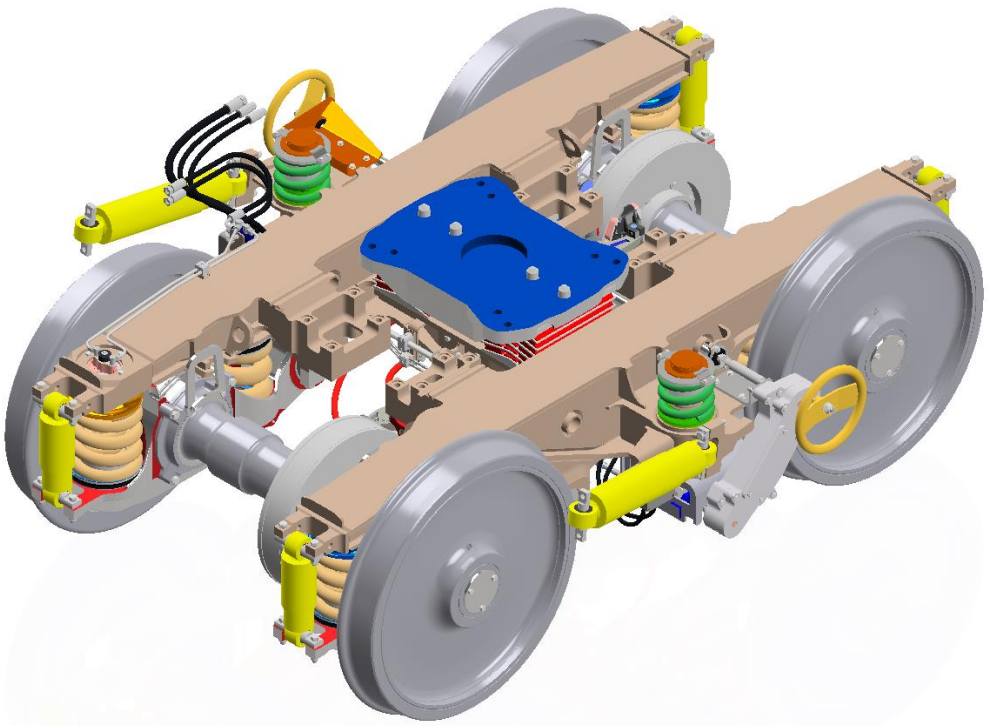
Engineering
tomorrow's
mobility

Drehgestellentwicklung Formica HP

Technischer Bericht

Bericht



17.164.00 – SWISS RAIL Solution AG
FORMICA 25

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
A. Burth	M. Schmid	T. Döring

Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-03-02079	04.03.2020	0.00	04.03.2020	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-03-02079		M. Schmid	T. Döring	04.03.2020
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung

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

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Inhalt

1 Dokumentenverzeichnis ... 5
1.1 Standards und Normen ... 5
1.2 PROSE Dokumentverzeichnis ... 5
2 Einleitung ... 8
2.1 Aufgabenstellung ... 8
2.2 Projektumfang und Ziele ... 9
2.3 Zulassungskonzept ... 10
3 Engineering ... 11
3.1 Beschreibung Konzept/Design Lösung ... 11
3.1.1 Radsatz ... 12
3.1.2 Bremskomponenten ... 14
3.1.3 Primärfederstufe ... 18
3.1.4 Sekundärfederstufe ... 20
3.1.5 Drehgestellrahmen ... 24
3.1.6 Heissläuferortung ... 24
3.1.7 Schnittstellen zum Wagenkasten ... 26
3.2 Lauftechnik ... 27
3.2.1 Laufstabilität ... 27
3.2.2 Dynamisches Fahrverhalten ... 28
3.2.3 Lauftechnisches Verschleissverhalten ... 33
3.2.4 Sicherheit gegen Entgleisen ... 36
3.2.5 Unsymmetrische Beladungen und Ausfallzustände ... 37
3.3 Festigkeit ... 37
3.3.1 Radsatz ... 37
3.3.2 Lastannahmen ... 38
3.3.3 Nachweiskonzept ... 38
3.3.4 Drehgestellrahmen ... 38
3.3.5 Achslagergehäuse ... 40
3.3.6 Mitnahmezapfen ... 41
3.3.7 Anbauteile ... 43
3.3.8 Schraubenverbindungen ... 45
3.4 Konzept zur Reduktion von Lärm und Verschleiss ... 46
3.5 Zielerreichung Spezifikation ... 48
3.6 Erkenntnisse Finale Designlösung/Berechnungen/Simulationen ... 50
4 Zulassung ... 51
4.1 Zulassungskonzept ... 51
4.1.1 Zielsetzung ... 51
4.1.2 Organisation ... 51
4.1.3 Containertragwagen CTW mit Formica HP Drehgestell ... 52
4.1.4 Zielsetzung für die Zulassung ... 52
4.1.5 Geplanter, provisorischer Meilensteinplan für die Zulassung ... 53
4.2 Messfahrten / Messprogram ... 53
4.2.1 Nachweisumfang der Messfahrten ... 53
4.2.2 Verwiegung ... 53
4.2.3 Fahrtechnische Messungen ... 54
4.2.4 Einschleifen ... 55

4.2.5 Lärmmessungen 55
4.2.6 Bremsmessungen 55
4.2.7 Thermische Prüfung der Bremse 55
4.2.8 Elektrischer Widerstand 56
4.2.9 Drehgestell Betriebslast 56

5 Herstellung 56

5.1 Kalkulation der Fertigungskosten 56
5.1.1 Kalkulation Prototypen 56
5.1.2 Kalkulation der Serienproduktion 57

5.2 Erkenntnisse Kostenkalkulation 58

5.3 Lieferanten 58
5.3.1 Radsatz 58
5.3.2 Radsatzlager 58
5.3.3 Bremsen 59
5.3.4 Gummi-Metall-Elemente 59
5.3.5 Schraubendruckfedern 60
5.3.6 Schwingungsdämpfer 60
5.3.7 Elektrische Energieversorgung 60
5.3.8 Zusatzausrüstung 61

5.1 Erkenntnisse/Probleme 62

5.2 Mögliche Einsparnisse/Kostenreduktion 62

6 LCC Übersicht 62

6.1 LCC Berechnung 62

6.2 LCC Modell 64

7 Fazit 66

1 Dokumentenverzeichnis

1.1 Standards und Normen

[1] *Alstom LHB GmbH: Schlussbericht Forschungsprojekt Low Emission Bogie EMBO, Salzgitter, März 2004.*

[2] *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 6. Auflage, Forschungskuratorium Maschinenbau, Frankfurt am Main, 2012.*

[3] *DVS 1612, Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweissverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau, Deutscher Verband für Schweissen und Verwandte Verfahren E.V., August 2014.*

[4] *EN 13749:2005, Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen, Europäisches Komitee für Normung, März 2011*

[5] *EN 12663-1:2010+A1; Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)*
Europäisches Komitee für Normung, Dezember 2014

[6] *EN ISO 3095 :2013, Akustik - Bahnanwendungen Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013*

[7] *EN 13979-1:2017-03 Entwurf: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Vollräder - Technische Zulassungsverfahren - Teil 1: Geschmiedete und gewalzte Räder; Deutsche und Französische Fassung prEN 13979-1:2017*

[8] *BMVI Forschungsprojekt: www.innovativer-Gueterwagen.de, 2017-2019 bei dem PROSE Typentests und Akustikmessungen auf der Geraden und im Bogen durchgeführt hat.*

[9] *DIN 7190-1:2017-02 Pressverbände - Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände*

[10] *DIN EN 13261:2011 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzwellen - Produktanforderungen; Deutsche Fassung EN 13261:2009+A1:2010*

[11] *BS 8535:2011-08-31, Railway applications. Wheelsets and bogies. Powered and non-powered axles with inboard bearings. Design method*

[12] *EN 13103-1:2019-02, Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Teil 1: Konstruktionsleitfaden für aussengelagerte Radsatzwellen; Deutsche Fassung EN 13103-1:2017*

1.2 PROSE Dokumentverzeichnis

Die folgenden Dokumente sind unter anderem im Rahmen der Drehgestellentwicklung vom FORMICA HP erstellt worden.

	PROSE Nr. / Version	*Bezeichnung*	*Bezeichnung 2*
	Übersichts-/ Montagezeichnungen		
[A]	*04-01-19736 0.00*	*Typenbild*	*Sgnss CTW 2004 / FORMICA HP*
[B]	*04-01-20231 0.00*	*Typenbild FORMICA HP*	*Drehgestell mit Handbremse*
[C]	*04-01-20237 0.00*	*Schnittstellen FORMICA HP*	*Mech., Elektr. und Pneum.*
[D]	*04-01-19894 0.00*	*DG mit Handbremse*	*FORMICA HP Prototyp*

[E]	*04-01-20042 0.00*	*DG ohne Handbremse*	*FORMICA HP Prototyp*
[F]	*04-01-20121 0.00*	*DG-Rahmen Bearbeitung*	
[G]	*04-01-19446 0.00*	*Radsatz komplett*	
[H]	*04-01-19908 0.00*	*Primärstufe*	
[I]	*04-01-19911 0.00*	*Sekundärstufe*	
[J]	*04-01-19910 0.00*	*Bremsausrüstung*	*Mit HB*
[K]	*04-01-20113 0.00*	*Bremsausrüstung*	*Ohne HB*
[L]	*04-01-20235 0.00*	*Feststellbremse kompl.*	
[M]	*04-01-19548 0.00*	*Elektrische Ausrüstung*	

Stückliste

[N]	*04-13-02481 0.00*	*FORMICA HP Strukturstückliste*	

Spezifikationen

[O]	*04-02-00639 0.00*	*Coil Springs*	
[P]	*04-02-00601 0.00*	*Achslenkerlager*	
[Q]	*04-02-00638 0.0000*	*Coating*	
[R]	*04-02-00607 0.00*	*Dämpfer*	
[S]	*04-02-00617 0.00*	*Longitudinal and lateral buffer*	
[T]	*04-02-00608 0.00*	*Shear-Pad*	
[U]	*04-02-00619 0.00*	*Swing Arm Axle Box Housing*	

Berechnungsberichte

[V]	*04-03-01716 1.00*	*Bericht zur lauftechnischen Simulation des Drehgestells unter einem 60'' Containertragwagen*	*FORMICA HP*
[W]	*04-12-01463 0.00*	*Lastannahmen*	*FORMICA HP*
[X]	*04-03-02031 0.00*	*Nachweiskonzept*	*FORMICA HP*
[Y]	*04-03-01891 0.00*	*Festigkeitsnachweis Drehgestellrahmen*	*FORMICA HP*
[Z]	*04-03-01926 0.00*	*Festigkeitsnachweis Achsschwinge*	*FORMICA HP*
[AA]	*04-03-01928 0.00*	*Festigkeitsnachweis Mitnahmezapfen*	*FORMICA HP*
[BB]	*04-03-02052 0.00*	*Festigkeitsnachweis Radsatzwelle*	*FORMICA HP*
[CC]	*04-03-02054 0.00*	*Nachweis Pressverband*	*FORMICA HP Rad/Welle*
[DD]	*04-03-01077 0.00*	*Festigkeitsnachweis Anbauteile*	*FORMICA HP*
[EE]	*04-03-02055 0.00*	*Nachweis Schraubenverbindungen*	*FORMICA HP*

Lieferantendokumente und Zeichnungen

Die folgenden Dokumente sind von Herstellern vorhanden.

	LIEFERANT	
	Sach-Nr.:	*Bezeichnung*
	LUCCHINI	
[FF]	*DP_QT231_1*	*Wheel*
[GG]	*DP_QT231_2*	*Wheel Partlist*
	NTN-SNR	
[HH]	*DC9733_A1_FC46048SP01*	*Tapered Bearing Unit*
	JUMO	
[II]	*90215099A01Z001C001*	*Radsatzfühler MS 1x Pt100, DIN B*
	GMT	
[JJ]	*AZ010477*	*Buchse / Axle Box Pivot Bush*
	TRELLEBORG	
[KK]	*17/2158*	*MOUNTING CHEVRON*
[LL]	*17/2039-00*	*APPLICATION DRAWING*
	GEREP	
[MM]	*63-01.55.1225*	*Primärdämpfer*
[NN]	*63-01.55.1220*	*Horizontaldämpfer*
[OO]	*63-01.55.1221*	*Schlingerdämpfer*
	KNORR-BREMSE	
[PP]	*TA48722_4 und TA48722_5*	*Stücklisten Bremssystem (Freigabe PROSE vom 2.9.19)*
[QQ]	*TA48722/11*	*Druckluftbremse:*
[RR]	*C211440*	*Kompaktbremszangeneinheit*
[SS]	*C211390*	*Kompaktbremszangeneinheit*
[TT]	*C199714/1*	*Bremsscheibe 590/325x110*
[UU]	*B28681/B*	*Wiegeventil*
[VV]	*C130641/21*	*Rollenhebelventil*
[WW]	*2C57907/125*	*Anschlussteile für Flexball Typ 125*

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Die Swiss Rail Solution AG, ein Gemeinschaftsunternehmen der PROSE AG und der JOSEF MEYER Rail AG, hat ein innovatives Drehgestell für Güterwagen als Ablösung für die heute im Einsatz stehenden Y25 Drehgestell Lösungen entwickelt.

Das Konzept des Formica HP (High Perfomance) beruht auf einem innengelagerten Drehgestellrahmen und bietet deutliche Verbesserungspotentiale hinsichtlich Lebensdauerkosten, Lärm, Laufeigenschaften, Verschleiss, Energie und Gewicht. Das Drehgestell Fomica HP ist für den Einsatz in Güterwagen-Ganzzügen mit einer Laufleistung ab 100'000 km pro Jahr ausgelegt.

Es konnten ökonomische und technologische Vorteile gegenüber einem Y25 Drehgestell in folgenden Bereichen realisiert werden:

Ökonomische Vorteile

Das Formica HP Drehgestell ist hauptsächlich für den kombinierten Verkehr mit hohen Laufleistungen und Blockzügen vorgesehen. In diesem Einsatzspektrum zeigen sich die konkreten Vorteile dieser innengelagerten Drehgestell-Entwicklung:

1. **Höhere Wirtschaftlichkeit** – Niedrige Lebensdauerkosten aufgrund tieferer Instandhaltungsaufwendungen bei höherer Laufleistung
2. **Reduzierte Lärmemission** - Für die Minimierung der Lärmemissionen ist das Drehgestell mit Scheibenbremsen auf der Welle zwischen den Lagern ausgestattet. Alle Körperschallbrücken sind mittels Gummi-Metallteilen schwingungstechnisch entkoppelt und eliminiert
3. **Maximale Gewichtsreduktion** - Die kürzeren Radsatzwellen sowie die innenliegenden Langträger ermöglichen eine sehr kompakte Bauweise. Durch die Minimierung des Tara-Gewichts wird die Nutzlast optimiert
4. **Verbesserte Laufeigenschaften** – Sowohl die geringere Eigenmasse als auch die radiale Einstellbarkeit der Radsätze erhöht die Laufstabilität bei gleichzeitiger Reduktion der Rad-Schiene-Kräfte.

Technologische Vorteile

Die Verwendung der Innenlagerung beim Formica HP stellt in der Güterwagenbranche eine Innovation dar. Die Anpassung der Y25 Schnittstelle ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Laufeigenschaften durch tiefere Rad-Schiene-Kräfte. Daraus resultieren eine geringere Beanspruchung des Oberbaus, sowie bessere Lebensdauerwerte der Radsätze. Die lauftechnischen Grenzwerte gemäss aktuellem Normenstand werden im Gegensatz zum Y25 Drehgestell eingehalten und somit eine Zulassung ermöglicht.

Das Drehgestell wurde als Plattformlösung entwickelt, bei der nach dem Baukastenprinzip verschiedene Konfigurationen möglich sind. Der Kunde kann entscheiden, welche Grundeigenschaften und Zusatzausrüstung er benötigt und welche für seine Anwendung den grössten Nutzen aufweisen:

1. **Variable Bremskonfiguration** – Kostenoptimierte Verwendung von einer oder zwei Bremsscheiben pro Radsatz, je nach Einsatzgebiet bzw. nationalen Zulassungen, nach TSI oder für TEN-Korridore
2. **Radiale Einstellbarkeit** - unterschiedliche Achslenkerlager; inkl. der Möglichkeit für die Ausrüstung mit hydraulischen Achslenkerlagern (HALL)

3. **Höhere Geschwindigkeiten** - Einsatz für bis zu 140 km/h (gegenüber der Version für 120 km/h ist hier die Ausrüstung mit Schlingerdämpfern notwendig)
4. **Variable Zusatzausrüstung** - verschiedene Bremsausrüstungen in unterschiedlicher Kombination: z.B. Feststellbremse mit Handrad, Gleitschutz, Wiegeventil, Bereitstellung der elektrischen Energie für Diagnose und Steuerung wie z.B. Heissläuferdetektor, Telematik

2.2 Projektumfang und Ziele

Das innengelagerte Formica HP Drehgestell verspricht durch die Möglichkeit der Berücksichtigung von leistungsfähigeren technologischen Neuerungen deutlich niedrigere Lebensdauerkosten über deutlich verlängerte Instandhaltungsintervalle und damit eine signifikant höhere Verfügbarkeit und Produktivität.

Nachfolgend sind die gesetzten Projektziele im Detail aufgelistet.

Drehgestell Formica HP	
Zielgewicht	< 4'650 kg
Radsatzlast	Tara 4t / Brutto 22.5t
Geschwindigkeit	Bis 120 km/h oder optional bis 140 km/h [1]
Laufleistung	min. 100'000 km / Jahr [2]
Rahmen	Konventionelle Stahlbauweise H-Rahmen aus geschweissten Blechen
Achsabstand	1.8 m
Schnittstellen	Angepasste Schnittstelle zum Wagenkasten
Achslager	Wälzlagereinheit, Detektion von Heissläufer mittels Sensorik
Radiale Einstellbarkeit	Mit normalem Achslenkerlager (ALL) oder hydraulischem Achslenkerlager (HALL)
Räder	920 mm Durchmesser mit geradem Steg
Radsatzwelle	Wellen mit grösstmöglicher Hohlbohrung
Bremsen	- Wellenscheibenbremse zwischen den Rädern - Verwendung von Kompaktbremseinheiten - geeignete Materialpaarung vermeidet Bremsenquietschen - Optional: die Verwendung von nur einer Bremsscheibe je Radsatz
Gleitschutz	Elektronischer Gleitschutz auf allen Achsen
Elektr. Energie	Achsgenerator für die Energieerzeugung
Zusatz / Optionen	Sensorik für verschleissabhängige Wartung & Flachstellendetektion
Kosten je DG	max. 38‘000 EUR in Serienproduktion (300 Stk. p.a.)

Tabelle 1: Zielsetzung für neues Formica HP

[1] Je nach Kombination sind Schlingerdämpfer nötig
[2] Basis für LCC-Kalkulation

2.3 Zulassungskonzept

Das für dieses Projekt erstellte Zulassungskonzept beruht auf den innovativen Besonderheiten des innengelagerten Drehgestells. Bisher beinhaltet die TSI WAG (relevant für die Zulassung von Güterwagen in Europa) nur aussengelagerte Drehgestelle.

Das Zulassungskonzept sieht vor, das Formica HP Drehgestell als Interoperabilitätskomponente (und wenn möglich als „bewährtes Laufwerk“) zu bescheinigen und damit die einfache Zulassung eines TSI_WAG-kompatiblen Güterwagens zu ermöglichen. Die Zulassung kann in drei Schritten erwirkt werden:

1. Betriebsbewilligung für Versuchsfahrten in der Schweiz vom BAV
2. Betriebsbewilligung für einen kommerziellen Versuchsbetrieb von Containertragwagen mit dem Formica HP in der Schweiz (ebenfalls BAV)
3. Nationale Zulassung eines TSI_WAG konformen Containertragwagens mit Formica HP in der Schweiz (eventuell zuerst als Zwischenschritt ohne Konformität zur TSI_WAG)

Die notwendigen Voraussetzungen für die EG-Bescheinigung des Drehgestells und der Radsätze als Interoperabilitätskomponenten im Sinne der TSI_WAG werden durch die entsprechenden Abklärungen und Verfahren mit der ERA (European Railway Authority) geschaffen. Die etablierte Zusammenarbeit mit dem BAV und der für die Erstellung der EG-Bescheinigungen vorgesehenen Benannten Stelle SCONRAIL sind für eine reibungslose Zulassung entscheidend.

Ein Testprogramm für Mess- und Zulassungsfahrten wurde erarbeitet und beinhaltet folgenden Umfang:

- Fahrtechnische Prüfungen mit Messradsätzen (EN 14363)
  (Sicherheit gegen Entgleisen, Streckenversuche)
- Fahrzeuglärm (TSI NOISE)
- Bremsleistung (UIC 544-1)
- Gleitschutzversuche (EN 15595)
- Elektrischer Widerstand (EN 50153)

Im Rahmen der Entwicklung ist auch ein Rahmenschwingversuch (nach EN 13749) vorgesehen.

3 Engineering

3.1 Beschreibung Konzept/Design Lösung

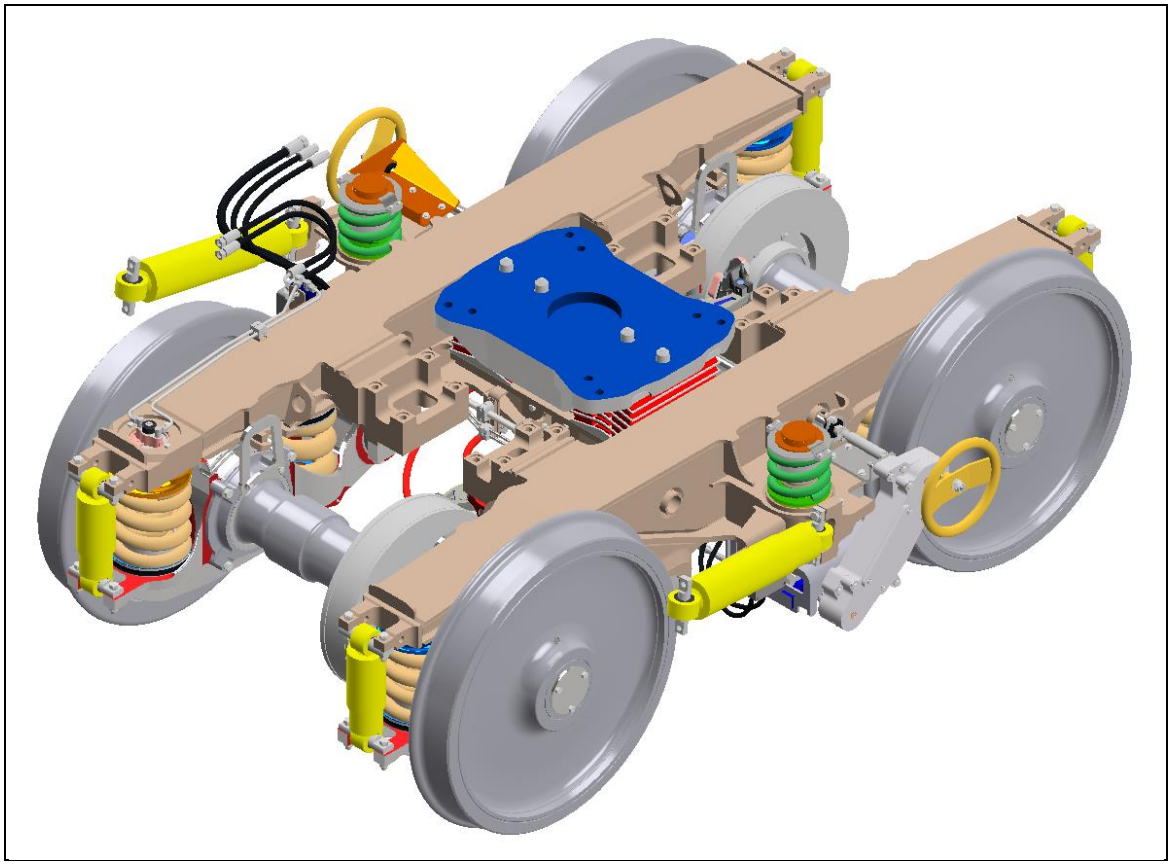


Abbildung 1: Komplettes Drehgestell

Das FORMICA HP Drehgestell ist innengelagert. Dadurch ist der Drehgestellrahmen erheblich schmäler, als bei einem aussengelagerten Drehgestell. Der Querträger des Rahmens ist sehr kurz. Es ist ein leichtes, kompaktes Drehgestell, welches den heutigen Anforderungen bezüglich Verschleiss und Lärm Rechnung trägt. Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass die Wartungsfreundlichkeit gegeben ist und möglichst bestehende Komponenten eingesetzt werden, um die Herstellkosten tief zu halten.

Bei den lauftechnischen Analysen werden erheblich bessere Resultate gegenüber konventionellen, aussengelagerten Konzepten erzielt. Insbesondere durch die sekundäre Gummischichtfeder konnte das dynamische Verhalten verbessert werden. Die Verwendung einer bewährten Komponente für dieses Bauteil reduziert das Entwicklungsrisiko erheblich. Die Primärstufe wird mit Achsschwingen realisiert. Die Achslenkerlager (ALL) sind Standard Elemente mit individuell definierter Quersteifigkeit und führen bereits zu deutlich verbesserten Laufeigenschaften im Vergleich zur starren Lenoir-Achsführung des Y25. Optional können auch hydraulische Achslenkerlager (HALL) integriert werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die dadurch erzielte Verbesserung der Laufeigenschaften nur in kleinen Bögen vorhanden ist, und somit die hohen Kosten schwer zu rechtfertigen sind.

Für die Scheibenbremse wurden innovative Kompaktbremszangen-Einheiten ausgewählt, welche erhebliche Vorteile betreffend Bremskraft, Bauraum und Unterhalt bieten. Je nach Anwendungsfall im Betrieb werden die Drehgestelle mit einer oder zwei Wellenbremsscheiben pro Achse ausgeführt. Durch Optimierung der Reibmaterialpaarung zwischen Bremsscheibe und Bremsbelag, sind die geforderten Bremswege bis 120 km/h mit einer Bremsscheibe pro Achse

möglich. Dies bedeutet eine spürbare Gewichtsreduktion und geringere Herstell- und Instandhaltungskosten. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass thermische Grenzen bestehen und deren Überschreitung aufgrund bestehender Regelungen zu betrieblichen Einschränkungen führen können. Dies können Geschwindigkeitsreduktionen nach einer Schnellbremsung oder reduzierte Achslasten bei längeren Gefällefahrten sein. Die Drehgestellkonfiguration mit zwei Bremsscheiben pro Achse ist für Geschwindigkeiten bis 140 km/h vorgesehen oder für betriebliche Lastfälle mit hoher thermischer Belastung (z.B. lange Gefällefahrten mit maximaler Achslast).

3.1.1 Radsatz

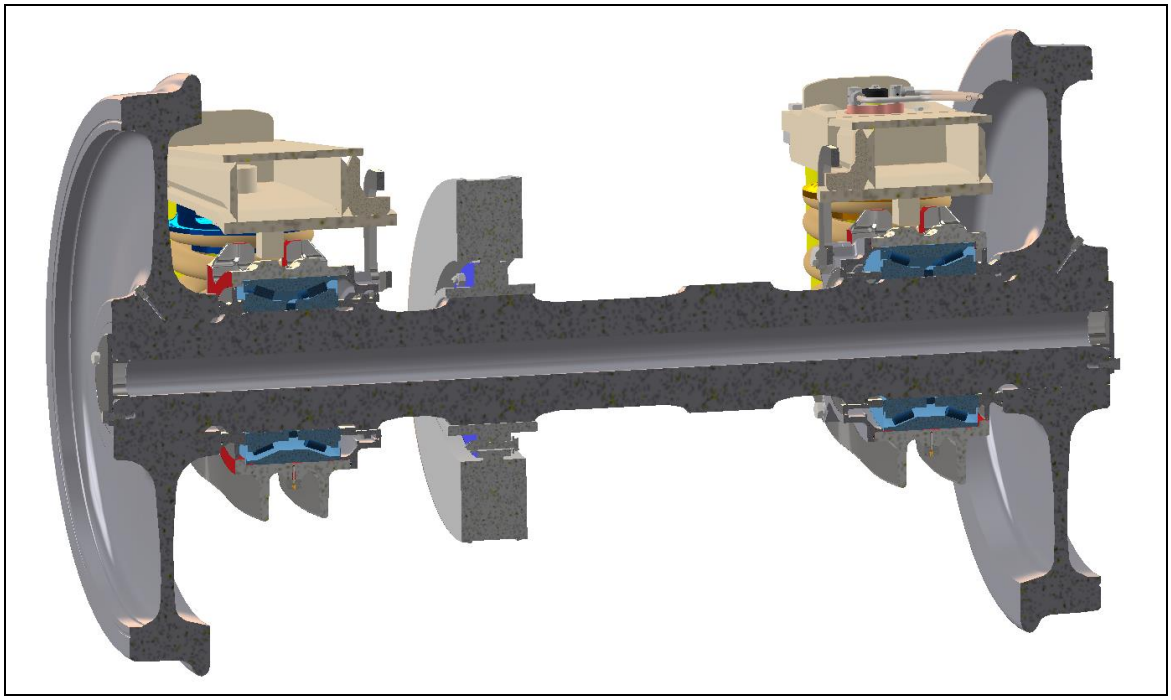


Abbildung 2: Radsatz komplett, Ausführung mit einer Wellenbremsscheibe

Die Verwendung von innengelagerten Radsätzen ist bei Güterwagen eine Innovation. Solche Radsätze sind bereits in einigen personenbefördernden Fahrzeugen im Einsatz (z.B. ICE-4) und werden immer häufiger bei neuen Fahrzeugentwicklungen eingesetzt.

Bei der Auslegung der Radsatzwelle zeigten sich Unstimmigkeiten bei der normativen Lage. Die EN- Norm für die Auslegung von Güterwagen-Radsätzen (EN 13103-1) sieht kein Konzept für Innenlagerung vor. In Grossbritannien sind innengelagerte Drehgestelle weit verbreitet. Die britische Norm BS 8535 ist derzeit die einzige Norm, welche ein umfassendes Konzept für die Berechnung von innengelagerten Radsatzwellen enthält. Diese Norm verwendet tiefere Materialgrenzwerte, als in der EN 13103-1 angewendet wird.

