

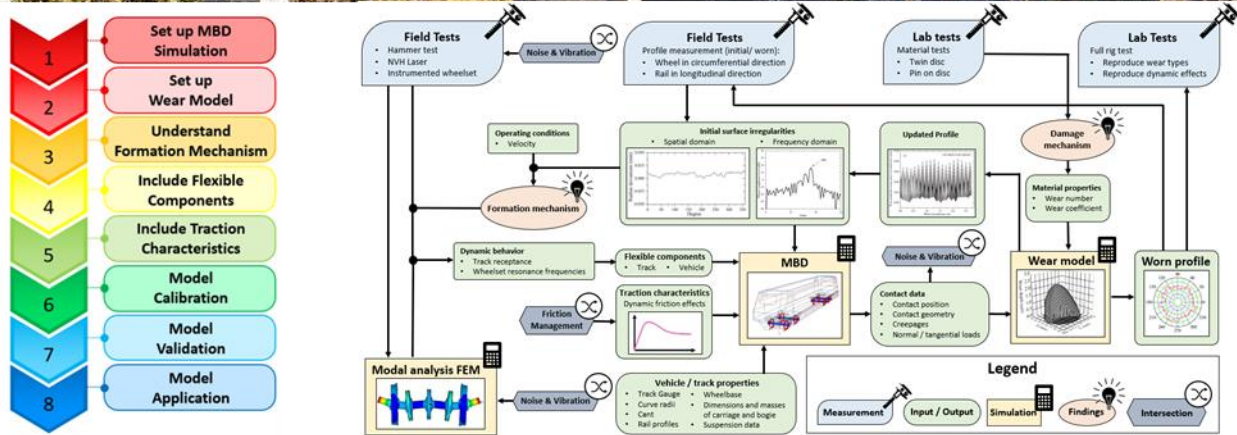
# Konzept Modellierung und Validierung

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 2 SKS / SKK und 3 Grundlagen Rad / Schiene

Modul: 5 Theoretische Grundlagen SKS und SKK und Modul 3 Grundlagen kontaktmechanische Interaktion von P3

## Technischer Bericht



ID: RAILplusSF-00010

Datum / Status: 24.08.2023 / Freigegeben

Seitenanzahl 33

Verfasser: Roland Müller / Felix Platzer / Blasius Buchegger / Mahdiyaz Nejadhamzeeigilani / Nikolaus Ritter

Geprüft: Mauro Saputelli

Freigegeben: Nikolaus Ritter

Zitierweise: Ritter Nikolaus, RAILplus / zb: *Konzept Modellierung und Validierung*, Technischer Bericht, RAILplusSF-00010, 24.08.2023

## Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	03.07.2023	R. Müller	Erster Entwurf
0.2	11.08.2023	N. Ritter	Bereinigter Entwurf.
0.3	21.8.2023	M. Stalder	Bericht redigiert und finalisiert.
0.4	23.08.2023	M. Saputelli	Bericht geprüft
1.0	24.8.2023	M. Stalder	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

## Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	28.08.2023
1.0	Management Board	13.09.2023

## Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

## Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
BEM	Boundary element method – Randelemente-Methode
CAD	Computer aided design
FE	Finite element
FEA	Finite element analysis – Finite Element Analyse
FM	Friction Management - Reibungsmanagement
FRA	Federal Railroad Administration – Bundes-Eisenbahn-Behörde
K2	Gefördertes Kooperations-Forschungsprojekt
Lab	Laboratory - Labor
MBS	Multibody- simulations – Mehrkörper Simulation (MKS)
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
MKS	Mehrkörper Simulation
RPM	Revolutions per minute – Umdrehungen pro Minute
SKK	Schienenkopf-Konditionierung
SKS	Spurkranz-Schmierung
TOR	Top of Rail - Schienenkopf
Tpf	Transports publics Firbourgeois
ViF	Virtual Vehicle

## Management Summary

Immer mehr Meterspurbahnen sind von massiv zunehmendem Verschleiss und von Lärm/Erschütterungen betroffen. Steigende Kapazitätsansprüche, straffere Zeitpläne und die Anforderungen an die Lärmemission und Erschütterung aus der Umweltschutzgesetzgebung sind eng mit den aufgeführten Problemstellungen verbunden, welche technisch dem Bereich der Interaktion Fahrzeug/Fahrweg zuzuordnen sind. Die Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug-/Fahrweg Meterspur ist damit beauftragt Ergebnisse zu entwickeln, welche die Meterspurbranche bei ihrer langfristigen Strategie unterstützt die Schaden- und Lärmeffekte zu verstehen und zu optimieren. Im Rahmen des K2-Projektes wurden zu diesem Zweck zielgerichtet aufeinander abgestimmte Arbeitspakete festgelegt. Dazu gehören unter anderem:

- Abklärungen zum Stand der Technik
  - Überblick zum Stand der Technik, zu den verschiedenen Verhaltensweisen und der bekannten Lösungsvarianten, Methoden und Modelle sowie zu verwendende Werkzeuge.
  - Schaffung der Basis für Modell-Weiterentwicklungen und Modell-Neuentwicklungen.
- Entwicklung von Modellen für Verschleiss und Schädigung, Lärm und Reibungsmanagement.
- Datenanalyse zur Verifikation der entwickelten Modelle.
- Anwendung der validierten Modelle zur Bewertung von Verbesserungsmassnahmen.

Im vorstehenden Dokument werden die Modellkonzepte für die Bereiche Verschleiss/Schädigung, Lärm und Reibungsmanagement vorgestellt. Diese geben einen strukturierten Einblick in die verschiedenen Aktivitäten bei den Modellentwicklungen, den dabei benötigten Inputdaten der Bahnen und Hersteller (bestehend aus Erfahrungen und/oder Untersuchungen/Betriebserprobungen), den benötigten Inputdaten aus Versuchsreihen auf Klein- und Grossprüfständen und den Verfahren zur Validierung der Modelle anhand von zusätzlichen Versuchen im Feld. Basierend auf den Modellkonzepten werden nun einerseits Spezifikationen für die Ermittlung der benötigten Inputdaten erstellt, welche wiederum zur Planung von dafür notwendigen Messungen und Versuchen verwendet werden.

## Inhalt

### Inhalt 5

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Ausgangslage und Vorgehen</b> .....	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Modellkonzept: Verschleiss</b> .....	<b>8</b>
3.1.	Einleitung .....	8
3.2.	Struktur des Modells.....	9
3.3.	Simulation von Mehrkörpersystemen .....	10
3.4.	Verschleissmodell .....	13
<b>4.</b>	<b>Modellkonzept: Lärm</b> .....	<b>16</b>
4.1.	Zusammenfassung.....	16
4.2.	Detaillkonzepte .....	17
4.3.	Reduktion von Kurvenkreisch-Geräuschen .....	21
<b>5.</b>	<b>Modellkonzept: Reibungsmanagement</b> .....	<b>23</b>
5.1.	Modell-Konzept .....	24
5.2.	Kraftschlusskraft-Modell .....	24
5.3.	TOR-Produktmodell.....	25
5.4.	Erweitertes FRA-Modell .....	27
<b>6.</b>	<b>Erforderliche Daten, geplante Prüfstands- und Feldversuche</b> .....	<b>29</b>
<b>7.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>33</b>

## 1. Einleitung

Dieser technische Bericht ist in der Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg von RAILplus in Zusammenarbeit mit dem Virtual Vehicle im Rahmen eines K2-Projektes entstanden. Vorgestellt wird das Konzept der Modellierung und Validierung eines Fahrzeug/Fahrweg-Modells womit langfristig Simulationen in Bezug auf Verschleiss, Lärm und die Anwendung von Reibwertverändernden Produkten im Rad-Schiene Kontakt durchgeführt werden können. Das Modell soll zudem ein wichtiges Werkzeug sein in der Übertragbarkeit von technischen Lösungen auf andere Bahnen mit etwas anderen Randbedingungen. Die Modelle werden vom Virtual Vehicle aufgebaut. Stadler und Voestalpine liefern Daten zu Fahrzeug und Fahrweg. Die Validierung erfolgt auf Prüfstandsversuchen bei Lucchini und in einem zweiten K2-Projekt mit AC<sup>2</sup>T und der University of Sheffield durch Prüfstands- und Feldversuche. Die Abbildung 1 gibt Aufschluss über die Abgrenzung und die Projektpartner.

