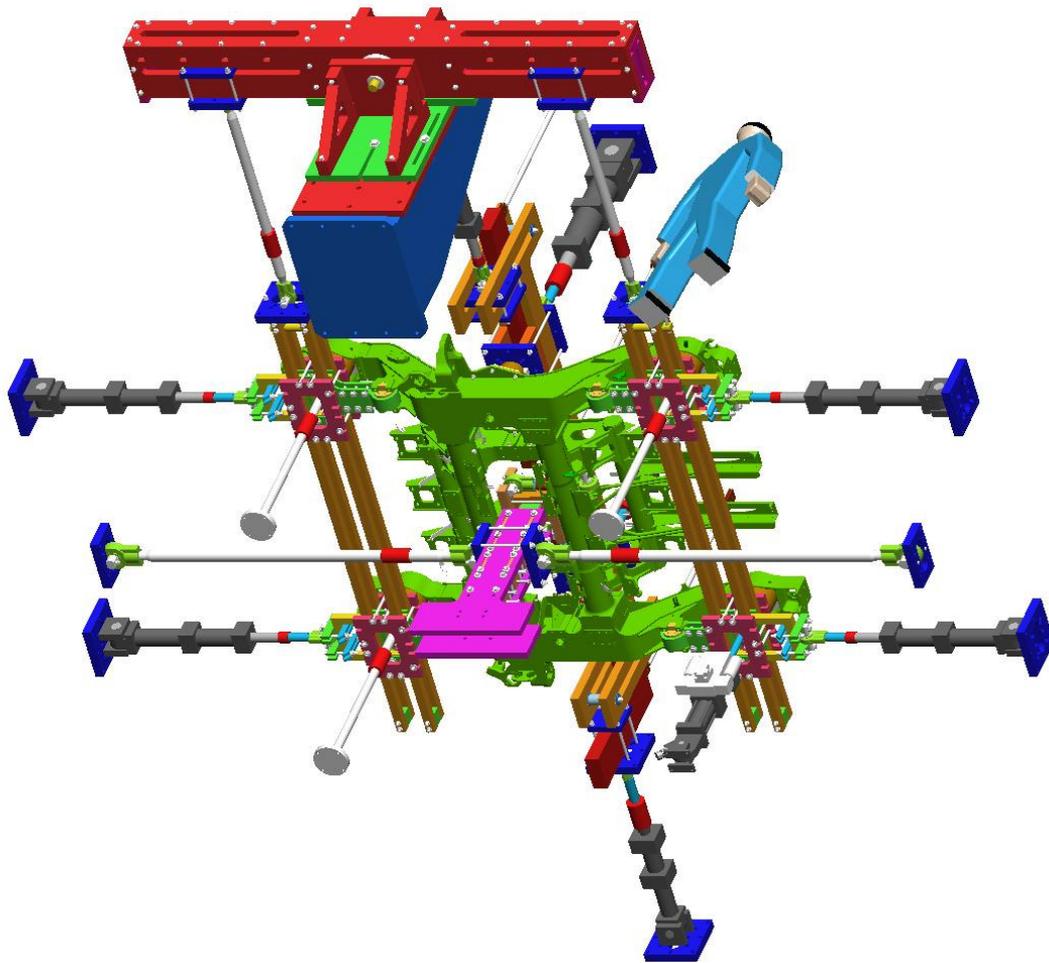


Abbildung 117 Prüfaufbau Untersicht – Hochgeschwindigkeitszug 1

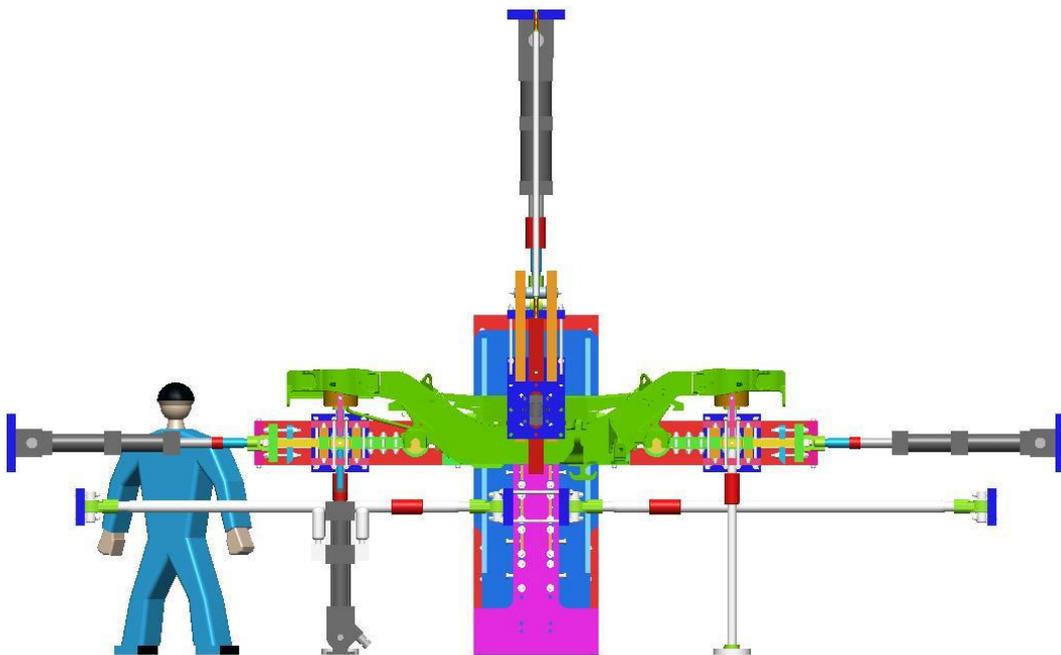


Abbildung 118 Prüfaufbau Seitriss – Hochgeschwindigkeitszug 1

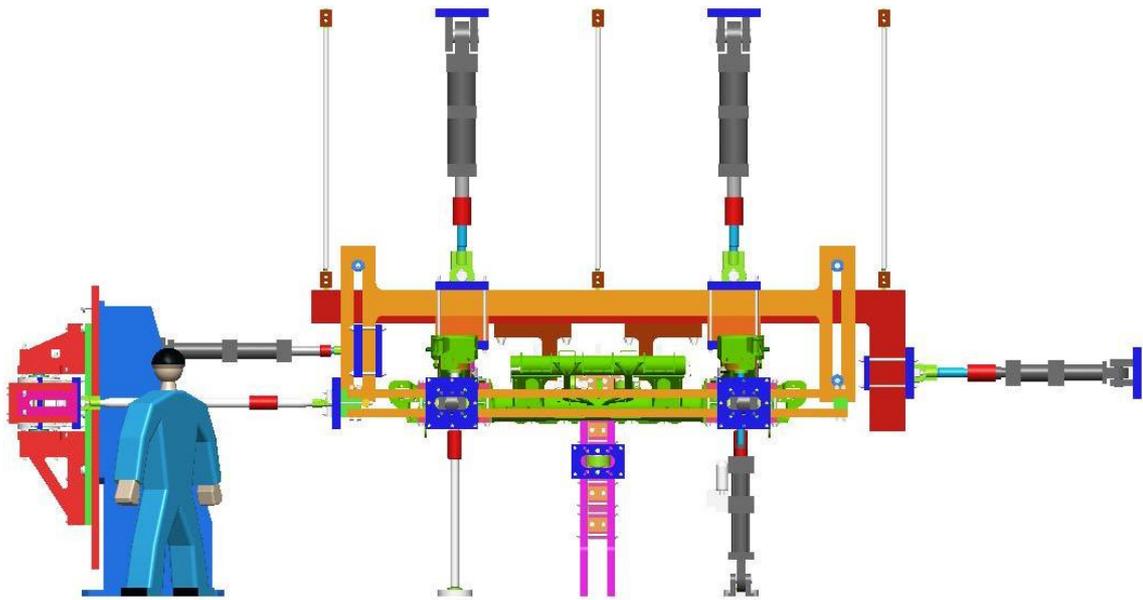


Abbildung 119 Prüfaufbau Grundriss – Hochgeschwindigkeitszug 1

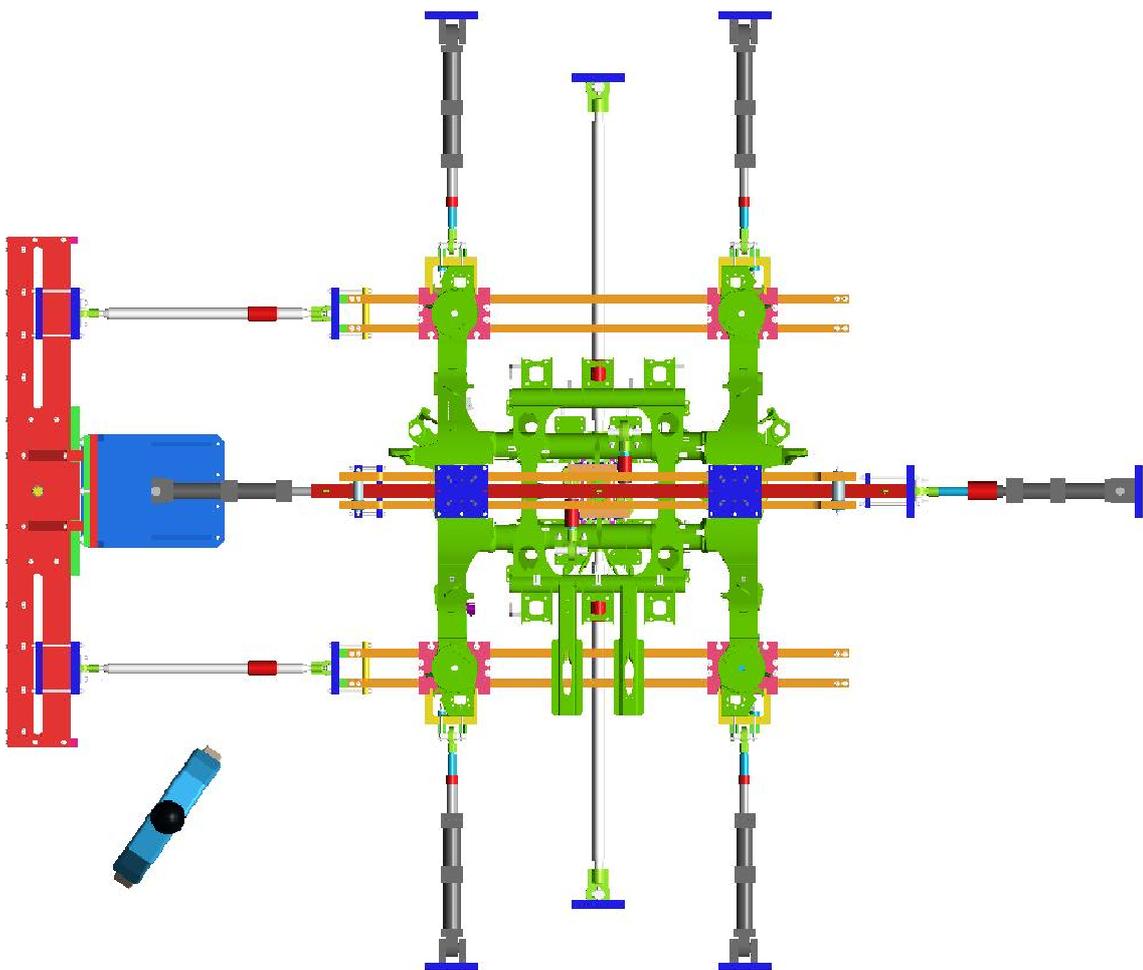


Abbildung 120 Prüfaufbau Grundriss – Hochgeschwindigkeitszug 1

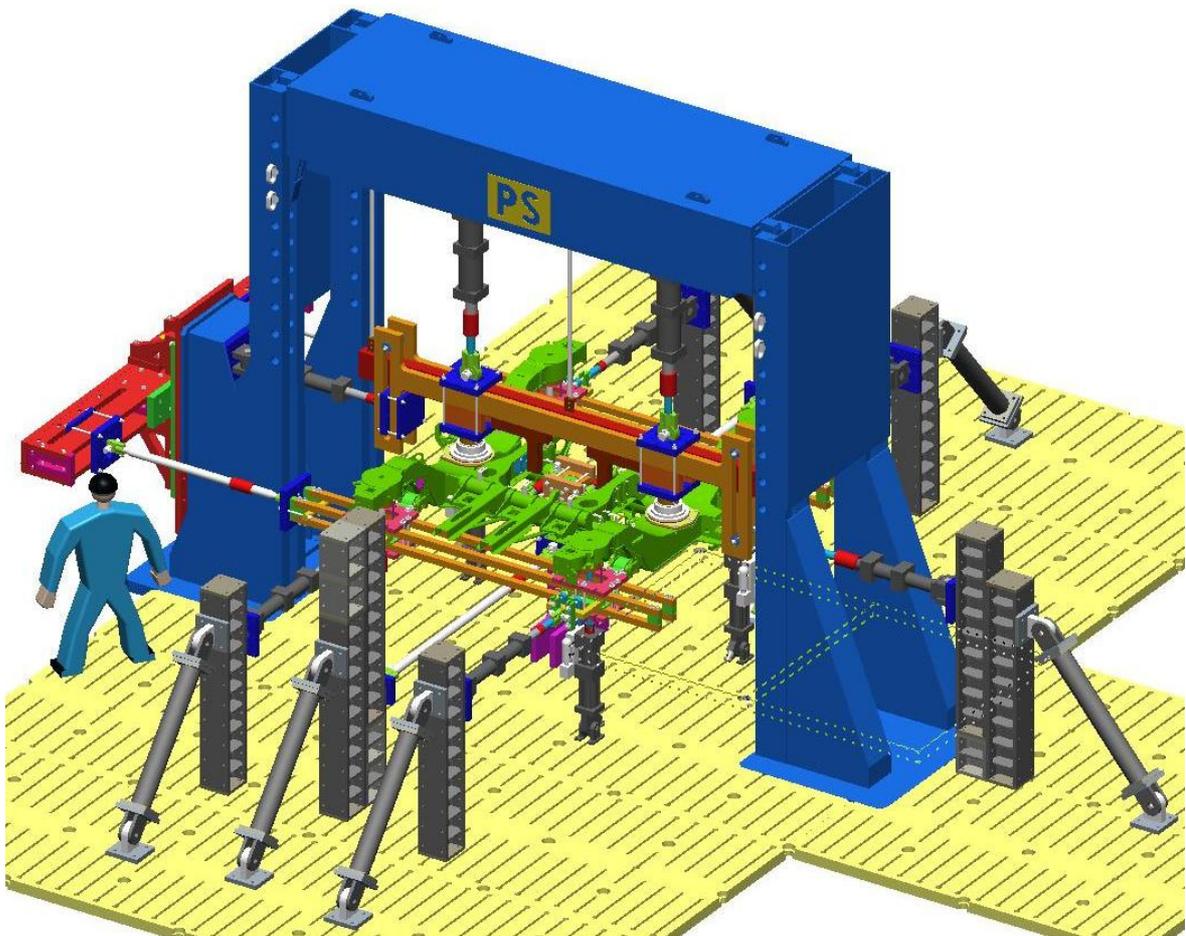


Abbildung 121 Prüfstand – Hochgeschwindigkeitszug 1

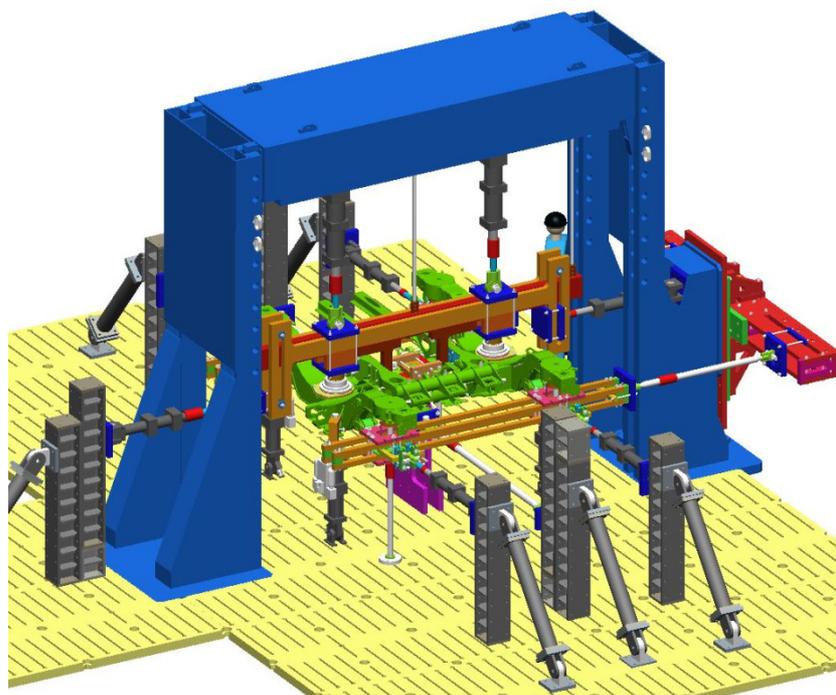


Abbildung 122 Prüfstand – Hochgeschwindigkeitszug 1

## 8.9 Hochgeschwindigkeitszug 2 – TDGR - Breitspur

Drehgestelltyp	Triebdrehgestell		