Die Wellenbremsscheiben (je nach vorgesehenem Einsatz eine oder zwei) sind zwischen den Radsatzlagern angeordnet. Die Räder sind auf die äusseren Enden der Radsatzwelle aufgepresst. Die Räder werden axial über einen Stützring und den Lagerinnenring sowie einen Labyrinthring gegen die Schulter der Radsatzwelle verspannt.

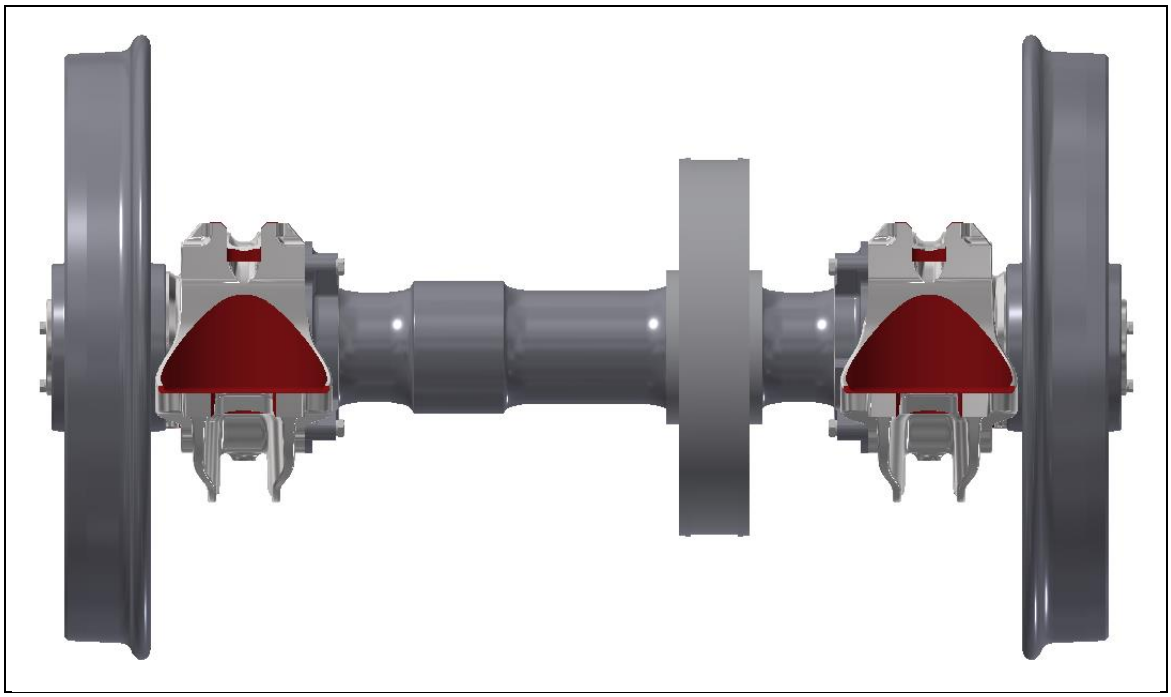


Abbildung 3: Radsatz mit Anordnung der Bremsscheiben

Die Bremsscheiben-Naben sind auf die Bremsnabensitze der Welle gepresst, die Bremsscheiben sind mit der Nabe verschraubt. Geteilte Bremsscheiben sind derzeit in den vorgesehenen Dimensionen nicht lieferbar. Diese würden einen Bremsscheiben- Wechsel ohne Raddemontage ermöglichen, jedoch wurden die Instandhaltungsintervalle so ausgelegt, dass der Wechsel der Bremsscheiben mit der Revision des Radsatzlagers und dem Tausch der Räder zusammen erfolgt.

Das Lager entspricht durch seine Dimensionen nicht mehr einem Standardlager. Die Dimensionen werden durch den strukturell notwendigen Lagersitz-Durchmesser der Radsatzwelle definiert. Das Lager wurde durch den Hersteller NTN-SNR ausgewählt und durch eine Lebensdauerberechnung bestätigt. Es handelt sich um eine abgedichtete Kegelrollenlager-Einheit (TBU). Dieses Lager wird bereits in anderen Schienenfahrzeugen verwendet. Der Durchmesser des Innenrings wurde etwas verkleinert, um ihn an den optimierten Lagersitz der Radsatzwelle anzupassen. Im Radsatzlagerdeckel und dem Stützring ist eine zusätzliche Abdichtung durch Labyrinthe vorhanden, welche das Eindringen von Feuchtigkeit verhindert. Das Lager muss für diese Anwendung bei einer Serienlieferung noch durch einen Leistungstest gemäss EN 12082 verifiziert werden.

Abbildung 4: Rad mit geradem Radsteg

Das Rad hat einen geraden Radsteg, wie er bei Rädern von modernen Reisezugwagen mit Scheibenbremsen z.B. IC2000, ICN und ICE zu finden ist. Im Rollvorgang kann dieses Rad durch die höhere vertikale Steifigkeit weniger zum Schwingen angeregt werden und strahlt damit auch deutlich weniger Schall ab als ein glockenförmig gewelltes Rad eines klotzgebremsten Y25-Drehgestells.

Eine zusätzliche körperschalldämpfende Beschichtung der Radscheibe ist bei diesem Rad möglich, da keine hohen Temperaturen beim Bremsvorgang auftreten. Für nachträgliche Radschallabsorber bzw. Ringelemente kann eine entsprechende Nut im Radkranz vorgesehen werden. Die Zulassungsversuche und Feststellung der Fahrzeugemissionen des neuen Drehgestells müssen zunächst am einfachen Rad ohne Absorber stattfinden.

Für das Rad ist ein Standardrad der Firma Lucchini vorgesehen, das schon für diverse Güterwagenprojekte zugelassen wurde. Es ist für eine Radsatzlast von 25 t ausgelegt. Die Radsatzwelle ist wegen der Innenlagerung keine Standardkomponente. Diese wurde speziell konstruiert. Die Berechnung und Auslegung wurde durch PROSE durchgeführt. Etablierte Radsatzhersteller können die Welle nach diesen Anforderungen herstellen.

3.1.2 Bremskomponenten

Die Evaluation der Bremsen hat sich als Herausforderung erwiesen. Hauptgründe dafür sind:

- Aus Gründen des deutlich besseren akustischen Verhaltens wurden Scheibenbremsen verwendet. Radscheibenbremsen wurden nicht in Betracht gezogen, da Wellenbremsscheiben günstiger sind und die Räder bei Radbremsscheiben aufwändiger und schwerer werden. Bei Innenlagerung sind die Platzverhältnisse zwischen den Radsatzlagern jedoch sehr begrenzt.

- Geschwindigkeiten bis 140 km/h wurden bei herkömmlichen Güterwagen bislang noch nicht angewendet.

- Die Bremskomponenten können nicht komplett im Drehgestell untergebracht und am ursprünglichen Luftanschluss des Wagenkastens angeschlossen werden. Es müssen auch wagenkastenseitig Komponenten angebracht bzw. ersetzt werden, z.B. Bremsventil, Zusatz-Luftbehälter, etc.

Das Konzept beinhaltet die Möglichkeit, eine oder zwei Bremsscheiben pro Radsatz vorzusehen. Dies ist davon abhängig, welche Zulassung erwirkt werden soll (z.B. kann die Anzahl der Bremsen bei Ausschluss der langen Rampenfahrten, welche in der TSI-WAG, Anhang C gefordert werden, reduziert werden).

Für das Formica HP Drehgestell wurden zunächst konventionelle Hängelaschen Bremszangen-einheiten untersucht. Dieses benötigen einen grossen Bauraum, wodurch sich erhebliche Freigängigkeitsprobleme zwischen den Bremszangen und den Langträgern ergaben.

Fa. Knorr hat innovative Kompaktbremszangen- Einheiten - speziell für den Güterwagenbereich - entwickelt. Diese Einheiten sind erheblich kompakter, so dass sie gut in den zur Verfügung stehenden Bauraum passen. Zudem sind sie leichter, und haben eine um etwa 20% höhere Bremszangenkraft, als die Hängelaschen- Einheiten. Da die Kompakteinheiten diese Vorteile bieten und nur ca. 10% teurer sind als die veralteten Hängelaschen Einheiten, wurden diese für das Formica HP Drehgestell gewählt.

Ein Drehgestell pro Fahrzeug ist mit einer Haltebremse ausgerüstet. Im betreffenden Drehgestell ist dazu die Installation einer Handbremszangeneinheit pro Radsatz (diagonal angeordnet) notwendig. Für das Anlegen und Lösen der Haltebremse sind Handräder beidseitig des Drehgestells vorhanden. Für die Betätigung der Haltebremse wird die Drehbewegung über einen Mechanismus aus Stangen, Getrieben und Flexball-Zügen in eine Zug- und Druckbewegung am Bremszylinder umgewandelt. Damit ist sichergestellt, dass die Handbremse mit den beiden Handrädern mit derselben Drehbewegung angelegt und gelöst werden kann.

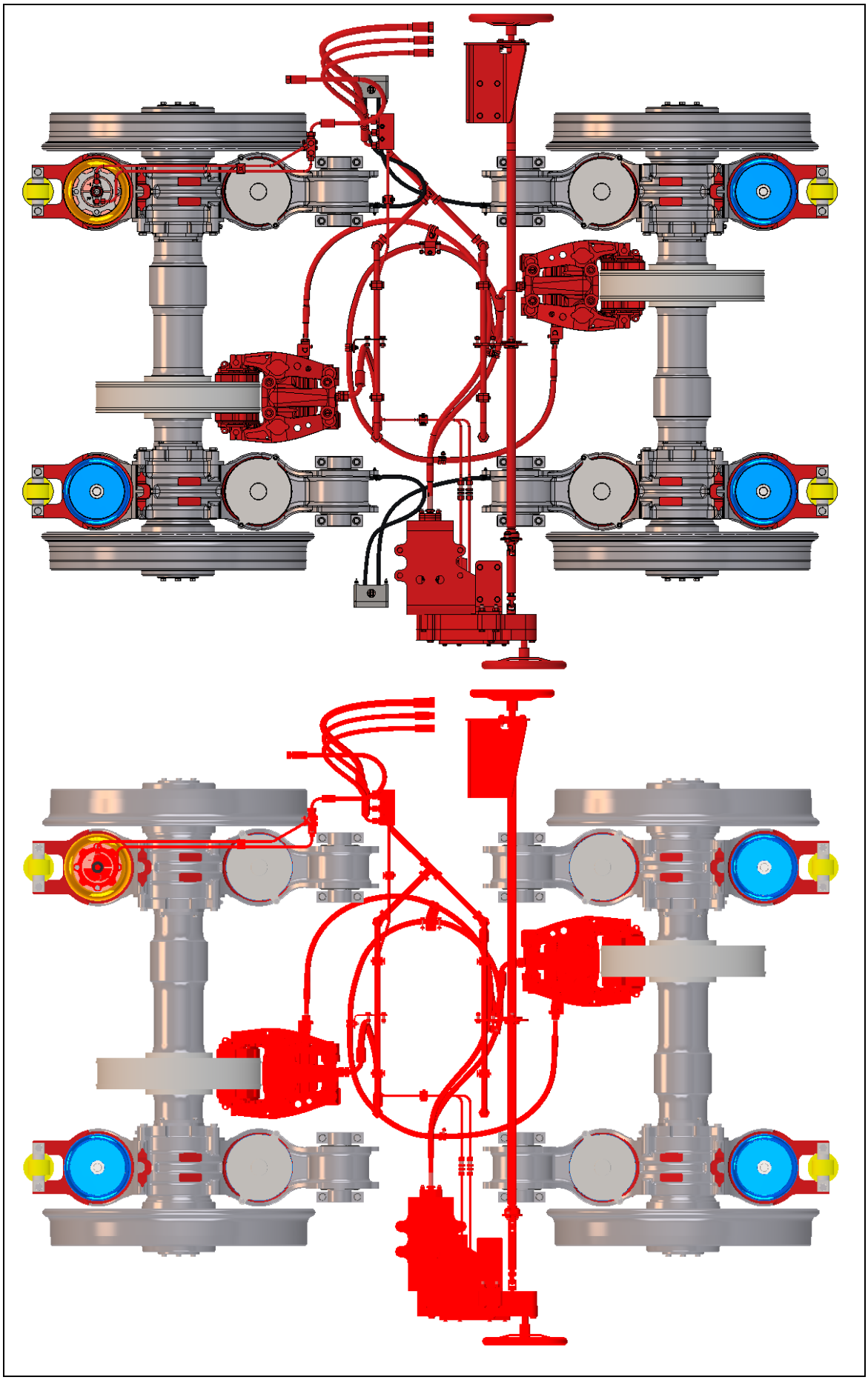


Abbildung 5 Bremskomponenten im Drehgestell inklusive Haltebremse für beide Radsätze

Infolge der grossen Auflastunterschiede ist eine lastabhängige Bremssteuerung notwendig. Diese wird über ein Wiegeventil in der Primärfederstufe gesteuert. Dieses ist oberhalb des äusseren Primärfedersatzes angeordnet. Die Einfederung des Lastventils wird in ein Drucksignal (T-Druck) umgewandelt und an das Steuerventil weitergeleitet, welches die Bremszylinder mit dem entsprechenden Bremszylinderdruck (C-Druck) versorgt. Beim Formica HP Drehgestell sind die Kräfte auf das Wiegeventil infolge der Innenlagerung höher, als bei einem aussengelagerten Drehgestell. Ein zunächst geplantes, weggesteuertes Ventil musste infolge Nichtlieferbarkeit verworfen werden. Zur Absicherung der Dauerfestigkeit des Wiegeventils ist die Messung und Auswertung eines Lastkollektivs vorgesehen.

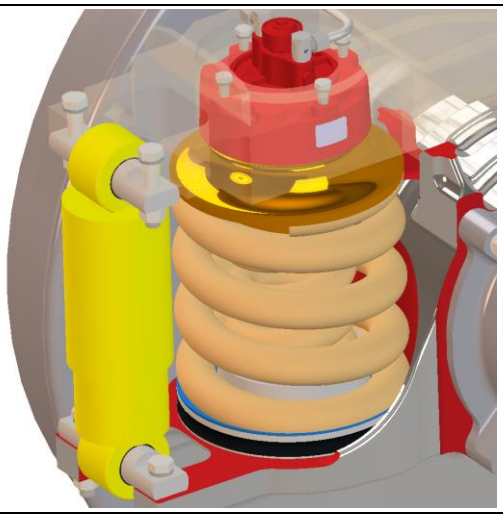


Abbildung 6: Lastventil (rot)

Das Formica HP Drehgestell ist optional für die Ausrüstung mit Gleitschutz ausgerüstet, obwohl dieser infolge der geringen Reibwertausnutzung prinzipiell nicht erforderlich wäre. Für den Gleitschutz ist der Einbau eines Sensors pro Radsatz vorgesehen. Dieser erhält Impulse von einem Polrad, welches neben dem Radsatzlager (Seite Richtung Bremsscheibe) angeordnet ist, siehe Abbildung 7. Der Sensor wird in den Radsatzlagerdeckel eingeschraubt. Das für den Gleitschutz erforderliche Gleitschutzventil und der Gleitschutzrechner sind im Wagenkasten untergebracht.

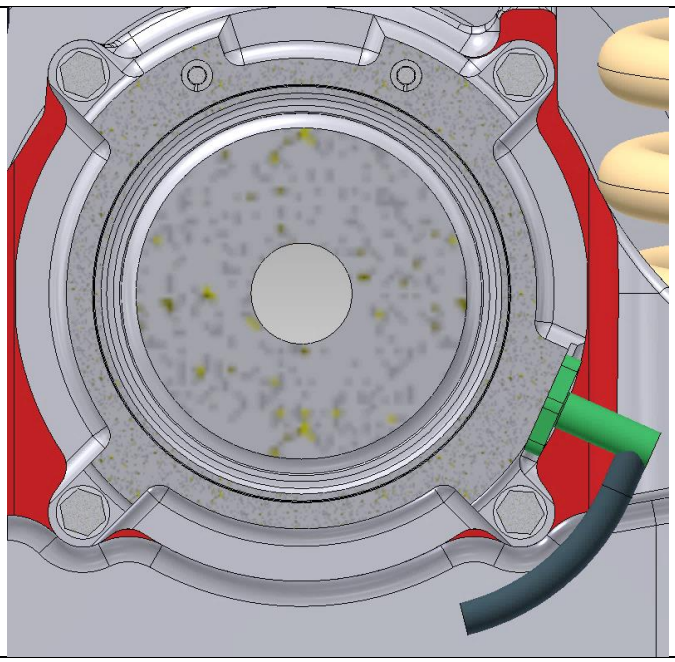


Abbildung 7. Anordnung Gleitschutzsensor

3.1.3 Primärfederstufe

Die Primärfederstufe hat sich in der Konzeptphase des Formica HP als die grösste Herausforderung erwiesen.

Bei der Innenlagerung kommt es infolge des kleineren Querabstands der Primärfedern zu grösseren Vertikalkräften, da ein grösseres primäres Wanken auftritt, als bei aussengelagerten Drehgestellen. Zur Einhaltung des Lichtraumprofils muss deshalb das primäre Wanken begrenzt werden. Dazu ist es erforderlich, die Primärfedersteifigkeit mit zunehmender Auflast zu erhöhen. Gleichzeitig soll ein ausreichender Querweg ermöglicht werden.

Für die Federanordnung wurde eine Achsschwinge gewählt, bei der Schraubendruckfedern auf beiden Seiten des Radsatzlagers angeordnet sind. Je nach Auflast kommen zwischen dem leeren und max. beladenen Zustand unterschiedlich viele Federn in den Eingriff. Im Tara-Zustand ist nur die äussere Feder des Federsatzes im Eingriff (die innere Feder ist etwas kürzer und hat einen Abstand zur Auflage). Bei höherer Auflast kommt dann zunächst die grosse Feder zwischen Radsatzlager und Achslenkerlager in Eingriff, und dann die innere Feder des Federsatzes, siehe Abbildung 9. Dadurch wird eine progressive Steifigkeitskennlinie der Primärfederstufe erreicht. Wegen der Mehrstufigkeit hat sich die Auslegung der Schraubendruckfedern als grosse Herausforderung erwiesen. Die Herstellbarkeit der Federn wurde von den Herstellern bestätigt. Damit der Querweg gegeben ist, sind Gummi - Schichtfedern oberhalb der Schraubendruckfedern angeordnet. Diese haben den positiven Nebeneffekt, dass der Radsatz bezüglich Körperschall vom Drehgestell-Rahmen entkoppelt wird.

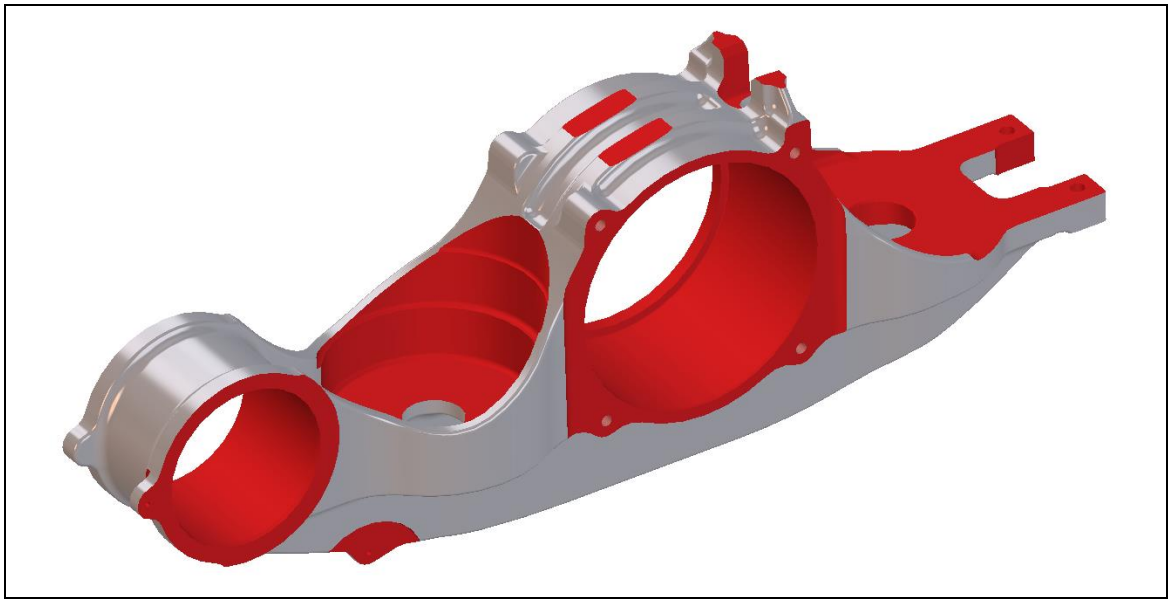


Abbildung 8: Radsatzlager- Gehäuse als Achsschwinge

Die Schwinge wird mittels einem Achslenkerlager (ALL) am Rahmen befestigt. Dieses hat mit d=190 mm eine Standarddimension und ist als Serienteil bei den Herstellern erhältlich. Das Lager hat die gleichen Dimensionen wie ein hydraulisches Achslenkerlager (HALL). Dieses kann somit alternativ eingebaut werden.

Das Radsatzlagergehäuse nimmt das Radsatzlager auf und beinhaltet die Aufnahmen für die Federpakete sowie für das Achslenkerlager. Die primäre Abhebesicherung und die Verschraubung für den primären Vertikaldämpfer sowie die Schnittstelle zum Lagerdeckel sind in der Komponente integriert. Am Lagerdeckel sind die Impulsgeber für den optionalen Gleitschutz integriert.

Der primäre Vertikaldämpfer ist am äusseren Ende der Schwinge angeschraubt und hat durch den grossen Hebelarm eine ideale Wirkung. Der Dämpfer ist zweistufig ausgeführt und je nach Beladung (leer oder beladen) sind die Dämpfungskennwerte unterschiedlich.

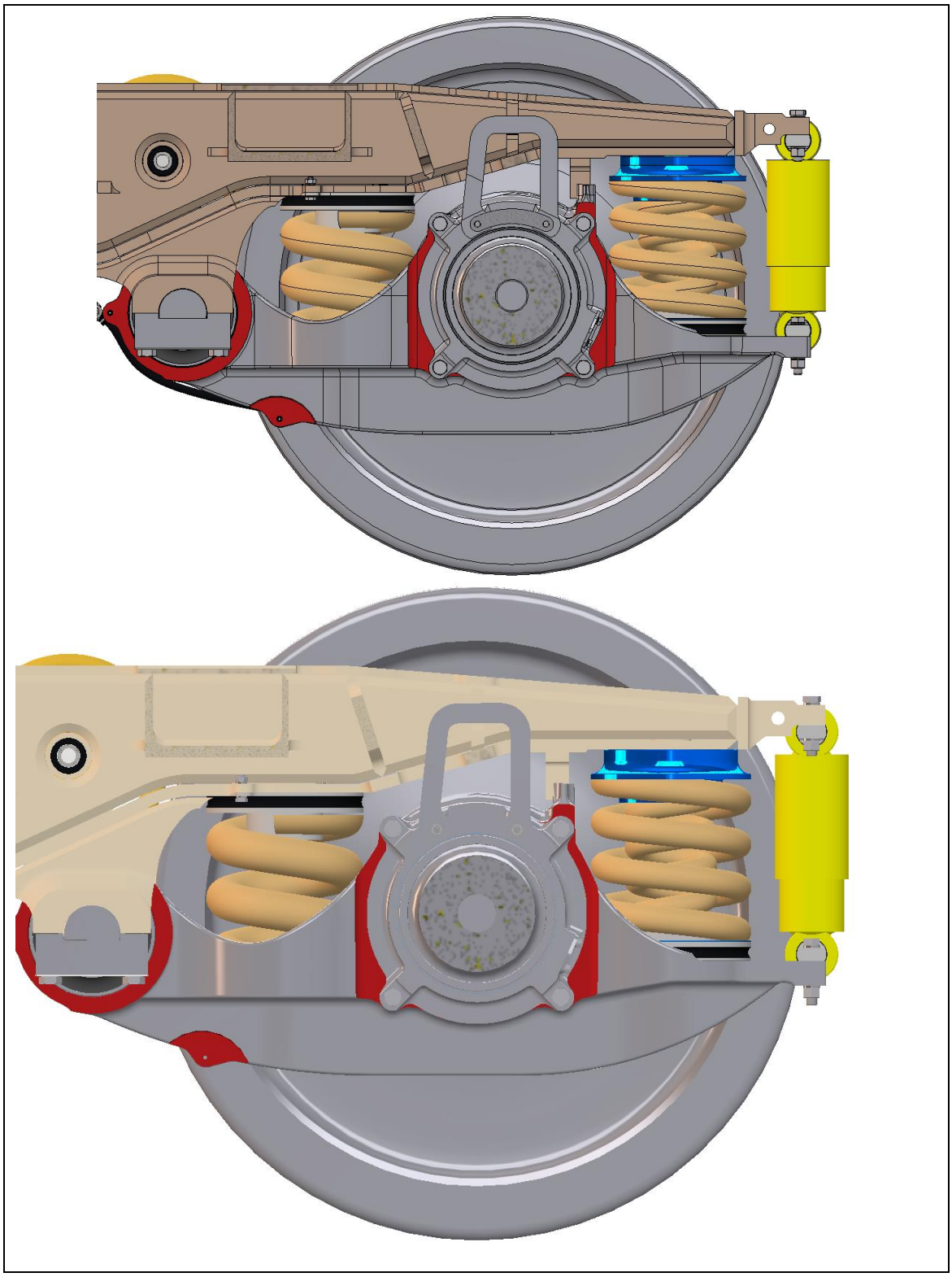


Abbildung 9: Komplette Primärfederstufe

3.1.4 Sekundärfederstufe

Die Sekundärstufe wurde gegenüber der ursprünglichen Annahme verändert und entspricht nicht mehr der Schnittstelle zum Y25 und gemäss der UIC 510-1 Norm. Dies weil die Sekundärstufe nach UIC 510-1 keine laterale Bewegung ermöglicht. Bezüglich Laufruhe und niedrigen Rad-Schiene-Kräften ist ein sekundärer Querweg erforderlich.

Es wurden mehrere Varianten analysiert und die Lösung sind zwei Gummischichtfedern, die auf dem Querträger aufliegen. Für diese Feder wurde ein bestehendes Gummischichtfeder-Modell evaluiert, welches schon in anderen Drehgestellen zum Einsatz kommt (z.B. Axiom TF25). Dadurch sind Messdaten der Federcharakteristiken vorhanden und die Entwicklungsrisiken werden deutlich reduziert.

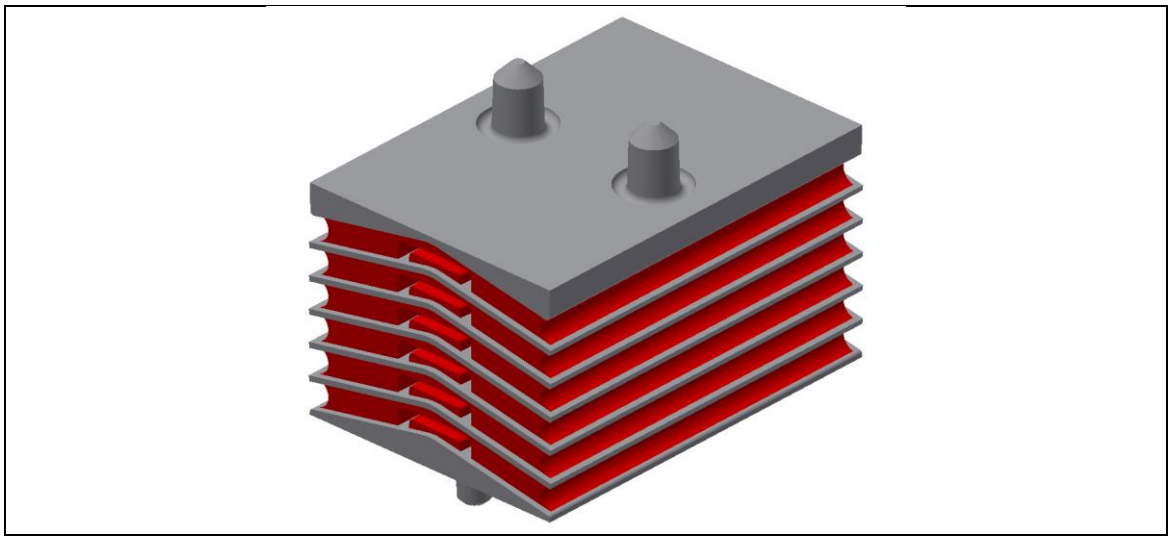


Abbildung 10: Sekundärfeder

Aussen auf den Langträger - «Balkonen» sind Wankanschläge angeordnet. Der Wagenkasten stützt sich über Reibbeläge auf diesen ab. Bei Längs- und Querbewegungen wird dadurch eine Reibhemmung zwischen Drehgestell und Wagenkasten ermöglicht. Diese Elemente sind ähnlich wie die beim Y25 Drehgestell verwendeten Wankanschläge.

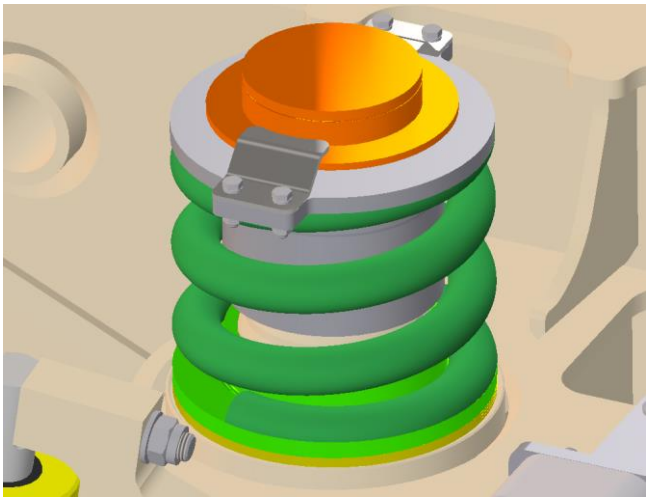


Abbildung 11 Wankanschlag mit Reibelement auf der Oberseite

Ein am Wagenkasten angeschraubter Mitnahmezapfen überträgt die Längs- und Querkräfte vom Drehgestell auf den Wagenkasten. Dies im Gegensatz zum Y25 Drehgestell, bei dem die

Übertragung der Kräfte über eine Drehpfanne erfolgt. Der Mitnahmezapfen (siehe Abbildung 14) taucht in eine Öffnung des Rahmen - Querträgers ein. Am unteren Ende des Mitnahmezapfens ist die sekundäre Abhebesicherung sowie der Querdämpfer angeschraubt. Für die Kraftübertragung zwischen Drehgestell - Rahmen und Mitnahmezapfen sind am Rahmen Gummipuffer vorhanden. Diese bewirken einen progressiven Kraftverlauf und verhindern ein hartes Anschlagen bei Einwirken der betrieblichen Längs- und Querkräfte.