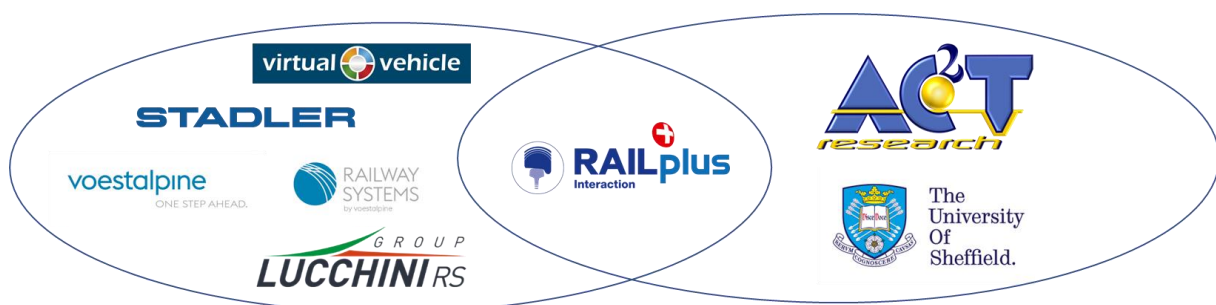


Abbildung 1 Organisation K2-Projekte und Projektpartner

## 2. Ausgangslage und Vorgehen

Immer mehr Meterspurbahnen sind von massiv zunehmendem Verschleiss betroffen. Die derzeit getroffenen Sofortmaßnahmen (Bsp. SKK) können die Situation zwar etwas entschärfen, lösen aber die Grundprobleme nicht. Um die Kontrolle über diese Interaktionen zu behalten, müssen die Bahnen in der Lage sein, das Gesamtsystem zu verstehen. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den drei Kategorien Radverschleiss, Schienenverschleiß sowie der Lärmproblematik insbesondere in den engen Bögen. Die Abbildung 2 gibt einen systematischen Überblick zu den Problemkategorien, Phänomenen und Arbeitsinstrumenten zur Behandlung der Kategorien Kurzzeitverhalten (static wear), Langzeitverhalten (dynamic wear) sowie Lärm, welche im K2-Projekt unter Federführung des ViF bearbeitet werden.

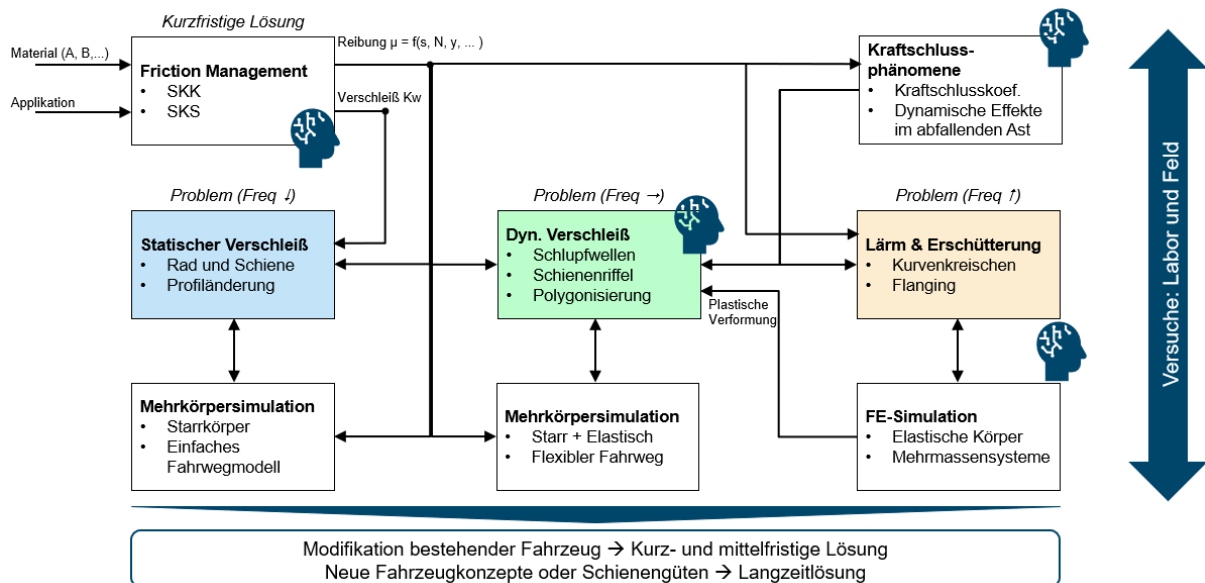


Abbildung 2: Überblick K2-Projekt ViF/RAILplus

Es soll daher ein Grundlagenverständnis und State-of-the Art für Kurz- und Langzeiteffekte in den oben genannten Bereichen erworben werden. Des Weiteren soll auch die Klassifikation von Betriebsbedingungen auf Basis von Felddaten durchgeführt werden. Eine Validierung und Kalibrierung der Modelle zur Beschreibung der Kurz- und Langzeiteffekte und deren Interaktion erfolgt unter Verwendung von bestehenden Felddaten und den im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuchen. Die Anwendung der Modelle unter Verwendung von generischen MKS/FE-Modellen in Form von Parameterstudien wird im Anschluss zur Verbesserung des Systemverständnisses der Meterspurbahn und zur Übertragbarkeit auf andere Bahnen durchgeführt. Diese Ergebnisse unterstützen dann die Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug-/Fahrweg Meterspur bei ihrer langfristigen Strategie die Verschleiss-, Schaden- und Lärmeffekte zu verstehen und zu optimieren.



### 3. Modellkonzept: Verschleiss

#### 3.1. Einleitung

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. Der konzeptionelle Rahmen basiert auf dem neuesten Stand der Technik und stützt sich auf die neuesten technologischen Fortschritte und die besten Praktiken der Industrie.

Dieses Kapitel beschreibt alle Teilmodelle, die zusammen das gesamte Modellierungskonzept für das Thema Verschleiss bilden. 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 beiden Projektthemen Reibungsmanagement und Lärm & Vibration zu berücksichtigen, um ein umfassendes Verständnis der Problemstellung zu erreichen.

In der folgenden Abbildung 3 wird ein allgemeiner Überblick über die Schnittstellen zwischen den Modellierungs- und Versuchskonzepten zum Verschleiss sowie die Überschneidungen zu den Themenbereichen Lärm & Vibration und Reibungsmanagement gegeben.

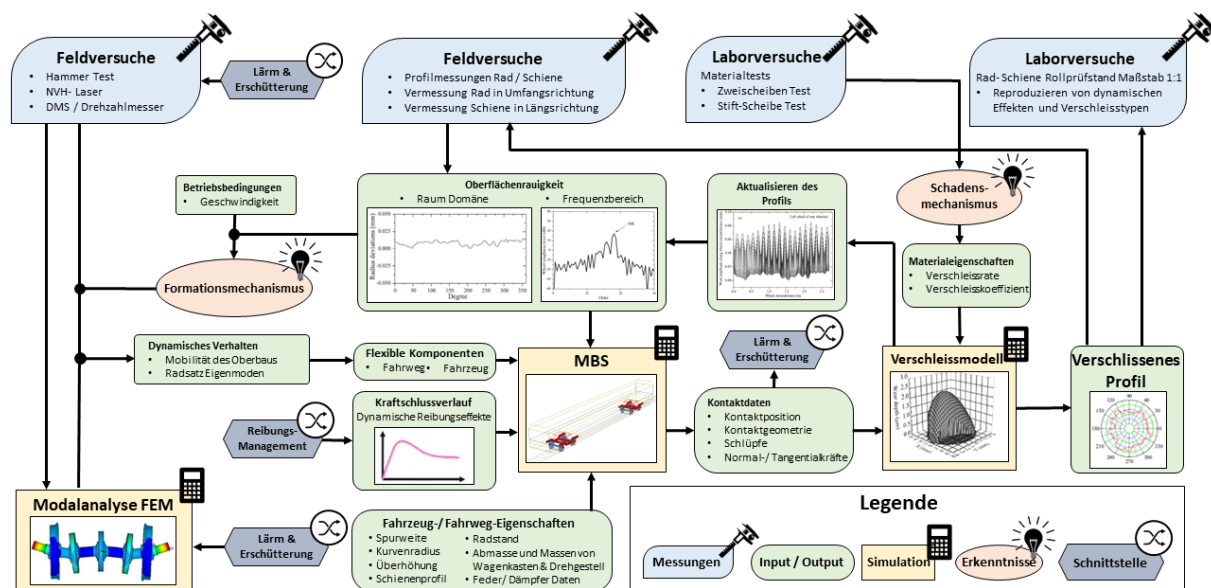


Abbildung 3: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept «Verschleiss»



### 3.2. Struktur des Modells

Es folgt eine umfassende Beschreibung des Simulationsmodells, das sich aus miteinander verbundenen Teilmodellen zusammensetzt, die im Kern eine iterative Schleife bilden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Dieser Prozess, der auch als Rückkopplungsschleife bezeichnet wird, umfasst die folgenden Schritte:

- Um die Entwicklung der Schadensarten entlang eines ausgewählten Gleisabschnitts zu simulieren, wird eine Mehrkörpersimulation (MKS) durchgeführt.
- Die sich daraus ergebenden Kontaktparameter werden dann als Eingabe für ein Verschleißmodell verwendet, das den während des Simulationslaufs auftretenden Verschleiß bewertet.
- Um ein Gleichgewicht zwischen Berechnungseffizienz und präzisen Ergebnissen zu finden, wird der berechnete Materialverlust extrapoliert, um mehrere Raddurchgänge bzw. gefahrene Kilometer zu berücksichtigen.
- Anschliessend wird aus dem auftretenden Verschleiß ein Verschleißprofil erstellt, das als Ausgangsbedingung für die nächste MKS dient. Diese geschlossene Berechnungsschleife wird so lange wiederholt, bis eine gewünschte Anzahl von Kilometern oder Raddurchgängen erreicht ist.

