

Erhebung von Fahrzeugdaten für Mehrkörpersimulation (MKS) Beurteilung vorhandener und relevanter Fahrwerke bei den Bahnen

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 5 Fahrzeuge

Technischer Bericht



ID: RAILPlusSF-00026

Datum / Status: 11.11.2023 / Freigegeben

Seitenanzahl 21

Verfasser: Roland Müller / Gleislauftechnik

Geprüft: Mauro Saputelli / PRJMA

Freigegeben: Claudio Häni / RBS

Zitierweise: RAILplus, Roland Müller, Gleislauftechnik: RAILPlusSF-00026, Erhebung von Fahrzeugdaten für Mehrkörpersimulation (MKS) Beurteilung vorhandener und relevanter Fahrwerke bei den Bahnen; 11.11.2023

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	13.10.2023	R. Müller	Erster Entwurf
0.2	08.11.2023	R. Müller	Bereinigter Entwurf.
0.3	09.11.2023	R. Müller	Bericht redigiert und finalisiert.
0.3	09.11.2023	M. Saputelli	Dokument geprüft
1.0	11.11.2023	C. Häni	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	28.11.2023
1.0	Management Board	xx.yy.2023

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AB	Appenzeller Bahnen AG
ADD	Aktiver Dreh-Dämpfer
ASM	Aare Seeland mobil AG
AVA	Aargau Verkehr AG
Cx	Längssteifigkeit der Radsatzführung
CJ	Compagnie des chemins de fer du Jura SA
DB	Deutsche Bahn
DG	Drehgestell
EMU	Electric Multiple Unit
FART	Società per le Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi SA
FE	Finite Elemente
FIMO	Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion-Meterspur-Optimierung
FLP	Ferrovie Luganesi SA
ISS	Instandsetzungsschwellen
LDG	Laufdrehgestell
LEB	Compagnie du Chemin de fer Lausanne – Echallens – Bercher SA
MBC	Transports de la région Morges – Bière – Cossonay SA
MDG	Motordrehgestell
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
MKS	Mehrkörpersimulation
MOB	Chemin de fer Montreux Oberland bernois SA
NStCM	Compagnie du chemin de fer Nyon-St-Cergue-Morez SA
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn AG
RhB	Rhätische Bahn AG

Abkürzung	Bezeichnung
TMR	Transports de Martigny et Régions SA
TPC	Transports publics du Chablais SA
TPF	Transports publics fribourgeois Holding (TPF) SA
transN	Transports Publics Neuchâtelois SA
TRAVYS	TRAVYS SA
ZB	ZB Zentralbahn AG .
ZBDG	Zahnradbremsdrehgestell
ZMDG	Reines Zahnradmotordrehgestell
AZMDG	Gemischtes Adhäsions- und Zahnradmotordrehgestell

Management Summary

Im Hinblick auf verschiedene technische Forschungsvorhaben in mehreren Teilbereichen der mechanischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg werden Fahrzeug-Fahrweg-Modelle benötigt. Zu deren Behandlung ist in Anbetracht der grossen Fahrzeugvielfalt bei den Bahnen eines oder sind mehrere generischen Modelle/e des Fahrzeugs einerseits und der Parameter des Fahrwegs andererseits auch für diese ein solches erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass

- die Fahrzeuge über unterschiedliche geometrische Abmessungen, Massenverteilungen, Kopplungen zwischen den verschiedenen Körpern, Radlasten, usw. verfügen,
- der Fahrweg aus unterschiedliche Standardelementen aufgebaut ist, welche wiederum über verschiedene mechanische Eigenschaften verfügen,
- die Trassierung vor allem durch eine grosse Anzahl an kleinen bis sehr kleinen Bogenradien charakterisiert ist jedoch die Maximalgeschwindigkeiten auf 120 km/h beschränkt sind.

Die generischen Modelle werden für Aufgabenstellungen benötigt, welche durch unterschiedliche Projektpartner bearbeitet werden:

- das ViF zum Verschleiss (Kurz- und Langzeitverhalten), zur Schallemission und zum Reibungsmanagement,
- die DB AG zu verschiedenen Interaktionsproblemen insbesondere im Trassierungsbereich der sehr engen Bögen,
- die beauftragte Stelle für die Erstellung der notwendigen Nachweise für die Bewilligung der Betriebserprobungen mit modifizierten bogenfreundlichen Radprofilen,
- eine beauftragte Stelle für die Versuchsrechnungen zu den verschiedenen Gleislagefehler identifiziert für die Meterspurbahnen im Hinblick auf künftige lauftechnische Nachweisrechnungen,
- die Emkamatik für die Untersuchungen zum Traktionsverhalten und die Schaffung der Grundlagen für die Ermittlung des Verschleisses aus den dadurch massgebenden Einflussgrössen.

Die grosse Vielfalt von Zugskonzepten und die grosse Anzahl von Meterspurbahnen impliziert eine beträchtliche Anzahl von Fahrzeugen, welche in einer Tabelle unter Berücksichtigung der lauftechnisch signifikanten Einflussgrössen festgehalten sind (Anlage 1). 90% des Rollmaterials der Meterspurbahnen für den Personenverkehr bestehen aus Triebzügen (und Gelenktriebzügen) davon sind 72% reine Adhäsionsfahrzeuge und bei vier Bahnen sind Fahrzeuge mit gemischten Antrieben Adhäsion-Zahnrad im Einsatz.

Die Inputdaten für das Fahrzeugmodell umfassen alle Daten, die erforderlich sind, um einen bestimmten Anwendungsfall, d.h. einen Streckenabschnitt und einen Fahrzeugtyp, nachzubilden. Das gesamte Fahrzeug wird nicht bis ins kleinste Detail abgebildet. Vielmehr werden bestimmte Komponenten so detailliert modelliert, dass das physikalische Verhalten des Fahrzeugs dargestellt wird.

Inputdaten zu den Fahrwegparametern für die MKS-Simulation sind

- Schientyp, Schieneneinbauneigung,
- Charakteristiken der Standardelemente,
- Eingriff Schwellenwert der Oberbauunterhaltung,
- Trassierungsparameter,
- Gleislagefehler,
- Charakterisierung der Strecken anhand von deren Bogenverteilungen.

Zudem sind zur Abschätzung des Einflusses der Traktion das Traktionsverhalten berücksichtigt werden. Insbesondere wann wieviel Traktionskraft erforderlich ist und bei welchem Schlupf diese aufgebaut wird.

In einer ersten Phase wird im Projekt P5 an Nachrüstlösungen und in einer weiteren Phase an Neubaulösungen gearbeitet. Diese werden hinsichtlich deren Verbesserungspotential in den verschiedenen Bereichen mittels MKS-Simulationen und weiteren Bewertungsmodellen beurteilt. Da diese vorerst auf Nachrüstlösungen bei den Meterspurbahnen und deren bestehenden Fahrzeuge sowie später auch auf Neubaufahrzeuge übertragbar sein müssen, ist für den Nachweis von deren Wirksamkeit ein generisches Fahrzeugmodell erforderlich.