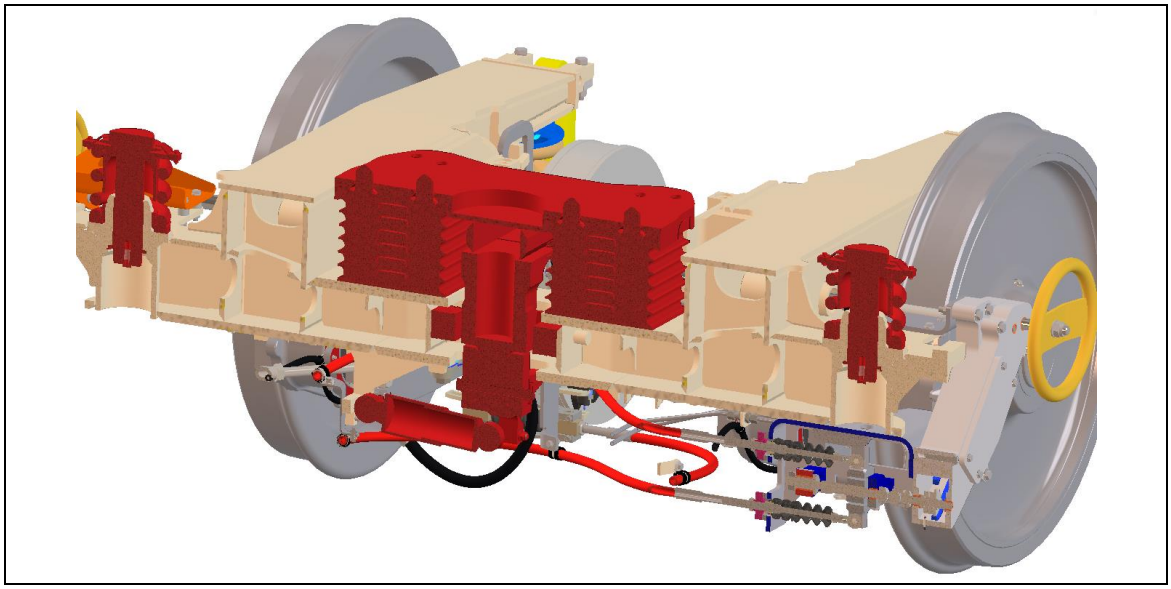


Abbildung 12: Längsschnitt durch das Drehgestell

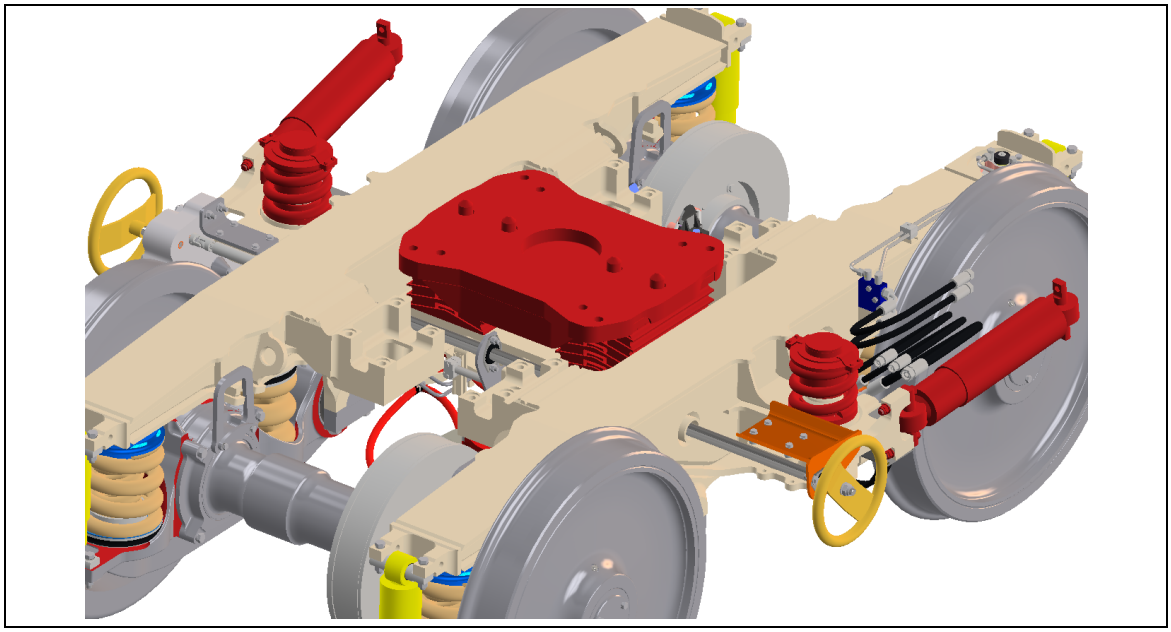


Abbildung 13: Platzierung der Sekundärstufe im Drehgestell

Der Mitnahmezapfen ist als Schweissbaugruppe konstruiert, siehe Abbildung 14. Er besteht aus einer Trägerplatte, welche die Schnittstelle zum Wagenkasten herstellt, und dem eigentlichen Zapfen, welcher aus einem Frästeil besteht. Diese Bauweise ist in der Herstellung teuer. Für eine Serie würde der Mitnahmezapfen aus Sphäroguss zu deutlich geringeren Kosten gefertigt.

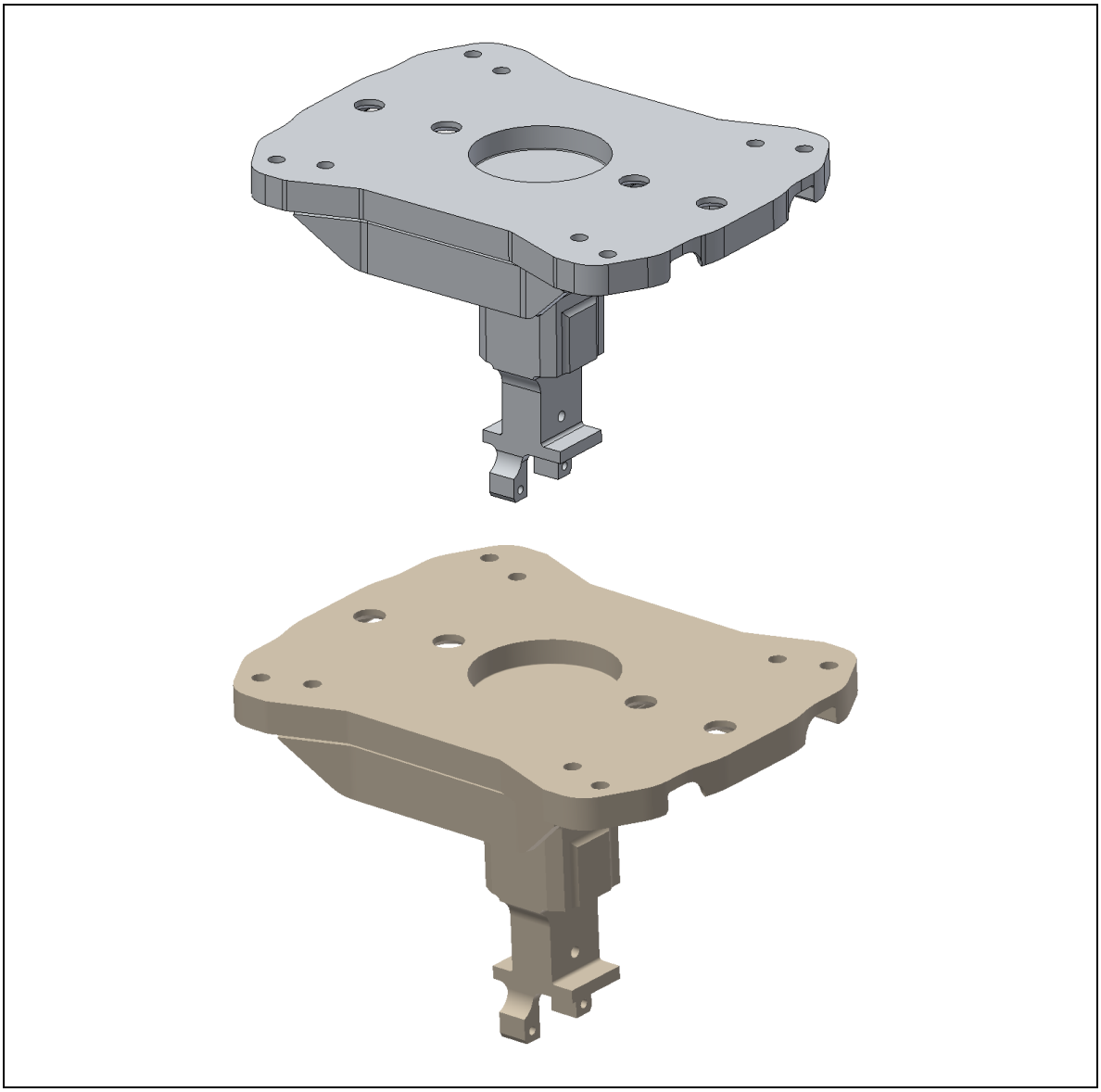


Abbildung 14: Mitnahmezapfen

Gemäss der lauftechnischen Simulation ist die Stabilität des Fahrzeugs mit dem Formica HP Drehgestell bis 120 km/h gewährleistet. Bei Geschwindigkeiten grösser 120 km/h kann es gemäss der Simulation zu instabilem Lauf kommen. Deshalb sind für Geschwindigkeiten > 120 km/h zusätzliche Schlingerdämpfer vorgesehen.

Die Montage erfolgt am Langträger des Drehgestellrahmens sowie am Wagenkasten. Dafür sind ebenfalls Supporte am Wagenkasten nötig. Für die Prototyp - Drehgestelle sind Supporte vorhanden und die Dämpfer werden bereitgestellt. Eine Verwendung der Dämpfer ist jedoch nur dann vorgesehen, wenn tatsächlich instabiler Lauf festgestellt wird. Erfahrungsgemäss sind die Simulationsergebnisse konservativ und das Fahrzeug läuft in der Regel länger stabil, als in der Simulation ermittelt. Somit besteht die realistische Chance, dass für eine Serienfertigung der Drehgestelle nach durchlaufenen Versuchsfahrten auf die Schlingerdämpfer auch bei Geschwindigkeiten > 120 km/h verzichtet werden kann, wodurch auch die zusätzlichen Supporte am Drehgestell (und am Untergestell des Güterwagens) verzichtet werden kann.

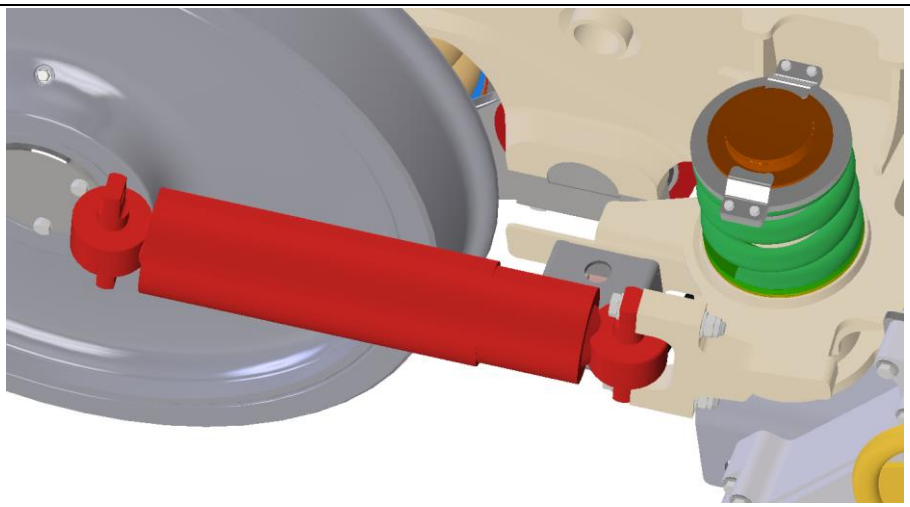


Abbildung 15: Schlingerdämpfer

3.1.5 Drehgestellrahmen

Der Drehgestellrahmen ist ein geschweisster H-Rahmen in Kasten - Bauweise und wird aus Stahlblechen der Qualität S355J2+N sowie einigen Frästeilen zusammengeschweisst. Er besteht aus zwei Langträgern und einem Querträger. Auf der Aussenseite sind in der Mitte der Langträger sogenannte "Balkone" angeschweisst, auf welchen sich die Wankanschläge abstützen. Die Schlingerdämpfer sind ebenfalls aussen an den Balkonen angeschraubt.

Für die Aufnahme der Kompaktbremseinheiten sind Supporte an der Innenseite der Langträger vorhanden. Dabei sind für die Prototyp-Drehgestelle Frästeile vorgesehen. Bei einer Serie würden diese Supporte aus Stahlguss gefertigt.

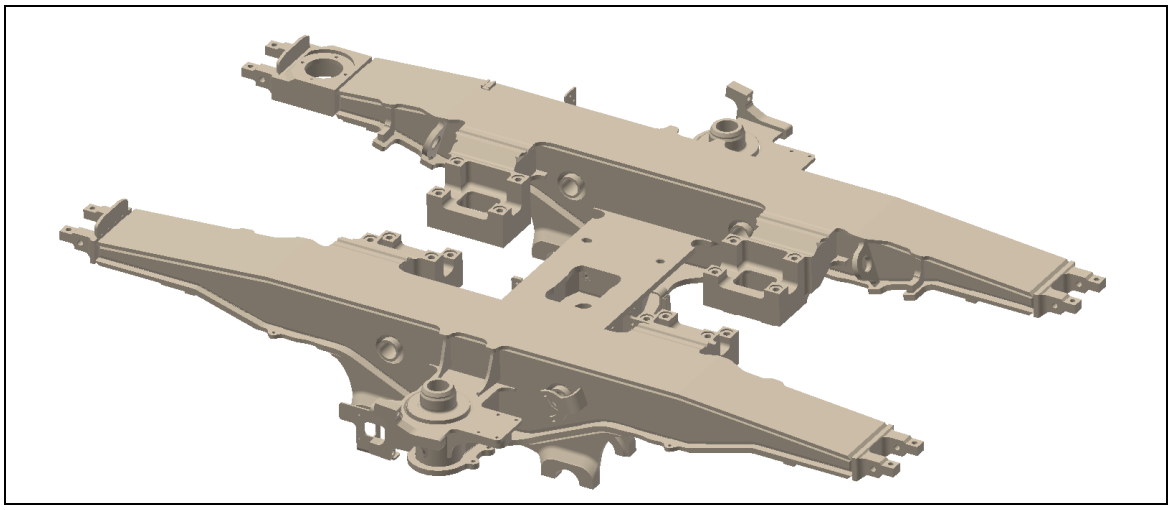


Abbildung 16: Drehgestellrahmen

Bei der Entwicklung des Formica HP Drehgestells wurden diverse konstruktive Varianten des Drehgestellrahmens erstellt und mehrfach überarbeitet. Das ergab sich aus den besonderen Anforderungen der Innenlagerung und der Sekundärfederschnittstelle. Es mussten auch mehrere Rechenloops durchgeführt werden, als dies in anderen Projekten in der Konzepthase erforderlich war. Der finale Konstruktionsstand (siehe Abbildung 16) ist gemäss EN 15085-3 schweisstechnisch geprüft und betr. Festigkeit nachgewiesen.

3.1.6 Heissläuferortung

Die konventionelle Heissläuferortung zur Detektion von Warm- und Heissläufern der aussenliegenden Radsatzlager erfolgt über streckenseitige Detektoren, welche die Temperaturen an der Unterseite des Radsatzlagergehäuses messen. Diese Detektoren sind mit einer zentralen Stelle verbunden und melden, wenn die Temperaturen bestimmte Grenzwerte überschreiten. Dabei wird zwischen Warm- und Heissläufer, sowie rechts - links Temperaturdifferenz unterschieden. Bei Detektion von Überschreitungen entscheidet die zentrale Stelle über betriebliche Massnahmen. Folgende Grenztemperaturen werden verwendet:

Alarmtyp	Temp. von	Temp. bis
Heissläufer Differenzalarm	≥ 45°	
Heissläufer heiss	≥ 100°	
Heissläufer warm	80°C	99°C

Tabelle 2 Heissläufer Alarm Grenztemperaturen

Beim innengelagerten Drehgestell ist die normierte Fläche an der Unterseite des Radsatzlagergehäuses nicht vorhanden, da die Gehäuse innerhalb der Räder angeordnet sind und somit von der bestehenden Detektorenanordnung nicht erfasst werden können. Für die Sicherstellung der Heissläuferortung wird die Temperatur deshalb direkt am Radsatzlagergehäuse für jedes Lager

gemessen und zur Übermittlung im Fahrzeug bereitgestellt. Für die Übertragung der Temperatursignale ergeben sich mehrere Optionen (z.B. zugübergreifende Kabelverbindung, Radiolink zur Lokomotive oder Datenfernübertragung via GSM). Die Anforderungen der SBB Infrastruktur betreffend der Bereitstellung der Temperatursignale wurden abgeklärt.

Abstimmung mit Technischen Netzzugang der SBB Infrastruktur

Am 30. September 2019 erfolgte ein Abstimmungs-Treffen mit dem Technischen Netzzugang. Das FORMICA-Drehgestell wurde vorgestellt und der Stand des Projekts gezeigt. Auch der offene Punkt bezüglich der Nicht-Detektierbarkeit von Heissläufern mit konventionellen infrastrukturseitigen Zugkontroll-Einrichtungen bei Innenlagerung wurde angesprochen. Auszug aus dem Protokoll hierzu:

Beim Probebetrieb Meldung/Information an Lf (analog DB ICE 4 mit innengelagerten LDG, der Meldung über Leittechnik erhält)

Es gibt schon Lösungen von mobilen Geräten mit Funk (VTG, etc.)

Aufgrund dieser Rückmeldung wurden weitere Abklärungen unternommen, um ein Konzept für eine fahrzeugseitig verbaute Heissläuferdetektion zu erarbeiten.

Betrieblich wird sichergestellt, dass im Falle eines Heissläufers der Lokführer benachrichtigt wird und die notwendigen Massnahmen ergriffen werden. Insbesondere für einen Probebetrieb ist eine analoge Sicherstellung zum heutigen Vorgehen mittels Betriebskonzept gut umsetzbar.

Konzept Vorschlag

Am 7. November 2019 erarbeitete PROSE zusammen mit SAVVY Telematic Systems AG ein mögliches Konzept für eine fahrzeugseitig installierte Heissläuferdetektion. Pro Drehgestell sind 4 PT1000-Sensoren notwendig, welche bei einschlägigen Herstellern standardmässig eingekauft werden können. Diese werden über einen sogenannten «Gateway» zusammengezogen, an welchen maximal 3 solche Sensoren angeschlossen werden können. Die gemessenen Werte werden im Sekunden-Takt an eine Telematik-Einheit gesendet, welche bereits erste Auswertungen macht, respektive bezüglich eines hinterlegten Trigger-Punktes überprüft und bei vorher definierten, interessanten Messwerten, diesen an die Cloud sendet. Dort werden dann die Messwerte ausgewertet und bei Überschreitung der Grenzwerte entsprechende Meldungen versendet. Mit der bestehenden Lösung können bereits automatisiert E-Mail versendet werden. Eine Meldung an ein App oder via SMS müsste für den Anwendungsfall implementiert werden, ist aber grundsätzlich gut möglich. Da standardmässig ein Bewegungssensor in der Telematik-Einheit verbaut ist, sind interessante Zusatzfunktionen möglich, z.B. für eine Flachstelledetektion. Insgesamt sind für diese Anordnung zwei «Gateways» pro Drehgestell, also vier pro Wagen und eine Telematik-Einheit pro Wagen notwendig.

Möglicher Einbau

Das oben beschriebene Konzept erfordert den Einbau von drei verschiedenen Sensoren und Geräten. Die vier Sensoren werden jeweils in Bohrungen auf der Unterseite der Radsatzlagergehäuse eingeführt und verschraubt (siehe Abbildung 17). Die Telematik-Einheit wird am Langträger des Wagenkastens aussen z.B. mit einer Montageplatte angeschraubt. Die «Gateway»-Einheiten werden an Anschweissteilen auf den Langträgern des Drehgestellrahmens befestigt.

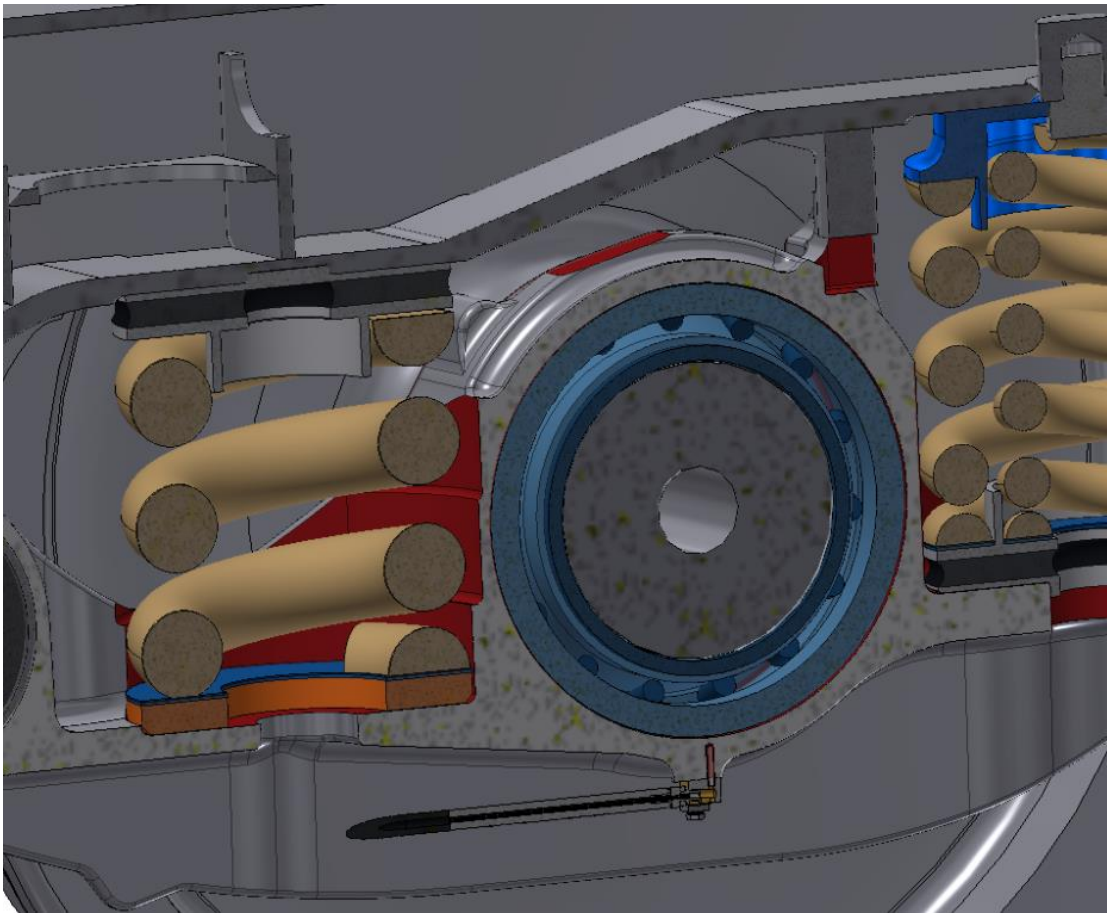


Abbildung 17 Position des Heissläufer Temperatursensors an der Untersite des Radsatzlagergehäuses

3.1.7 Schnittstellen zum Wagenkasten

Wie oben beschrieben hat das Formica HP Drehgestell infolge der Sekundärfederung eine andere Schnittstelle zum Wagenkasten, als das Y25. Die bestehenden Güterwagen, die für den Betrieb mit Y25 Drehgestellen entwickelt wurden, müssen für den Einsatz des Formica HP angepasst werden.

Die Strukturen der Containertragwagen sind je nach Hersteller unterschiedlich. Für die Prototypenphase wird sich SWISS Rail Solution auf den Wagentyp CTW 2004 der Fa. Cattaneo konzentrieren und diesen entsprechend anpassen, damit die Zulassungsfahrten durchgeführt werden können. Später ist evtl. eine Erprobung mit diesem Wagen vorgesehen.

3.2 Lauftechnik

Wesentliche Anforderungen aus dem Bereich der Lauftechnik sind ein sicherer und stabiler Lauf sowie eine nicht übermässige Fahrwegbeanspruchung. Für eine Zulassung muss das FOMICA HP die Grenzwerte der einschlägigen Normen zwingend erfüllen. Darüber hinaus soll das neuartige Drehgestell gegenüber bestehenden Lösungen wie des weit verbreiteten Y 25-Drehgestells Vorteile betreffend Lärm und Verschleiss aufzeigen.

3.2.1 Laufstabilität

Die Laufstabilität wird durch das Zusammenwirken des Eigenschwingverhaltens des Fahrzeugs und der Anregung durch den Rad-Schiene-Kontakt bestimmt. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit fällt das dynamische System in eine Bewegungsform mit erhöhten Schwingungen, die erst wieder abklingt, wenn die sogenannte kritische Geschwindigkeit unterschritten wird.

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis der Simulation der Laufstabilität für das FORMICA HP unter dem Containertragwagen JMR CTW 2004 für den Leerzustand bei hoher Äquivalenter Konizität. Das Fahrzeug startet aus einer Übergeschwindigkeit in Höhe von 156 km/h und wird dann moderat abgebremst. Durch mehrere Gleisverziehungen wird die als Instabilität bezeichnete Grenzzykelbewegung provoziert. Die Geschwindigkeit, bei der diese Bewegung abklingt, wird als kritische Geschwindigkeit bezeichnet. Im betrachteten Fall führt die letzte Gleisverziehung zu einer weiteren Grenzzykelbewegung, die bei ca. 120 km/h abklingt, siehe Abbildung 18 unten rechts.
Für den Grundentwurf des FORMICA HP-Drehgestells beträgt die kritische Geschwindigkeit ca. 120 km/h. Dies entspricht der anvisierten Geschwindigkeit für bis zu 90 t Fahrzeuggewicht. Der Einbau eines Schlingerdämpfers erhöht die kritische Geschwindigkeit auf 160 km/h. Die Zielgeschwindigkeit von 140 km/h bei 72 t Fahrzeuggewicht ist somit ebenfalls erreicht.

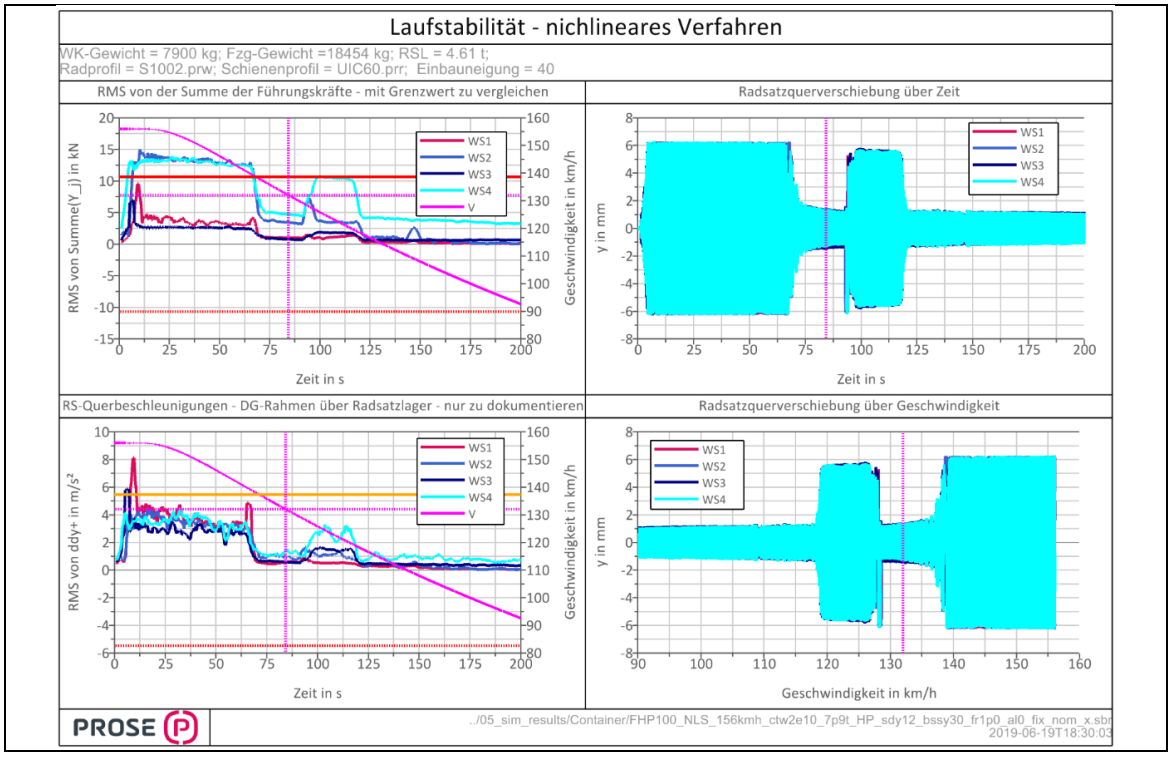


Abbildung 18: Untersuchung der Laufstabilität mittels nichtlinearem Verfahren. Ergebnis für FORMIC HP und den Containertragwagen JMR CTW 2004 für den Leerzustand, starre Schienenbettung, nominelle Äquivalente Konizität.