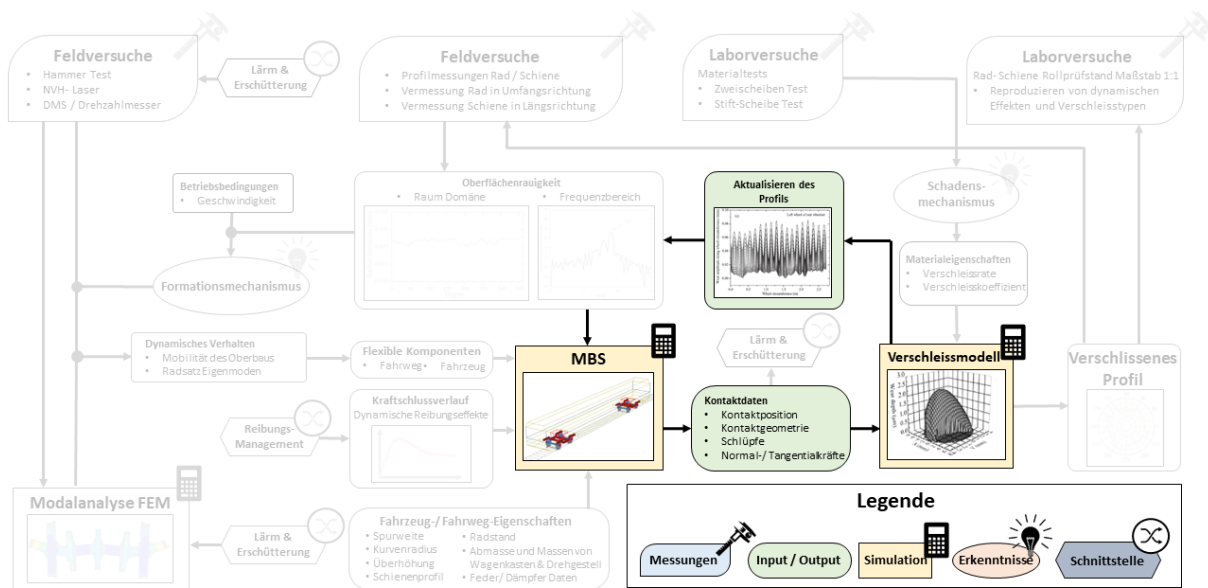


Abbildung 4: Iterationsschleife, die das Herzstück des Modells darstellt

Die detaillierte Funktionsweise dieser Teilmodelle wird in den folgenden Kapiteln ausführlich erläutert. Dazu gehören auch die spezifischen Eingaben, die für ihre Umsetzung erforderlich sind, wie die empfohlene Messkampagne und die Laborversuche, sowie die von den Projektpartnern bereitgestellten Daten.

### 3.3. Simulation von Mehrkörpersystemen

Obwohl MKS üblicherweise zur Simulation der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion eingesetzt werden, erfordern sie einen erheblichen Kalibrierungsaufwand, um die Entwicklung der dynamischen Verschleissarten genau abzubilden. Alle erforderlichen Eingaben und Simulationsergebnisse sind in Abbildung 5 zu finden.

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.

Die einzelnen Eingaben (grün) lassen sich in vier Kategorien einteilen, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

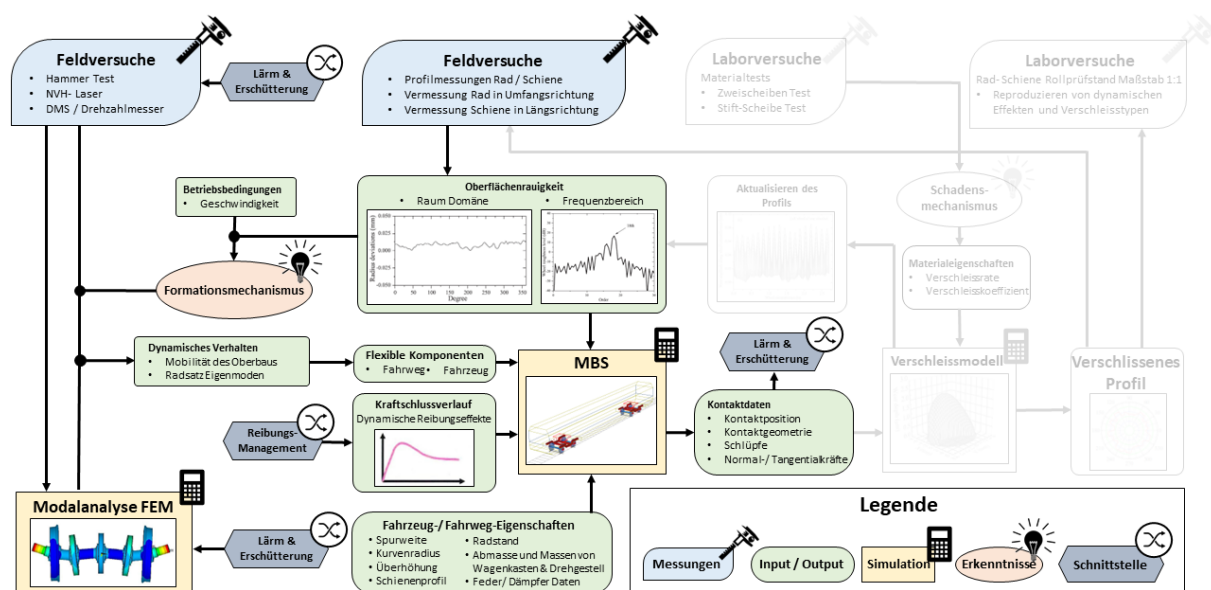


Abbildung 5: Erforderliche Eingaben für die Mehrkörpersimulation

#### Fahrzeug-/Gleis-Eigenschaften

Dies umfasst 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. Zusätzlich werden Gleisdaten wie Überhöhung, Bogenradius, Spurweite, Steigung usw. benötigt. Wenn Messungen von Spurweite, Überhöhung und andere Unregelmässigkeiten verfügbar sind, können diese Daten verwendet werden, um eine realistischere Darstellung des Gleisabschnitts zu berücksichtigen, da die resultierende Anregung des Fahrzeugs durch Berücksichtigung dieser Eingaben zu einer genaueren Darstellung des Anwendungsfalls führt. Wie bei den Rad- und Schienenprofilen sollten auch hier verschleissbedingte Änderungen des Raddurchmessers und der Schienenhöhe im Vergleich zum Nennprofil berücksichtigt werden.

### Initiale Oberflächenunregelmäßigkeiten

Nach dem Reprofilieren der Räder bzw. dem Schleifen der Schienen sind die Profile nicht ideal glatt. Die verbleibenden Oberflächenunebenheiten können bereits zur ersten Anregung des Systems beitragen, was zur Bildung von dynamischem Verschleiss führt. Daher wird empfohlen, diese Rauheit von Rad und Schiene in der ersten MKS-Simulation zu berücksichtigen, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dazu müssen die Profile in der Querrichtung und in der Umfangs- bzw. Längsrichtung unmittelbar nach dem Reprofilieren bzw. Schleifen gemessen werden.