Inhalt

1	Ausgangslage.....	7
1.1	Problemstellung	7
1.2	Vorgehenskonzept	8
2	Grundlagen	8
2.1	Bestehende Fahrzeugkonzepte bei den Meterspurbahnen.....	8
2.2	Nachrüstlösungen	10
2.3	Inputdaten für Fahrzeugmodelle.....	11
2.4	Inputdaten zu den Fahrwegparametern für die MKS-Simulation.....	14
2.4.1	<i>Schienen, Schieneneinbauneigung</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Eingriff Schwellenwert der Oberbauunterhaltung.....</i>	<i>14</i>
2.4.3	<i>Trassierungsparameter</i>	<i>15</i>
2.4.4	<i>Gleislagefehler</i>	<i>15</i>
2.4.5	<i>Bogenverteilungen</i>	<i>15</i>
3	Anforderungen an Fahrzeugdaten aus verschiedenen Forschungsbereichen ...	16
3.1	Virtuelles Fahrzeug (ViF).....	16
3.1.1	<i>Verschleiss Rad und Schiene.....</i>	<i>16</i>
3.1.2	<i>Lärm (Kurvenkreischen)</i>	<i>16</i>
3.1.3	<i>Reibungsmanagement</i>	<i>17</i>
3.2	Traktion (Emkamatik)	17
3.2.1	<i>Stationäre Auslegung.....</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Dynamik und Regelung</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Schädigungen und Verschleiss</i>	<i>18</i>
3.3	Anforderungen bezüglich der Anwendung von Gleislageabweichungen für die Meterspur [9]	18
3.4	Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der DB	18
3.5	Nachrüstlösungen	19
4	Zusammenfassung.....	19
5	Verzeichnisse	21
5.1	Revisionen	21
5.2	Referenzen	21
5.3	Abbildungen	21
5.4	Tabellen	21
6	Anhang.....	21

1 Ausgangslage

1.1 Problemstellung

Im Hinblick auf verschiedene technische Forschungsvorhaben in mehreren Teilbereichen der mechanischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg werden Fahrzeug-Fahrweg-Modelle benötigt. Diese betreffen sowohl den Fahrweg als auch das Fahrzeug, wobei dafür je nach Aufgabenstellungen unterschiedliche Betrachtungstiefen zur Anwendung gelangen werden. Zu deren Behandlung ist eines oder sind mehrere generischen Modelle/e des Fahrzeugs einerseits und des Fahrwegs andererseits erforderlich. Diese beiden Modelle müssen durch eine gemeinsame Schnittstelle miteinander verbunden sein und die massgebenden Elemente der beiden Interaktionspartner enthalten sowie repräsentativ sein für die Meterspurbahnen Schweiz. Von einem generischen Fahrzeug-/Fahrwegmodell wird erwartet, dass dieses durch Variation der Parameter an Fahrzeug und Fahrweg sowie von Veränderungen an weiteren Einflussparametern das Systemverhalten abbilden. Das generische Modell soll Plattform sowohl für das quasistatische als auch das dynamische Verhalten hinsichtlich Verschleisses, Lauf- und Traktionsverhalten, Luft- und Körperschall sowie weiterer Verhaltensweisen verwendbar sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass

- die Fahrzeuge über unterschiedliche geometrische Abmessungen, Massenverteilungen, Kopplungen zwischen den verschiedenen Körpern, Radlasten, usw. verfügen,
- der Fahrweg aus unterschiedliche Standardelementen aufgebaut ist, welche wiederum über verschiedene mechanische Eigenschaften verfügen,
- die Trassierung vor allem durch eine grosse Anzahl an kleinen bis sehr kleinen Bogenradien charakterisiert ist, jedoch die Maximalgeschwindigkeiten auf 120 km/h beschränkt sind.

Seit rund zwei Jahren laufen Betriebserprobungen mit Schienenkopfkonditionierung an den Shuttle-Zügen der MGB auf der Strecke Täsch – Zermatt. Primäres Ziel ist hierbei die Reduktion des Rad- und Schienenverschleisses. Dank der guten Spurkranzschmierung konzentriert sich der Verschleiss vor allem auf die Fahrflächen der Räder und der Schienen. Bei den Rädern ist dies die laufleistungsspezifische Reduktion der Raddurchmesser und bei den Schienen insbesondere die Schlupfwellenbildung an den bogeninneren Schienen. Zugleich wird bei diesem Versuch die Schallemission insbesondere bei der Bogenfahrt verfolgt (Kurvenkreischen). Da sich seit dem Einsatz der Schienenkopfkonditionierung die Schlupfwellen- und die Polygonbildung nicht mehr ausgeprägt in Erscheinung treten, werden diese Aspekte bei der Zentralbahn untersucht, da sich diese dort wegen der Verwendung von weichen Rad- und Schienenwerkstoffen in kürzerer Zeit ausbilden. Es ist deshalb beschlossen worden, dass das ViF wegen der Verfügbarkeit von Messdaten die Fahrzeuge dieser beiden Bahnen modelliert (Shuttle (vergleichbar mit Kometen bei der MGB und Adler bei der zb)). Aus diesen beiden Fahrzeugen sollen dann generische Modelle entwickelt werden, deren Ergebnisse auf andere Meterspurbahnen und deren Einsatzgebiete übertragbar sind.

1.2 Vorgehenskonzept

Zum jetzigen Zeitpunkt bestehen noch keine klaren Vorstellungen zu den Varianten, die bei den weitergehenden Untersuchungen berücksichtigt werden müssen. Die nachstehend aufgeführten Projekte benötigen nun für die vorgesehenen Untersuchungen zeitnah die erforderlichen Fahrzeug- und Fahrwegdaten. Dabei handelt es sich um den Aufbau der MKS-Modelle für die Problemstellungen, welche bearbeitet werden durch

- das ViF zum Verschleiss (Kurz- und Langzeitverhalten), zur Schallemission und zum Reibungsmanagement,
- die DB AG zu verschiedenen Interaktionsproblemen insbesondere im Trassierungsbereich der sehr engen Bögen,
- die beauftragte Stelle für die Erstellung der notwendigen Nachweise für die Bewilligung der Betriebserprobungen mit modifizierten bogenfreundlichen Radprofilen,
- eine beauftragte Stelle für die Versuchsrechnungen zu den verschiedenen Gleislagefehler identifiziert für die Meterspurbahnen im Hinblick auf künftige lauftechnische Nachweisrechnungen,
- die Emkamatik für die Untersuchungen zum Traktionsverhalten und die Schaffung der Grundlagen für die Ermittlung des Verschleisses aus den dadurch massgebenden Einflussgrössen.
- die beauftragte Stelle bei der Verifikation des Verhaltens von Nachrüstlösungen und Lösungen für Neubaufahrzeuge.

Es wird davon ausgegangen, dass die MKS-Modelle sowie das generische Modell durch einen der aufgeführten Projektpartner erstellt und anschliessen den anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden. Da die aus diesen generischen Modellen gewonnen Erkenntnisse auch auf die weiteren Meterspurbahnen übertragen werden sollen, muss insbesondere die Übertragbarkeit der für die Modellbildung ausgewählten Fahrzeuge auf deren Fahrzeuge und Einsatzgebiete nachgewiesen werden. Das entsprechende Vorgehen für diesen Nachweis sollte zum Beispiel in Anlehnung an das Lambda-Verfahren wie in der EN 14363 durchgeführt werden. Dabei kann eines der kritischeren Fahrzeuge ausgewählt werden und bei den anderen auf Tendenzen hinsichtlich deren Verhaltensweisen hingewiesen werden.