Geschwindigkeit maximal	v	km/h	250
Drehgestell Gewicht	m DG	t	9,2
Radsatzlast maximal	m RS	t	17
Drehgestellrahmen Gewicht	m DGR	t	2,3
Länge	L DGR	mm	3360
Breite	B DGR	mm	3069
Höhe	H DGR	mm	815
Radsatzabstand	X RS	mm	2600
Primärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2100
Sekundärfederabstand in y- Richtung	Y SF	mm	2000
Querpufferabstand in y- Richtung (Querkrafteinleitung)	Y QK-QP ein	mm	-
Radsatzanlenkung Mittenabstand in y- Richtung (Längskrafteinleitung)	Y LKein	mm	2144

Tabelle 21 Hauptdaten DGR Hochgeschwindigkeitszug 2

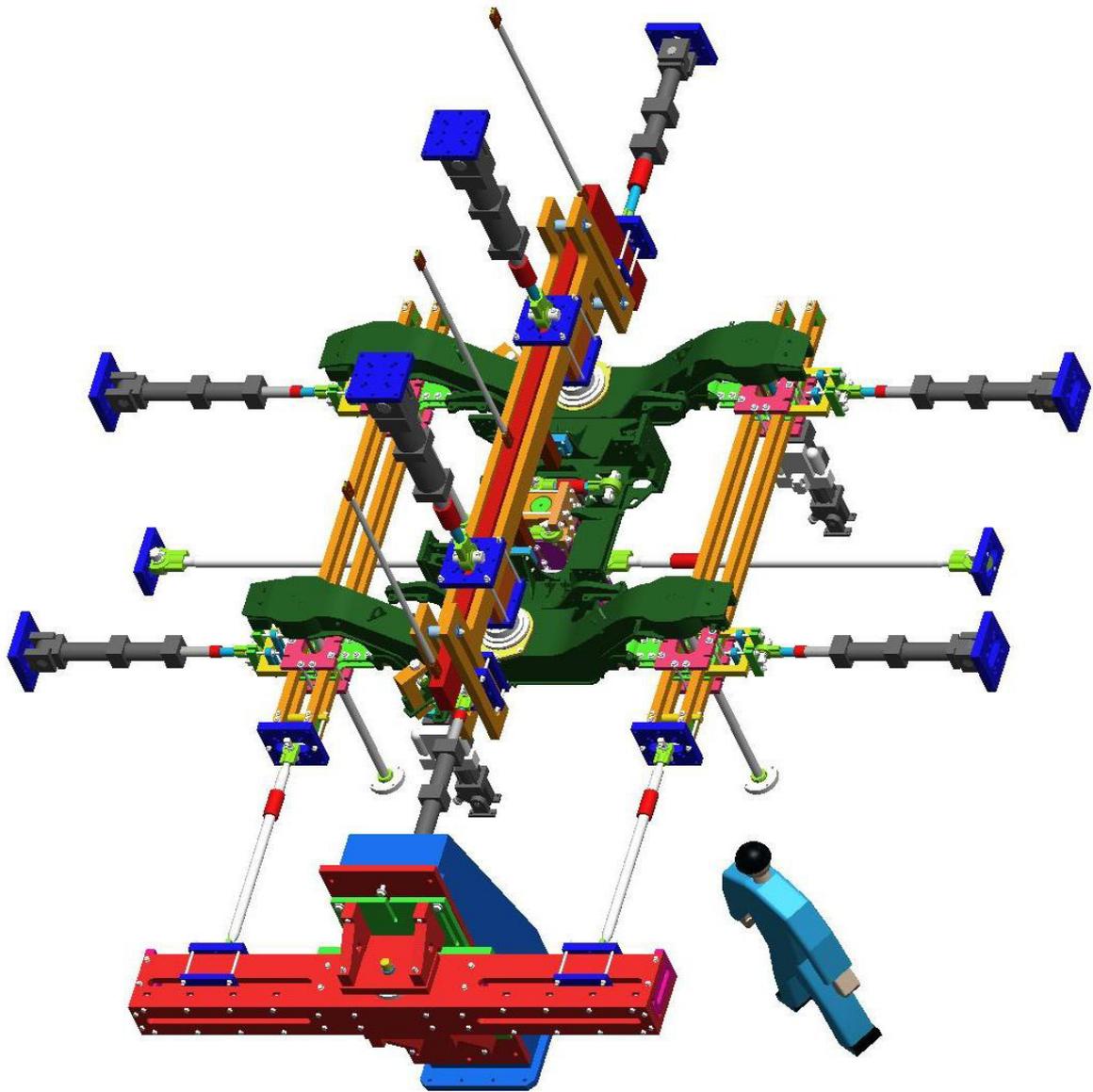


Abbildung 123 Prüfaufbau – TDGR Hochgeschwindigkeitszug (Breitspur 1520)