Werden darüber hinaus die vorhandenen dynamischen Verschleissmuster noch vor dem Reprofilieren/Schleifen gemessen, so lässt sich aus diesen Messungen der zugrunde liegende Entstehungsmechanismus ableiten. Dies kann durch die Berechnung der angeregten Resonanzfrequenzen verschiedener Systemkomponenten aus den beobachteten Wellenlängen und Betriebsbedingungen, wie z. B. der Fahrzeuggeschwindigkeit, gewonnen werden. Das Verständnis des Entstehungsmechanismus ist nicht nur für die Modellierung entscheidend, sondern auch für das Verständnis der gesamten Verschleissproblematik. Daher ist dieser Aspekt von grösster Bedeutung.

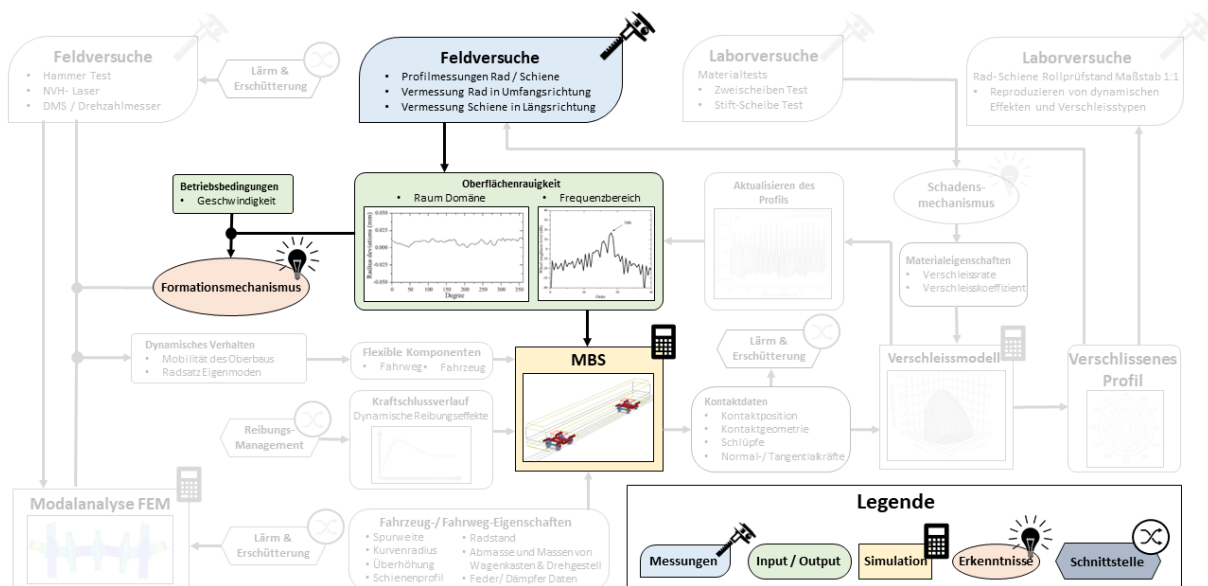


Abbildung 6: Berücksichtigung von anfänglichen Oberflächenunregelmäßigkeiten in der Mehrkörpersimulation sowie daraus die Ableitung des Entstehungsmechanismus von dynamischen Verschleissarten

### Flexible Komponenten

Bei der Simulation von dynamischem Verschleiss ist es unerlässlich, das dynamische Verhalten verschiedener Komponenten zu erfassen. Als häufigste Ursachen 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. Die Implementierung flexibler Komponenten im MKS ist in Abbildung 7 dargestellt.

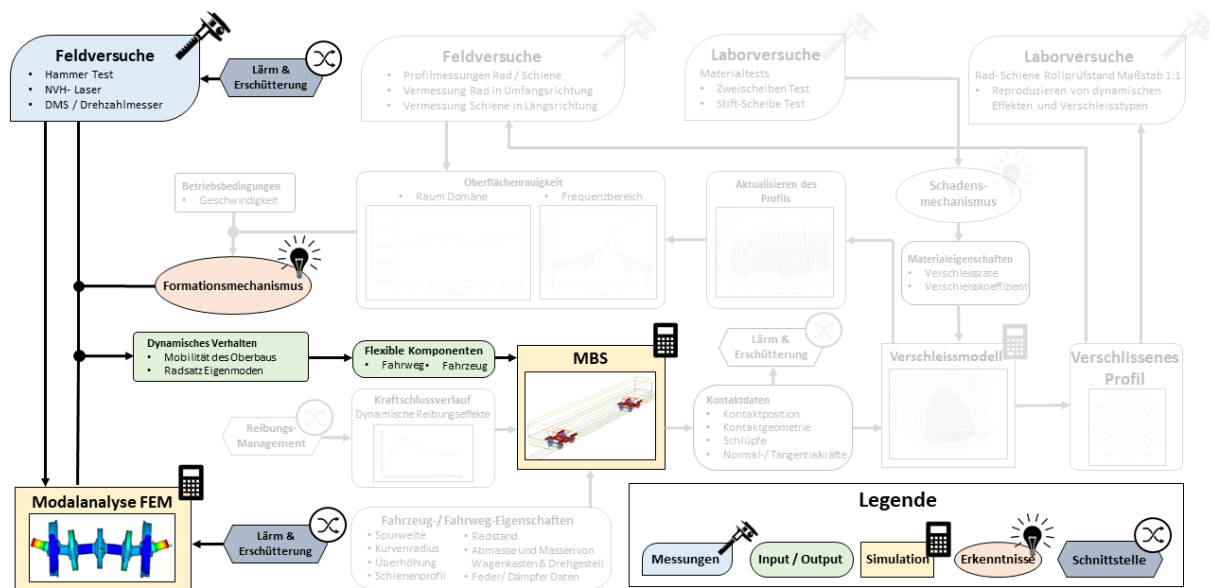


Abbildung 7: Einbeziehung flexibler Komponenten in MBS

Es gibt mehrere Möglichkeiten unterschiedlicher Komplexität, Komponenten im MKS als flexibel darzustellen. Zunächst werden die Methoden mit dem geringsten Aufwand eingesetzt. Je nach Anforderung kann die Simulation durch komplexere Methoden, wie z.B. die Modalanalyse mittels FEA, ergänzt werden. Die Kalibrierung des dynamischen Verhaltens der beiden Radsätze und des Gleises erfolgt durch Messungen an den jeweiligen Komponenten. Diese Messungen werden jedoch in einem noch zu erstellenden Lastenheft weiter ausgearbeitet.

### Merkmale der Traktion

Der an Rad und Schiene auftretende Verschleiss wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Einer dieser Faktoren ist die im Rad-Schiene-Kontakt wirkende Tangentialkraft, die wiederum vom vorhandenen Schlupf abhängt, wobei ihr Zusammenhang durch die Traktionsmerkmale bestimmt wird. Diese Eigenschaft wird im Rahmen des Reibungsmanagements (FM) untersucht und variiert in Abhängigkeit von Faktoren wie Tages- und Jahreszeit, Witterungsbedingungen, der Verwendung von FM-Produkten und vielen anderen Parametern. Für eine genaue Berechnung des Verschleisses ist es daher entscheidend, die Kontaktparameter genau zu berechnen, die wiederum von den Traktionseigenschaften abhängen. Durch die Integration des entwickelten FM-Modells in die MKS kann eine genauere Berechnung des Verschleisses erzielt werden.

### 3.4. Verschleissmodell

Das Verschleissmodell (siehe Abbildung 8) 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. In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Modellierung des Verschleisses vorgeschlagen, die jeweils auf unterschiedlichen Methoden beruhen, darunter Kontaktmechanik, statistische Analyse oder hybride Ansätze. In diesem Projekt wird der kontaktmechanische Ansatz für die anfängliche Modellierung gewählt. Auf der Grundlage des kontaktmechanischen Ansatzes können weitere Unterteilungen in verschiedene Berechnungsmethoden vorgenommen werden. Die Literatur legt jedoch nahe, dass die Auswahl der zu verwendenden Methode weniger Einfluss auf die Genauigkeit der Verschleissvorhersage hat als die Kalibrierung des oben genannten Verschleisskoeffizienten. Die Ausgabe des Verschleissmodells liefert typischerweise die Menge des abgetragenen Materials entweder als volumetrischen Verlust oder direkt als lokale Höhendifferenz am Schienenkopf oder als radiale Abnahme auf der Radoberfläche.