2 Grundlagen

Das ViF entwickelt Modelle für die die Untersuchung des Verschleissverhaltens (statisch und dynamisch) sowie des Lärms (u.a. Kurvenkreischen) und der Erschütterungen. Dabei werden in den Modellen auch die Kraftschlussphänomene berücksichtigt. Als Ergebnis der MKS-Simulation werden die Kontaktdaten der Interaktion zwischen Rad und Schiene geliefert. Diese Kontaktdaten werden nicht nur für die Berechnung des Verschleisses verwendet, sondern auch an den Bereich Lärm & Erschütterungen weitergegeben, der diese Daten wiederum für die Simulation von Kurvenkreischen und von Lärm aus dem Spurkranzanlauf verwendet.

2.1 Bestehende Fahrzeugkonzepte bei den Meterspurbahnen

Bei den schweizerischen Meterspurbahnen sind heutzutage verschiedene Fahrzeug- und Zugkonzepte eingesetzt. In den letzten Jahren wurden vorwiegend Triebzüge beschafft und dadurch das früher verwendete Konzept der mit Lokomotiven bespannten Züge (lokbespannte Züge) verlassen. Die Triebzüge (oder EMU) sind vergleichsweise zu den lokbespannten Zügen vielseitiger verwendbar (splitten und vereinigen), ermöglichen eine höhere Motorisierung und dank der höheren Achslast grössere Traktions- und dynamische Bremskräfte. Obwohl deren Vorteile in Bezug auf den Betrieb überwiegen, sind

die Auswirkungen dieses Fahrzeugkonzept auf den Verschleiss von Rad und Schiene sowie auf die Beanspruchung der Fahrbahn unterschätzt und deshalb nicht ausreichend berücksichtigt worden.

Die grosse Vielfalt von Zugskonzepten und die grosse Anzahl von Meterspurbahnen impliziert eine beträchtliche Anzahl von Fahrzeugen. In der Tabelle im Anhang 1 [1] sind Angaben zu den Meterspurfahrzeugen der Meterspurbahnen Schweiz aufgeführt. In der Kopfzeile dieser Tabelle sind zusammengehörende Gruppierungen von Zugeigenschaften bei den verschiedenen Bahnen in die unten aufgeführten Bereiche unterteilt:

- Identifizierung der Zugskonzepte mit maximalen Zuglängen je Zugkonzept (lokbespannt 120 m, Triebzüge 60m und vereinigt 120 m) und Kurzbeschreibungen in den verlinkten Datenblättern.

Identifizierung										
Bahn	Zugkonzept	Passende FIMO Zugkonzept	Fahrzeug Bezeichnung	Antrieb A = Adhäsion Z = Zahnrad	Anzahl Wagen/Modulen [-]	Fahrzeug Benennung	Anzahl Flotte [-]	Kontrol Fz-Register	Hersteller	Datenblatt

- Allgemein mit Angaben Längen der Einheiten, Bruttomasse, Radsatzlast Brutto sowie Anfahrzugkraft.

Allgemein				
Länge über Puffer [mm]	Brutto Dienstmass [t]	Max. Radsatzlast [t]	Dauerleistung [kW]	Anfahrzugkraft [kN]

- Drehgestelltechnik mit einem Teil der Angaben für dessen Modellierung

Drehgestelltechnik								
Kupplung Zahnrad - Radsatz (Zahnradbahnen)	Radsatzfolge Nach UIC 650	Radsatz Typ	Anzahl DG Total [-]	Anzahl AMDG Reine Adhäsion [-]	Anzahl ZMDG Reine Zahnrad [-]	Anzahl AZMDG Gemischte Antrieb [-]	Anzahl LDG Reine Adhäsion [-]	Anzahl ZBDG LDG mit Zahnradbremse [-]

Drehgestelltechnik								
Max Achsabstand [mm]	Min Achsabstand [mm]	Raddurchmesser Triebräder neu [mm]	Raddurchmesser Laufräder neu [mm]	Verschlossene Raddurchmesser Laufräder [mm]	Rad Typ	Bremesenart Betriebsbremsen	Max. Drehgestellabstand (Drehzapfenabstand) [mm]	Min. Drehgestellabstand (Drehzapfenabstand) [mm]

- Betrieb mit einem Teil der Kapazität für Beladung

Betrieb
Kapazität Sitzplätze + Klappsitze [Personen]

Aus diesen Daten sollte es möglich sein, einige wenige vergleichbaren Zugskonzepte festzulegen und zu beschreiben, die den Grossteil des Rollmaterials der Meterspurbahnen darstellen können. Bei einer ersten Durchsicht zeigt sich, dass 90% des Rollmaterials der Meterspurbahnen für den Personenverkehr aus Triebzügen (und Gelenktriebzügen) besteht. 72% des Rollmaterial sind reine Adhäsionsfahrzeuge. BOB, MGBahn, MVR und TMR haben nur Fahrzeuge mit gemischten Antrieben Adhäsion-Zahnrad im Einsatz. AB, TPC und zb haben eine gemischte Flotte aus reinen Adhäsionsfahrzeugen und Fahrzeugen mit gemischtem Antrieb. ASM, AVA, CJ, FART, FLP, LEB, MBC, MOB, NStCM, RBS, RhB, TPF, TRANSN und TRAVYS haben stattdessen nur reine Adhäsionsfahrzeuge.

Die durchschnittlichen maximalen und minimalen Achsabstände für Adhäsionsfahrzeuge betragen 2010 mm bzw. 1770 mm. In Bezug auf die Raddurchmesser, zeigen die Ergebnisse, dass diese bei den Triebrädern durchschnittlich 785 mm in Neuzustand und 710mm im verschlissenen Zustand sind. Bei den Laufrädern liegen diese Werte bei 690 mm und 630 mm. Bei Adhäsion-Zahnradfahrzeugen wird ein höherer Achsabstand beobachtet (maximal 2560 mm und minimal 1850 mm). Dies ist eine Folge des Zahnradantriebs. Die maximalen Raddurchmesser der Triebäder bei den Triebzügen sind

876 mm im Neuzustand und die minimalen im verschlissenen Zustand 600 mm. Bei den Laufrädern liegen diese Werte bei 770 mm und 600 mm. Alle untersuchten Fahrzeuge sind mit konventionellen Radsätzen ausgestattet.