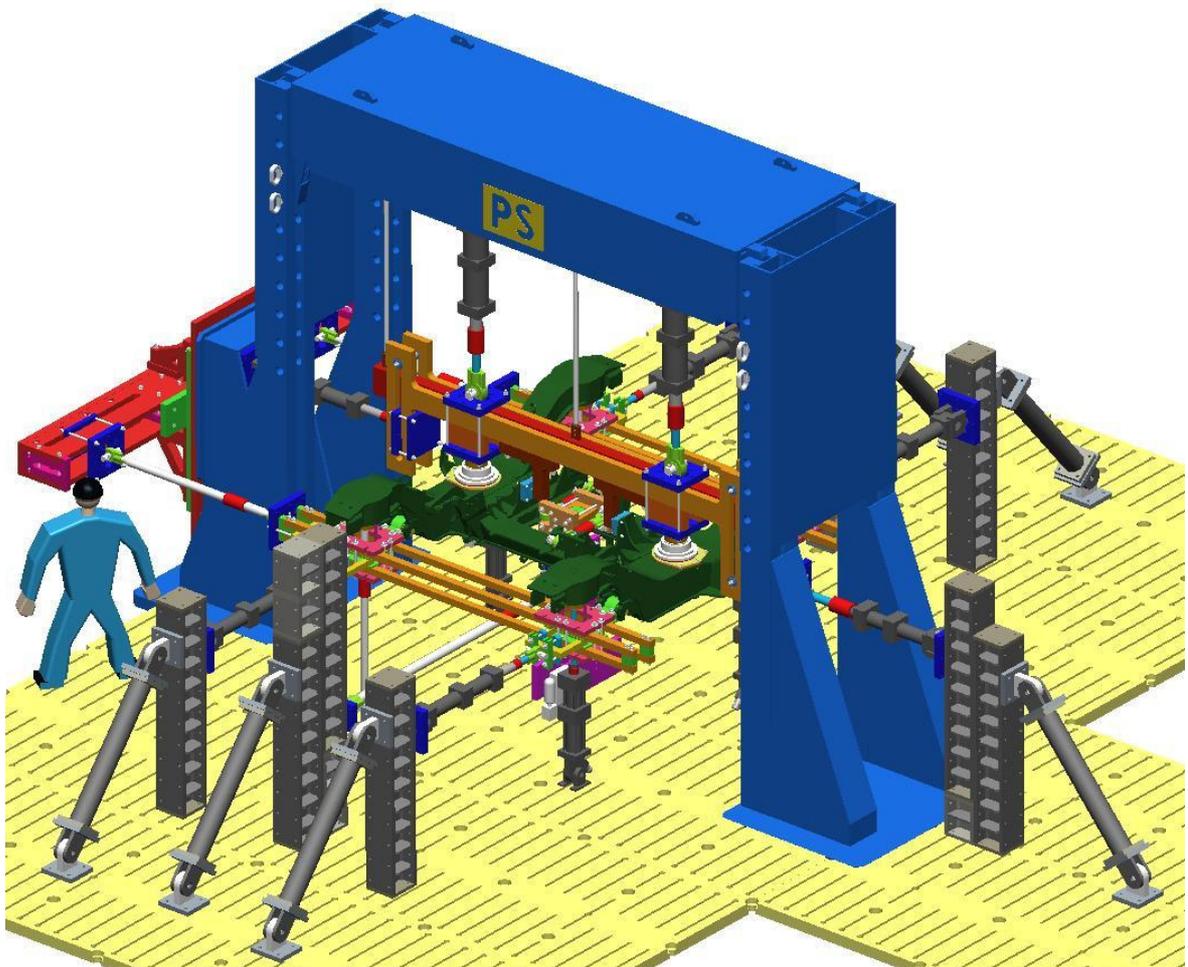


Abbildung 124 Prüfstand – TDGR Hochgeschwindigkeitszug (Breitspur 1520)

## 9 Sonderbeispiele von Prüfaufbauten

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Variabilität der modularen Vorrichtungen hinsichtlich Krafteinleitung und Kraftableitung am Beispiel der für die Metro 1 konzipierten Vorrichtungen.

Zusätzlich zur gestellten Aufgabe wurde die Verwendbarkeit für eine primärseitige Krafteinleitung von Vertikalkräften und Lateralkräften untersucht und überprüft.

### 9.1 Prüfaufbau Metro 1 mit Primärkrafteinleitung aufgeständert

Variante 1: Aktuatoren für Vertikalkrafteinleitung sind aufgeständert.

Beschreibung siehe 4.2.2.1.2 auf Seite 67

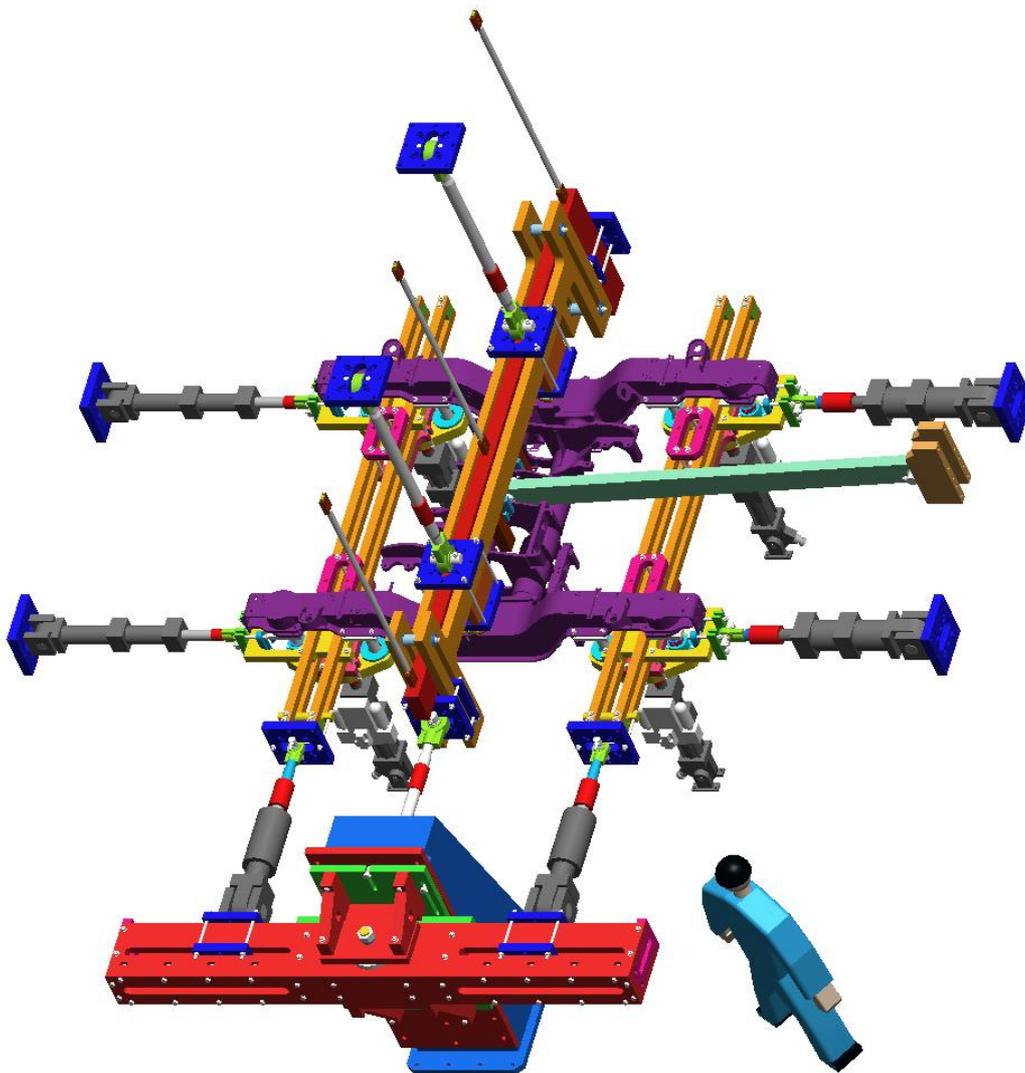


Abbildung 125 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung – TDGR Metro 1