3.2.2 Dynamisches Fahrverhalten

Die Beurteilung der Fahrsicherheit und der Fahrwegbeanspruchung beruht auf der Evaluierung des Fahrverhaltens bei der Fahrt auf ausgewählten Streckenprofilen. Diese sogenannten Prüfbereiche unterscheiden sich in Bogenradius, Geschwindigkeit V und freier Seitenbeschleunigung a_q. Ein wichtiges Mass zur Beurteilung ist dabei die Summe der Querkräfte zwischen Rad und Schiene je Radsatz.

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen diese sogenannte Gleisverschiebekraft für das Y 25 und das FORMICA HP im Prüfbereich 1 für das Leerfahrzeug und bei voller Beladung. Der Prüfbereich 1 (gem. EN 14363) bildet die schnelle Fahrt in der Geraden ab, wodurch sich die dynamischen Eigenschaften beurteilen lassen. Die Gleisverschiebekraft des FORMICA HP liegt bei beiden Beladungsfällen deutlich unter der des Y 25. In Abbildung 19 zeigt sich insbesondere die gegenüber dem Y 25 deutlich reduzierte Dynamik des FORMICA HP im Leerzustand des Fahrzeugs. Bei voller Beladung treten beim Y 25 zudem hohe Maximalwerte in Form von Spitzen auf, wohingegen der Verlauf beim FORMICA HP deutlich ausgeglichener ist, wie in Abbildung 20 zu erkennen.

Abbildung 19: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 für den Leerzustand im Prüfbereich 1: Gerade mit V = 132 km/h.

Abbildung 20: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht im Prüfbereich 1: Gerade mit V = 132 km/h.

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Gleisverschiebekraft für das Y 25 und das FORMICA HP im Prüfbereich 2. Dieser dient der Überprüfung des Fahrverhaltens bei schneller Fahrt durch einen weiten Bogen und liefert einen Aufschluss, sowohl über quasi-statische als auch über dynamische Eigenschaften. Es zeigt sich, dass die Gleisverschiebekraft des FORMICA HP in beiden Beladezuständen deutlich unter der des Y 25 liegt. Das Verhalten des Y 25 im Leerzustand ist durch eine hohe Dynamik und ausgeprägte Spitzen gekennzeichnet, siehe Abbildung 21. Das FORMICA HP zeigt einen deutlich ruhigeren Verlauf mit signifikant geringeren Spitzenwerten. Bei voller Beladung sind die Verläufe ähnlicher, wobei das Y25 die höheren Spitzenwerte aufweist, siehe Abbildung 22.

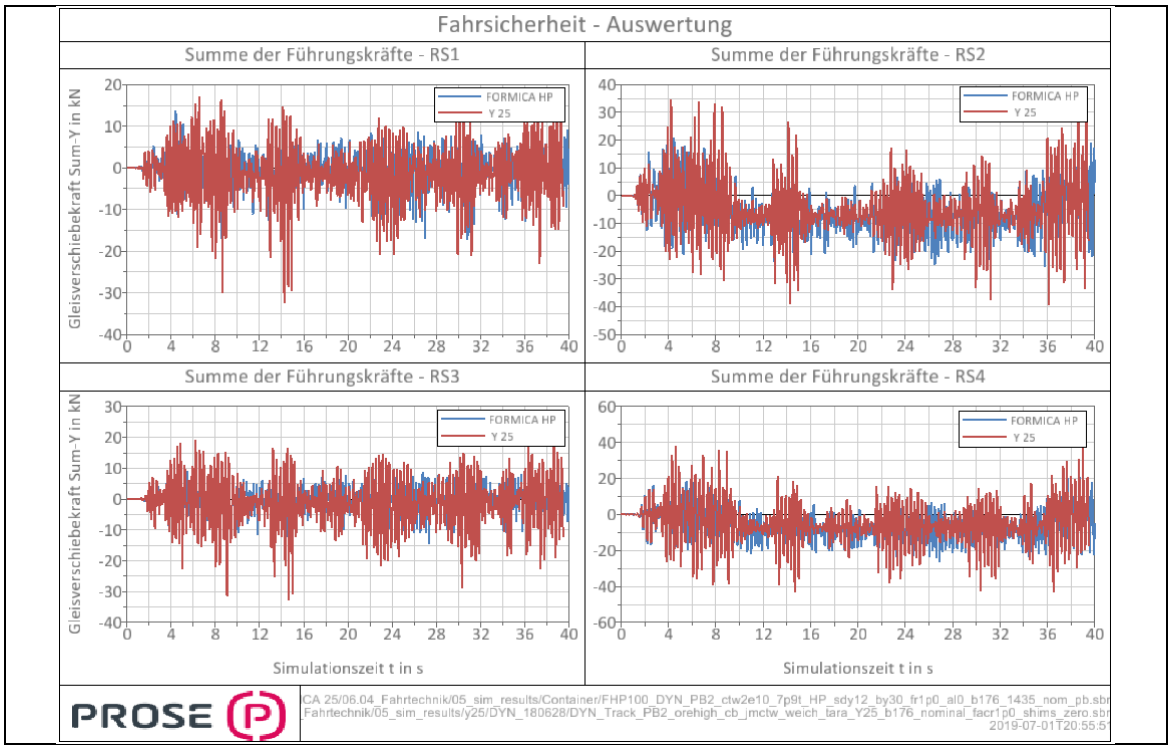


Abbildung 21: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 für das Leerfahrzeug im Prüfbereich 2: 702 m Bogen mit V = 132 km/ und aq = 0.94 m/s².

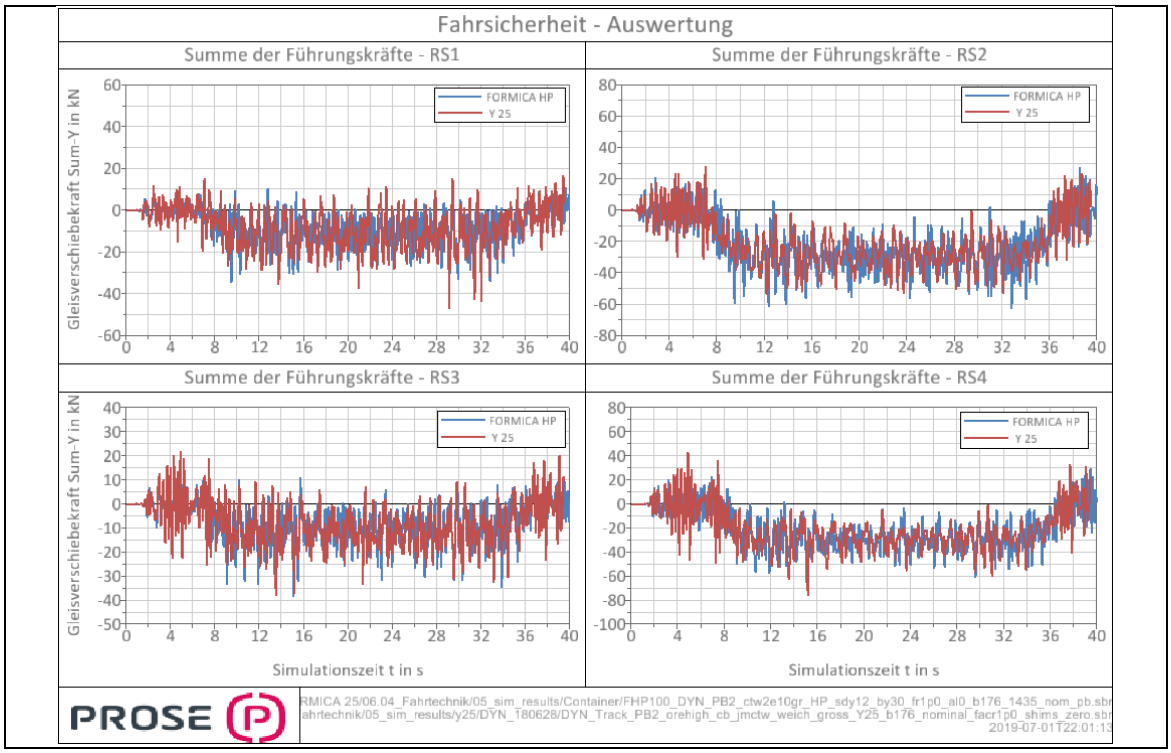


Abbildung 22: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht im Prüfbereich 2: 702 m Bogen mit V = 132 km/ und aq = 0.94 m/s².

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Gleisverschiebekraft für das Y 25 und das FORMICA HP im Prüfbereich 4, welcher die Fahrt in engen Bögen bei moderaten Geschwindigkeiten prüft, und damit eine Aussage über die quasistatischen Eigenschaften ermöglicht. Die Gleisverschiebekraft des Y 25 ist wiederum in beiden Beladezuständen deutlich höher. Im Vergleich mit dem Y 25 zeichnet sich das FORMICA HP durch eine geringere Dynamik und niedrigere Spitzenwerte aus. Es

zeigt sich zudem, dass das Steuerverhalten des FORMICA HP durch die gleichmässigere Kraftverteilung zu höheren quasistatischen Werten an den Drehgestell-nachlaufenden Radsätzen 2 und 4 führt, siehe Abbildung 24 rechts. Gleichwohl ergeben sich auch hier für das Y 25 höhere Spitzenwerte.

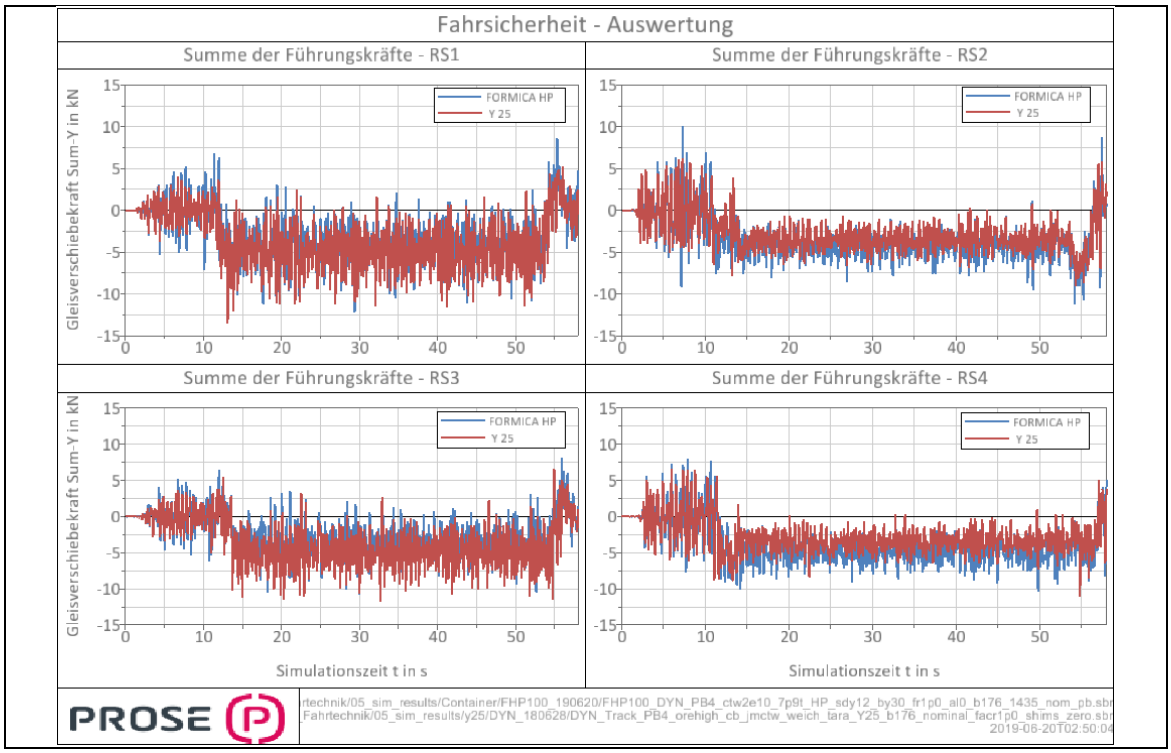


Abbildung 23: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 Leerfahrzeug im Prüfbereich 4: 300 m Bogen mit V = 86 km/h und aq = 0.94 m/s².

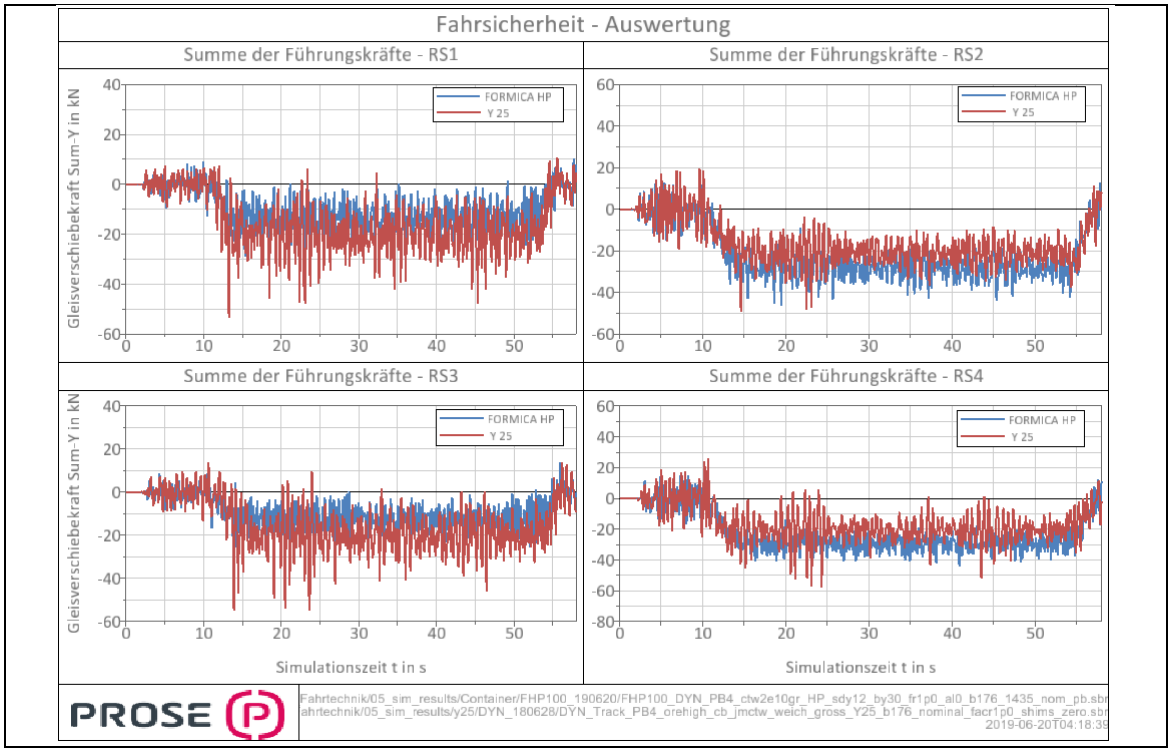


Abbildung 24: Vergleich des Y 25 Drehgestells und des FORMICA HP Drehgestells. Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht im Prüfbereich 4: 300 m Bogen mit V = 86 km/h und aq = 0.94 m/s².

Abbildung 25**Error! Reference source not found.** fasst die zuvor gezeigten Ergebnisse zusammen und zeigt die Maximalwerte der Gleisverschiebekraft für das Y 25 und für das FORMICA HP für den Beladezustand mit 90 t Gesamtgewicht. Im Prüfbereich 1 verringert sich die Gleisverschiebekraft des FORMICA HP auf 53 % des Wertes des Y 25, was ein Merkmal für die wesentlich besseren dynamischen Eigenschaften ist. Die Verringerung der Gleisverschiebekraft auf rund 80 % in den Prüfbereichen 2 und 4 zeigt darüber hinaus, dass auch die quasistatischen Eigenschaften des FORMICA HP besser sind. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Leerzustand des Fahrzeugs in Abbildung 26. Die Gleisverschiebekraft des FORMICA-HP sinkt in den Prüfbereichen 1 und 2 auf 54 % beziehungsweise 61 % des Wertes des Y 25-Drehgestells. Im Prüfbereich 4 ergibt sich eine leichte Erhöhung um 5 %.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das FORMICA HP gegenüber dem Y 25 ein signifikant besseres lauftechnisches Verhalten aufweist. Dies bedeutet einen grossen Vorteil in Bezug auf Lärm und Verschleiss.

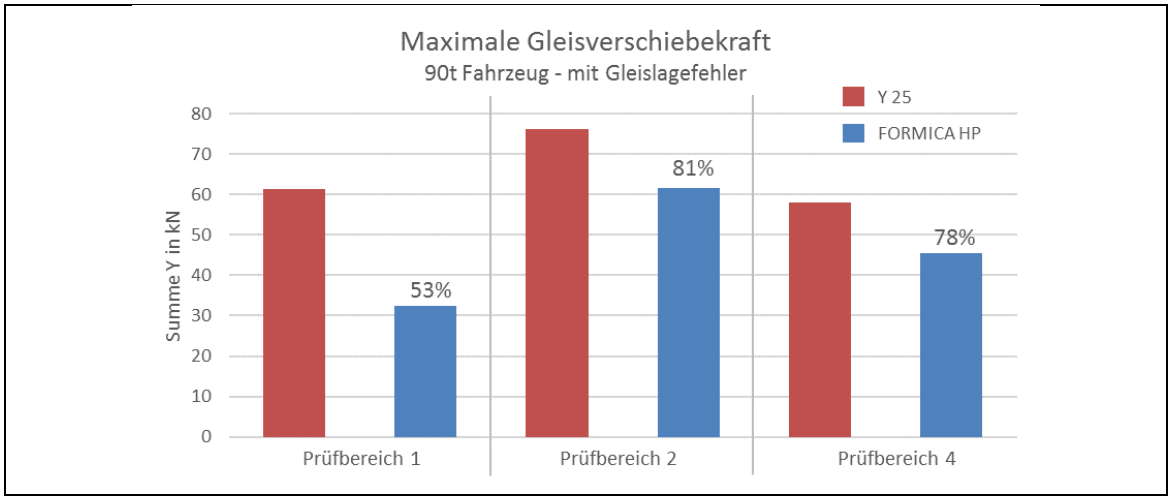


Abbildung 25: Vergleich des Y 25 und des FORMICA HP. Maximalwert der Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht in den verschiedenen Prüfbereichen. Prüfbereich 1: Gerade mit V = 132 km/h, Prüfbereich 2: 702 m Bogen mit V = 132 km/ und a_q = 0.94 m/s², Prüfbereich 4: 300 m Bogen mit V = 86 km/h und a_q = 0.94 m/s².

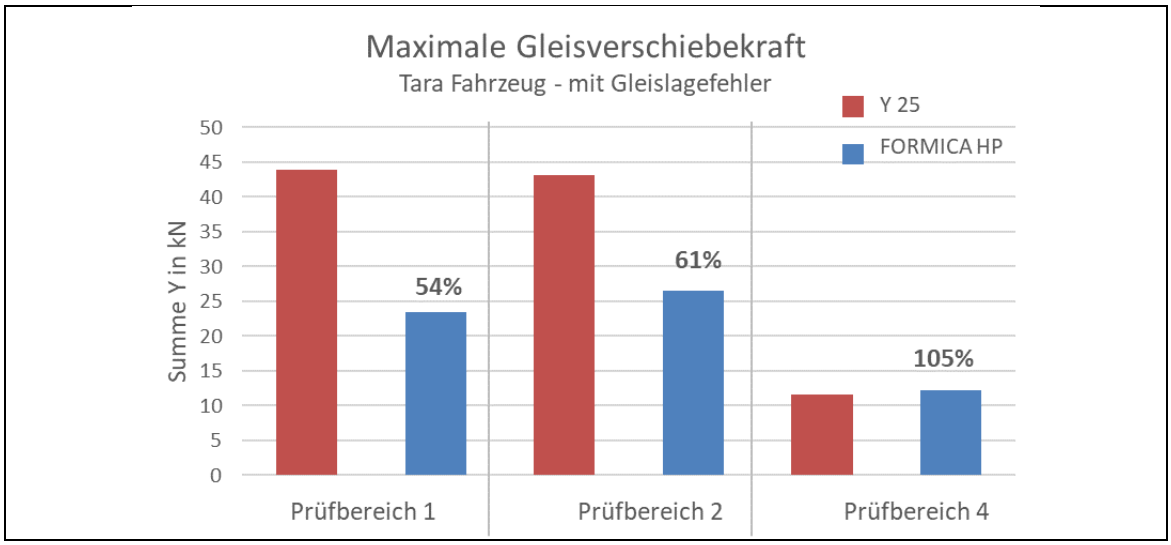


Abbildung 26: Vergleich des Y 25 und des FORMICA HP. Maximalwert der Summe der Querkraft zwischen Rad- und Schiene (Gleisverschiebekraft) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 im Leerzustand in den verschiedenen Prüfbereichen. Prüfbereich 1: Gerade mit V = 132 km/h, Prüfbereich 2: 702 m Bogen mit V = 132 km/ und a_q = 0.94 m/s², Prüfbereich 4: 300 m Bogen mit V = 86 km/h und a_q = 0.94 m/s².

3.2.3 Lauftechnisches Verschleissverhalten

Die zulassungsrelevanten Streckenprofile und Geschwindigkeiten für die Beurteilung der Fahrsicherheit und der Fahrwegbeanspruchung stellen naturgemäss Extremfälle dar. Diese können zwar in der betrieblichen Praxis auftreten, eignen sich jedoch nur eingeschränkt für die Beurteilung betriebsrelevanter Vorteile gegenüber bestehenden Lösungen. Aus diesem Grund wird für den Vergleich eine generische Streckenführung verwendet, die gewissermassen einen Auszug typischer Alltagssituationen von Güterwagen abbildet und damit die Beurteilung des lauftechnischen Konzeptes ermöglicht. Die Teststrecke setzt sich aus einem 300 m Rechtsbogen, einem 500 m Linksbogen und einem 1000 m Rechtsbogen zusammen. Alle drei Bögen sind durch Übergangsbögen und Zwischengeraden verbunden. In Verbindung mit der gewählten Überhöhungen der drei Bögen bewirkt die Testgeschwindigkeit von 80 km/h, dass der Güterwagen auf der Teststrecke im 300 m Bogen eine Querbeschleunigung nach Bogenaussen erfährt, wohingegen die Querbeschleunigung im 500 m Bogen und im 1000 m Bogen nach Bogeninnen wirkt. Dies ist typisch für den Betriebsalltag von Güterwagen, da diese sich hauptsächlich auf Streckenprofilen bewegen, deren Bogenabschnitte in erster Linie für die Befahrung von Personenzügen mit höheren Geschwindigkeiten ausgelegt sind. Als Testwaggon wird in diesem Fall der Containertragwagen JMR CTW 2004 gewählt. Der hier betrachtete, Beladungszustand von 90 t Gesamtgewicht bildet wiederum einen typischen Betriebsfall ab.

Massgeblich für das günstigere Verschleissverhalten des FORMICA HP gegenüber bestehenden Lösungen wie des Y 25 ist die verbesserte Einstellbarkeit der Radsätze im Bogen. Dies bedeutet gewissermassen, dass die Radsätze der durch den Bogenlauf vorgegebenen Schrägstellung, der sogenannten radialen Einstellung, besser folgen können. Dies wird durch die Führung der primären Federstufe mittels Schwinge erreicht. Durch die elastischen Verbindungselemente der Schwinge lässt sich die für die Einstellbarkeit der Radsätze massgebliche Längssteifigkeit der primären Federstufe gut einstellen. Massgeblich ist insbesondere das Achslenkerlager (ALL), welches die Schwinge mit dem Drehgestellrahmen verbindet.

Die Ergebnisse zur Laufstabilität zeigen, dass die Längssteifigkeit des ALLs ca. 19 kN/mm betragen sollte. Andererseits erfordert eine gute Einstellbarkeit der Radsätze im Bogen eine möglichst geringe Längssteifigkeit. Eine Lösung dieses lauftechnischen Widerspruchs bietet der Einsatz von sogenannten hydraulischen Achslenkerlagern (HALL). Hierbei ändert sich die Längssteifigkeit mit der Frequenz, so dass das HALL im Bogen (niedrige Frequenzen) weicher ist als in der Geraden (hohe Frequenzen). Ein typischer Wert für die untere Grenze der Längssteifigkeit verfügbarer HALLs ist 3.5 kN/mm. In der Untersuchung wird das HALL modelltechnisch mit seinen zwei Stufen umgesetzt, da das Umschaltverhalten für die Beurteilung der Bogenlaufeigenschaften nicht von Bedeutung ist.

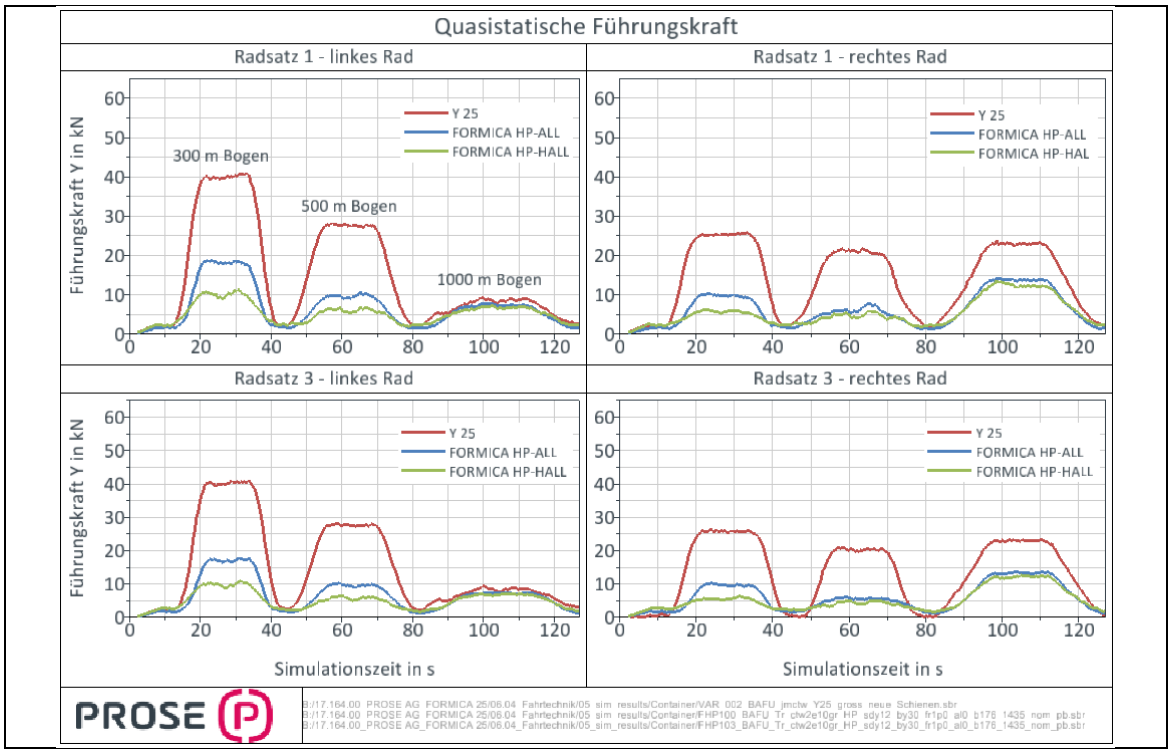


Abbildung 27: Vergleich des Y 25 und der beiden Varianten des FORMICA HP mit 19 kN/mm und 3.5 kN/mm Längssteifigkeit des Achslenkerlagers (ALL). Verlauf des Absolutwerts der quasistatischen Führungskraft für die beiden Drehgestell-führenden Radsätze (Radsatz 1 und Radsatz 3) auf der Teststrecke.

Abbildung 27 zeigt den Verlauf der quasistatischen Führungskraft für das Y 25 und das FORMICA HP mit 19 kN/mm und 3.5 kN/mm Längssteifigkeit des ALL. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Beträge der Führungskräfte nur für die im Bogen am stärksten belasteten Drehgestell-führenden Radsätze 1 und 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Führungskräfte des FORMICA HP in allen drei Bögen deutlich geringer ausfallen als beim Y 25. Insbesondere im engen 300 m Bogen zeigt sich zudem ein deutlicher Vorteil des weichen HALLs gegenüber dem steifen ALL. Beim 1000 m Bogen sind die Führungskräfte der aufgrund der geringen Geschwindigkeit weniger belasteten bogenäusseren Räder (links) fast gleich. Auf der bogeninneren Seite (rechts) zeigt sich wiederum, dass die Führungskräfte des FORMICA HPs deutlich geringer sind als die des Y 25.

Als Mass für die Einstellbarkeit der Radsätze im Bogen dient der sogenannte Anlaufwinkel. Dieser wird zwischen dem Radsatz und der Tangente des Gleises gemessen. Ein Anlaufwinkel von 0 rad entspricht somit der beabsichtigten radialen Einstellung des Radsatzes. Der Verlauf der Anlaufwinkel der vier Radsätze für die drei Fälle ist in Abbildung 28 dargestellt. Insbesondere im 300 m Bogen bei den beiden Drehgestell-führenden Radsätzen (1 und 3) zeigt sich die verbesserte Einstellbarkeit des FORMICA HPs gegenüber dem Y 25. Mit dem weichen HALL wird dabei nahezu eine radiale Einstellung erreicht. Im 1000 m Bogen und an den Drehgestell-nachlaufenden Radsätzen (2 und 4) sind die Unterschiede zwischen den drei Fällen gering.