Bei Fahrzeugen mit gemischtem Antrieb besteht die Tendenz zur Verwendung eines Auskuppelbaren Antriebs für das Zahnrad. Bei diesen Fahrzeugen ist es vorzuziehen, den Antrieb (Adhäsions- und Zahnrad) im gleichen Drehgestell unterzubringen. Nur zwei Fahrzeuge (ABeh 150x und 160x von zb) haben zwei verschiedene MDG für Adhäsions- und Zahnradantrieb. Bei den Zahnrad Drehgestellen wird beim Einsatz auf dem Bereich des Zahnstangengleises hinsichtlich des Zahnantriebs unter den folgenden Varianten unterschieden:

- **Fix verkuppelter Antrieb:** Die Drehzahl von Zahnrad und Adhäsionsrad kann angepasst werden. Die Drehzahl stimmt aber nur zum Beispiel für die halbe Abnutzung der Räder. Die neuen Adhäsionsräder sind zu gross, d.h. zu schnell (Translation). Die abgenutzten Adhäsionsräder sind zu klein, d.h. zu langsam.
- **Auskuppelbarer Antrieb:** In der Adhäsion läuft das Zahnrad im Leeren, der Antrieb erfolgt allein über die Adhäsionsübersetzung und Adhäsionsachse. Im Zahnradbetrieb wird die Adhäsionsachse ausgekuppelt und die Zug- und Bremskraft läuft einzig über das Zahnrad. Die Adhäsionsachse ist wie eine Laufachse. Das Problem sind die Zahnstangen Ein- und Ausfahrten. Hier läuft der Antrieb gleich wie beim fest verkuppelten Antrieb (siehe vorigen Abschnitt).
- **Vollständig getrennter Antrieb im Motordrehgestell:** Der eine Elektromotor treibt die Adhäsionsachse an. Der andere Elektromotor treibt das Zahnrad an. Die Leittechnik kann andauernd die optimale Kraftaufteilung berechnen und steuern. Es werden aber zusätzlich das Gewicht des jeweils anderen Elektromotors und Getriebe durch die Gegend gefahren; d.h. schwerere Fahrzeuge.

2.2 Nachrüstlösungen

Als Nachrüstlösungen werden nachträgliche Anpassungen an bestehenden Fahrzeugen und Fahrwerken bezeichnet. Wesentliche Veränderungen am Drehgestellrahmen werden nicht als Nachrüstlösungen eingestuft, da sie einen sehr grossen Einfluss auf den Festigkeitsnachweis, die Zulassung und die Kosten haben.

Die folgenden Lösungsansätze haben sich während der Projekt-Phase 1 von P5-Fahrzeugen (Systemanalyse «FIMO») durch die Analyse mit FIMO als «erfolgsversprechende Lösungen» herauskristallisiert [2]:

- Elastische Radsatzführung (niedriger Cx-Wert),
- Gegenseitige Radsatzsteuerung (Radsatzquerkupplung),
- Aktive Radsatzsteuerung (zu 100% oder nur teilweise zu 25%, 50% oder 75%),
- Aktiver Schlingerdämpfer (ADD).

In diesem Zusammenhang wurde die in Tabelle 1 aufgeführte Terminologie eingeführt.

Begriff	Bezeichnung
Konventionelles Fahrwerk	Drehgestelle mit zwei Radsätzen
Zahnrad-Fahrzeuge	Fahrzeug mit gemischtem Antrieb: reine Adhäsion und Zahnrad
Zugskonzept	Art der Fahrzeugkonstruktion. Kann sich je nach Art der Drehgestelle und/oder der Achsanordnung unterscheiden
Fahrwerkskonzepte	Art des Fahrwerks. Kann sich je nach Geometrie (Raddurchmesser, Radabstand), Ladebedingungen (Radsatzlast) und Funktionen (Antrieb) unterscheiden

Begriff	Bezeichnung
Bestandsfahrzeuge	Fahrzeuge, die im Einsatz bei den Meterspurbahnen sind
Generische Fahrzeuge	Fahrzeuge, die auf der Grundlage von Funktionalität und Betrieb konzipiert werden können
Neubaufahrzeuge	Fahrzeuge, die noch nicht existieren und in Zukunft entwickelt werden können
Nachrüstlösungen	Lösungen, die durch Änderungen an den derzeit in Betrieb stehenden Fahrwerken umgesetzt werden können
Innovatives Fahrwerk	Fahrwerk entwickelt mit dem Ziel, den Verschleiss im System Rad/Schiene zu reduzieren, mittels neuester, verfügbarer Technologien
Steuerungsmechanismen	Passive Mechanismen (durch Gestänge, Verkopplungen) oder aktive Mechanismen (durch Aktuatoren), die eine Radiale Einstellung ermöglichen
Selbststeuerung	Radsätze, welche sich selbst, über die eigenen Kraftschlusskräfte zwischen Rad und Schiene steuern
Zwangssteuerung	Radsätze, welche entsprechend dem Bogenradius in eine bestimmte Stellung gesteuert werden, aktiv oder passiv.
Kraftsteuerung	Radsätze, welche über äussere Kräfte gesteuert werden.
Aktive Steuerung	Radsatz, welcher über einen Aktuator, auf Grund bestimmter Messgrößen, angesteuert wird

Tabelle 1: Terminologie zu den Fahrzeugen und den Steuerungsmechanismen der Fahrwerke

2.3 Inputdaten für Fahrzeugmodelle

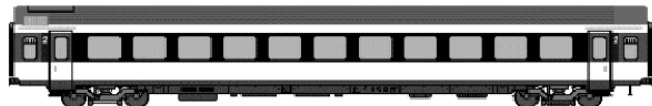
Die Inputdaten für das Fahrzeugmodell umfassen alle Daten, die erforderlich sind, um einen bestimmten Anwendungsfall, d.h. einen Streckenabschnitt und einen Fahrzeugtyp, nachzubilden. Das gesamte Fahrzeug wird nicht bis ins kleinste Detail abgebildet. Vielmehr werden bestimmte Komponenten so detailliert modelliert, dass das physikalische Verhalten des Fahrzeugs dargestellt wird. Bei einem Fahrzeug sind dies die Abmessungen, Massen und Trägheitsmomente von Fahrzeugkasten, Drehgestell und Radsatz sowie die Daten der Fahrzeugfederung und zu den Antriebs- und Bremssystemen. Für den Radverschleiss sind zusätzliche Informationen zu den verwendeten Stahlqualitäten und den werkstoffkundlichen Kennwerten der Räder erforderlich. Zum höherfrequenten Verhalten im Kontakt Rad-Schiene und den daraus resultierenden Mechanismen sind zusätzlich verfeinerte Modellierungen der am Rad-Schiene-Kontakt beteiligten Komponenten erforderlich. Die Kategorien der Inputdaten und deren Kontaktquellen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Materialkennwerte zur Radmaterial (RAILplus, Stadler, Lucchini RS),
- MKS-Modell oder Input zur Erstellung eines generischen MKS-Fahrzeug Modells (Stadler Bussnang),
- FE-Modelle von Radsatz und Rad von einem ausgewählten Fahrzeug (Stadler, Lucchini RS).

In Abbildung 1 ist ein möglicher Datensatz für ein Fahrzeug aufgeführt wie er für vereinfachte Berechnungen erforderlich ist. Zusätzliche Daten wären hier erforderlich für zum Beispiel lauffechnische Nachweisrechnungen wie sie in der Matrix der Abbildung 2 aufgeführt sind. Dazu gehören die berührgeometrischen Paarungen von Rad und Schiene unter Berücksichtigung von deren nominellen und im Betriebseinsatz sich verändernden Grössen.