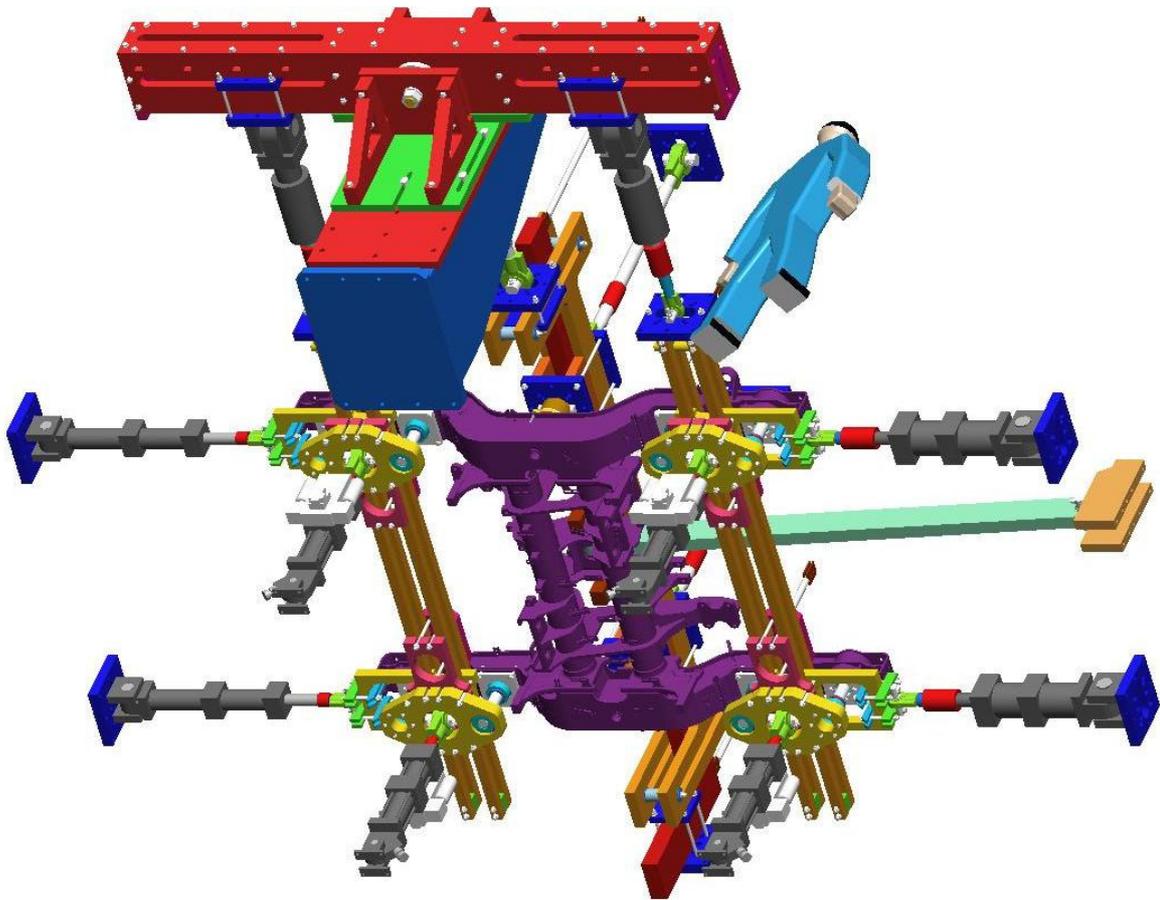


Abbildung 126 Prüfaufbau Primärkräfteinleitung Untersicht – TDGR Metro 1

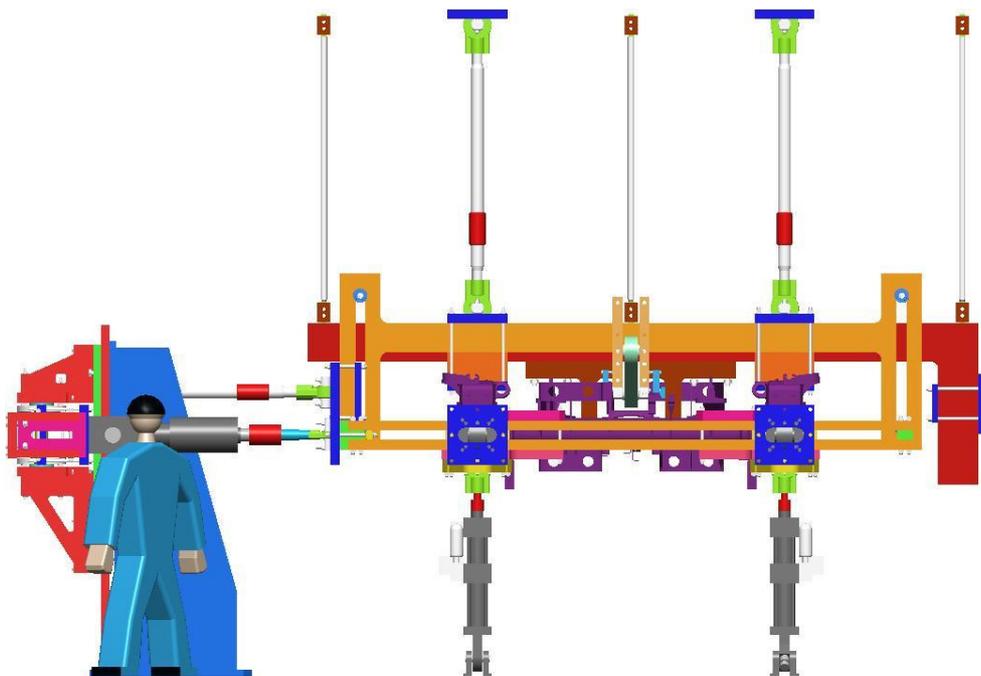


Abbildung 127 Prüfaufbau Primärkräfteinleitung Vorderansicht – TDGR Metro 1

## 9.2 Prüfaufbau Metro 1 mit Primärkrafteinleitung abgehängt

Variante 2: Aktuatoren für Vertikalkrafteinleitung sind am Prüfstandsüberbau abgehängt. Die Umsetzung dieser Variante bedingt einen komplexen Prüfstand mit einem entsprechenden Überbau. Mit dem SZA Portalprüfstand ist die Durchführung nur durch Erweiterung des Prüfstands möglich. Die konzipierten Vorrichtungsmodule aber ermöglichen mit wenigen Modifikationen die Realisierung. Siehe 4.2.2.1.2 auf Seite 67.

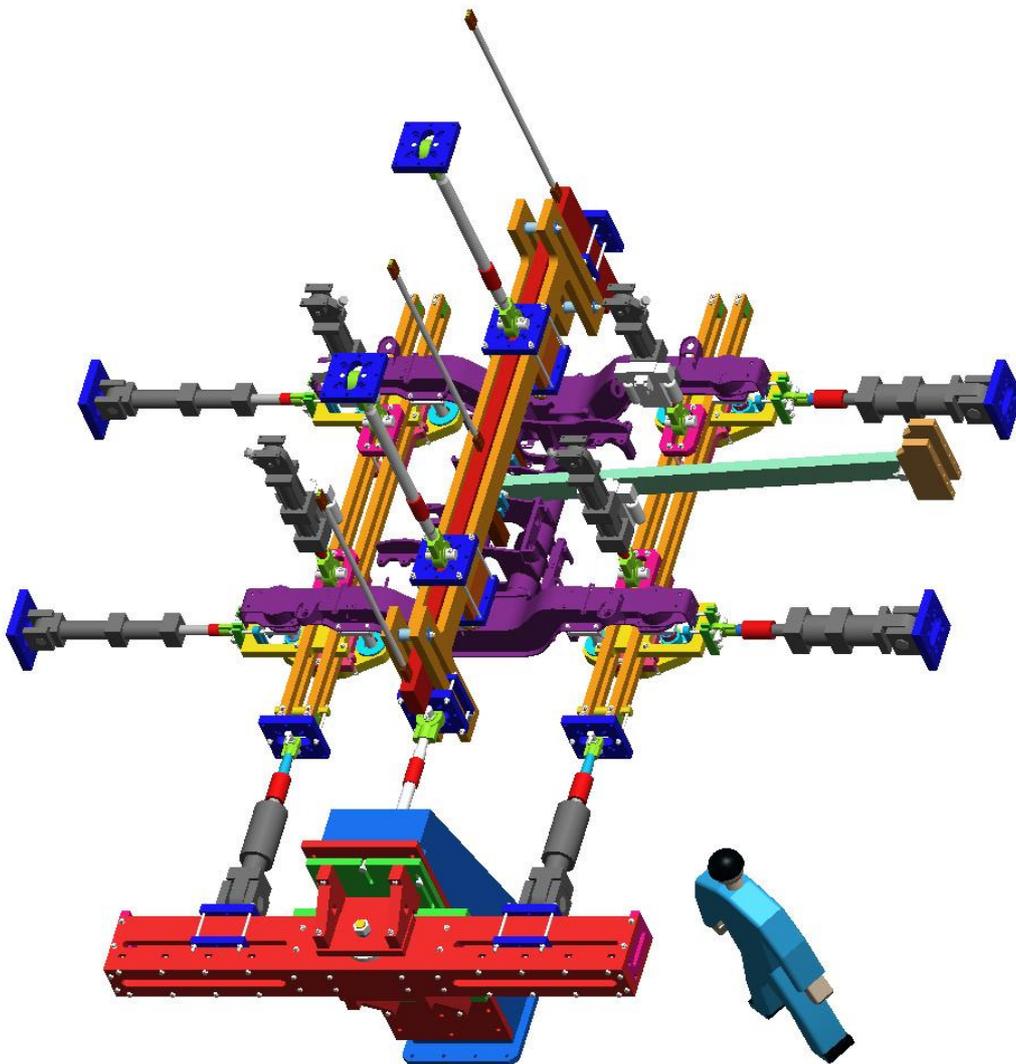


Abbildung 128 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1

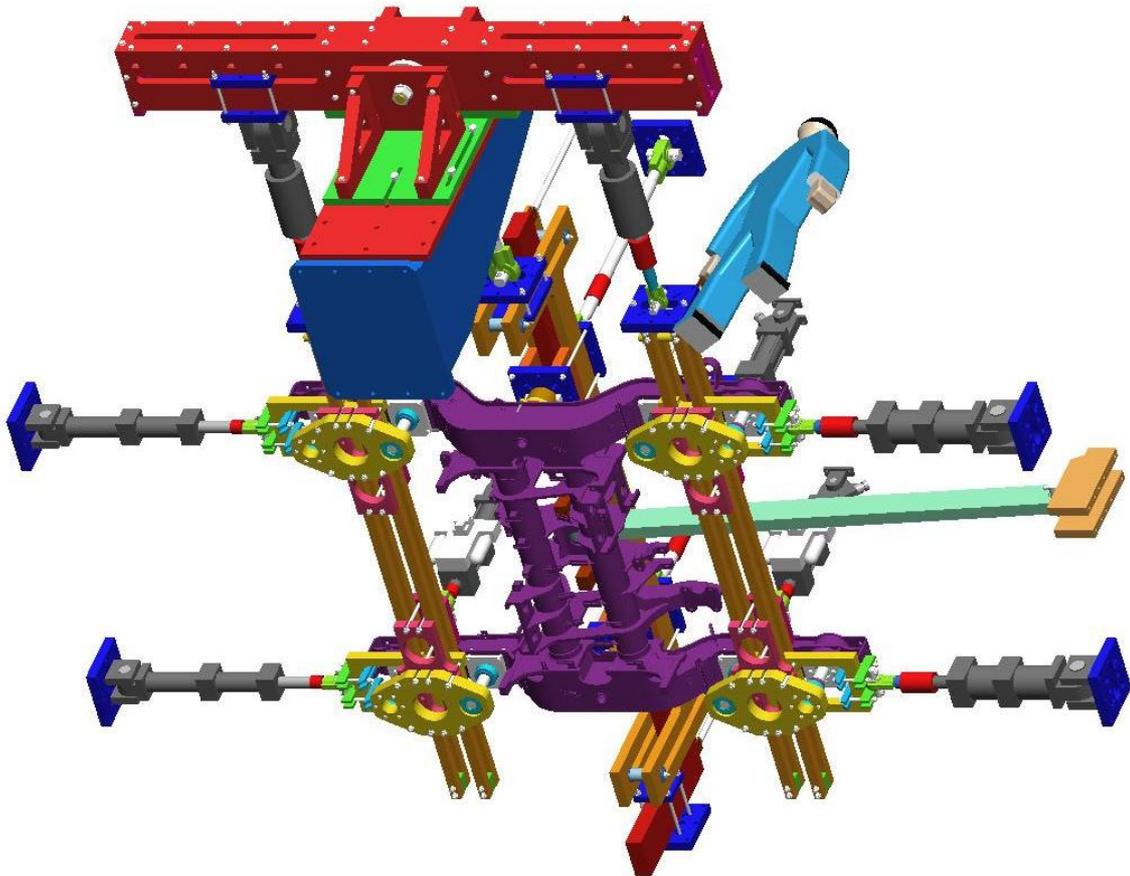


Abbildung 129 Prüfaufbau Primärkräfteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1