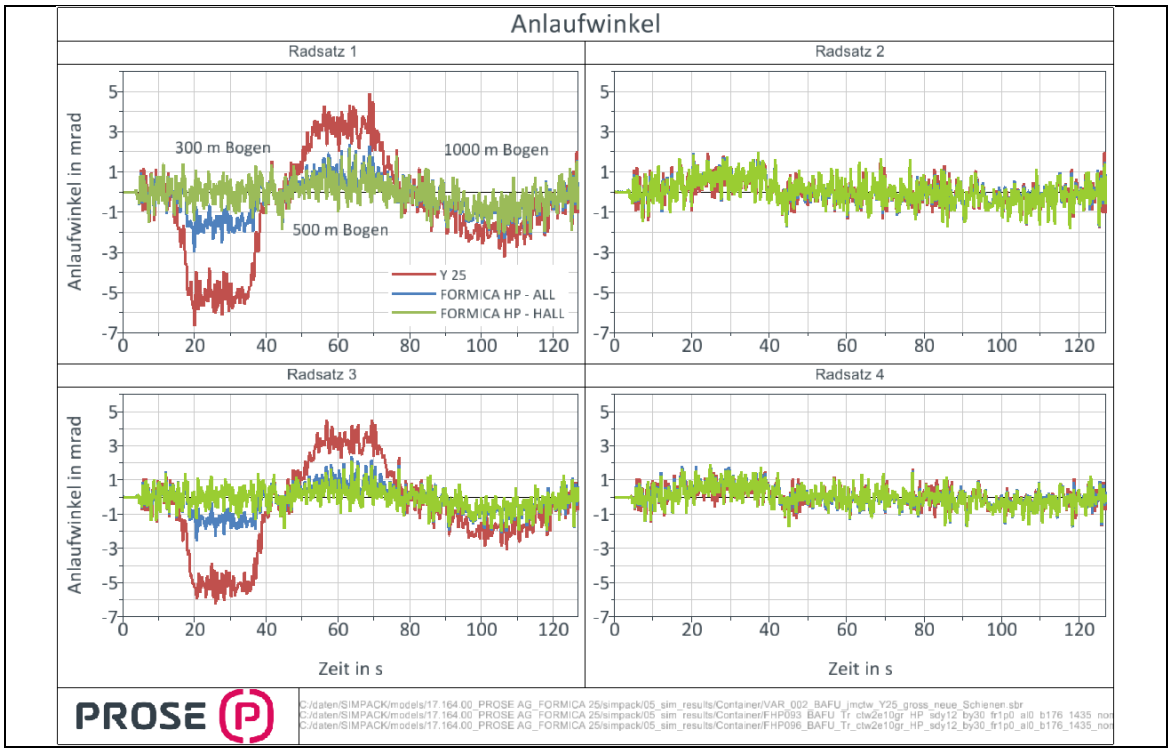


Abbildung 28: Vergleich des Y 25 und der beiden Varianten des FORMICA HP mit 19 kN/mm und 3.5 kN/mm Längssteifigkeit des Achslenkerlagers. Verlauf des Anlaufwinkels der vier Radsätze auf der Teststrecke für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht

Eine wichtige Beurteilungsgrösse des Verschleissverhaltens ist die sogenannte Verschleisszahl. Diese ergibt sich aus dem Produkt aus der im Kontakt wirkenden Schlupfkraft und dem Schlupf. Abbildung 29 zeigt die über die alle Radsätze summierte, gemittelte Verschleisszahl für die drei Drehgestelle bei voller Beladung mit 90 t Gesamtgewicht des Fahrzeugs. Es zeigt sich ein deutlicher Vorteil des FORMICA HP-Drehgestells gegenüber dem Y 25. So beträgt die Verschleisszahl im Falle des 300 m Vollbogens beim Y 25 rund 1400 N, beim längssteifen FORMICA HP rund 560 N und beim längsweichen FORMICA HP rund 180 N. Dies bedeutet eine Verringerung auf 41 % beziehungsweise 13 % der Verschleisszahl des Y 25. Der grundsätzliche Vorteil im Verschleiss zeigt sich auch bei den beiden anderen Bögen sowie im geringen Masse bei den beiden Drehgestell-nachlaufenden Radsätzen.

Abbildung 30 zeigt die summierte Verschleisszahl für das Leerfahrzeug. Der Vorteil des FORMICA HP gegenüber dem Y 25 ist im Vergleich zum 90 t Fahrzeug weniger stark, allerdings immer noch signifikant. Dies gilt insbesondere für die längsweiche Variante, für die die Verschleisszahl beim 300 m Bogen auf 32 % des Wertes des Y 25 fällt.

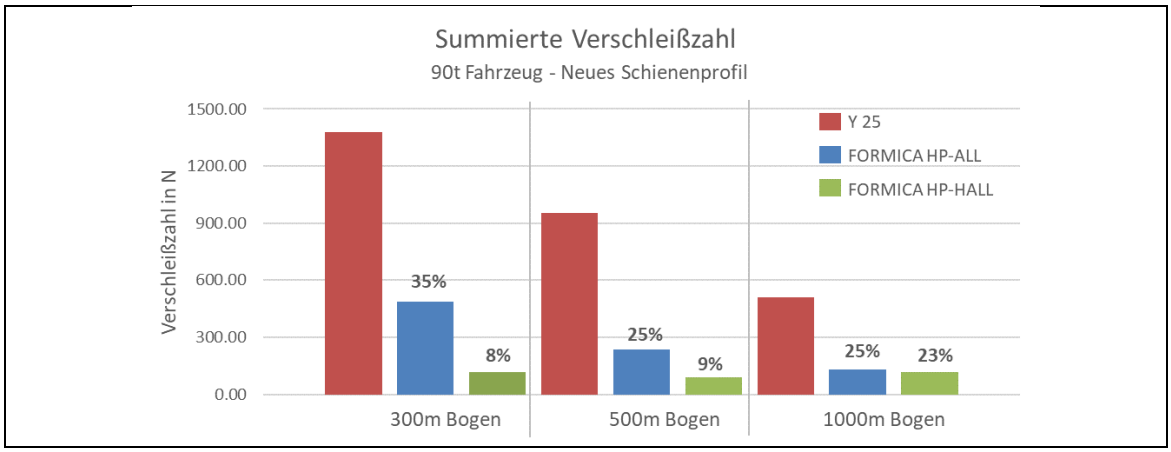


Abbildung 29: Vergleich des Y 25 Drehgestells und der beiden Varianten des FORMICA HP-Drehgestells mit 19 kN/mm und 3.5 kN/mm Längssteifigkeit des Achslenkerlagers. Summe der gemittelten Verschleisszahl im Vollbogen auf der Teststrecke für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht.

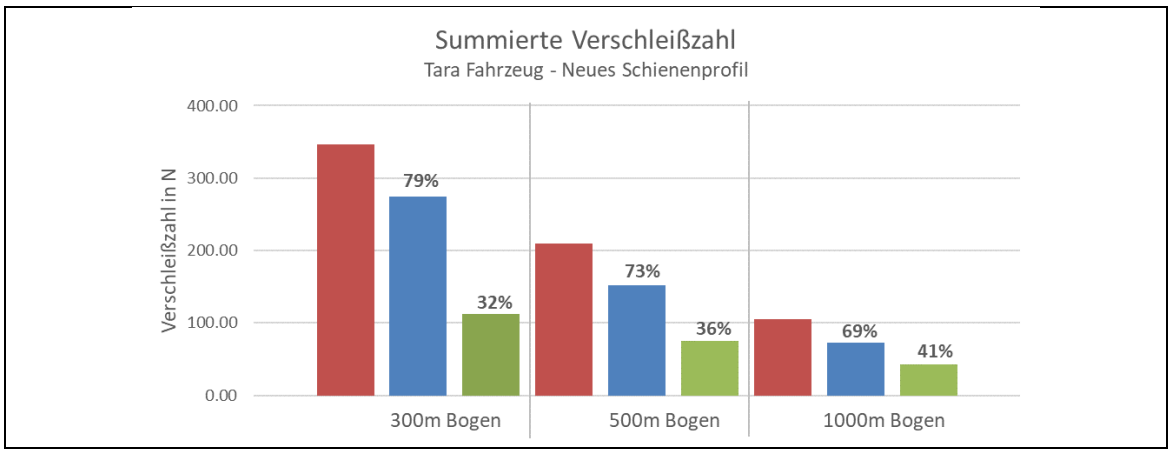


Abbildung 30: Vergleich des Y 25 Drehgestells und der beiden Varianten des FORMICA HP-Drehgestells mit 19 kN/mm und 3.5 kN/mm Längssteifigkeit des Achslenkerlagers. Summe der gemittelten Verschleisszahl im Vollbogen auf der Teststrecke für den Containertragwagen JMR CTW 2004 im Leerzustand.

3.2.4 Sicherheit gegen Entgleisen

Ein Prüfszenario für die Sicherheit gegen Entgleisen ist die Fahrt des Fahrzeugs auf einem verwundenen Gleis mit 150 m Bogenradius. Beurteilungskriterium sind dabei die Radanhebung Dz und der sogenannte Entgleisungskoeffizient Y/Q des führenden, bogenäusseren Rades. Dieses ist durch fahrzeug- und streckenseitige Verwindung am stärksten entlastet und die Gefahr des Spurkranz-Aufkletterns und damit des Entgleisens ist hier am grössten. Das Risiko steigt ausserdem mit Abnahme des Fahrzeuggewichts.

Abbildung 31 zeigt den Verlauf des Entgleisungskoeffizienten Y/Q sowie der Radanhebung Dz für das Y 25 und das FORMICA HP bei 16t Fahrzeuggewicht. Beim Y 25 ist deutliches Aufklettern festzustellen (Y/Q nahe 1.2) und die Radanhebung beträgt 2.1 mm. Im Gegensatz dazu beträgt der Entgleisungskoeffizient beim FORMICA HP nur 0.9 und bleibt damit deutlich unter dem Grenzwert. Als Folge tritt kein Aufklettern auf und die Radanhebung beträgt unter 1 mm. Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse als Balkendiagramm mit Relativvergleich. Beim FORMICA HP verringert sich die Radanhebung auf 45 % des Wertes des Y 25. Das FORMICA HP bietet somit im Vergleich zum Y 25 eine grössere Sicherheit gegen Entgleisen. In Hinblick auf zukünftige Anwendungen mit ultraleichten Wagenkästen stellt dies einen zusätzlichen Vorteil dar, da diese aufgrund der geringeren Masse sensitiver in Bezug auf Entgleisungen sind.

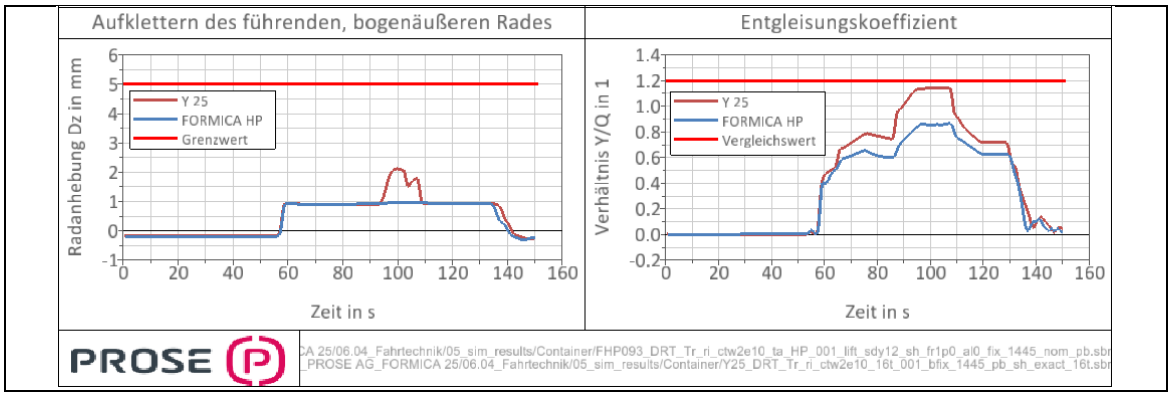


Abbildung 31: Vergleich des Y 25-Drehgestells und des FORMICA HP-Drehgestells. Radanhebung des vorlaufenden, bogenäusseren Rades und Entgleisungskoeffizient Y/Q im verwundenen 150 m Bogen (Verfahren 1) für den Containertragwagen JMR CTW 2004 mit 16 t Fahrzeuggewicht.

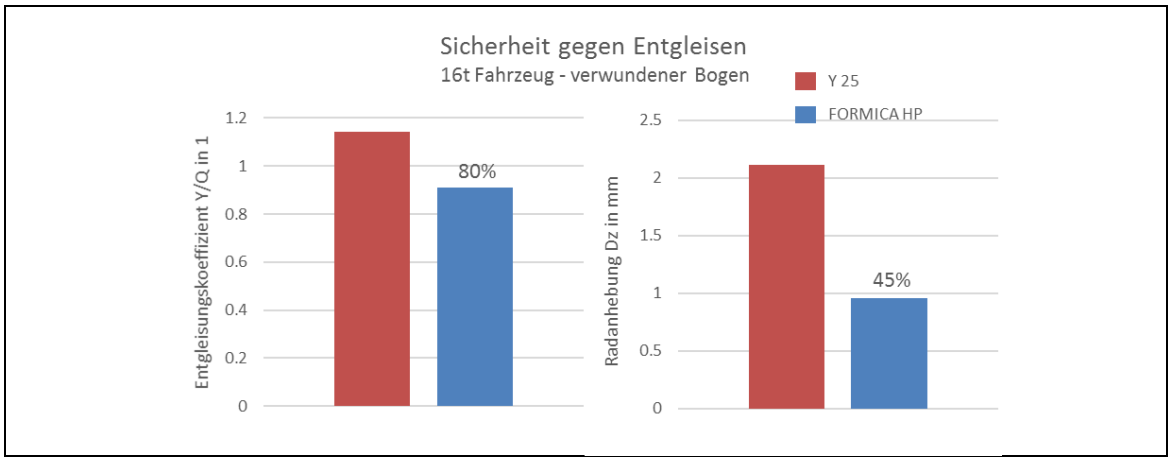


Abbildung 32: Vergleich des Y 25-Drehgestells und des FORMICA HP-Drehgestells. Entgleisungskoeffizient Y/Q und Radanhebung des vorlaufenden, bogenäusseren Rades im verwundenen 150 m Bogen (Verfahren 1) für 16t Fahrzeuggewicht.

3.2.5 Unsymmetrische Beladungen und Ausfallzustände

Zusätzlich zu den nahezu symmetrischen Nominalzuständen werden unsymmetrische Beladungszustände entsprechend den UIC Verladerichtlinien untersucht. Dabei werden in Längsrichtung das Grenzverhältnis der Drehgestelllasten von 3:1 und in Querrichtung das Grenzverhältnis der Radlasten von 1:1.25 angesetzt. Das FORMICA HP zeigt auch in diesen Extremfällen ein sicheres lauftechnisches Fahrverhalten und eine hohe kritische Geschwindigkeit. Die Sicherheit gegen Entgleisen ist ebenfalls gewährleistet.

3.3 Festigkeit

Das FORMICA HP Güterwagendrehgestell ist nach dem aktuellen Stand der Technik und Normen ausgelegt und nachgewiesen. Im Folgenden werden die verschiedenen Komponenten in der Verantwortlichkeit von PROSE beschrieben.

3.3.1 Radsatz

Der Radsatz vom Formica HP besteht aus einer innengelagerten Radsatzwelle und zwei aufgepressten Vollrädern mit zylindrischem Presssitz. Der Presssitz ist gemäss DIN 7190 [9] ausgelegt und kann die auftretenden Kräfte und Momente übertragen.
Das Rad wird aus dem Werkstoff ER8, gemäss EN 13262 hergestellt und ist als nichtführendes Rad gemäss EN 13979 [7] für 25 t ausgelegt. Es handelt sich dabei um ein Standardrad von der Firma Luccini, welche auch einen Festigkeitsnachweis für dieses Rad geführt hat.

Die Radsatzwelle wird aus dem Werkstoff EA1N gemäss EN 13261 hergestellt. Die Auslegung für einen innengelagerten Radsatz stützt sich auf der BS 8535 [11] ab, da dies aktuell die einzige verfügbare und gültige Norm für die Berechnung von solchen Radsatzwellen ist. In der aktuell gültigen TSI WAG ist für die Berechnung von Radsatzwellen nur die EN 13103 aufgeführt. Aus diesem Grund wurde ein Antrag für einen innovativen Prozess gestellt, dass die BS 8535 in der TSI WAG aufgenommen wird und der Festigkeitsnachweis von innengelagerten Radsätzen gemäss BS 8535 für eine TSI Zulassung ermöglicht wird.

Die ausgelegte Radsatzwelle hat einen Ø185 mm Radnabendurchmesser, einen Ø195 mm Radsatzlagerdurchmesser und einen Ø207.5 mm Wellenscheibensitz. Zudem ist eine Hohlbohrung von max. Ø59 mm eingeplant, um Gewicht zu sparen. Mit dem abschliessenden Design und dem beschriebenen Nachweiskonzept kann der Festigkeitsnachweis sowohl für die Version mit einer Wellenbremsscheibe pro Radsatzwelle als auch für zwei Wellenbremsscheiben pro Radsatzwelle erfolgreich geführt werden.

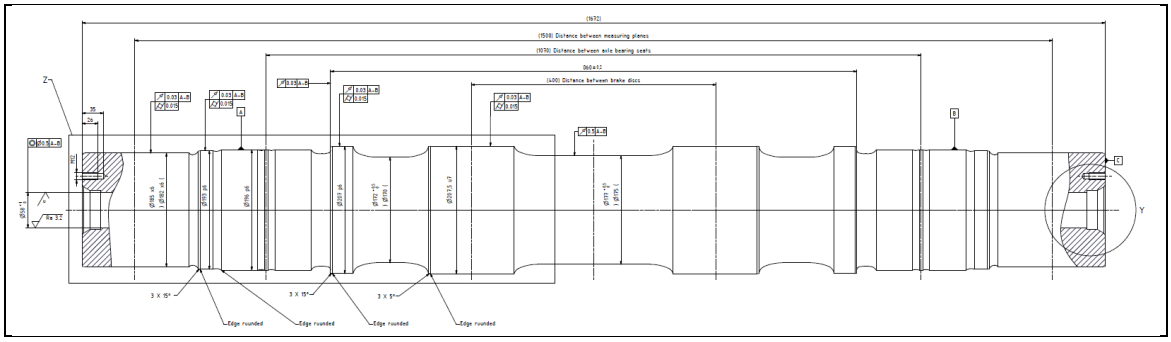


Abbildung 33: Zeichnung Radsatzwelle

Die folgenden Nachweisberichte sind von PROSE bezüglich des Radsatzes erstellt worden:

- [BB] Festigkeitsnachweis Radsatzwelle
- [CC] Nachweis Pressverband

3.3.2 Lastannahmen

Das Formica HP Güterwagendrehgestell ist durchgehend nach den Lasten der EN 13749, sowie partiell nach der EN 12663-1 für den Mitnahmezapfen am Wagenkasten, ausgelegt. Die Anforderungen für ein Güterwagendrehgestell mit Drehzapfen und Gleitelement (Kat. B-V) werden angewendet und auf das Konzept von Formica HP mit Sekundärfedern und Wankanschlägen angepasst. Als Grundlage wird das PROSE Lastannahmentool [V] für Drehgestelle verwendet und mit den Anforderungen vom FORMICA HP ergänzt.

3.3.3 Nachweiskonzept

Die im Schienenfahrzeugbau üblichen und dem Stand der Technik entsprechenden Auswertenormen werden für das Formica HP herangezogen. Im Nachweiskonzept [X] werden die einzelnen Nachweise beschrieben und in den jeweiligen Festigkeitsberichten ausführlich erklärt. Für den Nachweis der statischen Festigkeit wird durchgängig die FKM-Richtlinie und für Ermüdungsbewertungen von Schweisskonstruktionen die DVS 1612 bzw. die FKM-Richtlinie für Guss- oder mechanisch bearbeitete Bauteile angewendet. Alle Strukturbauteile vom Formica HP werden nach dem Dauerfestigkeitsprinzip ausgelegt.

3.3.4 Drehgestellrahmen

Der Festigkeitsnachweis für den Drehgestellrahmen ist in [Y] dokumentiert. Der finale Designstand vom FORMICA HP Güterwagendrehgestell ist sowohl bezüglich Schweissbarkeit als auch bezüglich Festigkeit abgesichert. Mit dem zuständigen Schweissfachingenieur (SFI) von Josef Meyer Rail sind

sämtliche Schweissnahtdefinitionen sowie die Zugänglichkeit abgeklärt und machbar. Diese Informationen sind in die abschliessende Nachweisphase der Festigkeitsberechnung eingeflossen. Zusammen mit den finalisierten Lastannahmen ist der abschliessende Festigkeitsloop durchgeführt worden.

Das Drehgestell ist für eine Achslast von 22.5 t bei einem Eigengewicht von 4650 kg ausgelegt und erfüllt sowohl die Kriterien der statischen Festigkeit bezüglich der aussergewöhnlichen Lastfälle als auch die Kriterien der Dauerfestigkeit für die betrieblichen Lastfälle. Der Drehgestellrahmen ist nach dem Stand der Technik nach der FKM-Richtlinie [2] sowie nach der DVS1612 [3] nachgewiesen. Im Folgenden wird eine Übersicht aus dem Festigkeitsnachweis gegeben.

In Abbildung 34 wird die statische Auslastung der aussergewöhnlichen Lastfälle dargestellt.

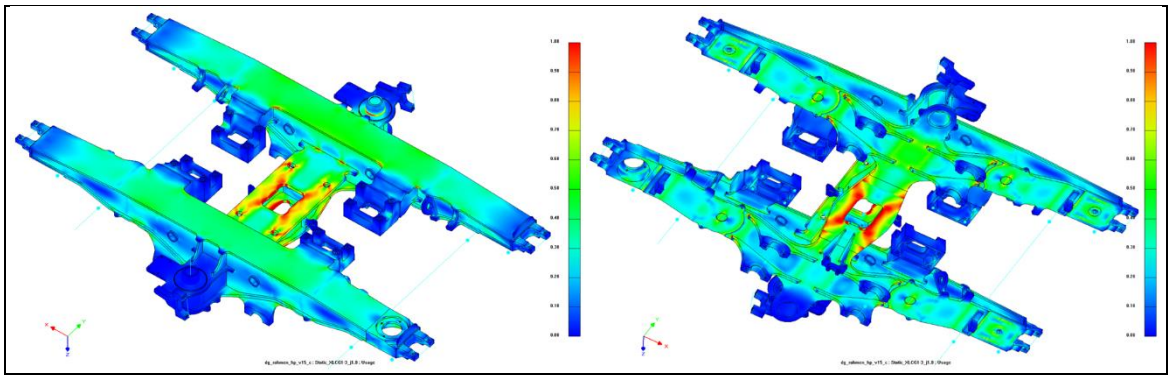


Abbildung 34: Statische Auslastung der aussergewöhnlichen Lastfälle

Speziell bei den extremalen Lastkombination mit der doppelten Bruttoauflast und einem 5g Längsstoss treten Bereiche am Querträger auf, welche lokale Spannungen grösser der Streckgrenze aufweisen. Für die statischen Extremallastfälle sind aber lokale Stellen mit Streckgrenzüberschreitungen zulässig solange keine globalen Deformationen nach dem Entlasten der Struktur auftreten. Diese Regionen sind bezüglich der plastischen Reserve des Materials untersucht worden. Gemäss der FKM-Richtlinie sind für Stahl grundsätzlich Dehnungen bis 5% zulässig. Diese Grenze wird in sämtlichen Regionen unterschritten. Da die Regionen jeweils nur sehr klein sind kann auch eine bleibende Deformation des Drehgestellrahmens unter diesen Lastfallkombinationen ausgeschlossen werden.

Weiter sind die Schweissnahte bezüglich statischer Festigkeit untersucht worden und in Abbildung 35 dargestellt. Für die Schweissnähte kann ausreichend Reserve ausgewiesen werden.

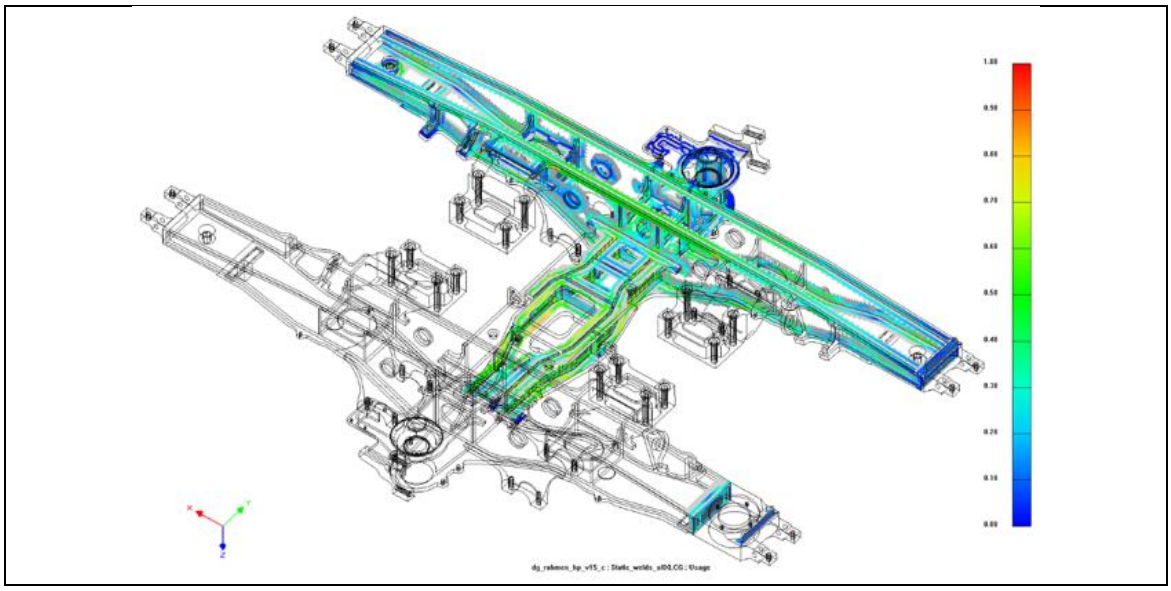


Abbildung 35: Statische Auslastung (Schweissnähte) der aussergewöhnlichen Lastfälle

Mit der finalen Konstruktion des Formica Drehgestellrahmens kann der Nachweis der statischen Festigkeit erbracht werden.

In Abbildung 36 wird die Dauerfestigkeitsauslastung des Grundmaterials für alle betrieblichen Lastfälle dargestellt.

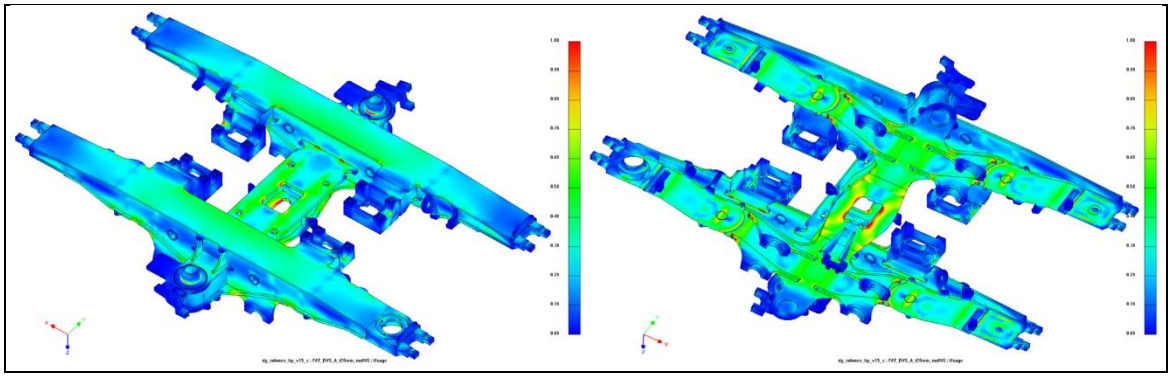


Abbildung 36: Dauerfestigkeitsauslastung der betrieblichen Lastfälle

An einigen Stellen des Rahmens zeigt die Auswertung des Grundmaterials gemäss DVS 1612 leichte Überschreitungen. Diese Bereiche sind jedoch mechanisch bearbeitete Bereiche, welche nach der FKM Richtlinie auch positiv nachgewiesen werden können.

Ein Dauerfestigkeitsnachweis des finalen Designs kann für alle Regionen und Bauteile des Drehgestellrahmens geführt werden.

In Abbildung 37 sind die Ermüdungsauslastungen der Schweissnähte nach DVS 1612:2014 dargestellt. Regionen, welche in den folgenden Abbildungen hohe Auslastungen zeigen sind im Detail untersucht worden. Wo erforderlich sind höhere Schweissnahtqualitäten bezüglich Festigkeitsanforderungen untersucht, mit dem Schweissfachingenieur abgesprochen um im Design umgesetzt.

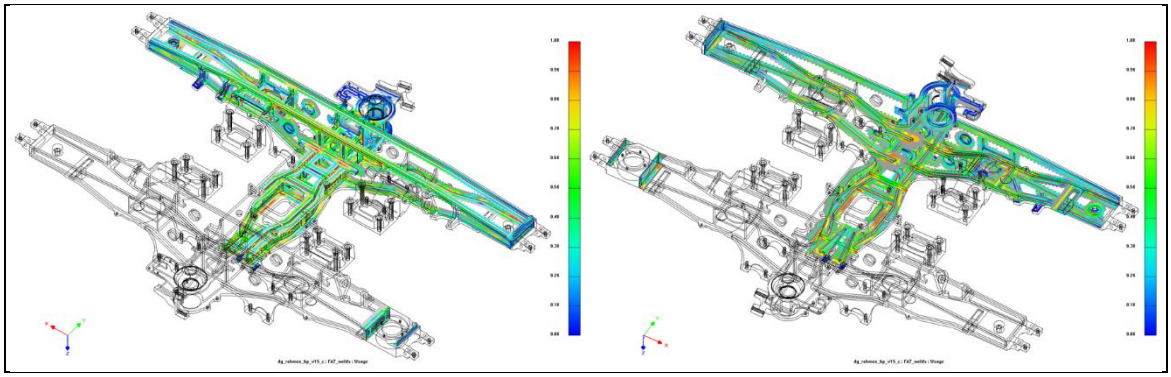


Abbildung 37: Schweissnahtauslastung der betrieblichen Lastfälle

Für sämtliche Schweissnähte an der finalen Konstruktion des Drehgestellrahmens kann ein Dauerfestigkeitsnachweis geführt werden.

Der Festigkeitsnachweis [Y] für den Drehgestellrahmen kann somit erfolgreich geführt werden.