In [4] sind die nominell verwendeten Radprofile bei den verschiedenen Meterspurbahnen aufgeführt. Bei den meisten verwendeten Radprofile zeigen sich bei Paarungen mit allen verwendeten Schienenprofilen und Einbauneigungen ungünstige Voraussetzungen für ein günstiges Verschleiss- und Schädigungsverhalten in den Bögen bei Radien unterhalb etwa 700m. Bei einigen zeigen sich leicht günstigere Zustände. Es zeigt sich aber, dass sich diese Radprofile im Betriebseinsatz verschleissbedingt an

die Schienen anpassen und sich dadurch günstigere Berührpaarungen für den Bogenlauf einstellen. Dieser Sachverhalt kann zum Beispiel im Bericht zur Betriebserprobung auf der MGB [8] nachgelesen werden und ist Gegenstand weiterer vertieft Untersuchungen.



Wagen		1					
Bezeichnung							
Fahrwerk		1			2		
Bezeichnung		LDG			LDG		
Radsatz		1	2	3	4		

Geometrie

Radstand	m	2.500		2.500	
Fahrwerkabstand	m		19.900		
Position	m	0	2.500	19.900	22.400

Radlasten

Radlast Tara	kg	5'370	5'370	5'370	5'370	
Radlast Brutto (AB-EBV)	kg	6'851	6'851	6'851	6'851	

Massen

Sitzplätze	kg	86				**
Stehplätze	kg	18.0				
Wagenkasten	kg	30'600				**
Beladung (AB-EBV)	kg	11'850				75kg
Fahrwerk	kg					
FW-Masse sekundärgefedert	kg					
FW-Masse primärgefedert	kg	3'000		3'000		*
Masse ungefedert / Radsatz	kg	1590	1590	1590	1590	*

Steifigkeiten

sekundär / Fahrwerk	N/m	1.20E+06		1.20E+06		*
primär / Rad	N/m	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	*

Dämpfung

sekundär / Fahrwerk	Ns/m	5.00E+04		5.00E+04		*
primär / Rad	Ns/m	9.00E+03	9.00E+03	9.00E+03	9.00E+03	*

Anteile pro Rad

Masse sek. gefedert	kg	5'306	5'306	5'306	5'306
Masse prim. gefedert	kg	750	750	750	750
Masse ungefedert	kg	795	795	795	795
Steifigkeit sekundär	N/m	3.00E+05	3.00E+05	3.00E+05	3.00E+05
Steifigkeit primär	N/m	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06
Dämpfung sekundär	Ns/m	1.25E+04	1.25E+04	1.25E+04	1.25E+04
Dämpfung primär	Ns/m	9.00E+03	9.00E+03	9.00E+03	9.00E+03

*Basis EW4

** Schätzung

Ungedämpfte Frequenz	f0	1.197
Gedämpfte Frequenz	f	1.167
Dämpfungsmass	D	15.66%

Abbildung 1: Möglicher Datensatz für ein Einzelfahrzeug

Nachweisrechnung			Beurteilungskriterien		1	2	3	4	5	6	7	8	9
				Eigendämpfungen, Restdämpfung Kritische Geschwindigkeit	Eigenfrequenzen, Eigenvektoren	Kraftniveau		Laufgüte bzw. Fahrkomfort		Wegamplituden	Verschleisskennwerte	Sicherheit gegen Entgleisen	
						Waaagrecht/quer	senkrecht	Waaagrecht/quer	senkrecht				
1	Laufverhalten in der Geraden	Eigenverhalten (Grenzzyklen)	x	x	(x)			(x)		(x)			
2		Dynamische Antwort auf regellose Gleislagefehler	(x)	(x)	x	x	x	x	x				
3	Quasistatisches Verhalten	Im Gleisbogen			x	x				x	x		
4		Im Gleisgegen- bogen			x	x				x			
5	Befahrbarkeit von Gleisverwindungen												x

Abbildung 2: Matrix mit den Anforderungen für lautechnische Nachweisrechnungen [3]

2.4 Inputdaten zu den Fahrwegparametern für die MKS-Simulation

2.4.1 Schienen, Schieneneinbauneigung

Bei den meisten Meterspurbahnen wird heute die Schiene 46E1 mit der Schienenneigung 1/20 verwendet. Teilweise ist auch die Schiene 54E2 und die 36E3 im Einsatz. Drei Bahnen setzen die Schienenneigung 1/40 ein. In [6] sind die nominellen Schienenprofile und deren Verwendung bei den verschiedenen Bahnen aufgeführt. Die realen Schienenprofile und Schieneneinbauneigungen in Abhängigkeit der Trassierungsgegebenheiten werden 2024 verfügbar sein.

Die nominellen Spurweiten und deren zulässigen Abweichungen sind in den Regelwerken aufgeführt [6]. Die nominelle Spurweite in Gleisen ist 1000mm. Die kleinste zulässige Spurweite ist 997 mm und die grösste zulässige Spurweite bei max. abgenützten Schienen 1030 mm. Spurerweiterungen werden selten ausgeführt. Sie dürfen im neuen Gleis bis 20 mm betragen.

2.4.2 Eingriff Schwellenwert der Oberbauunterhaltung

Die Instandsetzungsschwellen (ISS) Gleisgeometrie für Adhäsionsgleise sind in der R RTE 22570 [6] festgelegt. Diese stellen Extremwerte dar, welche die Sicherheit nicht beeinträchtigen dürfen.

2.4.3 Trassierungsparameter

2.4.3.1 Fahrdynamische Kenngrössen

Die für die Fahrzeuge der Meterspur zugrunde gelegten Fahrdynamischen Kenngrössen (Überhöhung, Überhöhungsfehlbetrag, Überhöhungsüberschuss, Gleisgrenzverwindungen) sind in der R RTE 22546 [7] festgelegt. Die maximale Abweichung der Überhöhung (Instandhaltungsschwelle ISS) ist $\pm 10\text{mm}$.

2.4.3.2 Überhöhungsbogen, Überhöhungsrampe

Die Gestaltung der Regelübergangsbögen (max. Überhöhung in Abhängigkeit Bogenradius, Länge Übergangsbogen, usw.) ist in der R RTE 22546 [7] geregelt.

2.4.3.3 Geschwindigkeit im Bogen

Aus den Fahrdynamischen Kenngrössen, den Überhöhungsrampen, den Übergangsbögen und den maximalen Fahrgeschwindigkeiten errechnen sich mit den in den Regelwerken aufgeführten Formeln die theoretisch möglichen Fahrgeschwindigkeiten in den Bögen. Diese können jedoch durch weitere Einflussgrössen beeinträchtigt werden (Vorsignaldistanzen, Gefälle, usw.).

2.4.3.4 Ausrundung von Kuppen und Wannen

Bei beengten Verhältnissen kommen Ausrundungen zur Anwendung. Die dabei zu berücksichtigenden Ausrundungsradien in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit sind in den R RTE 22546 [7].

2.4.3.5 Längsneigung

Bis zu einer Neigung von rund 70‰ werden die Fahrzeuge im Allgemeinen im reinen Adhäsionsbetrieb eingesetzt. Darüber sind je nach Anforderung mehr oder weniger Zahnradfahrwerke erforderlich.