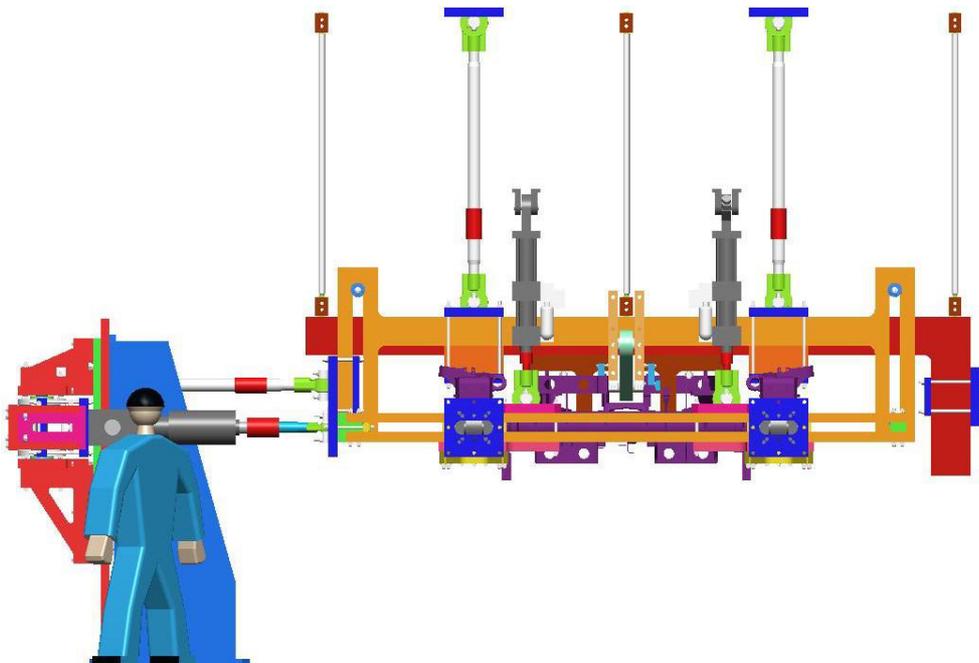


Abbildung 130 Prüfaufbau Primärkräfteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1

## 10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Um das Potential aus dem erstellten Konzept mit seinen Arbeitspaketen „Standardisierung“ und „Modularisierung“ für eine Reduktion der Kosten und der Durchlaufzeit bewerten zu können wird eine quantitative Betrachtung durchgeführt. Sie erfolgt über die in Abbildung 1 dargestellte Wertschöpfungskette durch eine Abschätzung der Wiederverwendbarkeit der fünf konzipierten Vorrichtungsmodule für unterschiedliche Drehgestellrahmenprüfungen.

Nachfolgende Abbildung 131 entspricht vollständig der Abbildung 1.

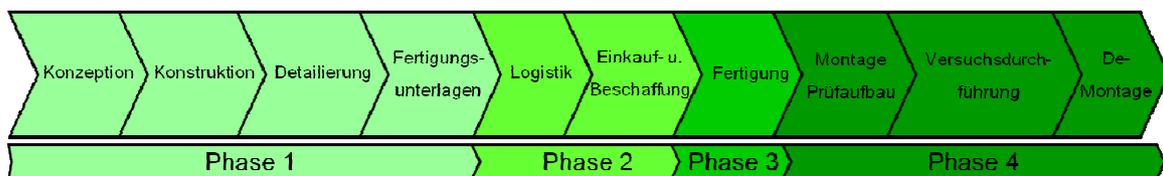


Abbildung 131 Wertschöpfungskette

Standardisierung:

Für das Konzept Standardisierung erfolgt keine Bewertung. Notwendige Tätigkeiten wie Positionieren der Querkraftabstützungseinheit bestehend aus Stütze und Querbalken, der Abstützung für die Querkrafteinleitung oder der Montage der Portalbrücke in Maximalhöhe sind nur einmal durchzuführen und brauchen bei Umsetzung weiterer Versuchsaufbauten nicht mehr erfolgen. Bei der erstmaligen Realisierung des Konzepts Standardisierung ergibt sich für die Phase 4 und dem ersten Prüfstands auf- und umbau keine nennenswerte Zeitreduktion. Die standardisierten Schnittstellen wirken erst bei anschließend durchzuführenden Versuchen an unterschiedlicher Rahmen. Im Vergleich mit dem IST Zustand wird eine Zeitersparnis von ca. 8 Arbeitsstunden erwartet.

Modularisierung:

Für die Abschätzung der Wiederverwendbarkeit der fünf Module wird angenommen, dass die konzipierten Schnittstellen bereits umgesetzt sind und das

betroffene Equipment entsprechend der Festlegungen positioniert ist. Dadurch erfolgt die Abschätzung der Vorrichtungswiederverwendbarkeit nur zwischen verschiedenen Rahmenversuchen.

Für die erfolgte Abschätzung wird eine weitere einschränkende Annahme getroffen. Die konzipierten Submodule wie z. B. Sekundärfederersatz, Radsatzanlenkung oder Primärfederersatz können vom Prinzip her für weitere Versuche übernommen und verwendet werden. Sie sind nur hinsichtlich geometrischer Erfordernisse wie z. B. Durchmesseränderung des Federersatzes oder Änderung der Schwingenlänge zu modifizieren. Andere, in dieser Arbeit nicht betrachtete Konstruktionsprinzipien wie beispielsweise eine Radsatzführung mit Federblattlenker senken in allen vier Wertschöpfungsphasen die Wiederverwendbarkeit und erhöhen die Aufwände.

Die betrachtete Wertschöpfungskette lässt sich in vier Phasen unterteilen, welche hinsichtlich des Kosten- und Zeitpotentials betrachtet werden.

## **10.1 Phase 1**

Diese Phase startet mit der Beauftragung des Festigkeitsversuchs beim Prüfinstitut durch den Hersteller. Auf Basis von herstellerspezifischen Angaben, zumeist in Form einer Spezifikation zum Festigkeitsversuch Drehgestellrahmen, erfolgt die Konzeption, Konstruktion, Detaillierung, Erstellung von Fertigungs- und Montageunterlagen und die Erstellung der Dokumentation zur Berichtslegung.

Bei Verfügbarkeit und Nutzung einer Vorrichtungsbibliothek mit einem, wie in dieser Arbeit festgelegten standardisierten Portalprüfstand und mit fünf modularisierten Hauptvorrichtungsmodule sowie zugehörigen Submodulen kann sehr schnell das Konzept des Prüfaufbaus relativ unabhängig von der Art des zu prüfenden Drehgestellrahmen erstellt und abgestimmt werden. Im Anschluss erfolgen die konstruktive Umsetzung des Konzepts und die Detaillierung der „virtuellen“ Vorrichtungen bzw. der Vorrichtungsmodule bestehend aus Haupt- und Submodulen. Hier müssen nur mehr einzelne Vorrichtungsteile und / oder Vorrichtunggruppen (Submodule) modifiziert und angepasst werden. Da die

Hauptmodule bereits standardisierte Schnittstellen aufweisen, fallen hier keine Aufwände an.

Die Ableitung von Fertigungs- und Montageunterlagen bzw. die Erstellung von Zusammenstellungszeichnungen zur Dokumentation lässt sich synergetisch durchführen.

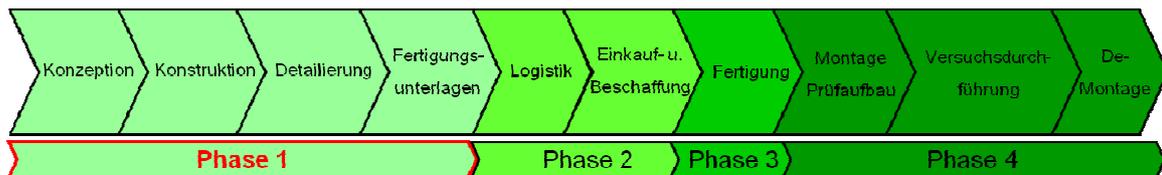


Abbildung 132 Wertschöpfungskette – Phase 1

Liegt die Wiederverwendbarkeit eines Moduls beispielsweise bei 90 % so müssen nur mehr 10 % der Vorrichtungsteile konstruiert und detailliert werden. Es müssen auch nur für diese Vorrichtungsteile Fertigungszeichnungen angefertigt werden. Vorrichtungen die zufolge Verschleißes nur zu ersetzen sind müssen nicht mehr konstruiert und detailliert werden. Die Fertigungsunterlagen sind ebenfalls nicht mehr zu erstellen.

In der Phase 1 lassen sich unter Verwendung einer Vorrichtungsbibliothek für einen für verschiedene Drehgestellrahmenkategorien „standardisierten und modularisierten“ Prüfstands Aufbau beträchtliche Reduktionen an Zeit und Kosten erzielen.

## 10.2 Phase 2

Phase 2 umfasst den Beschaffungs- und Einkaufsaufwand und die dafür erforderliche Logistik.

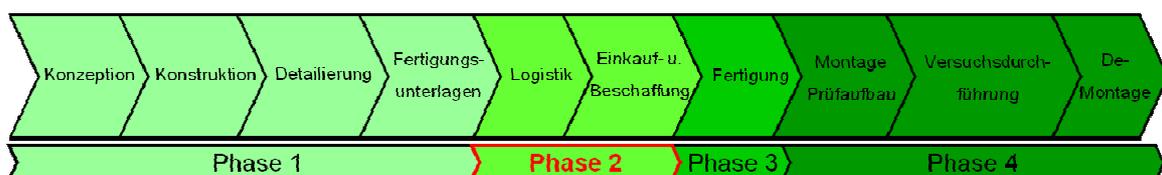


Abbildung 133 Wertschöpfungskette – Phase 2

Durch einen hohen Wiederverwendbarkeitsgrad reduziert sich der Bedarf und die Anzahl an neuen oder zu modifizierenden Vorrichtungen. In Summe reduziert sich dadurch auch der organisatorische Aufwand für Angebotseinholung, Vergleich und Bewertung, Bestellung und Verfolgung des Auftrags, sowie sonstiger zugehöriger Tätigkeiten.

Liegt die Wiederverwendbarkeit eines Moduls beispielsweise bei 90 % so müssen nur mehr 10 % an Vorrichtungen / Vorrichtungsteilen wiederbeschafft werden. Zu berücksichtigen sind Verschleißteile die bei Bedarf ebenfalls zu beschaffen sind.