3.3.5 Achslagergehäuse

Der Festigkeitsnachweis für das Achslagergehäuse ist in [Z] dokumentiert. Das Achslagergehäuse ist als Gussbauteil aus GJS-400-18LT gemäss EN 1563 gestaltet und vollständig nach der FKM-Richtlinie [2] nachgewiesen. Die Lasten sind analog zum Drehgestellrahmen nach der EN 13749 [4] hergeleitet und im Lastannahmendokument [W] dokumentiert.

In Abbildung 38 ist die statische Auslastung für alle aussergewöhnlichen Lastfälle dargestellt. Ein Teil-Sicherheitsfaktor (j_G) von 1.25 für zerstörungsfrei geprüfte Gusstücke gemäss FKM Richtlinie [2] wird in der Berechnung berücksichtigt. Die maximale statische Auslastung für die berücksichtigten Lastfälle beträgt 0.99 im Bereich vom Radiusübergang am Presssitz vom Achslenkerlager.

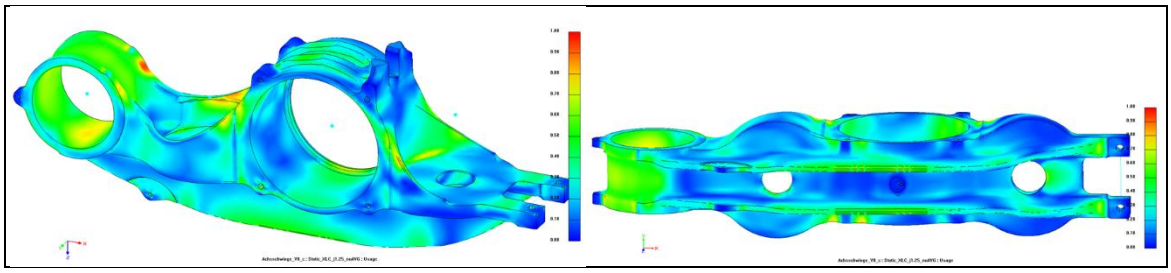


Abbildung 38: Statische Auslastung der aussergewöhnlichen Lastfälle

Das Achslagergehäuse weisst daher ausreichende Sicherheit gegen die statischen extremalen Lastfälle auf. Der statische Festigkeitsnachweis ist somit erbracht.

In Abbildung 39 ist die Ermüdungsauslastung für alle betrieblichen Lastfälle dargestellt. Für die Berechnung wird ein Gesamtsicherheitsfaktor (j_D) von 1.7 gemäss FKM Richtlinie [2] und einer Oberflächenrauheit von Rz 200 µm (entspricht Ra = 31.5 µm was für Gussoberflächen üblich ist) berücksichtigt. Die maximale Ermüdungsauslastung beträgt 0.95.

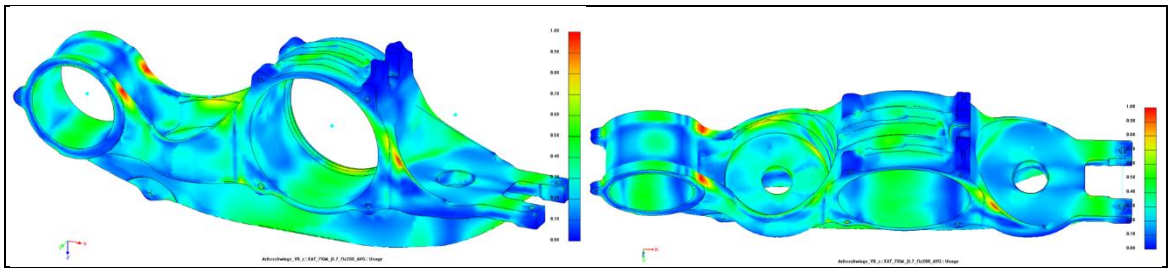


Abbildung 39: Ermüdungsauslastung für alle betriebliche Lastfälle.

Der Dauerfestigkeitsnachweis für das abschliessende Design des Achslagergehäuses kann erbracht werden. Um die Qualität der Bauteile sicherzustellen sind verschiedene Tests sowie Materialproben direkt aus dem gegossenen Bauteil spezifiziert worden [U]. Dies ist auch im Rahmen der FKM Richtlinie für die Anwendung des Sicherheitsfaktors von 1.7 (1.25 für geprüfte Gussbauteile und 1.35 für hohe Sicherheitsanforderungen) notwendig.

Der Festigkeitsnachweis [Z] für die Achsschwinge kann somit erfolgreich geführt werden.

3.3.6 Mitnahmezapfen

Der Mitnahmezapfen ist die Schnittstelle zwischen Wagenkasten und Drehgestell und ist als Schweisskonstruktion aus S355 konzipiert. Als Bestandteil der Wagenkastenkonstruktion basieren die Lastannahmen auf der EN 12663 [5] mit Ergänzungen durch die Schnittstellenlasten nach EN 13749 [4]. Die statische Auslastung des Mitnahmezapfens für die aussergewöhnlichen Lastfälle (5g Längsstoss, Querstoss, maximale Auflast und maximale Dämpferkraft) ist in Abbildung 40 (für Blechteile) und Abbildung 41 (für Frästeile) dargestellt. Die Materialeigenschaften wurden in Abhängigkeit der Bauteildicke angepasst. Ein Sicherheitsfaktor von 1.15 wird in Anlehnung an die EN 12663 [5] für nicht getestete Bauteile in der Berechnung berücksichtigt. Die maximale Auslastung beträgt 0.85.

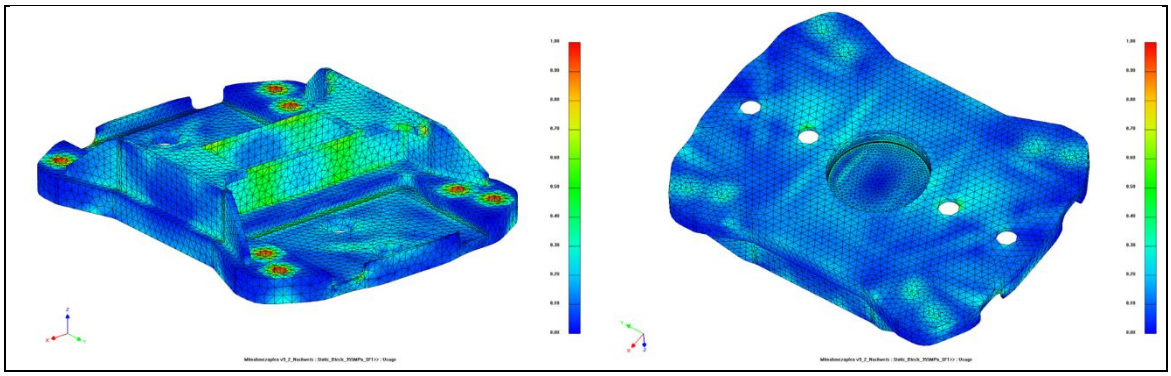


Abbildung 40: Statische Auslastung der Blechteile für die aussergewöhnlichen Lastfälle

Wie in folgender Abbildung dargestellt treten an der Abhebesicherung lokal im Radius hohe Spannungen auf. lokale Überschreitungen der Streckgrenze sind bei ausreichender plastischer Reserve des Bauteils zulässig. Daher werden diese Stellen nach dem Kriterium der zulässigen Dehnung bewertet, welche durchgängig sehr tief sind und der statische Nachweis daher ebenfalls geführt werden kann.

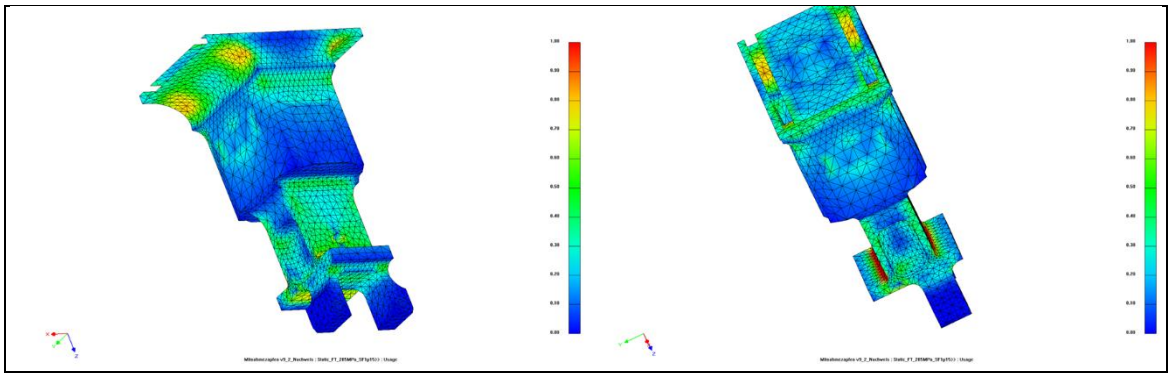


Abbildung 41: Statische Auslastung des Frästeils für die aussergewöhnlichen Lastfälle

Die statische Auslastung der definierten Schweissnähte ist in Abbildung 42 dargestellt. Ein Sicherheitsfaktor von 1.15 wurde in der Berechnung berücksichtigt. Die maximale Auslastung beträgt 0.61.

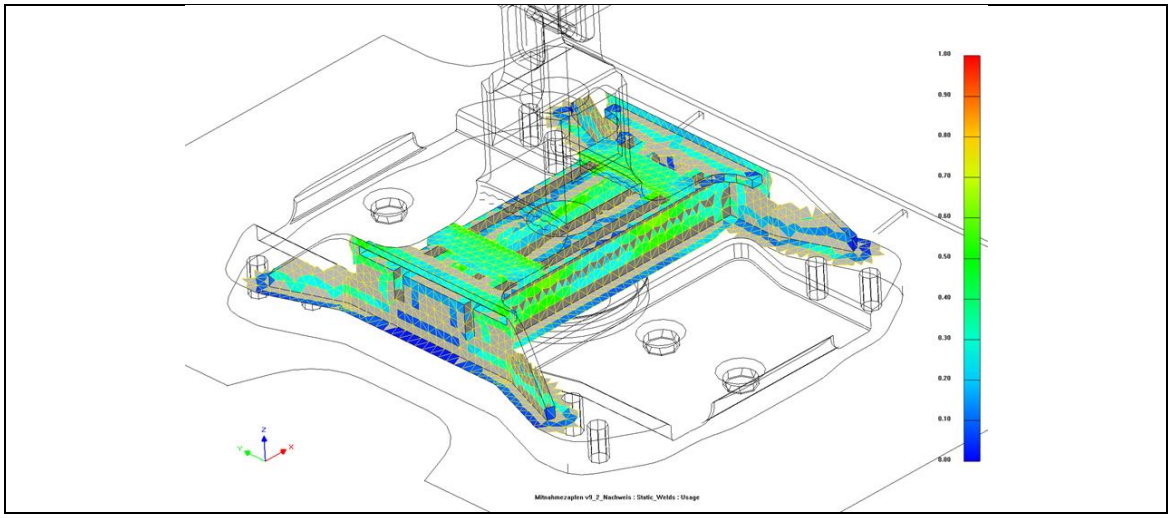


Abbildung 42: Statische Auslastung der Schweissnähte für die aussergewöhnlichen Lastfällen

Abbildung 43 (Blechteile) und Abbildung 44 (Frästeil) zeigen die Ermüdungsauslastung des Mitnahmezapfens für die betrieblichen Lastfälle (Bremskräfte, Querkräfte, Dämpferkräfte und dynamische Auflasten). Ein Blechdickenfaktor für die maximale Blechdicke von 47 mm wird für die Ermüdungsberechnung gemäss DVS 1612:2014 [3] berücksichtigt. Für das Frästeil wird gemäss

FKM Richtlinie ein Gesamtsicherheitsfaktor (j_{GES}) von 1.2 und eine Oberflächenrauheit von Rz = 50 µm (entspricht Ra = 5 µm was für gefräste Oberflächen üblich ist) angenommen. Die maximale Ermüdungsauslastung beträgt 0.79.

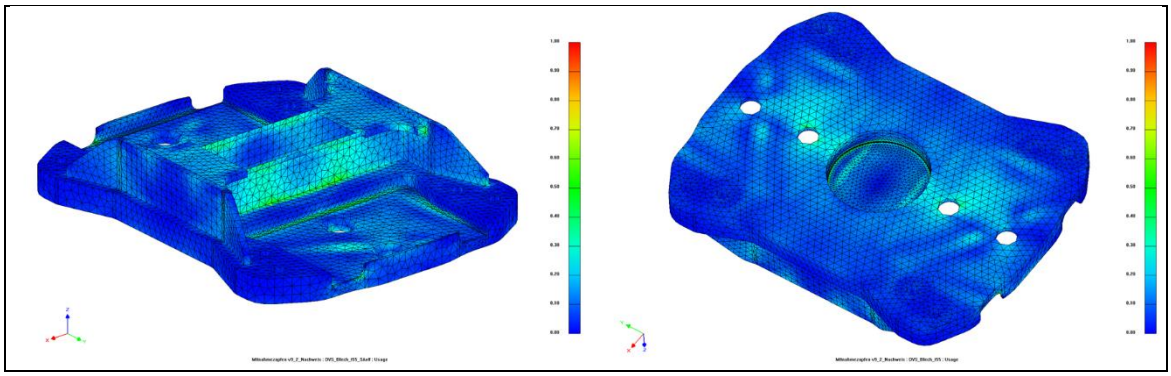


Abbildung 43: Ermüdungsauslastung der Blechteile für die betrieblichen Lastfälle.

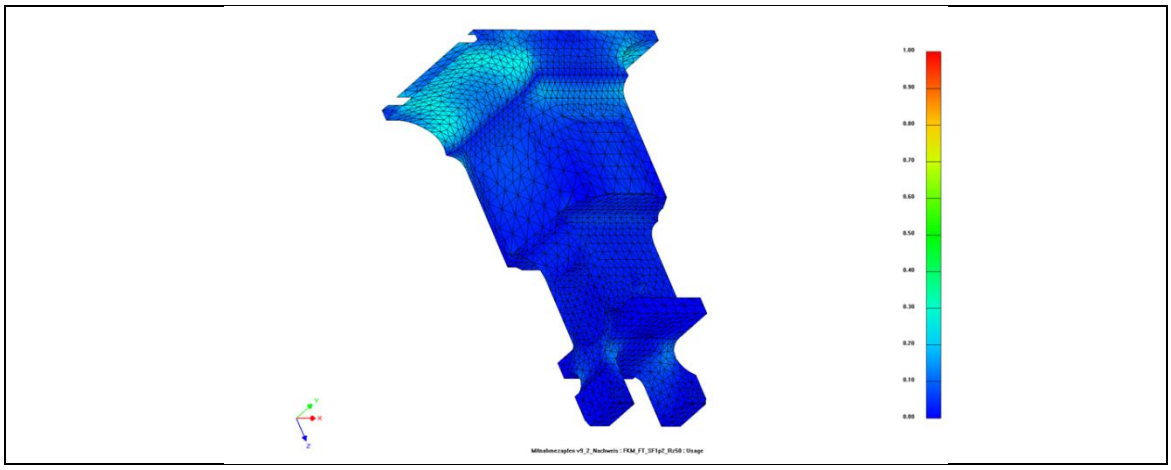


Abbildung 44: Ermüdungsauslastung des Frästeils für die betrieblichen Lastfällen.

Die Ermüdungsauslastung der definierten Schweissnähte gemäss DVS 1612:2014 [3] ist in Abbildung 45 dargestellt. Eine Blechdickenfaktor für die maximale Blechdicke von 47mm wird hier mitberücksichtigt. Die maximale Auslastung beträgt 0.76.

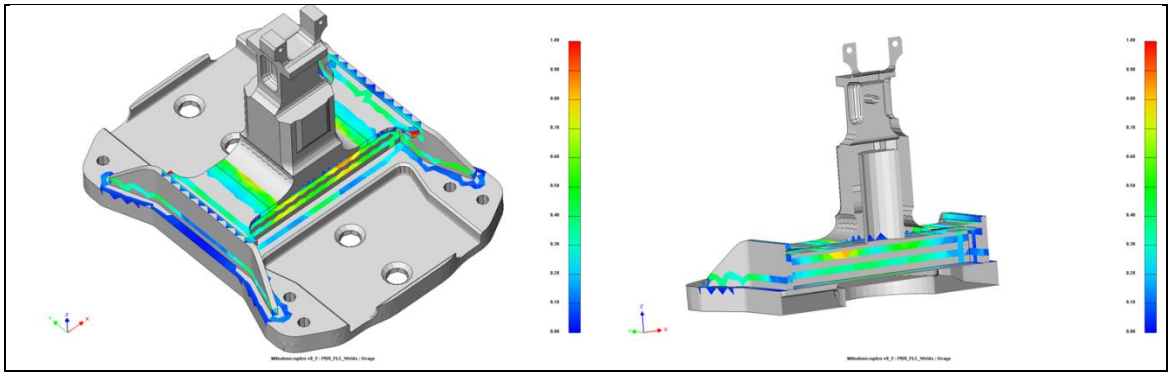


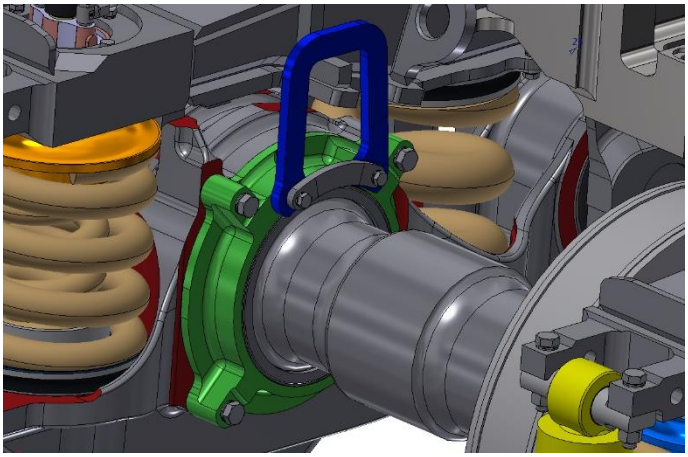
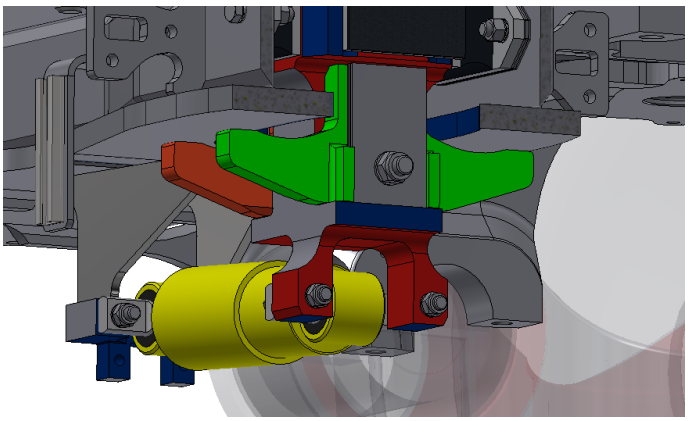
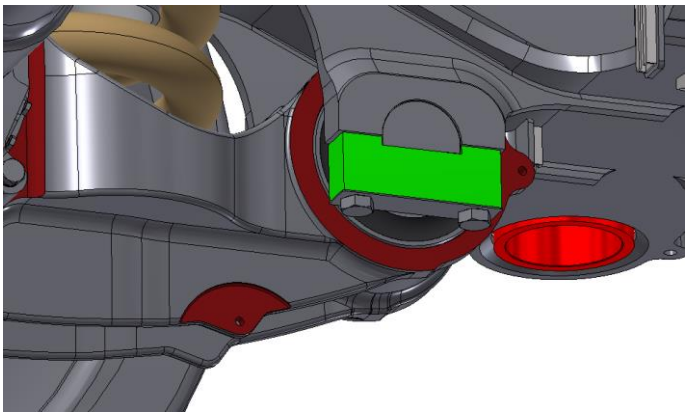
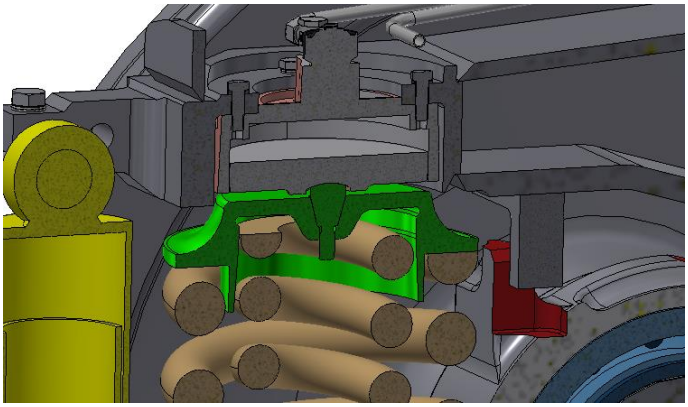
Abbildung 45: Ermüdungsauslastung der Schweissnähte für die betrieblichen Lastfällen.

Der Festigkeitsnachweis [AA] für den Mitnahmezapfen kann somit erfolgreich geführt werden.

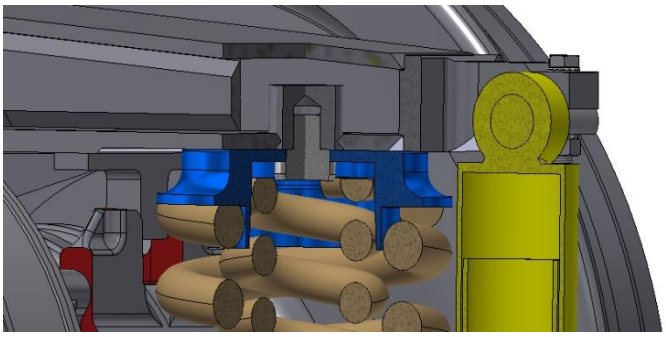
3.3.7 Anbauteile

Im Rahmen der Nachweisführung für das FORMICA HP Güterwagendrehgestell wurden sämtliche Lasttragenden Bauteile analysiert und gegebenenfalls berechnet sowie im Nachweisbericht der Anbauteile [DD] dokumentiert. Im Folgenden werden die entsprechenden Bauteile lediglich der

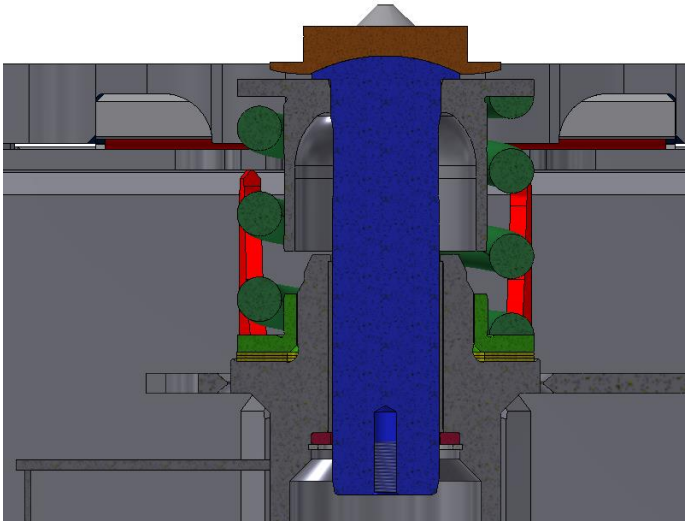
Übersichtshalber dargestellt.

Bauteil	**Abbildung**
Achslagerdeckel und primärer Ausfederanschlag	
Sekundärer Ausfederanschlag	
Brückenverschraubung Achslenkerlager	
Federteller am Wiegeventil	

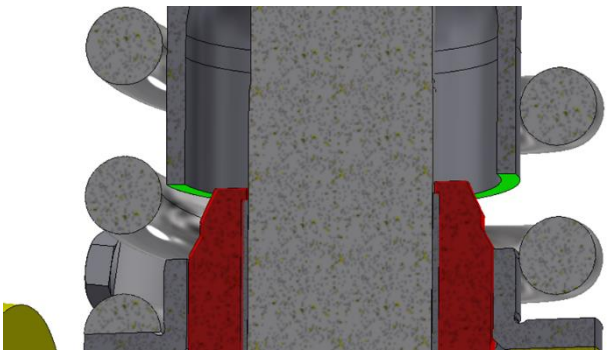
Federteller der Schraubendruckfedern



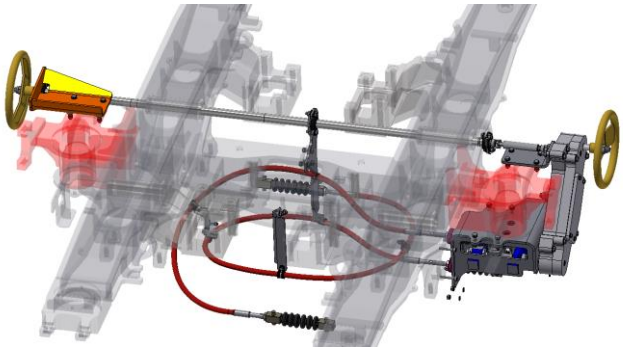
Lagerbolzen am Wankanschlag



Federführung am Wankanschlag



Diverse Bauteile der Handbremseinheit



3.3.8 Schraubenverbindungen

Im Rahmen der Nachweisführung für das FORMICA HP Güterwagendrehgestell sind sämtliche Schrauben analysiert und berechnet sowie im Nachweisbericht der Schraubenverbindungen [EE] dokumentiert worden. Die Verschraubung des Mitnahmezapfen am Wagenkasten ist im Nachweisbericht Mitnahmezapfen [AA] dokumentiert.

Verbindungen mit Risikoklasse «H»

- Befestigung Primärer Vertikaldämpfer am Drehgestellrahmen
- Befestigung Sekundärer Querdämpfer am Mitnahmezapfen
- Befestigung Schlingerdämpfer am Drehgestellrahmen
- Befestigung Bremszangeneinheit
- Brückenverschraubung des Achslenkerlagers
- Befestigung Lagerdeckel Radsatzlagerung in der Achsschwinge
- Befestigung Bremsscheibe

Verbindungen mit Risikoklasse «M»

- Befestigung Flexballkasten am Drehgestell Untergurt
- Befestigung Halter am Obergurt des Drehgestellrahmens
- Befestigung Halter Nebengeräte am Obergurt des Drehgestellrahmens
- Befestigung Getriebebefestigung
- Verbindung Getriebehalbschalen

Verbindungen mit Risikoklasse «M» ohne Berechnungen

- Befestigung Quer- und Längspuffer am Drehgestellrahmen
- Befestigung Ausfederanschlag & Shims-Queranschlag am Mitnahmezapfen
- Befestigung Abhebesicherung am Drehgestellrahmen
- Befestigung Deckel an Radsatzwelle
- Befestigung Abfallsicherung Reibbelag
- Befestigung Halteblech Handbremse
- Befestigung Gelenklager
- Befestigung Radsatzlager Temperaturfühler

3.4 Konzept zur Reduktion von Lärm und Verschleiss

Vom Drehgestell eines Güterwagens wird der wesentliche Anteil des Fahrgeräuschs insbesondere dem Rollgeräusch abgestrahlt. Das Rollgeräusch wird in erster Linie über die Schallanteile von Rad- und Schiene verursacht, erst in zweiter Linie über die Dämpfung, Abstrahlgrad und vibro-akustischer Transfer in den Rahmen.

Die Radsätze der Formica Drehgestelle sind mit Wellenbremsscheiben ausgerüstet. Scheibengebremste Räder weisen nach bisherigen Erkenntnissen geringere Radrauheiten und niedrigere Verschleissraten als bei klotzgebremsten Rädern auf, da beim Bremsen bis auf den Microschlupf kein Abrieb an den Radlaufflächen erfolgt.

Bei scheibengebremsten Rädern entfallen die periodischen Temperaturschwankungen während der Bremsvorgänge nahezu vollständig, so können Räder mit einem geraden Radsteg verwendet werden, welche durch höhere Steifigkeit weniger stark zum Schwingen angeregt werden und dadurch auch weniger Luftschall abstrahlen als gewellte Güterwagenräder. Aufgrund der geringeren Betriebstemperaturen der Räder kann auch problemlos eine zusätzliche körperschalldämpfenden Beschichtung aufgebracht werden. Weitere Massnahmen zur Erhöhung der Raddämpfung sind Dämpfungsringe aus Metall, welche zur Nachrüstung vorgesehen werden.

Beim Formica HP kann nicht auf zugelassene Radsätze zurückgegriffen werden, es ist eine Neuzulassung eines rohen Rades ohne Absorber nötig. Daher werden die zusätzlichen Dämpfungsmassnahmen nur als Option konstruktiv vorgesehen, jedoch nicht im Rahmen des Projekts untersucht.

Die Primärstufe mit Stahlfedern ist über eine Gummischichtfeder schwingungstechnisch vom Rahmen entkoppelt, so dass möglichst wenig Schwingungsenergie vom Achslager in den Rahmen übertragen wird.

In einem 700m Bogen sind Güterwagen i.d.R. um 3-6 dB lauter als auf der Geraden. Bei modifizierten Y25 DG-Konstruktion mit weicheren Primärfedern kann die Einstellbarkeit in Bögen verbessert werden, was auch zu geringeren Vorbeifahrpegeln führt. Bei Messungen dieser modifizierten Y25 DG [8] wurden Pegelminderungen im Bogen zwischen 1 und 2 dB gegenüber dem Standard Y25 DG ermittelt. Beim Formica HP DG ist diese Einstellbarkeit durch die wirkenden Hebelkräfte der Innenlagerung bereits mit dem einfachen Achslagerlenker ALL optimal umgesetzt, so sind die Anlaufwinkel in engen Bögen etwa um 1/4 kleiner als bei einem herkömmlichen Y25 DG und so werden Pegelminderungen in Gleisbögen von mehr als 2 dB erwartet. Ein hydraulisches Achslager HALL würde den Anlaufwinkel vom Formica HP in engen Gleisbögen mit Radien von 300m nochmals verringern, in mittleren Bögen mit Radien um die 500 und 700m unterscheidet sich der Anlaufwinkel allerdings kaum noch von dem einfachen Achslenkerlager. Es wird daher zunächst das einfache ALL im Prototypen DG umgesetzt und für die Zulassung getestet, da es enorme Kostenvorteile in der Fertigung und im Betrieb bietet. Der Verschleiss der Räder wird über die Kraftverhältnisse im Kontaktbereich untersucht und hängt von den jeweiligen Rad- und Schienenprofilen ab. In der laufdynamischen Untersuchung wurden die gemittelten Verschleisszahlen für den Containertragwagen CTW 2004 mit 90 t Gesamtgewicht für den Vollbogen berechnet. Demnach fallen die Verschleisszahlen für das Formica HP mit einfachen ALL und 19 kN/mm Steifigkeit je nach Bogenradius etwa um 1/3 kleiner aus als beim Standard DG Y25. Mit dem HALL wären vor allem in engen Bögen noch geringere Verschleisszahlen möglich, in mittleren Bögen fällt der Unterscheid jedoch nur klein aus.