2.4.4 Gleislagefehler

Für die Beurteilung der dynamischen Antwort auf regellose Gleislagefehler (sog. Störverhalten) werden der Richtungs-, Längshöhen- und Querhöhenfehler herangezogen. Diese Fehler werden durch Angabe der Leistungsdichtespektren mittels analytischer Funktionen beschrieben. Die für die lauftechnischen Betrachtungen erhobenen Gleislagefehler der verschiedenen Meterspurbahnen werden anhand der Leistungsdichtespektren miteinander verglichen und in der Folge in einem Bericht veröffentlicht [10]. Diese werden anschliessend in ein den Bahnen dienenden lauftechnischen Lastenheft integriert.

2.4.5 Bogenverteilungen

Für den grössten Teil der Meterspurbahnen liegen detaillierte Beschreibungen der Einsatzstrecken in Form der äusseren Gleisgeometriedaten vor. Darin sind unter Anderem genau verortet die Bogenhalbmesser sowie deren Krümmungsrichtungen (links/rechts) und die an diese angrenzenden Übergangsbögen, deren Überhöhungen und die Längsneigungen aufgeführt. Zudem sind die Fahrgeschwindigkeiten gemäss RADN dieser Gleisgeometrie zugeordnet.

3 Anforderungen an Fahrzeugdaten aus verschiedenen Forschungsbereichen

3.1 Virtuelles Fahrzeug (ViF)

3.1.1 Verschleiss Rad und Schiene

Um die Entwicklung des statischen und dynamischen Verschleisses in Eisenbahnsystemen zu reduzieren bzw. zu vermeiden, kann eine Vielzahl von Gegenmassnahmen ergriffen werden. Um deren Wirksamkeit im speziellen Anwendungsfall der Meterspurbahnen zu bewerten, wird ein Simulationsmodell entwickelt, das die interessierenden Verschleissarten qualifiziert abbilden kann. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Anwendbarkeit des Modells auf alle interessierenden Verschleissarten gelegt. Dies ermöglicht eine zunächst getrennte Betrachtung der einzelnen Schadensarten und in späteren Projektphasen eine ganzheitliche Betrachtung ihres Zusammenspiels. Da für die Simulation des statischen Verschleisses nur bestimmte Komponenten des Modells notwendig sind, wird die Funktionalität des gesamten Modells anhand der Simulation der dynamischen Verschleissart demonstriert. Darüber hinaus gilt es, alle Schnittstellen zu den anderen Projektthemen Reibungsmanagement und Lärm & Vibration zu berücksichtigen, um ein umfassendes Verständnis der Problemstellung zu erreichen.

Um einen bestimmten Anwendungsfall, d.h. einen Streckenabschnitt und einen Fahrzeugtyp nachzubilden sind Daten zu den Fahrzeug-/Gleis-Eigenschaften erforderlich. Das gesamte Fahrzeug wird nicht bis ins kleinste Detail abgebildet. Vielmehr werden bestimmte Komponenten so detailliert modelliert, dass das physikalische Verhalten des Fahrzeugs dargestellt wird. Bei einem Fahrzeug sind dies die Abmessungen, Massen und Trägheitsmomente von Fahrzeugkasten, Drehgestell und Radsatz sowie die Daten der Fahrzeugfederung. Zusätzlich werden Gleisdaten wie Überhöhung, Bogenradius, Spurweite, Steigung sowie die verorteten Traktionsdaten (Schlupf, Geschwindigkeit) benötigt.

Bei der Simulation von dynamischem Verschleiss ist es unerlässlich, das dynamische Verhalten verschiedener Komponenten zu erfassen. Als häufigste Ursachen für die Entstehung von dynamischem Verschleiss werden in der Literatur die unteren Biege- und Torsionsmoden des Radsatzes und das dynamische Verhalten des Gleises genannt. Um diese Faktoren in der MKS zu berücksichtigen, sind zusätzliche Anstrengungen sowohl bei der Messung der physikalischen Komponenten als auch bei deren Modellierung erforderlich. Daher werden alle übrigen Komponenten, von denen nicht angenommen wird, dass sie zur Bildung dynamischer Verschleissmuster beitragen, als starr modelliert, um einen übermässigen Modellierungs- und Berechnungsaufwand zu vermeiden.

Das Verschleissmodell nutzt die von der MKS gelieferten Kontaktdaten, um den Verschleiss des Rades oder der Schiene zu berechnen. Zur genauen Quantifizierung des Verschleisses ist es jedoch erforderlich, die für den Verschleiss relevanten Materialeigenschaften zu bestimmen. Diese werden als Verschleisskoeffizienten oder Verschleisszahlen bezeichnet und in der Regel durch Laborversuche, wie z. B. den Zweischeibentest, ermittelt.

3.1.2 Lärm (Kurvenkreischen)

Das Kurvenkreischen wird durch die Schallabstrahlung des Rades bestimmt. Zur Berechnung dieser Schallabstrahlung wird ein Radabstrahlungsmodell auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode entwickelt. Dieses Modell kann auch für das Thema Verschleiss verwendet werden, insbesondere für die Modellierung von periodischen Rundheitsabweichungen (Polygone). Grundlegend sind die Eingangsdaten von Feldmessungen sowie die Anregungskräfte, die durch den Rad-Schiene-Kontakt verursacht werden.

Diese Anregungskräfte werden mit Hilfe eines Zustandsraummodells im Zeitbereich berechnet, das die laterale Reibungskoeffizient-Schlupfbeziehung enthält und die Berechnung der Stick-Slip-Anregung in einer Rückkopplungsschleife ermöglicht. Zu diesem Zweck sind mehrere Messgrößen aus Feldmessungen erforderlich.

Auf der Grundlage von dynamischen Mehrkörper-Simulationen (MKS) eines Fahrzeugs, das einen bestimmten definierten Bogen durchfährt, wird eine quasistatische Simulation für die Fahrt im Bogen entwickelt. Das Ergebnis dieses Modells ist unter anderem die Kontaktposition von Rad und Schiene sowie der Schlupf. Letzteres kann zur Berechnung der Anfangsbedingungen für die Beziehung zwischen dem lateralen Reibungskoeffizienten und dem Schlupfverhalten verwendet werden. Dieses MKS-Modell ist dasselbe, wie dasjenige welches für das Thema Verschleiß verwendet wird.

Bei konstantem Längs- und Bohr-Schlupf werden die seitlichen Kontaktkräfte für variierenden seitlichen Schlupf berechnet. Dabei muss das Reibungsmodell dasselbe sein, wie es bei den fahrdynamischen Berechnungen in der Haftzone ist. Zudem es ist eine Einführung des abfallenden Kraftschlussgesetzes erforderlich (z. B. Kraft/Polach-Näherung).

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wird ein Radstrahlungsmodell erstellt. Dabei werden die aus dem "Zeitbereichs-Zustandsmodell" im Zeitbereich gewonnenen Kräfte zunächst in den Frequenzbereich transformiert und dann im FE-Modell auf den in der "stationäre Simulation des Bogenlaufs" berechneten Kontaktpunkt angewendet. Die resultierende Schwingung hängt von einer präzisen Darstellung der Moden des Rades ab. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, das Modell des Radsatzes anhand von Messdaten aus experimentellen Modalanalysen aus "Feldversuche" zu kalibrieren.