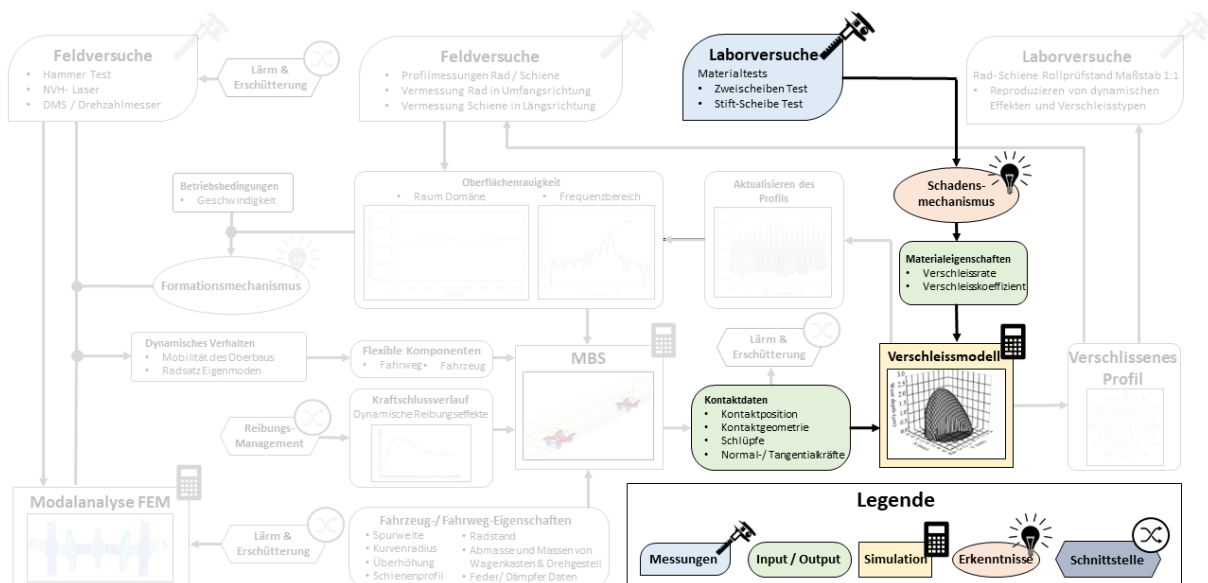


Abbildung 8: Bereitstellung von Inputs für das Verschleissmodell aus MKS und Laborversuchen

### Aktualisierung des Profils

Die vom Verschleissmodell gelieferte Menge an abgetragenem Material kann nicht als direkter Input für die anschliessende MKS-Simulation der nächsten Iterationsschleife verwendet werden. Ebenso ist ein Vergleich mit im Feld gemessenen Profilen nicht durchführbar. Um beides zu ermöglichen, muss ein Profil durch Überlagerung des Anfangsprofils des aktuellen Iterationsschrittes mit dem abgetragenen Material erzeugt werden (siehe Abbildung 9). Bei diesem Prozess der Profilerzeugung spielen in der Regel zwei Hauptfaktoren eine wichtige Rolle. Erstens ist es aufgrund des hohen Rechenaufwands nicht möglich, jeden Zugbetrieb (auf geraden Strecken oder in Bogen) über einen längeren Zeitraum zu simulieren. Daher wird davon ausgegangen, dass die Verschleissentwicklung über eine bestimmte Anzahl von gefahrenen Kilometern einem weitgehend linearen Trend folgt. Dies ermöglicht eine lineare Extrapolation des Verschleisses und erleichtert eine rechnerisch vertretbare Simulationszeit. Der zweite Faktor betrifft die Tatsache, dass das verschlissene Material an diskreten Punkten auf der Oberfläche des Rades oder der Schiene bewertet wird. Um ein glattes Profil zu erhalten, wird ein Glättungsalgorithmus angewandt, der sicherstellt, dass keine scharfen Kanten im verschlissenen Profil vorliegen. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass der Glättungsprozess keine grösseren Veränderungen des Profils bewirkt als die, die durch den berechneten Verschleiss bestimmt werden.

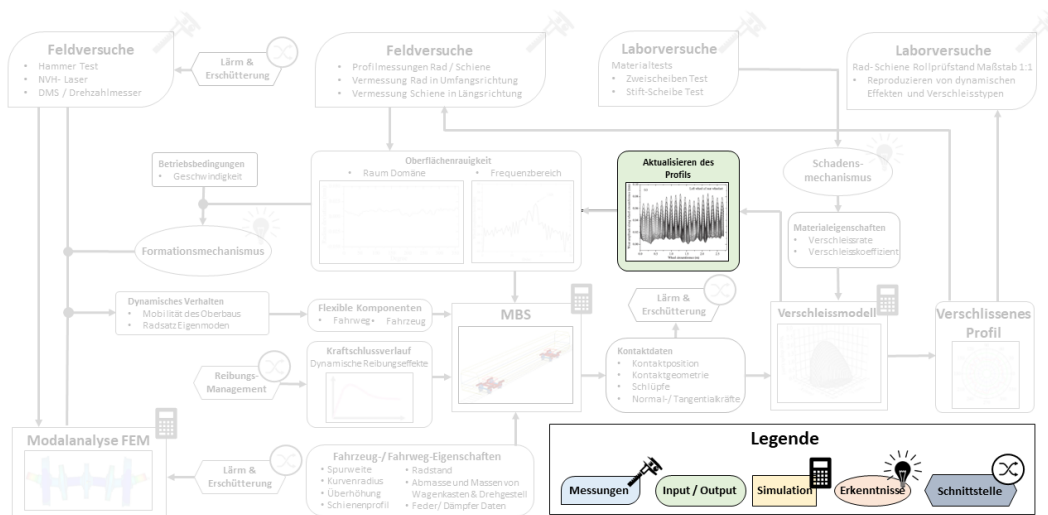


Abbildung 9: Aktualisierung des Anfangsprofils in Abhängigkeit von der Menge des abgetragenen Materials, berechnet durch das Verschleissmodell

### Verschlissenes Profil

Das aus den Ergebnissen des Verschleissmodells gewonnene Profil, das in der letzten Iterationsschleife erzeugt wird, wird nicht in weitere MKS integriert. Stattdessen stellt diese Ausgabe das Ergebnis des gesamten Verschleissmodells dar. Um das Modell zunächst zu kalibrieren und zu validieren, wird eine vergleichende Analyse zwischen diesen Ergebnissen und den im Feld gemessenen Verschleissprofilen durchgeführt. Wenn die Möglichkeit besteht, den dynamischen Verschleiss durch Versuche im Massstab 1:1 auf dem Prüfstand zu reproduzieren, können die Versuchsergebnisse auch mit der Simulation verglichen werden, um die Funktionalität des Verschleissmodells weiter zu validieren, wie in Abbildung 10 dargestellt. Sobald das Gesamtmodell validiert ist, wird es dazu verwendet, um die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen gegen die Entwicklung des Verschleisses zu bewerten.

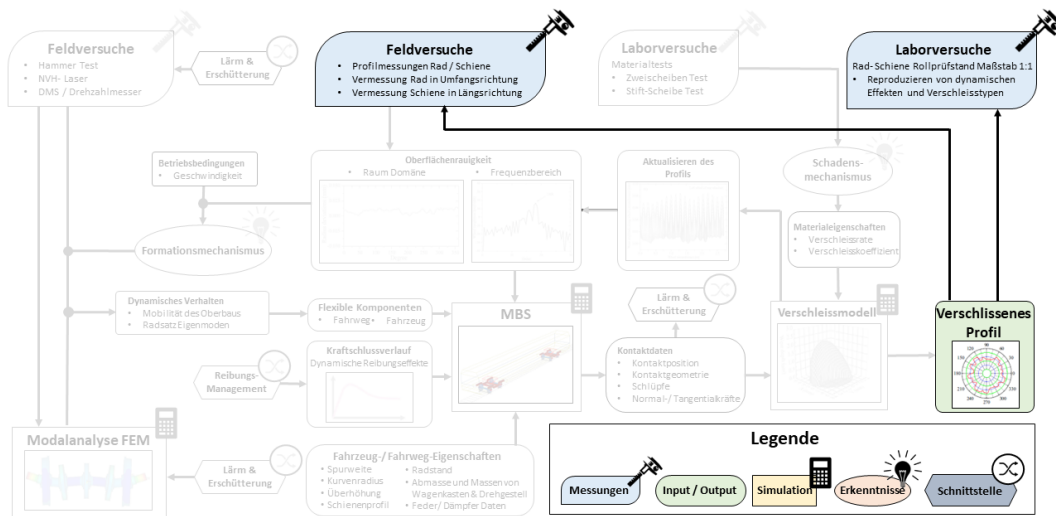


Abbildung 10: Vergleich des Verschleißprofils mit Feldversuchen und Versuchen auf dem Prüfstand zur Kalibrierung bzw. Validierung des Modells



## 4. Modellkonzept: Lärm

### 4.1. Zusammenfassung

Um die Entwicklung des Kurvenkreischens in Eisenbahnsystemen zu vermindern oder möglicherweise zu beseitigen, können einige bekannte Gegenmassnahmen ergriffen werden. Um deren Wirksamkeit im speziellen Anwendungsfall der Meterspurbahnen zu bewerten, wird ein Simulationsmodell entwickelt. Der konzeptionelle Rahmen basiert auf dem neuesten Stand der Technik und stützt sich auf die neuesten technologischen Fortschritte und die besten Praktiken der Industrie.