3.5 Zielerreichung Spezifikation

Die Gegenüberstellung der Zielerreichung und Zielsetzung des Formica HP wird in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Drehgestell Formica HP			
Spezifikation		**Zielerreichung**	**Potentiale**
Zielgewicht	< 4'650 kg	4’750kg	Drehgestell mit einer Wellenbremsscheibe pro Achse, ohne Handbremse, mit Schlingerdämpfer Supporten
Radsatzlast	Tara 4t / Brutto 22.5t	Erfüllt	
Geschwindigkeit	Bis 120 km/h oder optional bis 140 km/h [3]	Auslegung: • 120km/h • Optional 140km/h	Modularer Baukasten aller Systeme damit das Drehgestell optimal an den Anwendungsfall ausgelegt werden kann Einbau von Schlingerdämpfern für hohe Geschwindigkeiten möglich
Laufleistung	min. 100'000 km / Jahr [4]	Erfüllt	
Rahmen	Konventionelle Stahlbauweise H-Rahmen aus geschweissten Blechteilen	Erfüllt	Optimierung komplexer Schweissbauteile durch Gussteile
Achsabstand	1.8 m	Erfüllt	
Schnittstellen	Neue Schnittstelle zum Wagenkasten	Erfüllt	
Achslager	Klassisches Wälzlager, Detektion von Heissläufer mittels Sensorik	Erfüllt	Sensorik erweiterbar für Früherkennung von Lagerschäden
Radiale Einstellbarkeit	Mit normalem Achslenkerlager (ALL) oder hydraulischem Achslenkerlager (HALL)	Erfüllt	Normale Achslenkerlager ALL erfüllen die gesetzten Ziele an die Laufeigenschaften. Ein hydraulisches Achslenkerlager (HALL) kann integriert werden.
Räder	920mm Durchmesser mit geradem Steg	Erfüllt	Zusätzliche Optionen zur Schallminimierung können integriert werden. • Radabdeckungen • Ringdämpfer am Radkranz • Spezialbeschichtung
Radsatzwelle	Wellen mit grösstmöglicher Hohlbohrung	Erfüllt	Durchmesser Hohlbohrung 58mm

[3] Je nach Kombination sind Schlingerdämpfer nötig
[4] Basis für LCC-Kalkulation

Drehgestell Formica HP			
Spezifikation		**Zielerreichung**	**Potentiale**
Bremsen	• Wellenbremsscheiben • Verwendung von Kompaktbremseinheiten • geeignete Materialpaarung vermeidet Bremsenquietschen • Optional: die Verwendung von nur einer Bremsscheibe je Radsatz	Auslegung: • 120km/h mit 1x WBS pro Achse • 140km/h mit 2x WBS pro Achse	Unterschiedliche Materialpaarungen der Bremsscheibe und Bremsbelag sind möglich je nach gefordertem Bremsvermögen und Streckenprofil
Gleitschutz	Elektronischer Gleitschutz auf allen Achsen	Erfüllt	Gleitschutzsystem ist optimiert auf Drehgestell-selektive Ansteuerung
Elektr. Energie	Achsgenerator für die Energieerzeugung	Nicht erfüllt Für das Innengelagerte Design konnte noch keine Lösung mit einem Systemhersteller entwickelt werden. Lieferant KES hat sich kurzfristig aus dem Projekt zurückgezogen	Aktuelle Entwicklungsprojekte gehen alle in Richtung Stromversorgung von der Lokomotive aus. Mögliche Konzepte sind: SBB Cargo: 5L Güterwagen über die Automatische Kupplung RAlpin: Neuentwicklung Gliederzug mit Kabelübergang an den Wagenenden DB: Innovativer Güterwagen Durch Entfallen der Achsgeneratoren wird die Gewichtsbilanz, Herstellungskosten und LCC verbessert. Wünscht ein Kunde Stromversorgung mit Achsgenerator findet sich dazu für eine Serie sicher ein Anbieter (z.B. Start-Up, KES überdenkt entscheid, ...) Im Moment wird hierzu jedoch nichts entwickelt, eine geeignete Schnittstelle ist jedoch vorhanden
Zusatz / Optionen	Sensorik für verschleissabhängige Wartung & Flachstellendetektion		Konzepte zur Überwachung bestehen für: • Diagnose Bremsventile • Lagerschäden erkennen vor Heissläuferdetektion • Früherkennung von Rad-Laufflächenschäden und Flachstellen • Verschleisserkennung Bremsbelag

Drehgestell Formica HP			
Spezifikation		**Zielerreichung**	**Potentiale**
Kosten je DG	max. 38'000 EUR in Serienproduktion (300 Stk. p.a.)	Nicht erfüllt	Optimierung der Herstellkosten für eine Serie durch industrialisierung und Designoptimierung für die Herstellung (Gussteile anstelle Schweisskonstruktion, Optimierung der Bearbeitungszugaben

Tabelle 3 Zielerreichung Formica HP

3.6 Erkenntnisse Finale Designlösung/Berechnungen/Simulationen

Die in der Spezifikation vorgegebenen Ziele werden vom Formica HP Drehgestell weitgehend erfüllt. Die strukturellen und lauftechnischen Anforderungen wurden erreicht. Ebenso die konstruktiven Vorgaben.

Das Zielgewicht des Drehgestells wurde leicht überschritten (um 2%). Die Haupt-komponenten wurden betreffend Gewicht maximal optimiert. Die Radsatzwelle musste in Folge des erforderlichen Nachweises nach BS 8535 relativ stark dimensioniert werden. Die Achsschwinge hat infolge der Aufnahme von drei Federn, sowie des Achslenkerlagers und dem Primärdämpfer ein relativ grosses Gewicht, welche infolge Strukturoptimierung nicht weiter reduziert werden konnte.

Eine Lösung für den Achsgenerator wurde erarbeitet, leider hat sich der Lieferant KES zu einem späten Zeitpunkt aus dem Projekt zurückgezogen, so dass keine finale Lösung vorhanden ist. Es sollte jedoch möglich sein, im Fall einer Serie einen passenden Achsgenerator zu entwickeln.

Die grösste Abweichung der Zielerreichung ergab sich bei den Kosten des Drehgestells. Der Zielpreis kann auch bei einer grösseren Serie vermutlich nicht erreicht werden (siehe 5.1.2).

4 Zulassung

4.1 Zulassungskonzept

4.1.1 Zielsetzung

Ein Fahrzeug mit Formica HP (1BS) Drehgestellen soll im Rahmen des Projekts wie folgt zugelassen werden:

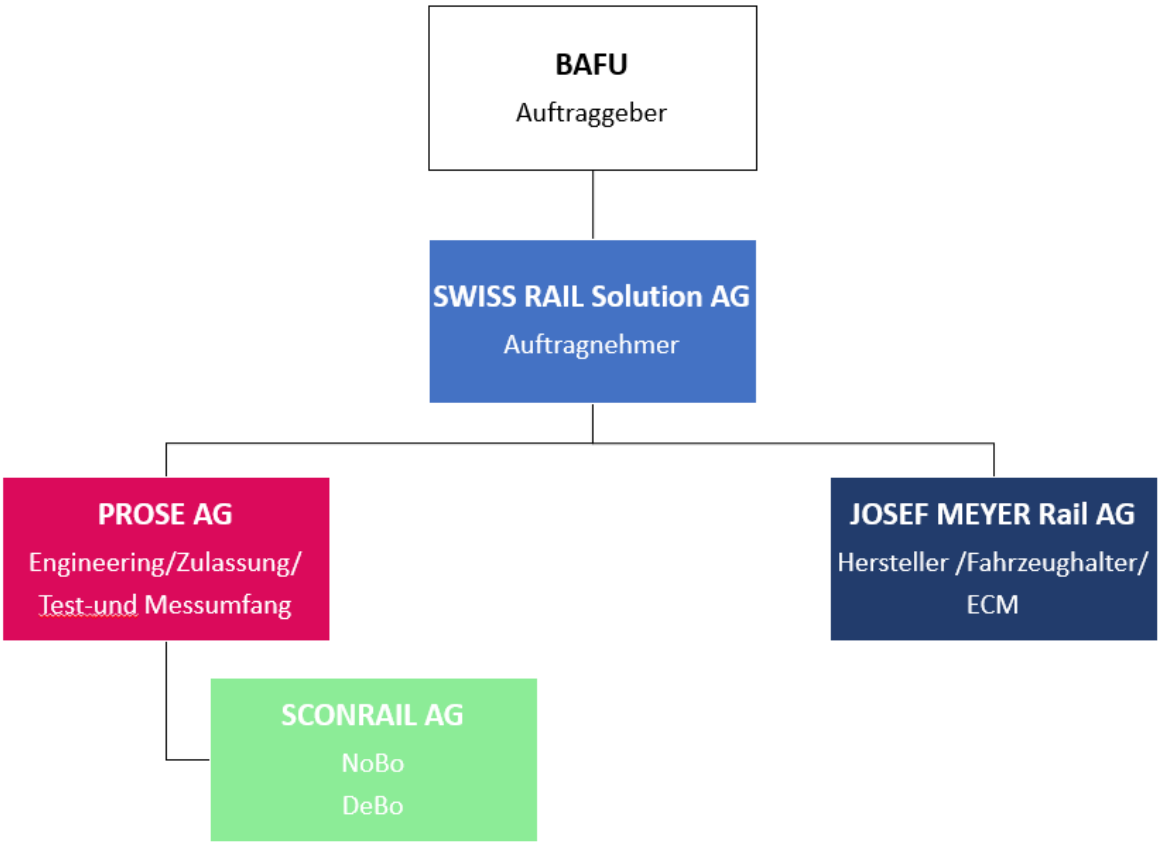
1) Betriebsbewilligung für Versuchsfahrten sowie für den Probebetrieb in der Schweiz

2) Typenzulassung als umgerüstetes Fahrzeug gemäss RTE 49100 des für die Versuchsfahrten verwendeten CTW 2004/Formica HP als weitgehend TSI_WAG konformer Güterwagen in der Schweiz (nationale Zulassung).

Im Rahmen der Zulassung soll das Drehgestell Formica HP als Interoperabilitätskomponente bescheinigt werden. Für die Interoperabilitätskomponenten Radsatz, Achswelle und Rad wird die Bescheinigung über den Hersteller angestrebt. Da in der TSI_WAG eine Bescheinigung von innengelagerten Radsätzen als IK nicht vorgesehen ist, hat PROSE mit Schreiben vom 13.03.2019 an DG-MOVE den Prozess „innovative Lösung“ gemäss Abschnitt 6.1.3. der TSI_WAG gestartet. Der Vorschlag von PROSE ist es, eine analoge Regelung für innengelagerte Radsätze für Güterwagen zu erlauben, wie sie gemäss TSI_LOC&PAS für Personenfahrzeuge und Lokomotiven gilt.

Eine Bescheinigung als international freizügig einsetzbaren interoperablen Güterwagen (Einhaltung aller Bedingungen des Abschnitts 7.1.2.und des Anhangs C der TSI_WAG oder Erfüllung des OTIF-ETV WAG) ist gemäss heutigem Entwicklungsstand des Formica HP und dem aktuellen Stand der TSI_WAG nicht möglich.

4.1.2 Organisation



4.1.3 Containertragwagen CTW mit Formica HP Drehgestell

Die grundlegenden technischen Daten der vorgesehenen Containertragwagen CTW 2004 und des Formica HP Drehgestells sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Dieser Antrag betrifft das Fahrzeug in der Konfiguration als TSI_WAG konformen Güterwagen.

Beschreibung	Einh.	Versuche / Probebetrieb Nationale Zulassung in der Schweiz
Fahrzeug-Typ		Sgnss CTW 2004 / FORMICA HP
Typenbild-Nr.		04-01-19734
Zulässige Geschwindigkeit	km/h	100/120/(140)
Masse Tara	t	18
Zuladung	t	72
Masse Brutto	t	90
Drehzapfen-Abstand	m	14.46
Länge über Puffer	m	20.00
Länge Fahrzeugstruktur	m	18.76
Drehgestell-Variante		Formica HP
Masse Drehgestell	kg	4’700
Achsgenerator / Akku	--	Nicht notwendig für Versuche
Anzahl Bremsscheiben pro DG	--	2
EP-Bremse	--	nein
Handbremse	--	1xCTW mit einem Drehgestell mit Handbremse 1xCTW ohne Handbremse
Gleitschutz	--	Ja
Heissläuferortung	--	„on board“
Temperaturbereich	--	T1
Minimale Achslast	t	4.0

Tabelle 4: Technische Daten des CTW mit Formica HP Drehgestellen

4.1.4 Zielsetzung für die Zulassung

Um die Zulassung von alternativen Güterwagentypen (im gemäss TSI_WAG definierten Parameterbereich) zu vereinfachen, sollen das Drehgestell Typ „Formica HP“ und seine Radsätze als Interoperabilitätskomponenten IK bescheinigt werden.

Eine Zulassung des CTW als freizügig einsetzbares interoperables Fahrzeug (Erfüllung der Vorgaben im Abschnitt 7.1.2 und des Anhang C der TSI_WAG) ist auf Grund des aktuellen Stands Entwicklung des Drehgestells und der TSI_WAG nicht möglich.

4.1.5 Geplanter, provisorischer Meilensteinplan für die Zulassung

Item	Teilschritt	Wer	Termin
1	Anträge an BAV (Versuchsfahrten, Zulassung CH) durch PROSE im Auftrag von SRS	PROSE	05.07.2019
2	Anträge an SCONRAIL (Baumusterprüfung CTW und DG) durch PROSE im Auftrag von SRS	PROSE	30.08.2019
3	Beauftragung Radsatzlieferant mit der Zulassung IK Rad, Achswelle, Radsatz (nicht erfolgt wegen Kostenproblematik Radsatzlieferant)	JMR	30.09.2019
4	Erstellen der Nachweisplan / Dokumentenliste	PROSE	31.03.2021
5	Einholen der Unbedenklichkeitserklärung von SBB Infrastruktur	PROSE	31.01.2021
6	Erstellen der Nachweisdokumente für Genehmigung Versuchsfahrtenn und allenfalls Probebetrieb	PROSE	30.06.2020
7	Zulassung Versuchsfahrten	BAV	28.02.2021
8	Allenfalls Betriebsbewilligung für Probebetrieb	BAV	30.06.2021
9	Erstellen der Nachweisdokumente für Zulassung CH	PROSE	30.04.2021
10	CH Zulassung Güterwagen nach TSI_WAG (allenfalls als „umgerüsteten Wagen“)	BAV	30.06.2021

4.2 Messfahrten / Messprogram

4.2.1 Nachweisumfang der Messfahrten

Gemäss Zulassungskonzept Formica HP/Containertragwagen CTW sind folgende Messfahrten/Versuche vorgesehen:

- Fahrtechnische Prüfungen auf der Strecke (EN 14363)
- Fahrtechnische Prüfung Sicherheit gegen Entgleisen (EN 14363)
- Fahrzeuglärm (TSI_NOISE)
- Einschleifen der für die Brems und Lärmtest verwendeten Drehgestelle
- Bremsleistung (UIC 544-1)
- Thermische Prüfung der Bremse
- Elektrischer Widerstand (EN 50153)
- Streckenversuche Betriebslast Drehgestell (EN 13479:2011)

Das Fahrzeug wird für eine Geschwindigkeit v_{adm} von 120 km/h und einen Überhöhungsfehlbetrag I_{adm} von 130mm (Zugreihe A) zugelassen. Bei den Versuchsfahrten soll überprüft werden, ob im unbeladenen und in einem mittleren Beladungszustand ebenfalls seine Zulassungsgeschwindigkeit v_{adm} von 140 km/h ohne Schlingerdämpfer möglich wäre. Allenfalls wären hier Messfahrten ebenfalls mit Schlingerdämpfer durchzuführen.

4.2.2 Verwiegung

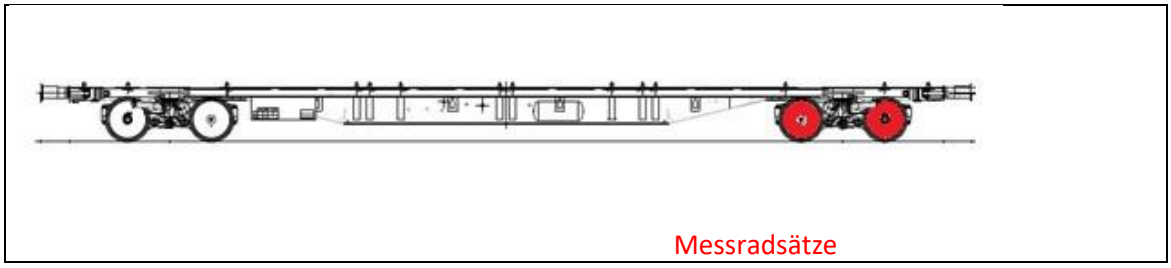
Vor den Versuchsfahrten werden die Radlasten des unbeladenen Fahrzeuges auf einer geeigneten Waage bestimmt.

Im weiteren Versuchsablauf werden ebenfalls die Radlasten des vollbeladenen Fahrzeuges und des teilbeladenen Fahrzeuges bestimmt. Total sind also drei Verwiegungen nötig, welche mit der mobilen Radlastwaage der PROSE AG durchgeführt werden können.

4.2.3 Fahrtechnische Messungen

Messradsätze

Durch die PROSE Deutschland GmbH werden zwei Radsätze zu Messradsätzen umgebaut. Diese werden in einem Formica HP Drehgestell eingebaut.



Sicherheit gegen Entgleisen

Die Versuche der Sicherheit gegen Entgleisen werden nach der EN 14363:2016 nach dem Verfahren 2 (Prüfung auf dem Verwindeprüfstand und im ebenen Versuchsgleis) durchgeführt.
Zuerst wird die Verwindeprüfung mit dem mobilen Verwindeprüfstand der PROSE AG durchgeführt (Zeitaufwand 1 Tag). Danach werden mit den eingebauten Messradsätzen die Querkräfte in einem ebenen (ohne Überhöhung) Bogen mit einem Radis von 150m (z.B. Unterhaltswerkstätte Olten) bestimmt.
Die kompletten Entgleisungssicherheitsversuche werden im unbeladenen Zustand und mit leerem Container (schlechtester Fall aus der Simulation) durchgeführt.

Streckenversuche nach EN 14363

Die Streckenversuche nach der EN 14363:2016 werden nach dem normalen Verfahren (vollständiger Streckenversuch, mit Messradsätzen) durchgeführt. Dabei werden der unbeladene sowie der vollbeladene Containertragwagen berücksichtigt.
Auf Grund der Resultate der fahrdynamischen Simulation ist davon auszugehen, dass ebenfalls der Querdämpferausfall bei den Messfahrten überprüft werden muss. Für die Stabilitätsprüfung im Prüfbereich 1 soll ebenfalls geprüft werden, ob der Wagen mit Formica HP Drehgestell ohne Schlingerdämpfer für eine Geschwindigkeit von 140 km/h zugelassen werden kann.
Folgende mögliche Strecken kommen in Frage:

Strecke	Prüfbereich	Zustände	Anmerkungen
Gümligen – Thun	1	Normalzustand (unbeladen und beladen) Querdämpferausfall (unbeladen und beladen)	$V_{adm,tara}$ = 140 km/h $V_{adm,brutto}$ = 100 km/h
Frauenfeld - Weinfelden	1	Normalzustand (unbeladen und beladen) Querdämpferausfall (unbeladen und belden)	Alternative zu Gümligen – Thun $V_{adm,tara}$ = 140 km/h $V_{adm,brutto}$ = 100 km/h
Winterthur – St.Gallen	2 und 3	Normalzustand (unbeladen und beladen)	$V_{adm,tara}$ = 120 km/h $V_{adm,brutto}$ = 100 km/h
Seuzach – Etzwilen	4	Normalzustand (unbeladen und beladen)	$V_{adm,tara}$ = 120 km/h $V_{adm,brutto}$ = 100 km/h

Während den Versuchsfahrten sind reale Konizitäten von > 0.4 zu erreichen. Dies ist möglich durch:

- Gleiszustand mit hohen Konizitäten
- Verschleiss-Radprofil

Die Messungen in der nahen Vergangenheit haben gezeigt, dass der Zustand der Schienen in der Schweiz nicht zwingend zu hohen Konizitäten führt. Es sei daher hier empfohlen, auf dem Drehgestell ohne Messradsätze (vereinfachtes Messverfahren mit Beschleunigungen) ein Verschleissprofil aufzudrehen. Anschliessend werden die Prüfungen im Beladungszustand tara im Prüfbereich 1 wiederholt.

4.2.4 Einschleifen

Für die Lärm- und Bremsversuche müssen Bremssohlen und Räder eingefahren sein. Falls für die bei den Lärmversuchen eingesetzten Radsätze nicht eine Laufleistung von mindestens 1'000 km mit aktivierten Bremsen bestätigt werden kann, wird PROSE die Testkomposition während drei Tagen in der Schweiz mit aktivierten Bremsen fahren.

4.2.5 Lärmmessungen

Die Lärmmessungen decken den Umfang der TSI_NOISE ab.
Die Vorbeifahrtsmessungen werden mit zwei unbeladenen Fahrzeugen bei 80 km/h und 140 km/h durchgeführt. Verwendet wird die TSI konforme Strecke bei Kerzers.
Die Lärmversuche werden nach der TSI Noise mit einer Komposition von zwei Wagen im unbeladenen Zustand durchgeführt.

4.2.6 Bremsmessungen

Die Versuche zur Bestimmung der Bremsleistung werden nach dem UIC-Regelwerk UIC 540ff durchgeführt.

Statische Bremstests

Vor den dynamischen Bremsversuchen werden statische Bremstests durchgeführt:

- Messung der Bremszylinderdrücke
- Klotzkraftmessung
- Federspeicher
- Messung der Losbrechkraft gemäss UIC 544-1

Dynamische Bremstests

Die dynamischen Bremstests werden mittels Abhängeversuche nach UIC 544-1 durchgeführt. Folgende Tests sind vorgesehen:

- Unbeladener Wagen aus 100 und 120 km/h
- Mittlere Beladung aus 100 und 120 km/h
- Volle Beladung aus 100 km/h

4.2.7 Thermische Prüfung der Bremse

Dieser Versuch findet im voll beladenen Zustand statt.
Ziel ist es, den Nachweis mittel zwei hintereinander durchgeführten Schnellbremsungen aus 120 km/h zu führen. Da das Drehgestell voraussichtlich nur eine Bremsscheibe pro Radsatz besitzt, könnte dieser Nachweis kritisch sein. Allenfalls gäbe es hier auch Möglichkeiten eines alternativen Nachweises (Messung mit Sägezahn-Geschwindigkeitsprofil am Gotthard).
Nachgewiesen werden muss, dass nach einer Schnellbremsung die Bremse nicht an Reibwert verliert und diese unmittelbar weiterverwendet werden kann.
Während den Versuchen wird ebenfalls das Auskühlverhalten der Bremsscheiben charakterisiert (Thema Böschungsbrand etc.)

4.2.8 Elektrischer Widerstand

Die Impedanz zwischen dem Untergestell und der Schiene wird nach EN 50153 Kapitel 6.4 für zwei Drehgestelle messtechnisch bestimmt.

4.2.9 Drehgestell Betriebslast

Zur Ergänzung der Prüfstandsversuche zum Nachweis der Festigkeit nach EN 13749 werden Streckenversuche durchgeführt. Es wird ein Drehgestell mit ca. 45 DMS nach Vorgaben des Engineerings (kritische Stellen, Hotspots…) instrumentiert.
Die Streckenversuche werden mit Teilbeladung (oder leerer Wagen) und einer Geschwindigkeit bis 120 km/h durchgeführt. Ebenfalls wir die maximale Beladung mit 100 km/h geprüft. Eine mögliche Strecke hierfür nach EN 13749 wäre der Nord-Süd-Korridor über die Gotthard-Panoramastrecke.
Die Gesamtlänge der gemessenen Strecke muss mindestens einem zehntausendstel der Lebensdauerkilometer des Drehgestells entsprechen. Bei einer Lebensdauer von ca. 4.5 Mio Kilometer entspricht dies einer Versuchsstrecke von mindestens 450 km.

5 Herstellung

5.1 Kalkulation der Fertigungskosten

5.1.1 Kalkulation Prototypen

Die Kostenübersicht der Prototypen-Drehgestelle ist in folgende Positionen aufgeteilt:

- Einmalkosten JMR für die Herstellung
- Einmalkosten von Lieferanten für Produkteentwicklung
- Materialkosten Zukaufteile
- Arbeitsaufwände für Prototypherstellung

					Einmalkosten		PROTOTYP			
					Entwicklung	Produktion	Material	Arbeit		VK (5x DG)*
Struktur	Bauteil-Nr.	Einheit	Beschreibung	Anmerkungen	€	€	€	h/St.	Su. h	€
0	EMO	Stk.	EMO DREHGESTELL	5 DG Prototyp	0	20'000	2'500	40	200	47'660
1	04-01-19446	Stk.	Radsatz komplett	60 mm Bohrung statt 58	136'000	42'173	189'969	0	400	304'658
2	04-01-20121	Stk.	DG-Rahmen Bearbeitung	kompl. DG incl. Bearb.	0	39'091	32'242	120	600	149'782
3	04-01-19908	Stk.	Primärstufe		31'455	20'364	29'626	0	0	53'545
4	04-01-19911	Stk.	Sekundärstufe	incl. Mitnahmezapfen	0	23'227	28'235	4	16	56'839
5	04-01-19910	Stk.	Bremsausrüstung	nur eine Bremsscheibe	92'000	0	45'800	0	0	51'296
6	04-01-19548	Stk.	Elektrische Ausrüstung	nur Temperatur etc.	0	0	5'501	0	0	6'161
7	04-01-18948	Stk.	Feststellbremse kpl.	pauschal nur 1x Prototyp	0	0	2'500	0	8	3'794
8	Sonstige	Stk.	Sonstiges	Miete, Umbau, Dämpfer	0	0	52'636	0	0	58'952
* incl. Einmalkosten				**Summe**	**259'455**	**144'855**	**389'009**	**164**	**1'224**	**732'688**

Abbildung 46: Herstellungskosten Prototypen Drehgestell

Fazit der Projektkosten für Prototyp:

Für die Herstellung der Prototypen Drehgestelle ergeben sich folgende Haupt-Kostentreiber:

- Einmalkosten von Lieferanten für Produkteentwicklung: 260 TEUR
- Einmalkosten Produktion (Werkzeuge, Vorrichtungen, Formen): 145 TEUR
- Materialkosten: 389 TEUR

Die reinen Herstellkosten für vier Drehgestelle betragen 732 TEUR. Berücksichtigt man die Einmalkosten von SRS für die Herstellung und Projektbetreuung sowie die Einmalkosten der Lieferanten für Produkteentwicklung, so wird das Budget für die Prototypen Drehgestelle um mehr als 353 TEUR überschritten.

Diese Kosten werden zu 70 % durch die Materialkosten der Zukaufteile und die Einmalkosten, welche die Lieferanten für ihre Produktentwicklung abgegolten haben möchten, dominiert.

5.1.2 Kalkulation der Serienproduktion

Die Kostenübersicht für die Serienherstellung wurde auf der Basis von 300 Drehgestellen pro Jahr kalkuliert.

					300-er Serie/anno			
					Material	Arbeit		VK (1x DG)
Struktur	Bauteil-Nr.	Einheit	Beschreibung	Anmerkungen	€	h/St.	Su. h	€
0	EMO	Stk.	EMO DREHGESTELL	5 DG Prototyp	250	15	15	2'145
1	04-01-19446	Stk.	Radsatz komplett	60 mm Bohrung statt 58	26'440	0	0	29'613
2	04-01-20121	Stk.	DG-Rahmen Bearbeitung	kompl. DG incl. Bearb.	6'079	0	103	19'611
3	04-01-19908	Stk.	Primärstufe		4'019	0	0	4'501
4	04-01-19911	Stk.	Sekundärstufe	incl. Mitnahmezapfen	3'527	0	4	4'448
5	04-01-19910	Stk.	Bremsausrüstung	nur eine Bremsscheibe	8'750	0	0	9'800
6	04-01-19548	Stk.	Elektrische Ausrüstung	nur Temperatur etc.	600	0	0	672
7	04-01-18948	Stk.	Feststellbremse kpl.	pauschal nur 1x Prototyp	900	0	2	1'257
8	Sonstige	Stk.	Sonstiges	Miete, Umbau, Dämpfer	0	0	0	0
				Summe	**50'564**	**15**	**124**	**72'045**

Abbildung 47: Herstellkosten Serienproduktion

Fazit der Projektkosten für Serie

Die Kostenübersicht für die Serienherstellung wurde auf der Basis von 300 Drehgestellen pro Jahr kalkuliert. Zusammenfassend ergibt sich folgendes:

- Mit 72 TEUR liegt der Preis pro Drehgestell derzeit fast 100 % über dem Zielpreis.
- Dieser wird mit über 50 TEUR durch die Einkaufsteile dominiert.
- Durch vertiefte Verhandlungen vor Produktionsstart kann der Preis auf ca. 63 TEUR gesenkt werden (Kostenoptimierung von 12 %).

- Im Verlauf der Fertigung kann erfahrungsgemäss eine Kostenoptimierung von bis zu 20 % über einen Zeitraum von 3 Jahre erreicht werden. Somit ergibt sich ein Serienpreis von 51 TEUR pro Drehgestell. Dieser Schätzung liegen die notwendigen Stückzahlen zugrunde. Bei einem Einstandspreis von 63 TEUR wird es aber kaum möglich sein, Bestellungen für solche Stückzahlen zu erhalten.
- Auch nach einer Industrialisierungsphase von 3 Jahren sind die Kosten ca. 13 TEUR über dem Zielpreis.