### 10.3 Phase 3

Diese Phase umfasst die Fertigung der benötigten Vorrichtungen, wobei die Fertigung grundsätzlich intern oder extern erfolgen kann. Die Entscheidung darüber wird in der Phase 2 getroffen. Auch ist es möglich, dass bereits in Phase 1 eine Entscheidung darüber getroffen wird. Diese Entscheidung muss die internen Fertigungsmöglichkeiten bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigen.

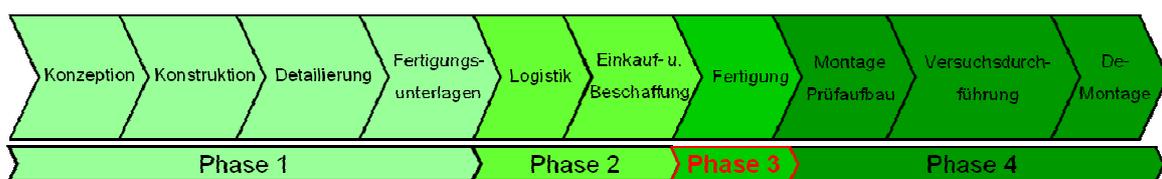


Abbildung 134 Wertschöpfungskette – Phase 3

Eine spezifische Aussage, ob eine Kostensenkung oder eine Zeitreduktion erzielbar ist, ist sehr stark von der zu fertigenden Vorrichtung bzw. dem Vorrichtungsteil selbst abhängig. Generell kann aber festgestellt werden, dass weniger zu beschaffende und zu fertigende Teile von den potentiellen Vorrichtungsgesamtkosten aus betrachtet weniger kosten werden und so Kostensenkungen bewirken.

## 10.4 Phase 4

Die Phase 4 entspricht im Wesentlichen den drei Abschnitten Aufbau, Durchführung und Abbau des Prüfaufbaus.

Der umfassendere Abschnitt „Versuchsdurchführung“ umfasst die Vorversuche, die Durchführung des statischen Versuchsprogramms und die Durchführung des Ermüdungsprogramms.

Die Zeit, welche für die gesamte Phase 4 benötigt wird, wird in dieser Arbeit als Versuchsdauer bezeichnet.

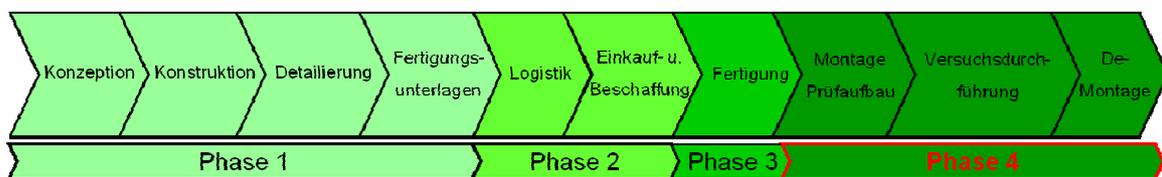


Abbildung 135 Wertschöpfungskette – Phase 4

Wie bereits erwähnt wird durch die Standardisierung eine Verkürzung der Aufbauzeit um 8 Arbeitsstunden erwartet, da einige Abstützungen am Spannfeld bzw. am Portal keine örtliche Veränderung mehr erfahren.

Die modularisierten Vorrichtungsmodule lassen aber eine Reduzierung der Versuchsdauer erwarten. Vor allem der mehrmalige, während des Ermüdungsprogramms zum Zwecke der Oberflächenrissprüfung, durchzuführende, Aus- und Einbau des Drehgestellrahmen wird durch die modularen Vorrichtungen und die standardisierten Schnittstellen erleichtert.

## 10.5 Betrachtung über die Kette

Durch Abschätzung der Wiederverwendbarkeit der fünf konzipierten Vorrichtungsmodule für Drehgestellrahmenprüfungen von Straßenbahn-, Metro-, Reisezugwagen-, Lokomotiv- und Hochgeschwindigkeitszugdrehgestellen wird der

Anteil an Vorrichtungsteilen des jeweiligen Vorrichtungsmoduls erhoben, welcher zu modifizieren oder neu zu schaffen ist.

Die Abschätzung erfolgt durch Befragung von fünf SZA Mitarbeitern, welche zum jeweiligen Vorrichtungsmodul eine Schätzung des prozentualen Anteils der Wiederverwendbarkeit für jede Phase abgaben. Die Wiederverwendbarkeiten der Module für die unterschiedlichen Drehgestellrahmenkategorien wurden in der Schätzung berücksichtigt. Diese Schätzwerte wurden summiert und durch Division durch die Anzahl der Befragten objektiviert.

	Wieder- verwend- barkeit [%]	Konzept, Konstruktion, Beschaffung, Fertigung [%]	Montage, Versuchs- durchführung [%]
Modul Sekundärfederersatz	90	10	5
Modul Radsatzersatz	64	36	5
Modul Querkrafteinleitung	85	15	5
Modul Querkraftableitung	97	3	3
Modul Längskraftableitung	41	59	0

Tabelle 22 Wiederverwendbarkeit

Die höchste Wiederverwendbarkeit von 97 % wird dem Modul Querkrafteinleitung zugeordnet. Dem Modul Sekundärfederersatz werden 90% , dem Modul Querkrafteinleitung 85 % zugesprochen. Das Modul Radsatzersatz ist mit 64 % bewertet, was auf die Komplexität und die große Vielfalt an unterschiedlich ausgeführten Radsatzanlenkungen und Primärfederungen hinweist.

Das Modul Längskraftableitung ist mit 41 % am niedrigsten bewertet, was ebenfalls auf die große Variantenvielfalt hinweist.

Damit wurden die Anteile jener Vorrichtungsteile die zu modifizieren sind oder neu geschaffen werden müssen für die Phase 1, 2 und 3 abgeschätzt.

Am wenigsten Aufwand in diesen drei Phasen weist das Modul Querkraftableitung mit 3 % aus, es folgt das Modul Sekundärfederersatz mit 10 % und das Modul

Querkrafteinleitung mit 15 %. Das Modul Radsatzersatz ist mit einem Vorrichtungsanteil von 36% Nichtwiederverwendbarkeit als kostenintensives Modul zu identifizieren. Gleiches gilt für das Modul Längskraftableitung, welches mit 59 % Anteil für seine Nichtverwendbarkeit hoch bewertet ist. Das bedeutet allerdings auch, dass immerhin 41 % dieser Modulteile wiederverwendet werden können.

Während die Bewertungen in den Phasen 1, 2 und 3 gleich sind, fällt auf, dass das Potential einer Reduktion der Versuchsdauer in der Phase 4 gering bewertet wird. Dies wird auf die Montage und den komplexen Prüfaufbau zurückgeführt, wo nur wenig Reduktionspotential erwartet wird.

## 11 Zusammenfassung

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist es die Kosten für Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen zu senken und die Durchlaufzeit zu verkürzen.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden zwei Teilaufgaben mit eigenen Aufgabenstellungen definiert:

1. Ausarbeitung eines Konzepts zur Standardisierung von Schnittstellen eines bestehenden Portalprüfstands des Festigkeitslabors der Schweißtechnischen Zentralanstalt SZA zu Vorrichtungsmodulen
2. Konzeptionelle Modularisierung von Vorrichtungen für Festigkeitsversuche an Drehgestellrahmen von Drehgestellen mit zwei Radsätzen in Betriebslage gemäß EN 13749.

Für beide Teilaufgaben wurden unterschiedliche Daten und Informationen erhoben. Diese bilden die Basis für die Festlegung des detaillierten Konzepts auf Basis der EN 13749. Das Konzept der ersten Teilaufgabe Standardisierung wird detailliert in neun Punkten beschrieben. Sie definieren die Schnittstellen zwischen Prüfstand und Vorrichtungsmodulen für Prüfungen in Betriebslage und die Aufprägung der Längs-, Quer- und sekundärseitigen Vertikalkräfte sowie der Kraftableitungen und -abstützungen. Es wurden die Prüfstandsschnittstellen für fünf Hauptmodule festgelegt.

Das Konzept der zweiten Teilaufgabe Modularisierung definiert folgende fünf Hauptmodule:

1. Modul Wagenkasten - Sekundärfederersatz
2. Modul Radsatzersatz
3. Modul Querkrafteinleitung
4. Modul Querkraftableitung
5. Modul Längskraftableitung

Weiters definiert es weitere zu berücksichtigende Randbedingungen wie die Verwendbarkeit für statische und dynamische Versuche, Variabilität für unterschiedliche Radsatzabstände, variable Spurweiten, realitätsnahe und verspannungsfreie Einspannung, transparenten Prüfaufbau ohne parasitäre Kraftflüsse und Kraftschlüsse sowie vollständige Aktions- und Reaktionskraftmessung.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden fünf Hauptmodule konzipiert. Die Vielfalt von unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien erforderte für einzelne Hauptmodule eine Unterteilung in Haupt – und Submodule:

Modul Wagenkasten – Sekundärfederersatz mit Submodulen:

- Luftfederersatz
- Schraubendruckfederersatz

Modul Radsatzersatz mit Submodulen

- Chevronfederersatz (Schub- Druck –Gummifeder)
- Zapfenführung (Flex Coil)
- Dreieckslenker / Schraubendruckfederersatz
- Schwingenführung / Schraubendruckfederersatz entkoppelt

Modul Längskraftableitung mit Submodulen:

- 1# Binärlenker
- 2# Binärlenker
- Leminiskatenersatz
- Tauchzapfenersatz

Ergebnisse:

Diese Arbeit zeigt, dass die konzipierten Haupt – und Submodule für Drehgestellrahmen von Drehgestellen für die Hauptbelastungen von fünf in der EN 13749 definierten Drehgestellkategorien verwendbar sind. Sie sind für Radsatzabstände von 1700 mm bis 3000 mm einsetzbar und ermöglichen damit Prüfungen von Straßenbahnrahmen, Metro-, Personenwagen- und Hochgeschwindigkeitsrahmen, wie auch Lokomotivrahmen. Mit den konzipierten Vorrichtungen sind Prüfungen von Schmal-, Normal- und Breitspurdrehgestellrahmen von 900mm bis 1676 mm möglich. Die Durchführung von statischen und Ermüdungsversuchen ist ohne Umbau möglich. Sämtliche eingeleiteten Aktionskräfte und sämtliche abgeleiteten Reaktionskräfte sind messbar. Der Aufbau ist durch vertikale, laterale und longitudinale Kraffteinleitungen und Kraftableitungen transparent gestaltet und ermöglicht es falsche oder parasitäre Kraftflüsse und Kraftschlüsse schnell zu erkennen. Der Prüfaufbau ermöglicht eine realitätsnahe Aufspannung, ohne dass Verformungen des Drehgestellrahmen behindert werden. Optional konzipierte Längskraffteinleitungen ermöglichen neben statischen Lozenginglastfällen auch variabelere Längskräfte in den Ermüdungsprogrammen.