3.1.3 Reibungsmanagement

Das Modell der Kraftschlusskraft ist ein wesentliches Instrument zum Verständnis des Kraftschlussverhaltens. Es liefert wertvolle Erkenntnisse durch die Analyse des Verhältnisses zwischen tangentialer Kraftschlusskraft und Normalkraft, die als "Adhäsion" bezeichnet wird, im Verhältnis zum Schlupf. Diese Erkenntnisse werden durch die Analyse von Kraftschluss-Schlupf-Kurven unter verschiedenen Bedingungen dargestellt.

Das von Polach entwickelte Kraftschlusskraft-Modell stellt einen entscheidenden Zusammenhang zwischen der Relativbewegung der Kontaktflächen, die den Längs-, Quer- und Bohr-Schlupf umfasst, und dem Kraftschlusskoeffizienten her. Die Fähigkeit des Modells, den Kraftschlusskoeffizienten zu quantifizieren, der die beteiligten Kraftschlusskräfte charakterisiert, trägt wesentlich zur genauen Darstellung der Dynamik von Schienenfahrzeugen bei. Diese Informationen sind von unschätzbarem Wert für die Vorhersage und Analyse des Verhaltens von Zügen bzw. Schienenfahrzeugen in verschiedenen Betriebsszenarien.

3.2 Traktion (Emkamatik)

Die erreichbare Zug- und Bremskraft hat einen wesentlichen Einfluss auf das betriebliche Verhalten eines Triebfahrzeugs, beispielsweise die Einhaltung der geforderten Fahrzeiten oder die Beförderung der vereinbarten Anhängelast auf Strecken mit Steigung oder Gefälle. Andererseits haben die ausgeübten Kräfte Einfluss auf die Abnutzung der Schienen und Laufflächen sowie auf Torsionsschwingungen in der Radsatzwelle.

Die Traktionsregelung, welche unter anderem für eine optimale Ausnutzung der Adhäsion zwischen Rad und Schiene sorgt, hat dabei eine wichtige Bedeutung. Die Optimierung für ein Kriterium (Leistung, Verschleiß oder Komfort) kann nachteilige Auswirkungen bei den anderen Kriterien haben. Sowohl die Abnutzung von Rad und Schiene als auch die Bewährung eines Fahrzeugs bei kritischen Schienenzuständen wird nicht erst dann bestimmt, wenn der Softwareingenieur seine Regelparameter einstellt.

3.2.1 Stationäre Auslegung

Für ein gegebenes Zugkonzept (das viele weitere Kriterien wie zum Beispiel nach AB-EBV max. Drehzapfenabstand und max. Achslast berücksichtigen muss) sind die Anforderungen so zu definieren, dass sie im Rahmen des physikalisch Machbaren und der Erfahrungen bisheriger Projekte liegen. Zur Erfüllung der Minimalanforderungen an die stationäre Auslegung der Zugkräfte sind Beharrungen auf Gebirgsstrecken sowie Beschleunigung auf Gebirgs- und Talstrecken erforderlich. Als wesentliche konstruktive Eigenschaften werden neben anderen vor allem nach Einzelachs- oder Gruppenantrieben unterschieden.

3.2.2 Dynamik und Regelung

Für ein Fahrzeug muss die Regelung so eingestellt werden, dass sie die Anforderungen „Leistung, Verschleiss und Komfort“ im Sinne eines bestmöglichen Kompromisses erfüllt.

3.2.3 Schädigungen und Verschleiss

Im ungünstigen Fall können im Betrieb durch übermässige Ausnützung der Adhäsion Schäden und übermässiger Verschleiss an Rädern und Schienen entstehen. Diese Erscheinungen sind aber nicht immer eindeutig der Adhäsion zuzuordnen und oft auch gar nicht dadurch verursacht. Aus diesem Grunde wird es wichtig sein, diese von denjenigen zu trennen, welche aus der Spurführung resultieren.

3.3 Anforderungen bezüglich der Anwendung von Gleislageabweichungen für die Meterspur [9]

Die erarbeiteten RAILplus-Gleislagefehler basieren auf der Auswertung von Messdaten. Vor der ersten Verwendung dieser Gleislagefehler z.B. in Fahrzeugausschreibungen ist zu empfehlen, entsprechende lauftechnische Simulationen unter Verwendung dieser Gleislagefehler durchzuführen, um deren Eignung bzw. die Fahrzeug-Reaktionen zu überprüfen. Diese Frage stellt sich vor dem Hintergrund, dass die RAILplus-Gleislagefehler fahrtechnisch anspruchsvolle Randbedingungen (Störverhalten des Fahrzeugs) ergeben dürften, die technische Machbarkeit von Fahrzeugen aber realisierbar sein muss. Zudem zeigen sich bei mehreren Bahnen auf Strecken, welche im oberen Geschwindigkeitsbereich befahren werden, periodische Längshöhenfehler mit vergleichbaren Wellenlängen. Zur Abklärung von deren Relevanz in Bezug auf allfällige Resonanznachbarschaften mit den Fahrzeugen müssen die Eigenfrequenzen der Starrkörper der Meterspurfahrzeuge bekannt sein.

3.4 Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der DB

Für die Bearbeitung verschiedener Lieferobjekte wird ein generisches Fahrzeugmodell mit starrer Radsatzführung für ein Einzelfahrzeug mit relevanten und parametrisierten Konstruktionsaspekten (Achstand, Drehzapfenabstand, Steifigkeiten Primärfederung, Ausdrehwiderstand, Massen, Raddurchmesser, ggf. weitere relevante Parameter) erstellt. Einige der zu behandelnden Problemstellungen sind:

- vereinfachte Methoden zur Ermittlung des Stellungsbildes der Fahrwerke im Bogen in Abhängigkeit des Bogenhalbmessers,
- Erfordernisse zur nominellen Spurerweiterung aufgrund der bogenabhängigen Stellungsbilder der Fahrzeuge,
- Untersuchung zu nicht durch den Fahrkantenverschleiß verursachten Erweiterungen der Spurweite insbesondere im Bereich der sehr kleinen Bogenhalbmesser und Aufzeigen von möglichen Ursachen aus dem Zusammenwirken von Fahrzeug/Fahrweg,
- Veränderung der Berührungsgeometrie Rad/Schiene bei Belastung im Vergleich zum unbelasteten Gleis,

- werkstoffkundliche Bewertung der Ergebnisse aus Feld- und Prüfstandsversuchen des AG im Hinblick auf Verschleiß (z.B. Schlupfwellen) und RCF (z.B. Laufflächenschäden an Rädern) sowie die Anwendung der Methoden auf konkrete Fragestellungen, die vom AG vorgegeben werden.

Das generische Fahrzeug muss so ausgestattet werden, dass sich damit durch Variation der Fahrzeugparameter die Fahrzeuge der Meterspur übertragbare Antworten zu oben aufgeführten Fragestellungen bei den Meterspurbahnen ableiten lassen.