5.2 Erkenntnisse Kostenkalkulation

- JMR und PROSE sehen sich derzeit nicht in der Lage bei einer geplanten Stückzahl von 300 DG/pro Jahr den Zielpreis von 41’800 CHF (38'000 EUR) pro Drehgestell zu erreichen.
- Das Y25 Drehgestell wird mit sehr viel grösseren Stückzahlen produziert (20’000 DG pro Jahr) und ist auf das Optimum industrialisiert.
- Die Anbieter der Komponenten wie Knorr und Lucchini bieten auf Basis der Mengen keine wettbewerbsfähigen Konditionen an.
- Über 70 % der Kosten sind Materialkosten für Zukaufsteile (reine Einkaufskosten) ohne Einmal-, Transport-, Lager, oder sonstige Beschaffungskosten.

5.3 Lieferanten

Die Zusammenarbeit mit den Lieferanten war in dem Formica HP Projekt eine grosse Herausforderung, da die Reaktionszeit und Kooperationsbereitschaft sehr unterschiedlich war. Dennoch ist es gelungen, für die wichtigsten Komponenten des Formica HP Drehgestells Lieferantenabklärungen durchzuführen und Schnittstellen sowie Bauräume abzuklären. Für die wichtigsten Komponenten wurden Richtpreisangebote für die Prototypdrehgestelle übermittelt.

5.3.1 Radsatz

- **Lucchini**: Hat die PROSE Spezifikation mit einem CBC (Clause by Clause) kommentiert. Ein Richtpreisangebot wurde übermittelt. Lucchini bietet Standard Güterwagenräder an. Die Radsatzwelle wurde als Neukonstruktion angeboten. Gemäss dem Angebot und der technischen Unterstützung ist Lucchini der favorisierte Lieferant.

- **GHH - Bonatrans und Bochumer Verein Verkehrstechnik BVV** haben auch Angebote abgegeben. Diese sind jedoch preislich ungünstiger als das Lucchini Angebot.

5.3.2 Radsatzlager

Für die Radsatzlager wurde eine Spezifikation erstellt. Folgenden Lieferanten wurde diese zugestellt:

- **SKF**: konnte kein geeignetes Kegelrollenlager anbieten, welches die Lebensdauer für das Formica HP Drehgestell erfüllt.

- **FAG Schäffler**: konnte kein geeignetes Lager in der benötigten Dimension anbieten.

- **NTN- SNR:** hat ein Kegelrollenlager angeboten, welches auf einem bewährten Radsatzlager basiert. Der Innenring dieses Lagers wird von d=208 mm auf d=196mm reduziert, um auf den optimierten Lagersitz der Radsatzwelle zu passen. Dieses Lager hat eine rechnerische L10 Lebensdauer von 6.7 Mio. km. NTN war als einziger Lieferant bereit eine Anpassungs-

konstruktion umzusetzen. Deshalb ist NTN- SNR der einzige Lieferant, welcher eine Lösung anbieten kann.

- **Radsatzlagergehäuse**

Das Radsatzlagergehäuse ist als Gusskonstruktion aus Sphäroguss GJS400-18LT konzipiert. Zur Anfrage wurde ein 3D Modell des Bauteils erstellt und Festigkeitsberechnungen durchgeführt.

- **Foacas (Hergiswil):** Mit Fa. Foacas wurden Details zur Herstellung, Formteilung etc. geklärt. Ein Richtpreisangebot wurde übermittelt.

5.3.3 Bremsen

Für die benötigten Scheibenbremseinheiten wurde eine Spezifikation erstellt. Folgenden Lieferanten wurde diese Spezifikation zugestellt:

- **Knorr- Bremse**: hat auf die PROSE Anfrage kompetent und mit Interesse reagiert. Knorr ist ein etablierter Lieferant von kompletten Bremssystemen und führend in innovativen Komponenten. Knorr hat zunächst Hängelaschen Bremseinheiten angeboten. Infolge des begrenzten Bauraums beim innengelagerten Drehgestell konnte mit diesen Bremszangen keine Lösung gefunden werden. Daraufhin hat Knorr innovative Kompaktbremszangen - Einheiten angeboten, die speziell für den Güterwagenbereich entwickelt wurden. Diese Einheiten sind erheblich kompakter, so dass sie in den zur Verfügung stehenden Bauraum passen. Zudem sind sie leichter und haben eine etwa 20% höhere Bremszangenkraft als die Hängelaschen - Einheiten. Das Richtpreisangebot für diese Bremsen war zudem nur ca. 10% höher. Aus diesen Gründen wurde Kompaktbremszangen Einheit als favorisierte Scheibenbremseinheit gewählt und konstruktiv integriert.

- **Dako/Kovis**: Diese zwei Anbieter arbeiten zusammen, um Komplettsysteme anzubieten. Kovis ist ein Hersteller von Bremsscheiben und Dako von Bremseinheiten. Dako hat Hängelaschen-brems - Einheiten angeboten. Um eine Integration dieser Einheiten in dem begrenzten Bauraum zu ermöglichen, war Dako bereit einige Änderungen an den Einheiten vorzunehmen, so dass eine Integration möglich wurde. Allerdings ist das Richtpreisangebot von Dako höher als das Angebot von Knorr und befindet sich im Bereich der Kompaktbrems - Einheiten von Knorr. Damit fiel die Entscheidung zu Gunsten der Knorr – Bremse aus, welche zusätzliche Vorteile bietet.

- **Faiveley**: Ähnlich wie Knorr sind sie ein Anbieter von Komplettsystemen. In unserem Falle war die Kontaktaufnahme schwierig. Auf unsere Anfragen bei mehreren Personen wurde nicht reagiert. Faiveley hat offensichtlich kein Interesse und wurde deshalb nicht mehr als Lieferant in Betracht gezogen.

5.3.4 Gummi-Metall-Elemente

Für die benötigten Gummi-Metall-Elemente wurden Spezifikationen erstellt (Sekundär-Gummischichtfeder, primäre Schichtfedern, Längs- und Querpuffer, Achslenkerlager). Folgenden Lieferanten wurde diese Spezifikation zugestellt:

- **Trelleborg**: Der Lieferant wurde sehr früh in der Konzeptphase angefragt, denn diese Komponenten sind massgebend für die Primärstufe. Trelleborg ist der Lizenzinhaber für hydraulisches Achslenkerlager (HALL) Elemente, diese können nur über Trelleborg beschafft werden. Trelleborg hat ein Richtpreisangebot für ein konventionelles und alternativ für ein HALL abgegeben.
  Betreffend der sekundären Gummischichtfeder hat Trelleborg ein Bauteil angeboten, welches die spezifizierten Eigenschaften sehr gut erfüllt. Dabei handelt es sich um eine Feder, die schon

in anderen Drehgestellen (z.B. Axiom TF25) verwendet wird. Gemessene Kennlinien der Steifigkeiten sind vorhanden. Das Design Risiko ist mit diesem Element deshalb gering.

- **Rex:** Wurde betreffend der sekundären Gummischichtfeder angefragt. Rex hat angeboten, diese Feder neu zu entwickeln. Dies wurde zugunsten der bereits vorhandenen Gummischichtfeder von Trelleborg nicht weiterverfolgt. Anfragen zu Längs- und Querpuffern sowie Schichtfedern für die Primärstufe wurden gestellt. Hier hat Rex Konzepte ausgearbeitet und ein Angebot erstellt. Für diese Komponenten ist Rex der favorisierte Anbieter.

- **Bategu: W**urde betreffend der sekundären Gummischichtfeder angefragt. Bategu hat angeboten, diese Feder neu zu entwickeln. Dies wurde zugunsten der bereits vorhandenen Gummischichtfeder von Trelleborg nicht weiterverfolgt. Anfragen zu Längs- und Querpuffern sowie Schichtfedern für die Primärstufe wurden gestellt. Ein Angebot wurde abgegeben.

- **GMT**: Technische Abklärungen betreffend dem Achslenkerlager wurden durchgeführt. Ein Richtpreisangebot wurde abgegeben. Dieses war preislich am besten. Hier ist GMT der präferierte Lieferant.

5.3.5 Schraubendruckfedern

- **Grüber:** Hat die von PROSE ausgelegten Schraubendruckfedern für die Primärstufe betreffend Herstellbarkeit und Festigkeit bestätigt und ein Richtpreisangebot für die Federn abgegeben.

5.3.6 Schwingungsdämpfer

- Für die benötigten Schwingungsdämpfer wurde eine Dämpferspezifikation sowie Bauraumzeichnungen erstellt. Folgenden Lieferanten wurde diese Spezifikation zugestellt.

- **ZF-Sachs**: Haben umgehend reagiert und diverse technische Optimierungen der Dämpferanordnung vorgeschlagen. Die geforderten Kennlinien können eingehalten werden. Zeichnungen der Dämpfer wurden übergeben. Ein Richtpreisangebot erstellt. Der Preis war hoch.

- **Gerep**: Hat umgehend reagiert und ebenfalls technische Optimierungen der Dämpferanordnung vorgeschlagen. Lieferantenzeichnungen und ein Richtpreisangebot wurden übermittelt. Das Angebot war deutlich günstiger, als das von ZF. Damit ist Gerep der präferierte Lieferant.

- **Koni**: Hat Interesse und hat Rückmeldung zu den Dämpferanordnungen gegeben. Eine Offerte wurde nicht abgegeben.

5.3.7 Elektrische Energieversorgung

Achsgenerator:

Für die geplanten Achsgeneratoren als Energieversorger für die On-Board Elektronik vom Gleitschutzrechner und der Sensorik für die Heissläufererkennung, konnte keine technische und kommerzielle Lösung mit einem Hersteller gefunden werden.

Als alternative Stromversorgung auf dem CTW Wagen wird eine Stromversorgung von der Lokomotive aus realisiert. Die elektrische Verbindung kann auch für die Diagnosedaten der Sensorik genutzt werden, um die Heissläuferdetektion an den Fahrzeugführer anzuzeigen oder an die Leitstelle weiterzuleiten.

Das Konzept einer Energieversorgung vom Zugfahrzeug aus besteht als zentrales Element auf den verschiedenen Projekten und Studien zu den Innovativen Güterwagen. Dies wird mittels einer

durchgängigen Stromversorgung auf den Wagen erreicht. So können die Potenziale der Digitalisierung für die Teil-Automatisierung des Betriebs (z.B. automatische Bremsprobe) und die verstärkte Nutzung von Diagnosedaten aus Sensorik oder auch eine elektro-pneumatische Bremse erschlossen werden.

Bestehende Konzepte sind:

- SBB Cargo: 5L Güterwagen über die Automatische Kupplung
- RALpin: Neuentwicklung Gliederzug mit Kabelübergang an den Wagenenden
- DB: Innovativer Güterwagen

KES: Die Firma KES hat sich ursprünglich bereit erklärt, mit PROSE einen projektspezifischen Achsgenerator für das innengelagerte Drehgestell Design neu zu entwickeln. Über mehrere Monate wurde intensiv an einem möglichen Konzept mit technischer Lösung gearbeitet. KES hatte einen am Achsende befestigten Achsgenerator vorgeschlagen, der über eine kleine Drehmomentstütze am DG-Rahmen abgestützt wird. Aus Gründen der stationären Heissläuferortungsanlagen, wurde eine kompakte Einheit entworfen, welche an beiden Achsenden vorgesehen war.

Im Juni 2019 teilte uns KES mit, dass die angestrebte Lösung und Zusammenarbeit nicht weiterverfolgt werden kann, da die geforderte Leistung Aufgrund der kleinen Baugrösse auch mit zwei Einheiten pro Drehgestell nur knapp erreicht werden. Weiter wurden der hohe Entwicklungsaufwand sowie die kleine Herstellmenge für die Prototypen Drehgestelle als Grund angegeben.

Tibram: Hat einen Achsgenerator vorgeschlagen, welcher zwischen Radsatzlager und Bremsscheibe angeordnet ist. Aus Gründen des Bauraums und der Zugänglichkeit musste diese Lösung leider verworfen werden. Ein aussen am Achsende befestigter Achsgenerator konnte Tibram nicht anbieten.

5.3.8 Zusatzausrüstung

Unter die Zusatzausrüstung fallen Komponenten und Systeme, die am Drehgestell angebaut werden können. Um die Verwendung dieser Komponenten zu ermöglichen, müssen sie konstruktiv integriert werden, auch wenn diese im Prototyp nicht verbaut werden.

Gleitschutz

SWISS Rail Solution hat sich beim Drehgestell zum Ziel gesetzt, bei Scheibenbremsen nicht nur die normativen Anforderungen einzuhalten (bis 120 km/h ist ein Gleitschutz nicht zwingend nötig), sondern die Möglichkeit zu bieten, einen Gleitschutz auch bei tieferen Geschwindigkeiten einsetzen zu können. Dadurch wird das kurzzeitige Blockieren der Räder und daraus resultierende Flachstellen vermieden. Das gewährleistet glatte Laufflächen und grosse Überdrehintervalle sowie eine lange Lebensdauer der Räder.

Bei der Verwendung eines Gleitschutzes werden zusätzliche Komponenten benötigt, die in einem klassischen Y25 mit Klotzbremse nicht vorhanden sind:

- Sensor am Radsatz für Detektion der Blockierung (Polrad)
- Gleitschutzrechner
- Zusätzlicher Luftbehälter
- Gleitschutzventile

- Stromversorgung für Gleitschutzrechner

Da die Platzverhältnisse im Drehgestell limitiert sind, müssen gewisse Komponenten des Bremssystems im Wagenkasten untergebracht werden. Das Bremssystem teilt sich deshalb in zwei Teile:

- Drehgestell: Bremsscheiben, Bremszangeneinheiten, Handbremse inkl. Handrad, Gleitschutzsensor

- Wagenkasten: Gleitschutzrechner, Gleitschutzventile, Stromversorgung und- Speicherung, Zusatzluftbehälter

5.1 Erkenntnisse/Probleme

Die Zusammenarbeit mit den Lieferanten war teilweise schwierig. Manche Lieferanten zeigten kaum Interesse an dem innovativen Projekt. Die Reaktionszeiten auf Spezifikationen und Anfragen waren teilweise sehr lang. In Einzelfällen wurde eine Angebotsabgabe abgelehnt. Einige Komponentenhersteller waren jedoch aufgeschlossen, und haben das Projekt positiv unterstützt (z.B. der Bremsenlieferant Knorr oder der Radsatzlieferant NTN SNR).

5.2 Mögliche Einsparnisse/Kostenreduktion

Die Kosten der Komponenten könnten mittels eines «low cost sourcings» reduziert werden. Die Y25 Drehgestelle werden heute z.B. überwiegend in «low cost countries» hergestellt. Es ist daher schwer möglich, diese Preise mit hochpreisigen Qualitätslieferanten zu erreichen. Auch hat Swiss Rail Solutions infolge der fehlenden Umsätze in diesem Bereich zu wenig Marktmacht, um bei den Lieferanten tiefere Preise durchzusetzen. Die grossen Systemanbieter haben dabei mehr Möglichkeiten. Ein aktives Einkaufsmanagement ist die Voraussetzung für die Erzielung tieferer Einkaufspreise.

6 LCC Übersicht

6.1 LCC Berechnung

Die anvisierte Lebensdauer der wichtigsten Verschleisskomponenten (Räder, Bremsscheiben) und die Überholintervalle (Radsatzlager) werden aufeinander abgestimmt, damit können die Komponenten maximal genutzt werden und die LCC Kosten werden minimiert. So ist es z.B. sinnvoll, beim Radtausch die Lager zu überholen. Um lange Überholintervalle zu erreichen, werden spezielle Massnahmen, wie synthetisches Lagerfette zur Anwendung kommen.

Da aber Abnützung und Verschleiss von vielen Faktoren abhängen (Einsatzort, Beladungszustände, Laufleistung, etc.) wird von bekannten durchschnittlichen Bedingungen ausgegangen.

Die unten dargestellte Tabelle zeigt die Annahmen und Grunddaten für die Berechnung der LCC Kosten.

Nr.	Beschreibung	Einheit	FORMICA HP	Y25 mit K-Sohle mit integrieter Bremse	Y25 mit Scheibenbremse
1	**Technische Grunddaten**				
	Laufleistung min.	km/anno	100'000		
	Laufleistung max.	km/anno	200'000		
	Referenzgüterwagen		CTW		
	Radsatzlast	t/Radsatz	22.5		
	LüP des Referenzgüterwagen	m	20		
	Eigengewicht Drehgestell	kg	4'850	4'800	5'100
	Gewicht CTW ohne Drehgestelle	t	8.4		
	Leergewicht	t	18.1	18.0	18.6
	max. Zuladung	t	71.9	72.0	71.4
	Länge eines Zuges	m	600		
	max. Tonnage ohne Lokomotive	t	1800		
	Anzahl von CTW pro Zug	Anz.	20		
	Anzahl von Radsätzen	Anz./CTW	4		
	Anzahl von Umläufen Korridor 1 bei 100'000 km/anno	Uml./Woche	2		
	Anzahl von Umläufen Korridor 1 bei 200'000 km/anno	Uml./Woche	4		
	Anzahl Wochen[1]	Woche/anno	50	49	50
	Durchführung IS2 nach:[2,3,11]	km	1'500'000	600'000	600'000
	Durchführung Reprofilierung nach:[4]	km	250'000	150'000	200'000
	Anzahl der Reprofilierungen pro Radsatz[3]	Anz.	6	6	6
	Beladungsfaktor	%	80%		
2	**Kostensätze für Kalkulation**				
	Wechselkurs informativ	CHF/€	1.10		
	Marktpreise[5]	CHF	69'300	22'000	33'000
	Lärmbonus CH[6]	CHF/Achse/km	0.03	0.02	0.03
	Transportleistung in CH geschätzt	%	35%		
	Transportkosten min. beladen	CHF/km/t	0.030		
	Transportkosten max. beladen	CHF/km/t	0.080		
	Transportkosten leer	CHF/km/t	0.015		
	Transportkosten gewählt	CHF/km/t	0.050		
	Preis eines CTW ohne Drehgestelle[5]	CHF	30'000		
	Preis eines CTW mit Drehgestelle[5]	CHF	168'600	74'000	96'000
	Abschreibungsdauer (AfA)	Jahre	10		
	Nutzungsdauer	Jahre	20		
	Kosten pro Reprofilierung	CHF/Radsatz	200		
	Kosten einer IS2 (Radsatzrevision)	CHF/Radsatz	900		
	Kosten Neubescheibung[7]	CHF/Radsatz	3'000	2'500	3'000
	Kostenreduktion durch radialer Einstellbarkeit beladen[8]	pro bel. Zug von Basel nach Chiasso	100	0	0
	Kostenreduktion durch radialer Einstellbarkeit leer[8]	pro bel. Zug von Basel nach Chiasso	10		

Abbildung 48: Berechnung LCC Kosten

Legende zu LCC Berechnung

[1] Annahme: FORMICA HP steht aufgrund seiner höheren Laufleistungsgrenzwerte eine Woche pro Jahr mehr zur Verfügung

[2] Geplante Instandhaltungs-Stufe: 1.500.000 km

[3] Annahme: gleiche IS-Intervalle für Y25 mit K-Sohle oder Scheibenbremse

[4] Annahme:

- Scheibenbremsen verschleissen weniger die Rad-Lauffläche
- FORMICA HP verschleisst weniger die Rad-Lauffläche als Y25 mit Scheibenbremsen, da radial einstellbar

[5] Mittlerer Marktpreis in CHF umgerechnet zum aktuellen Wechselkurs

[6] Schweizer Lärmbonus berücksichtigt, auch EU wird Lärm-Bonus-Malus-System einführen. Umfang derzeit nicht berücksichtig

[7] Aufgrund der Bauarten der Radsätze mit Scheibenbremsen (Rad- oder Achsscheiben) ist ein etwas höherer Aufwand geschätzt

[8] Gemäss ersten überschlägigen Berechnungen bei der heutigen Geschwindigkeit,

[9] Leer und beladen gleich ein Umlauf

[10] Vorteil der radialen Einstellbarkeit bei FORMICA HP nicht berücksichtigt

[11] Nach VPI bei Y25 Drehgestellen

Allgemeine Anmerkungen zur LCC Berechnung

- Schwarz: Eingabeparameter zur Berechnung
- Tests müssen diese Annahmen bestätigen
- Sicherheitsgewinn bzw. erleichterter Aufwand durch erleichterte Radsatzprüfung mit Ultraschall durch Hohlachse nicht berücksichtigt
- Höherer Aufwand bei IS2 bei FORMICA HP, Abziehen der Scheiben nur geschätzt; geplant: Lagerprüfung bei Neubescheibung
- Sensorik für Verschleissanzeige nur Option, daher sind die Kostenvorteile nicht berücksichtigt
- Vorteil der höheren Geschwindigkeit von FORMICA HP (freie Trassen, Gotthard etc.) nicht berücksichtigt
- Vorteil des Baukastensystems von FORMICA HP (Optimierung des Drehgestelles anhand der Transportaufgabe) nicht berücksichtigt
- Alle Kalkulationen ohne Zinskosten und Teuerungsraten

6.2 LCC Modell

Das LCC-Modell zeigt die Kosten Vor- und Nachteile pro Kostenart gegenüber den einzelnen Drehgestelltypen bei 100'000 km und 200'000 km Laufleistung pro Jahr.

Das LCC-Modell berücksichtigt folgende Eckdaten:

- Investitionskosten
- Gewicht
- Lärmbonus
- Trassenverschleiss
- Instandhaltung Radsätze
- Geringerer Werkstataufenthalt

Nr.	Beschreibung	Einheit	FORMICA HP		Y25 mit K-Sohle mit integrieter Bremse		Y25 mit Scheibenbremse	
3	**Berechnung der LCC per anno**		100'000 km/anno	200'000 km/anno	100'000 km/anno	200'000 km/anno	100'000 km/anno	200'000 km/anno
	Alle Betrachtungen immer im Vergleich zum Y25 mit K-Sohle							
3.1	Auswirkung Gewichtsersparnis							
	Vorteil transp. Nettotkm pro CTW	tkm/anno/CTW	-10'000	-20'000	0	0	-60'000	-120'000
	Vorteil transp. Nettotkm pro CTW	CHF/anno/CTW	**-400**	**-800**	**0**	**0**	**-2'400**	**-4'800**
3.2	Auswirkung Lärmbonus							
	Lärmbonus pro CTW (Annahme 35% in CH)	CHF/CTW/anno	**350**	**700**	**0**	**0**	**350**	**700**
3.3	Auswirkung verschleissabh. Trassenpreis							
	Anzahl Umläufe Basel - Chiasso[9]	Umläufe/anno	100	200	98	196	100	200
	Kostenersparnis durch rad. Einstellbarkeit	CHF/CTW/anno	**410**	**820**	**0**	**0**	**0**	**0**
3.4	Auswirkung Instandhaltungskonzept							
3.4.1	**Reprofilierungskosten[10]**	CHF/CTW/anno	320	640	533	1'067	400	800
	Kostenvor-/Nachteile Reprofilierung	CHF/CTW/anno	**213**	**427**	**0**	**0**	**133**	**267**
3.4.2	**Kosten IS2**	CHF/CTW/anno	240	480	600	1200	600	1200
	Kostenvor-/Nachteile IS2	CHF/CTW/anno	**360**	**720**	**0**	**0**	**0**	**0**
3.4.3	**Lebensdauer der Scheibe**	km	1'500'000	1'500'000	900'000	900'000	1'200'000	1'200'000
	Kosten Neubescheibung	CHF/CTW/anno	800	1'600	1'111	2'222	1'000	2'000
	Kostenvor-/Nachteile Neubescheibung	CHF/CTW/anno	**311**	**622**	**0**	**0**	**111**	**222**
3.4.4	**Anzahl der planmässigen Werkstattläufe**	Anz./anno	0.4	0.8	0.7	1.3	0.5	1.0
	Kosten pro Werkstattlauf (Frachtkosten, Miete, Rangieren, Verwaltung, entgangener Gewinn) pauschal	CHF	800					
	Kosten pro Jahr	CHF/CTW/anno	320	640	533	1'067	400	800
	Kostenvor-/Nachteile Werkstattläufe	CHF/CTW/anno	**213**	**427**	**0**	**0**	**133**	**267**
3.4.5	Auswirkung geringerer Werkstattaufenthalt							
	Erhöhung der Einsatzzeit per Jahr geschätzt	%	2.04%	2.04%	0%	0%	2.04%	2.04%
	Kostenvorteil Investitionsvolumen (AfA = 10 Jahre)	CHF/CTW/anno	**344**	**344**	**0**	**0**	**196**	**196**

Abbildung 49: LCC-Modell

Die folgenden Ergebnisse der LCC-Betrachtung gehen von einem Investitionsbedarf von 69'300 CHF respektive 41'250 CHF (Grossserienproduktion durch einen entsprechenden Hersteller) aus. Es werden ein Formica HP Drehgestell mit Y25 Drehgestell mit Klotz- und Scheibenbremse betrachtet.

LCC-Vorteile von Formica HP gegenüber	Formica HP	Y25 Klotzbremse km/anno		Y25 Scheibenbremse km/anno	
Drehgestellpreis pro Drehgestell in CHF	69'300	22'000		33'000	
Investitionssumme CTW	168'600	74'000		96'000	
Laufleistung pro Jahr in km		**100'000**	**200'000**	**100'000**	**200'000**
Kostenvorteil Formica HP pro Jahr in CHF		1'802	3'260	3'278	6'400
Return on Investment (ROI) in Jahren		52.5	29.0	22.1	11.3

Abbildung 50: Kostenübersicht mit Investitionsbedarf CHF 69k

LCC-Vorteile von Formica HP gegenüber	Formica HP	Y25 Klotzbremse km/anno		Y25 Scheibenbremse km/anno	
Drehgestellpreis pro Drehgestell in CHF	41'250	22'000		33'000	
Investitionssumme CTW	112'500	74'000		96'000	
Laufleistung pro Jahr in km		**100'000**	**200'000**	**100'000**	**200'000**
Kostenvorteil Formica HP pro Jahr in CHF		1'687	3'145	3'164	6'294
Return on Investment (ROI) in Jahren		22.8	12.2	5.2	2.6

Abbildung 51: Kostenübersicht mit Investitionsbedarf CHF 41k

Erkenntnis aus der LCC Betrachtung:

In Abhängigkeit von der Laufleistung und der Y25 Drehgestell Art, liegt der ROI zwischen 52,5 und 11.3 Jahren bei einer Investition von 69'300 CHF pro Drehgestell. Bei einer Investition von 41'250 CHF pro Drehgestell liegt der ROI zwischen 22,8 und 2.6 Jahren.

LCC Fazit:

Die Investition ist bei einer kalkulierten Lebensdauer eines Güterwagens von 30 Jahren nur bei sehr hohen Laufleistungen und natürlicher geringer Investitionssumme wirtschaftlich interessant.

7 Fazit

In der Projektumsetzung hat PROSE ein Drehgestell entwickelt, das einen grossen Schritt zu einem Güterwagen der Zukunft darstellt. Das Konzept des innengelagerten Drehgestells wurde mit rechnerischen Simulationen bestätigt. Viele Herausforderungen, insbesondere bei der Lauftechnik und der Evaluation der Federstufen, konnten nach mehrmaligen Variationen gelöst werden.

Die Strukturkomponenten wurden mit detaillierten Festigkeitsberechnungen optimiert und nachgewiesen. Das FORMICA HP Drehgestell zeigt erhebliche Vorteile bezüglich Rad-Schienen-Verschleiss und Oberbau-Beanspruchung. Die Lebenszyklus-Kosten (LCC) sind gegenüber konventionellen Güterwagen Drehgestellen deutlich reduziert. Die Entgleisungssicherheit ist besser als beim Y25. Betreffend den Lärmemissionen konnten massive Verbesserungen erzielt werden.

Die Gründe dafür sind folgende:

- keine Reibdämpfer (Lenoir) in der Primärstufe
- Körperschallentkoppelung zwischen Rad und Wagenkasten
- Einsatz von Wellenbremsscheiben
- sekundäre Gummischichtfeder statt Drehpfanne
- Räder mit geradem Steg (lärmoptimiert)
- optionale Radschallabsorber möglich (Ring- oder Flächenabsorber)

Ein Zulassungskonzept wurde erarbeitet und beim BAV eingereicht (siehe 4.1). Erste Gespräche mit benannten Stellen haben stattgefunden. Insgesamt ist das vorgestellte Konzept des Formica HP abgesichert und die Machbarkeit kann als gegeben betrachtet werden. Abklärungen mit SBB Infrastruktur waren prinzipiell positiv. Es wurden mögliche Limitierungen für den Netzzugang in der Schweiz infolge der Lösung mit einer Bremsscheibe pro Radsatz aufgezeigt. Die Zulassung als Interoperabilitätskomponente nach TSI WAG für ein innengelagertes Güterwagendrehgestell ist derzeit noch nicht möglich. Die TSI WAG enthält in ihrer aktuellen Version z.B. keine Norm für die Auslegung von innengelagerten Radsatzwellen. PROSE hat dazu im April 2019 einen innovativen Prozess bei der Generaldirektion für Mobilität und Verkehr (GD MOVE) der Europäischen Kommission angestossen. Bis Ende 2019 wurde dieser Antrag in der TSI WAG nicht umgesetzt.

Mit potentiellen Lieferanten wurden die technische Machbarkeit sowie Liefertermine für Produktentwicklung und Fertigung abgeklärt. Hier hat sich gezeigt, dass für bestimmte Teilsysteme kein Lieferant gefunden werden konnte, der bereit war, eine Lösung termingerecht und zu realistischen Herstellkosten für die Prototypen Drehgestelle oder eine kleinere Serie auszuarbeiten. Die Zielkosten des Seriendrehgestells können – basierend auf den vorliegenden Preisen der Lieferanten – auch bei Hochrechnung auf eine grössere Serie nicht erreicht werden. Durch Zusammenarbeit mit einem grossen Systemanbieter und entsprechendes «low cost sourcing» könnten die Serienpreise voraussichtlich reduziert werden.