Ermüdungsversuche können als Dauerfestigkeitsversuch, als Betriebsfestigkeits- oder als Nachfahrversuch durchgeführt werden.

Ergänzend zur konzeptionellen Betrachtung zeigt die einfach durchgeführte wirtschaftliche Betrachtung, dass durch eine entsprechende Standardisierung und Modularisierung vor allem die Wiederverwendbarkeit von Vorrichtungen erheblich gesteigert werden kann. Die konzipierten modularisierten Vorrichtungen erreichen 41%, 64% 85%, 90% und 97% Wiederverwendbarkeit.

Die erhöhte Wiederverwendbarkeit steigert auch die Reproduzierbarkeit und verbessert damit die Qualität der Versuche.

Die Arbeit zeigt, dass eine beträchtliche Kostensenkung für Vorrichtungen zur Aufprägung von Hauptlasten möglich ist. Die Kostensenkung und die Reduktion der Durchlaufzeit können vor allem in den Phasen 1, 2 und 3 erreicht werden. Für die Phase 4, die Versuchsdurchführung sind eher geringe Kosten- und Zeitreduktionen zu erwarten, allerdings wird in dieser Phase die Reproduzierbarkeit und die Qualität nachhaltig gesteigert.

## 12 Ausblick

Wie bereits in der Zusammenfassung beschrieben ist ein zum Teil beträchtliches Potential für eine Kostensenkung und eine Durchlaufzeitverkürzung gegeben.

Diese Aussage muss etwas präzisiert werden, da sich die Betrachtung auf die in der EN 13749 angegebenen Hauptbelastungen und die dafür konzipierten Vorrichtungsmodule bezieht.

### 1.) Erweiterung der Aufgabenstellung um Zusatzlasten:

Die in dieser Arbeit gestellte Aufgabe soll um die Modularisierung von Vorrichtungen für Zusatzlasten wie Motor- und Getriebersatzvorrichtungen, um Bremsersatz- und um Dämpfersatzvorrichtungen wie beispielsweise Schlingerdämpfersatzvorrichtungen erweitert werden. Dadurch können weitere Kostensenkungspotentiale generiert werden.

### 2.) Analyse zusätzlicher Standards:

Durch eine Analyse weiterer Standards wie GM/RT, AAR und GOST sollen deren Anforderungen erhoben werden und deren Umsetzbarkeit im Rahmen der bereits konzipierten Hauptmodule wie auch um die zu erweiternden Zusatzmodule analysiert werden. Damit kann die Variabilität des Prüfstands für Rahmenfestigkeitsversuche gesteigert werden.

### 3.) Erweiterung um eine Mehrkörpersimulation des Prüfstands:

Prüfstandsversuche werden immer komplexer und umfangreicher, sodass eine bessere Kenntnis des Aufbaus und seiner Wirkungen auf den Drehgestellrahmen notwendig wird. Durch eine Erweiterung um eine MKS des Prüfstands lassen sich im Vorfeld Fehler reduzieren und passendere und zeitgemäßere Prüfprogramme entwickeln.

## 13 Verzeichnis

### 13.1 Literaturverzeichnis

- Engeln, W. (2007): *Kostenorientierte Produktentwicklung*, Skriptum 2007/2008, Hochschule Pforzheim
- Gradl, K. (2013): *Validierung der Finite-Elemente Festigkeitsberechnung mit Daten aus dem Laborversuch*, TU Graz, Graz
- Haibach, E. (2006): *Betriebsfestigkeit* (3. Auflage). Springer-Verlag, Berlin
- Haigermoser, A. (2002): *Schienenfahrzeuge*, Skriptum, TU Graz, Ausgabe 07/2002, Graz
- Hanneforth, W., Fischer, W. (1986): *Laufwerke*, (1. Auflage). Transpress, Verlag für Verkehrswesen
- Janicki, J., Reinhard, H., Ruffer, M. (2013): *Schienenfahrzeugtechnik*, (3. Auflage). Bahn Fachverlag, Heidelberg
- Klein, B. (2013): *Leichtbau- Konstruktion*, (10. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden
- Morschek, L.A., Roller, J.J., (2013): *Stress testing of a new north american passenger locomotive truck frame in accordance with International Union of Railways (UIC) Code*, , JRC2013-2426, ASME, Knoxville, Tennessee, USA
- Rubel, M. (2010): Einfluss der Struktursteifigkeit und der Gestaltung von Drehgestellrahmen auf die lauftechnischen Eigenschaften von Schienenfahrzeugen, TU Dresden, Dresden

- Schabert, H.M., Moser, C. (2000): Nachweis der Betriebsfestigkeit von Drehgestellen und deren Bauteilen auf dem Schwingprüfstand – Gesamtwirkung und wirtschaftliche Aspekte, *ZEV + DET Glas. Ann 124* (2000)4
- Tskipurishvili, V.B. (1993): A method of fatigue testing welded and welded-cast bogie frames of locomotives, *Welding International*, 7:4, 308-310
- Ullrich, P., Wildhagen, M., (2006): *Fahrzeugversuch, Möglichkeiten der Betriebsfestigkeitserprobung von Gesamtfahrzeugen mit servohydraulischen Prüfsystemen*, expert verlag, Renningen
- Wöhler, A. (1871). Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl. *Zeitschrift für Bauwesen*, S. 74-106

### Broschüren:

- Alstom; (2002). *Structural Integrity Assessment*, Broschüre (CORPO/PROS/SIA/uke/TECHNO/11.00/UK/1306.)
- DB Systemtechnik; (2012). *Zulassungsmanagement, Prüfung und Zertifizierung*; Broschüre
- MTS Systems Corporation; (2010). *MTS Durability Testing Solutions*, Broschüre
- MTS Systems Corporation; (2004). *Model 329 Multiaxial Spindle- Coupled Road Simulators*, Broschüre
- Toyota Motorsport GmbH; *Full- Car Rad Simulator (MTS 329)*, Broschüre

### Normen, Regelwerke:

- TSI RST HS:2008-02-21 Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems
- TSI RST Loc&Pas:2011-04-26 Technische Spezifikation für die Interoperabilität - Teilsystem „Fahrzeuge“ des konventionellen Eisenbahnsystems „Lokomotiven und Fahrzeuge im Personenverkehr“
- DIN EN 14363:2005 Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche
- EN 15827:2011, Bahnanwendungen – Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke, Juni 2011
- EN 13749:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen
- GM/RT2100 Railway Group Standard 2100, Issue Four, December 2010
- UIC 615-4 Triebfahrzeuge – Drehgestelle und Laufwerke – Festigkeitsprüfung an Strukturen von Drehgestellrahmen
- UIC 515-4 Eisenbahnfahrzeuge für den Transport von Fahrgästen – Laufdrehgestelle – Laufwerke - Festigkeitsprüfung am Rahmen von Drehgestellen

- VDV 152, Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen nach BOStrab, 1992-09-01
- NB Zht CT 03-98, Version 2009. Elektrische Triebzüge, Sicherheitsnormen
- DIN EN ISO 9934-1:2001, Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, 2001
- DIN EN 1290:2002, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung von Schweißverbindungen; September 2002
- DIN EN 1321:1996, Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen. Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten, Dezember 1996

---

## 13.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auto- und Rahmenabmessungen, Massen .....	40
Tabelle 2 Federwege, Drehgestell- und Fahrzeugmassen .....	40
Tabelle 3 Federwege, Massen, Energieaufwand Fahrzeug / Drehgestell .....	42
Tabelle 4 Drehgestell und – rahmendaten für Straßenbahn und Reisezugwagen....	75
Tabelle 5 Drehgestell und – rahmendaten für Lokomotive .....	76
Tabelle 6 Drehgestell und – rahmendaten für Metro und Hochgeschwindigkeitszug	77
Tabelle 7 Hauptlasten - statisch und dynamisch .....	83
Tabelle 8 Zusatzlasten – statisch, statisch und dynamisch .....	83
Tabelle 9 Schnittstellen Prüfstand Aufriss .....	102
Tabelle 10 Abmessungen, Kräfte, Sekundärfederersatz .....	106
Tabelle 11 Abmessungen, Kräfte, Querkrafteinleitung .....	115
Tabelle 12 Abmessungen, Kräfte, Querkraftableitung .....	115
Tabelle 13 Hauptabmessungen Straßenbahn 1 .....	122
Tabelle 14 Hauptabmessungen Straßenbahn 2 .....	125
Tabelle 15 Hauptabmessungen Metro 1 .....	131
Tabelle 16 Hauptdaten DGR Metro 2 .....	136
Tabelle 17 Hauptdaten DGR Reisezugwagen 1 .....	139
Tabelle 18 Hauptdaten DGR Reisezugwagen 2 .....	144
Tabelle 19 Hauptdaten DGR Lokomotive 1 .....	147
Tabelle 20 Hauptdaten DGR Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	152
Tabelle 21 Hauptdaten DGR Hochgeschwindigkeitszug 2 .....	157
Tabelle 22 Wiederverwendbarkeit .....	169

### 13.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Wertschöpfungskette .....	3
Abbildung 2 Schema Versuchsaufbau für statische Versuche .....	10
Abbildung 3a,b a. unidirektionaler DMS und b. DMS Rosette (Quelle: Vishay) ..	11
Abbildung 4 Messstellenauswahl und Messstellenplan (Quelle: Siemens) .....	12
Abbildung 5 Schema Verwindungssteifigkeit, Vertikalbiegesteifigkeit, Querbiegesteifigkeit.....	14
Abbildung 6 Schema Ermüdungsprogramm EN13749 dreistufig.....	17
Abbildung 7 Schema Versuchsprogramm GOST einstufig .....	18
Abbildung 8 Vergleich Dehnungen gemessen – Dehnungen errechnet .....	20
Abbildung 9 Weltkarte - Gültigkeit von Standards .....	24
Abbildung 10 Lastannahmen Modell Drehgestellrahmen – Koppelstellen (Quelle: Siemens) .....	26
Abbildung 11 Portalprüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: SZA) .....	28
Abbildung 12 Prüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT).....	28
Abbildung 13 Durch einzelnen Unternehmensbereiche verursachte und festgelegte Herstellkosten eines Produktes – Durchschnittswerte für den Maschinenbau.....	31
Abbildung 14 Straßensimulator ( MTS 329) der Toyota Motorsport GmbH .....	33
Abbildung 15 Prüfstandsecke des Straßensimulator MTS 329 6DOF .....	34
Abbildung 16 Schema Schienenfahrzeugsimulator .....	37
Abbildung 17 Schema Drehgestellsimulator .....	39
Abbildung 18 Einachsiges Fahrwerk (Quelle: Wikipedia) / Dreiachsiges Fahrwerk (Quelle: Siemens).....	44
Abbildung 19 Losradlaufwerk Fahrwerk (TALGO).....	44
Abbildung 20 innengelagertes Drehgestell (Quelle: Bombardier).....	46
Abbildung 21 Verbreitung von Spurweiten (Quelle: Siemens).....	47
Abbildung 22 Triebdrehgestell - Hauptkomponenten (Quelle: Siemens).....	48
Abbildung 23 Laufdrehgestell - Hauptkomponenten (Quelle: Siemens) .....	49
Abbildung 24 Bauformen Rahmen (Quelle: Rubel).....	55
Abbildung 25 Prüfportal 1 Festigkeitslabor SZA .....	57
Abbildung 26 Prüfstand - Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: TU Graz).....	60