3.5 Nachrüstlösungen

Die Nachrüstlösungen werden anhand der MKS hinsichtlich deren Verbesserungspotential mittels MKS-Simulationen bewertet. Da diese Lösungen auf die Meterspurbahnen und deren Fahrzeuge übertragbar sein müssen wird deren Wirksamkeit anhand eines generischen Fahrzeugmodells nachgewiesen. Es ist zu erwarten, dass dafür aus den Forschungsarbeiten die massgebenden Indikatoren zur Verfügung stehen, damit anhand dieser die Wirksamkeit der Lösungen für den Bogenlauf hinsichtlich der gestellten Anforderungen an Lärm, Verschleiss, Beanspruchungen und Schädigungen nachgewiesen werden können. Zudem muss auch nachgewiesen werden, dass mit diesen Lösungen die geforderten Maximalgeschwindigkeiten erreicht werden können.

4 Zusammenfassung

Im Hinblick auf verschiedene technische Forschungsvorhaben in mehreren Teilbereichen der mechanischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg werden Fahrzeug-Fahrweg-Modelle benötigt. Diese betreffen sowohl den Fahrweg als auch das Fahrzeug, wobei dafür je nach Aufgabenstellungen unterschiedliche Betrachtungstiefen zur Anwendung gelangen werden. Zu deren Behandlung ist eines oder sind mehrere generischen Modelle/e des Fahrzeugs einerseits und des Fahrwegs andererseits erforderlich. Das generische Modell soll Plattform sowohl für das quasistatische als auch das dynamische Verhalten hinsichtlich Verschleisses, Lauf- und Traktionsverhalten, Luft- und Körperschall, Erschütterungen sowie weiterer Verhaltensweisen verwendbar sein. Dabei handelt es sich um Problemstellungen, welche bearbeitet werden durch

- das ViF zum Verschleiss (Kurz- und Langzeitverhalten), zur Schallemission und zum Reibungsmanagement,
- die DB AG zu verschiedenen Interaktionsproblemen insbesondere im Trassierungsbereich der sehr engen Bögen,
- die beauftragte Stelle für die Erstellung der notwendigen Nachweise für die Bewilligung der Betriebserprobungen mit modifizierten bogenfreundlichen Radprofilen,
- eine beauftragte Stelle für die Versuchsrechnungen zu den verschiedenen Gleislagefehler identifiziert für die Meterspurbahnen im Hinblick auf künftige lauftechnische Nachweisrechnungen,
- die Emkamatik für die Untersuchungen zum Traktionsverhalten und die Schaffung der Grundlagen für die Ermittlung des Verschleisses aus den dadurch massgebenden Einflussgrössen.
- die beauftragte Stelle bei der Verifikation des Verhaltens von Nachrüstlösungen und Lösungen für Neubaufahrzeuge.

Die Anforderungen und die organisatorischen Aspekte an das zu entwickelnde generische Fahrzeugmodell aus des verschiedenen Forschungsaspekten werden in der folgenden Tabelle 2 zusammengefasst:

Themas	Federführung	Kurzbeschreibung	Synergien zu Thema
Verschleiss Kurzzeitverhalten	ViF/Verschleiss	Vereinfachung des Modell für die dynamische Verschleissart	- ViF-Lärm - Nachrüstlösungen - Untersuchungen DB - Anwendung von Gleisla-geabweichungen - Traktion Schädigung/Verschleiss - Reibungsmanagement
Verschleiss Langzeitverhalten	ViF/Verschleiss	Gesamtes Modell anhand der Simulation der dynamischen Verschleissart entwickeln.	- ViF- Lärm - Traktion Dynamik/Regelung - Reibungsmanagement
Lärm/Erschütterung	ViF/Lärm	Übernahme Modell zum dynamischen Verschleiss und Integration in ein dynamisches Fahrwegmodell	- Reibungsmanagement - ViF/dynamischer Verschleiss
Reibwert Rad/Schiene	ViF/Reibungsmanagement	Verbrauch Konditioniermittel und Berücksichtigung der Kraftschlusskräfte und Traktion	- ViF/Kurzzeitverhalten - ViF/Lärm
Traktion	Emkamatik	Dynamisches Verhalten des Radsatzes bei Selbsterregung	- ViF/Langzeitverhalten - ViF/Kurzzeitverhalten - Reibungsmanagement - ViF/Lärm - DB Beanspruchung Werkstoffe Rad/Schiene
Gleislageabweichungen	Projekt P3	- Störverhalten durch regellose Gleislagefehler (Umsetzbarkeit in Lastenheft) - Frequenznachbarschaften periodische Gleislagefehler und Fahrzeugeigenmodi	- ViF/Kurzzeitverhalten
Untersuchungen DB Teil 1	DB	- Stellungsbilder - Beanspruchung Einspannmittel Schienen auf Schwelle - Spurerweiterung	- ViF/Kurzzeitverhalten - ViF/Lärm
Untersuchungen DB Teil 2	DB	- Berührungsgeometrie Rad/Schiene	- ViF/Kurzzeitverhalten - ViF/Langzeitverhalten - ViF/Lärm
Untersuchungen DB Teil 3	DB	- Kontaktmechanik und Beanspruchung Werkstoffe Rad/Schiene	- ViF/Kurzzeitverhalten - ViF/Langzeitverhalten - Traktion
Nachrüstlösungen Neubaulösungen	Projekt P5	- Wirksamkeit der Nachrüstlösungen - Wirksamkeit der Neubaulösungen	- ViF/Kurzzeitverhalten - ViF/Langzeitverhalten - ViF/Lärm

Tabelle 2: Anforderungen und die organisatorischen Aspekte an das zu entwickelnde generische Fahrzeugmode

5 Verzeichnisse

5.1 Revisionen

Rev.	Datum	Bearbeiter	Beschrieb der Anpassung

5.2 Referenzen

- [1] RAILplus P5, Bearbeitung_Uebersicht_Rollmaterial_Meterspur_V01
- [2] RAILplus P5, FIMO LO-1.4 Konzeptionelle Bewertung
- [3] ORE B176 Vorstudien und Lastenhefte, Bände 1 und 2, 1989
- [4] RAILplus P3, Profile der Räder und Schienen, Lieferobjekt 2.2.1.
- [5] D RTE 22540, Fahrbahnpraxis Meterspur und Spezialspur.
- [6] R RTE 22570, Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen, Meterspur
- [7] R RTE 22546 Geometrische Gestaltung der Fahrbahn, Meterspur
- [8] RAILplus P2, Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt, 2022
- [9] RAILplus P3 und P4, Identifikation repräsentativer Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen der Meterspur
- [10] RAILplus, Identifikation repräsentativer Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen der Meterspur

5.3 Abbildungen

ABBILDUNG 1: MÖGLICHER DATENSATZ FÜR EIN EINZELFAHRZEUG	13
ABBILDUNG 2: MATRIX MIT DEN ANFORDERUNGEN FÜR LAUFTECHNISCHE NACHWEISRECHNUNGEN [3]	14

5.4 Tabellen

TABELLE 1: TERMINOLOGIE ZU DEN FAHRZEUGEN UND DEN STEUERUNGSMECHANISMEN DER FAHRWERKE	11
TABELLE 2: ANFORDERUNGEN UND DIE ORGANISATORISCHEN ASPEKTE AN DAS ZU ENTWICKELNDE GENERISCHE FAHRZEUGMODE	20

6 Anhang

[Bearbeitung Uebersicht Rollmaterial Meterspur V01](#)