In diesem Kapitel werden die Teilmodelle und die erforderlichen Messkampagnen beschrieben, die zusammen das gesamte Modellierungskonzept für das Thema Kurvenkreischen bilden. Darüber hinaus ist es unerlässlich, alle Schnittstellen zu den anderen Projektthemen, nämlich Reibungsmanagement und Verschleiss, zu berücksichtigen, um ein umfassendes Verständnis der Problemstellung zu erreichen.

Im Folgenden wird ein allgemeiner Überblick über die Schnittstellen zwischen den Modellierungs- und Versuchskonzepten zum Kurvenkreischen gegeben, sowie die Überschneidungen zu den Themenbereichen Lärm & Erschütterung und Verschleiss (siehe Abbildung 11) aufgezeigt.

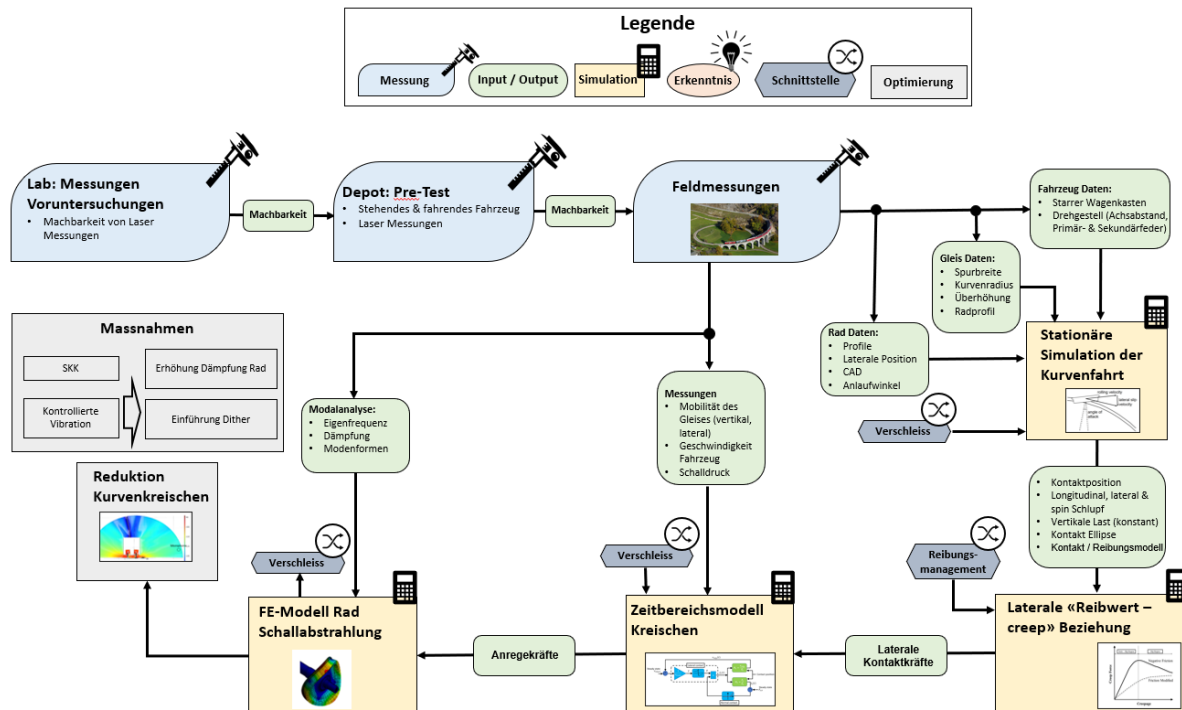


Abbildung 11: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept

Es werden Massnahmen zur Verringerung des Kurvenkreischens festgelegt. Dabei handelt es sich um die Anwendung von Reibungsmodifikatoren oder Massnahmen zur Erhöhung der Dämpfung des Rades oder die Verwendung eines Mechanismus namens "Dither".

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.

Die Beziehung zwischen dem lateralen Reibungskoeffizienten und dem Schlupfverhalten wird auf der Grundlage von Messungen im Labor und im Feld ermittelt. Die negative Steigung der Kurve (siehe Abbildung 12) wird nach dem Stand der Technik häufig als Hauptgrund für das Kurvenkreischen genannt. Bisher sind die aus Laborversuchen verfügbaren Reibungsmessungen in der Regel quasi-statisch. Das dynamische Verhalten bei kleinen Amplituden und hohen Frequenzen kann sich von diesem messbaren quasi-statischen Verhalten deutlich unterscheiden und sogar überhaupt keine negative Steigung aufweisen. Dies muss vor allem in der Praxis im Bereich der Meterspurbahnen überprüft werden.

Auf der Grundlage von dynamischen Mehrkörper-Simulationen (MKS) eines Fahrzeugs, das einen wohldefinierten 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 das für das Thema Verschleiss verwendete.

Es sind Feldmessungen geplant, um die erforderlichen Daten für die Modelle zu ermitteln. Dies ist ein grundlegender Schritt, um die Modelle zu kalibrieren und zu validieren und um zu prüfen, ob die Annahmen der Normalspur auch für die Meterspur gelten. Unter anderem sind Lasermessungen an Rad und Schiene zur lateralen Position notwendig.

Im Depot eines Betreibers werden Vorversuche durchgeführt, um die Durchführbarkeit von Lasermessungen direkt an einem Fahrzeug zu prüfen.

Weitere Vorversuche werden im Labor vor den Tests im Depot durchgeführt, um die Machbarkeit und die Randbedingungen von Lasermessungen an einem rotierenden Objekt zu prüfen, das ein ähnliches Schwingungsverhalten wie ein Rad eines Meterspurfahrzeugs aufweist.

Weitere Details zu den einzelnen Blöcken der Übersicht finden sich im nachfolgenden Kapitel dieses Dokuments.

## 4.2. Detailkonzepte

Die folgenden Detailbeschreibungen beziehen sich auf die Abbildung 11.

### Labor: Vorversuche

Im Labor von ViF wird eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, inwieweit Schwingungsmessungen am bewegten Rad mit Lasermesstechnik realisiert werden können. Dabei geht es darum, die Rahmenbedingungen für eine korrekte Messung während der Rotation des Rades zu ermitteln und die konkret einzusetzenden Messgeräte zu bestimmen. Die Messkampagne wird vollständig vom ViF durchgeführt.

### Unterhaltsanlage: Vorversuche

Anschließend werden in "Unterhaltsanlage - Vorversuche" die Laser an einem entsprechenden Fahrzeug im Depot montiert und letzte Voruntersuchungen durchgeführt. Zunächst werden Messungen am stehenden Fahrzeug durchgeführt, dann wird das Fahrzeug in einem Bereich in der Nähe des Depots kurz durch einen Bogen im Gleisfeld gefahren, um das entstehende Rauschen und das Rauschverhältnis der Laser zu ermitteln. Wird dieser Versuch positiv bestätigt, kann die Messkampagne "Feldversuche trocken" freigegeben werden.

## Feldversuche

Bei den "Feldversuchen" wird eine mehrtägige Messkampagne (etwa 3-4 Tage) im MGB-Netz durchgeführt. Ziel ist es, Daten für phänomenologisch-physikalische Untersuchungen der Auswirkungen von Kurvenkreischen und Schlupfwellenbildung, sowie Daten für die Modellkalibrierung und -validierung zu erhalten. Dazu wird unter anderem ein Fahrzeug mit Lasern und Beschleunigungssensoren ausgestattet und 2-3 Bögen mit Beschleunigungssensoren instrumentiert. Die Messkampagne ist somit der Kern der Modellerstellung und eines tieferen Verständnisses der Ursachen von dynamischem Verschleiss und Kurvenkreischen.