Abbildung 27a,b Prüfstand zur Drehgestellrahmenprüfung (Quelle: VNIIZhT / Wolfand) .....	61
Abbildung 28a,b Prüfstand (Quelle: a. CETEST / b. CAF).....	61
Abbildung 29a,b Prüfstand (Quelle: a. Sifang Rolling Stock Institute / b. Tabor) .....	61
Abbildung 30a,b Prüfstand (Quelle: a. Politecnico di Milano / b. IMA Dresden) .....	62
Abbildung 31a,b Prüfstand (Quelle: a. ECS / b. IFF Leipzig).....	62
Abbildung 32a,b Prüfstand (Quelle: a. und b. Mitsubishi Heavy Industries) .....	62
Abbildung 33a,b Prüfstand (Quelle: a. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation / b. DB Systemtechnik Minden) .....	63
Abbildung 34 Prüfstand (Quelle: Alstom).....	63
Abbildung 35a,b Prüfstand (Quelle: a. TU Graz / b. ASME) .....	64
Abbildung 36 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Hauptlasten mit Querkrafteinleitung zentral am Querpuffer.....	70
Abbildung 37 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Hauptlasten mit Querkrafteinleitung an den Radsatzersatzvorrichtungen .....	70
Abbildung 38 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung zentral am Querpuffer.....	72
Abbildung 39 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung an den Radsatzersatzvorrichtungen .....	72
Abbildung 40 Drehgestellrahmenprüfung in Rückenlage (Quelle: VNIIZhT / Wolfand) .....	73
Abbildung 41 Schema Versuchsaufbau Rückenlage für Hauptlasten.....	74
Abbildung 42 Schema Versuchsaufbau Rückenlage für Haupt- und Zusatzlasten...	74
Abbildung 43 Schema Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung zentral am Querpuffer.....	80
Abbildung 44 Legende Versuchsaufbau Betriebslage für Haupt- und Zusatzlasten mit Querkrafteinleitung zentral am Querpuffer.....	80
Abbildung 45 Sekundärfederersatz und Radsatzersatz - SZA.....	87
Abbildung 46 Prüfung mit Primärfeder (Quelle: DB Systemtechnik).....	88
Abbildung 47 Prüfaufbau Straßenbahn – SZA.....	89
Abbildung 48 Prüfaufbau Straßenbahn - SZA .....	89
Abbildung 49 Prüfaufbau BR189 (Quelle: Wolfand) .....	91
Abbildung 50 Detail BR 189 - Primärfederersatz mit Dreieckslenker.....	92

Abbildung 51 Prüfaufbau BR 189 Aufriss (Quelle: Wolfand).....	92
Abbildung 52 Prüfaufbau 1 (Quelle: TU Graz / Siemens).....	94
Abbildung 53 Prüfaufbau 2 (Quelle: TU Graz / Siemens).....	94
Abbildung 54 Prüfaufbau 3 (Quelle: Tabor / Siemens) .....	95
Abbildung 55 Rahmengrößen und Prüfstand Festigkeitslabor SZA .....	96
Abbildung 56 Belastungsanordnung für ein Drehgestell mit Langträgern.....	98
Abbildung 57 Schnittstellen Prüfstand Grundriss.....	101
Abbildung 58 Schnittstellen Prüfstand Aufriss .....	102
Abbildung 59 Sekundärfederung (Luftfederung, Schraubendruckfederung).....	104
Abbildung 60 Sekundärfederersatz (Luftfederung, Schraubendruckfederung).....	104
Abbildung 61 Wagenkasten- Sekundärfederersatz .....	105
Abbildung 62 Radsatzersatz Hauptmodul.....	107
Abbildung 63 Radsatzersatz – TDGR Straßenbahn 2 .....	107
Abbildung 64 Radsatzersatz – Möglichkeiten der Längskrafteinleitung.....	108
Abbildung 65 Radsatzersatz – DGR Lokomotive.....	108
Abbildung 66a, b Radsatzersatz – Untersicht DGR Straßenbahn 2 und DGR Metro 1 .....	109
Abbildung 67a,b Radsatzersatz – Untersicht DGR Lokomotive und DGR Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	110
Abbildung 68 Radsatzersatzsubmodul – Chevronfederung und Ersatzvorrichtung	111
Abbildung 69 Radsatzersatzsubmodul – Zapfenführung und Ersatzvorrichtung ....	112
Abbildung 70 Radsatzersatzsubmodul – Dreieckslenker / Schraubendruckfederung und Ersatzvorrichtung.....	112
Abbildung 71 Radsatzersatzsubmodul – Schwingenführung und Ersatzvorrichtung .....	113
Abbildung 72 Querkrafteinleitung .....	114
Abbildung 73 Querkraftableitung .....	116
Abbildung 74a, b Lemniskate, Lemniskatenersatz .....	117
Abbildung 75 Lemniskatenersatz zur Längskraftableitung uneingebaut.....	117
Abbildung 76 Längsanschlag.....	118
Abbildung 77a, b Tauchzapfenersatz - Längskraftableitung eingebaut / uneingebaut .....	119
Abbildung 78 Längskraftableitung mit einem Binärenlenker.....	120

Abbildung 79 Längskraftableitung mit einem Binärenker .....	120
Abbildung 80 Längskraftableitung mit zwei Binärenkern .....	121
Abbildung 81 Längskraftableitung mit zwei Binärenkern im eingebauten Zustand	121
Abbildung 82 Prüfaufbau – TDGR Straßenbahn 1 (innengelagert) .....	123
Abbildung 83 Prüfstand – TDGR Straßenbahn 1 .....	124
Abbildung 84 Prüfaufbau – TDGR Straßenbahn 2 .....	126
Abbildung 85 Prüfaufbau Untersicht – TDGR Straßenbahn 2 .....	127
Abbildung 86 Prüfaufbau Aufriss seitlich – TDGR Straßenbahn 2 .....	127
Abbildung 87 Prüfaufbau Aufriss vorn – TDGR Straßenbahn 2 .....	128
Abbildung 88 Prüfaufbau Grundriss – TDGR Straßenbahn 2 .....	128
Abbildung 89 Prüfaufbau Schrägriss 1 – TDGR Straßenbahn 2 .....	129
Abbildung 90 Chevronfederersatz – TDGR Straßenbahn 2 .....	129
Abbildung 91 Prüfstand – TDGR Straßenbahn 2 .....	130
Abbildung 92 Prüfstand Ansicht 2 – TDGR Straßenbahn 2 .....	130
Abbildung 93 Prüfaufbau – TDGR Metro 1 .....	132
Abbildung 94 Prüfaufbau Untersicht – TDGR Metro 1 .....	133
Abbildung 95 Prüfaufbau Aufriss seitlich – TDGR Metro 1 .....	133
Abbildung 96 Prüfaufbau Aufriss vorn – TDGR Metro 1 .....	134
Abbildung 97 Prüfaufbau Grundriss – TDGR Metro 1 .....	134
Abbildung 98 Prüfstand – TDGR Metro 1 .....	135
Abbildung 99 Prüfaufbau – TDGR Metro 2 .....	137
Abbildung 100 Prüfstand – TDGR Metro 2 .....	138
Abbildung 101 Prüfaufbau – LDGR Reisezugwagen 1 .....	140
Abbildung 102 Prüfaufbau Untersicht – Reisezugwagen 1 .....	141
Abbildung 103 Prüfaufbau Seitriss – Reisezugwagen 1 .....	141
Abbildung 104 Prüfaufbau Aufriss vorn – Reisezugwagen 1 .....	142
Abbildung 105 Prüfaufbau Grundriss – Reisezugwagen 1 .....	142
Abbildung 106 Prüfstand – Reisezugwagen 1 .....	143
Abbildung 107 Prüfstand – Reisezugwagen 1 .....	143
Abbildung 108 Prüfaufbau – JLDGR Reisezugwagen 2 .....	145
Abbildung 109 Prüfstand – JLDGR Reisezugwagen 2 .....	146
Abbildung 110 Prüfaufbau – TDGR Lokomotive 1 .....	148
Abbildung 111 Prüfaufbau Untersicht – Lokomotive 1 .....	149

Abbildung 112 Prüfaufbau Seittriss – Lokomotive 1 .....	149
Abbildung 113 Prüfaufbau Aufriss vorn – Lokomotive 1 .....	150
Abbildung 114 Prüfaufbau Grundriss – Lokomotive 1 .....	150
Abbildung 115 Prüfstand – Lokomotive 1 .....	151
Abbildung 116 Prüfaufbau – LDGR Hochgeschwindigkeitszug (Normalspur) .....	153
Abbildung 117 Prüfaufbau Untersicht – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	154
Abbildung 118 Prüfaufbau Seittriss – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	154
Abbildung 119 Prüfaufbau Grundriss – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	155
Abbildung 120 Prüfaufbau Grundriss – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	155
Abbildung 121 Prüfstand – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	156
Abbildung 122 Prüfstand – Hochgeschwindigkeitszug 1 .....	156
Abbildung 123 Prüfaufbau – TDGR Hochgeschwindigkeitszug (Breitspur 1520) ...	158
Abbildung 124 Prüfstand – TDGR Hochgeschwindigkeitszug (Breitspur 1520).....	159
Abbildung 125 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung – TDGR Metro 1 .....	160
Abbildung 126 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung Untersicht – TDGR Metro 1 .....	161
Abbildung 127 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung Vorderansicht – TDGR Metro 1 ..	161
Abbildung 128 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1 .....	162
Abbildung 129 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1 .....	163
Abbildung 130 Prüfaufbau Primärkrafteinleitung abgehängt – TDGR Metro 1 .....	163
Abbildung 131 Wertschöpfungskette .....	164
Abbildung 132 Wertschöpfungskette – Phase 1 .....	166
Abbildung 133 Wertschöpfungskette – Phase 2 .....	166
Abbildung 134 Wertschöpfungskette – Phase 3 .....	167
Abbildung 135 Wertschöpfungskette – Phase 4 .....	168