Die gemessenen Daten werden wie folgt dargestellt:

### Dynamische Messungen:

- Geschwindigkeit Fahrzeug
- Schalldruck
- Drehzahl der Räder
- Gleismobilitäten (vertikal, lateral)

### Gleisdaten:

- Spurweite
- Bogenradius
- Überhöhung
- Schienenprofile

### Raddaten:

- Profile
- Seitliche Position auf der Schiene
- CAD
- Anstellwinkel

### Fahrzeugdaten:

- Starrer Wagenkasten
- Drehgestell mit starrem Aufbau (Radstand, Primär- und Sekundäraufhängung)

Die Messkampagne ist so geplant, dass die Daten auch für das Thema "Verschleiss", insbesondere für die Modellierung von Schlupfwellen, verwendet werden können. Eine genauere Beschreibung der Messkampagne wird in einer separaten Spezifikation beschrieben.

## Simulation des stationären Bogenlaufs

Die stationäre Interaktion von Fahrzeugen in Bögen wird auf der Grundlage der Mehrkörperdynamik simuliert. Es wird das gleiche Modell wie beim Thema "Verschleiss" verwendet und auf der Grundlage von Daten aus der Messkampagne "Feldmessungen" erstellt. Im stationären Bereich der Bögen werden die folgenden Daten ermittelt:

- Kontaktposition von Rad und Schiene
- Längs-, Quer- & Spin-Schlupf
- Vertikale Belastung (konstant)
- Kontakt-Ellipse

Diese Daten werden dann in den aufgeführten Modellen verwendet.

## Laterale Beziehung "Reibungskoeffizient - Schlupf"

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

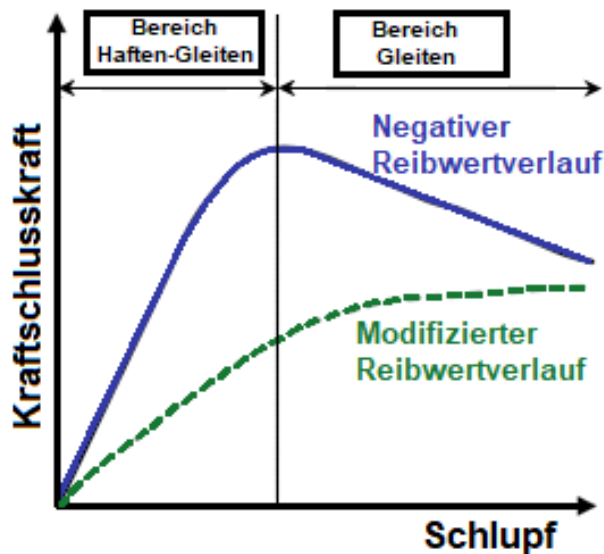


Abbildung 12: Kraftschlusskräfte für positive und negative Steigung<sup>1</sup>

Beim Kurvenkreischen interessieren wir uns hauptsächlich für den lateralen Schlupf, der durch den Anlaufwinkel des Rades während der Bogenfahrt verursacht wird, wie die folgende Abbildung 13 zeigt. Je grösser der Anlaufwinkel ist, desto grösser ist der Schlupf.

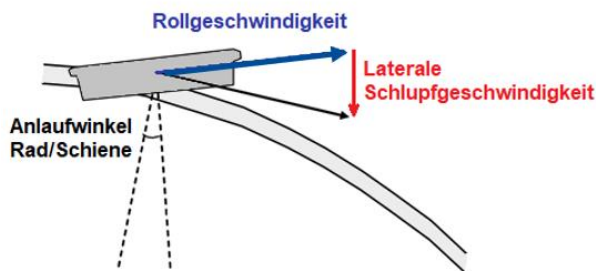


Abbildung 13: Geschwindigkeiten und Anlaufwinkel<sup>2</sup>

Es ist wichtig zu beachten, dass die Quer- und Längsschlupfkräfte nicht unabhängig voneinander sind. In einem Bogen dreht sich das innere Rad zu schnell, während sich das äussere Rad zu langsam dreht, der seitliche Schlupf geht immer mit dem Längsschlupf einher. Um diese Aspekte in den Modellen für den Bedarf des Messgeräts zu berücksichtigen, sind Messungen im Labor und im Feld erforderlich. Diese Messungen werden in einer separaten Spezifikation beschrieben.

Messungen aus dem Bereich "Reibungsmanagement" werden verwendet, um die Wirkung von Reibungsmodifikatoren (Konditioniermittel) auf das Kurvenkreischen zu berücksichtigen.

### Zustandsraummodell im Zeitbereich

Es wird ein Zeitbereichs-Kreisch-Modell erstellt, das für die Anwendungen in der Meterspur ausreichend repräsentativ ist. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells sollten daher

<sup>1</sup> Kim, J. C., Yun, Y. S., & Noh, H. M. (2019). Analysis of wheel squeal and flanging on curved railway tracks. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20, 2077-2087.

<sup>2</sup> Thompson, D. J., Squicciarini, G., Ding, B., & Baeza, L. (2018). A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 3-41

---

ausreichend experimentelle Daten zur Verfügung stehen. Selbst wenn diese Daten nur einen einzigen Oberflächenzustand repräsentieren, sind sie dennoch repräsentativ. Der wichtigste Teil der Datenerfassung ist mit der Rekonstruktion einer physikalisch korrekten Kraftschlusskurve verbunden.

Die Anregungskräfte werden mit Hilfe eines Zeitbereichs-Zustandsraummodells berechnet, das die Beziehung zwischen dem lateralen Reibungskoeffizienten und dem Schlupf enthält und die Berechnung der Stick-Slip-Anregung in einer Rückkopplungsschleife ermöglicht.

### **FE-Modell für die Radabstrahlung**

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. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Dämpfung im Modell. Um diese Dämpfung korrekt messen zu können, muss die Messumgebung für "Feldversuche" möglichst ruhig sein.

Die Schwingungen des Rades führen dann zu einer Schallabstrahlung. Zur Bewertung des Kurvenkreischens können eine Berechnung der Schalleistung oder definierte Referenzpunkte in grösserem Abstand zum Objekt herangezogen werden. Gegebenenfalls kann auch hier ein BEM-ähnlicher Ansatz (Boundary Element Method) verwendet werden, der die Effizienz der Berechnung erhöht.

Darüber hinaus wird dieses FE-Modell des Radsatzes auch im Rahmen des Themas "Verschleiss" zur Modellierung von Schlupfwellenbildung eingesetzt.

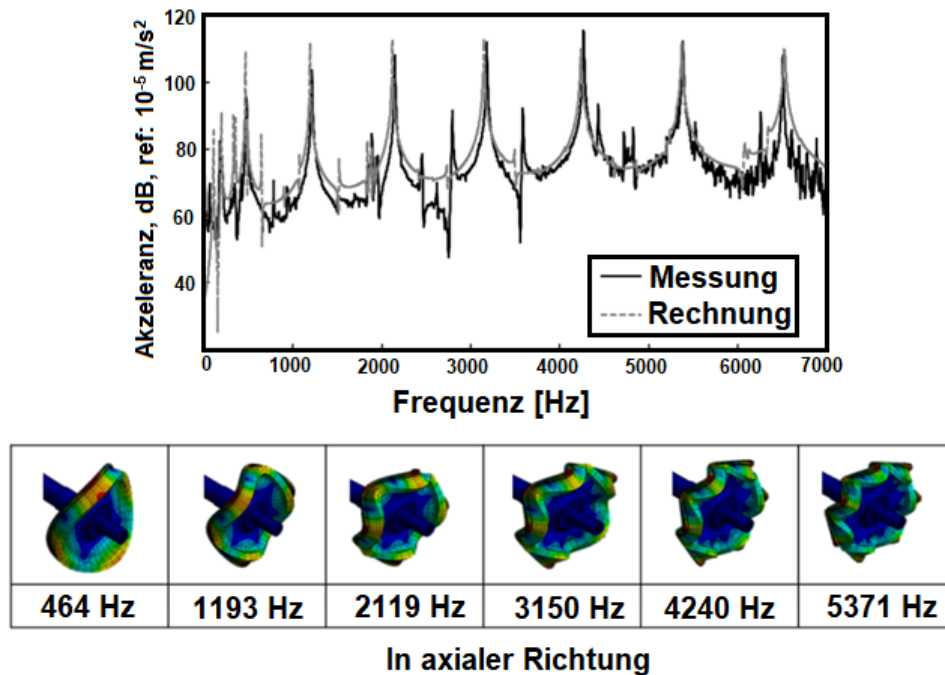


Abbildung 14: Axiale Modi eines Rades<sup>3</sup>

### 4.3. Reduktion von Kurvenkreisch-Geräuschen

Für die Meterspur sind Massnahmen zur Reduzierung des Kurvenkreischens bekannt. Einige dieser Massnahmen werden für den Einsatz in der Meterspur bewertet. Diese Massnahmen werden im folgenden Kapitel beschrieben.

#### Reibungsmodifikator (Konditionierung der Schiene)

Das Hauptaugenmerk bei der Minderung des Kurvenkreischens liegt auf der Reduzierung des Stick-Slip-Effekts durch den Einsatz von Reibungsmodifikatoren. Bei diesem Ansatz wird auch der Effekt der "Modenkopplung" berücksichtigt, da diese Modenkopplung Kurvenkreischen verursachen kann, obwohl die Reibungskurve insgesamt eine positive Steigung aufweist. Viele in Laborversuchen getestete und optimierte Reibungsmodifikatoren führen im Feld zu gemischten Ergebnissen (örtliche Strecken-, Fahrzeug- und Witterungsbedingungen, Oberflächenverschmutzung beeinflussen das Kreischen stark) und müssen ständig neu aufgetragen werden.

#### Dämpfung des Rades erhöhen

Durch abgestimmte Rad-Absorber, Dämpfungsbeschichtungen an der Radscheibe oder Ringdämpfern kann die Schallabstrahlung durch richtige Auslegung ebenfalls massiv reduziert werden.

<sup>3</sup> Kim, J. C., Yun, Y. S., & Noh, H. M. (2019). Analysis of wheel squeal and flanging on curved railway tracks. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 20, 2077-2087.

## Dither

Anwendung der Ditherkraft zur "Störung" des Kreisch Phänomens.

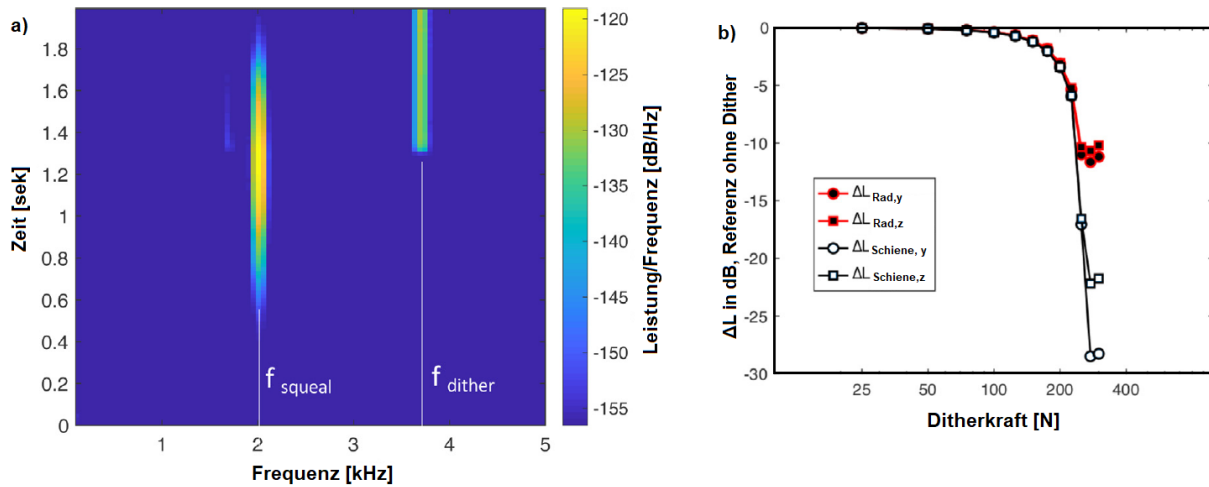


Abbildung 15: (a) Spektrogramm der seitlichen Radverschiebung mit 300 N, beginnend bei 1,3 s. (b) Verringerung der seitlichen und vertikalen Verschiebungswerte an der Kontaktposition von Rad und Schiene als Funktion der Amplitude der Ditherkraft. Die Ditherkraft beginnt immer bei 1,3 s. Die Verringerung wird durch Auswertung des Effektivwerts zwischen 1,8 und 2 Sekunden für den Fall mit Dither und den Fall ohne Dither berechnet.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Kropp, W., Theyssen, J., & Pieringer, A. (2021). The application of dither to mitigate curve squeal. *Journal of Sound and Vibration*, 514, 116433.



## 5. Modellkonzept: Reibungsmanagement

Dieses Kapitel soll einen Überblick über das vorgeschlagene Modellkonzept für das Reibungsmanagement geben. Die Grundlage dieses Modells ist das FRA-Modell (FRA: Federal Railroad Administration, U.S. Department of Administration), das von der Virtual Vehicle Research GmbH für ein früheres FRA-Projekt entwickelt wurde. Durch die Nutzung dieses etablierten Modells profitiert der in diesem Kapitel beschriebene Ansatz für das Reibungsmanagement von der Expertise und dem Wissen, das durch umfangreiche Forschung und Entwicklung gewonnen wurde.

Es ist erwähnenswert, dass die Ergebnisse aus dem Reibungsmanagement-Thema über den unmittelbaren Fokus hinaus weitergehende Auswirkungen haben werden. Insbesondere werden diese Ergebnisse auch in den Bereichen "Verschleiss" und "Lärm und Erschütterungen" genutzt, um eine synergetische Beziehung zwischen diesen drei miteinander verbundenen Themen zu gewährleisten. Durch die Integration der Erkenntnisse aus dem Reibungsmanagement mit Verschleiss- sowie Lärm- und Schwingungsanalysen kann ein umfassendes Verständnis der Systemdynamik erreicht werden, was zu einer verbesserten Leistung, Zuverlässigkeit und Sicherheit im Eisenbahnbetrieb führt.

Insgesamt unterstreicht die Anwendung des FRA-Modells für das Reibungsmanagement und seine Integration mit verwandten Themen die Bedeutung eines ganzheitlichen Ansatzes bei der Bewältigung der Herausforderungen und der Optimierung der Leistung von Meterspurbahnsystemen.

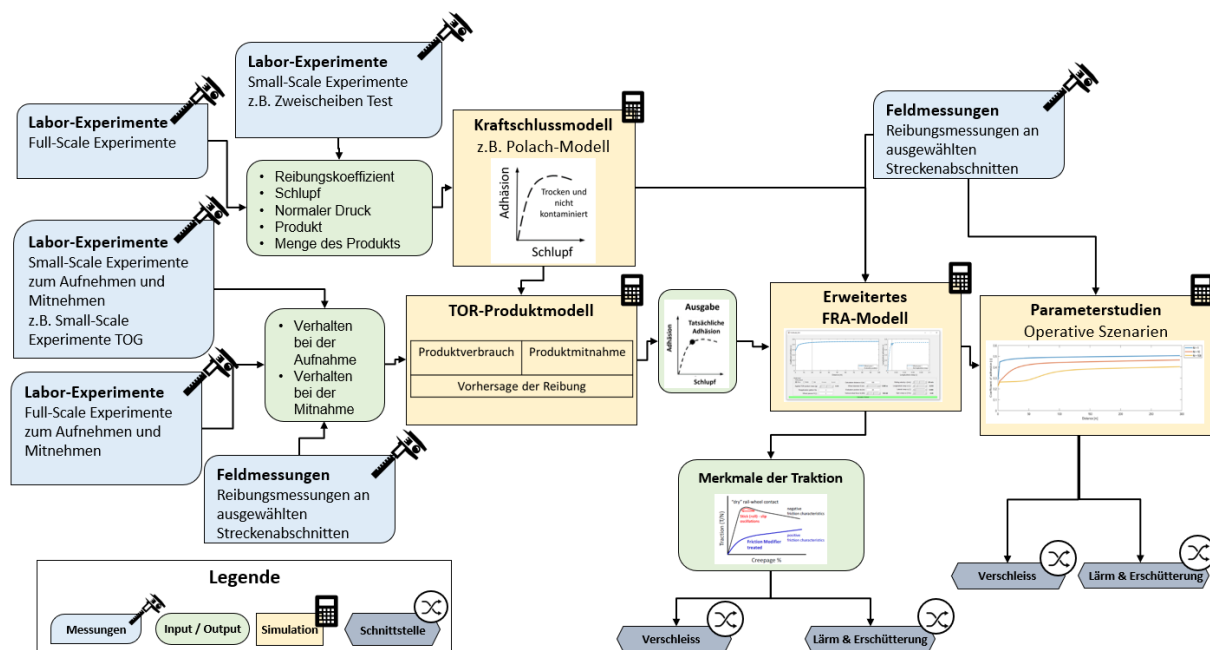


Abbildung 16: Überblick über das Thema Reibungsmanagement in diesem Projekt. Eine grössere Version dieser Abbildung befindet sich auf Seite 70 der Präsentation 20230424-25\_1.Technical Meeting\_F2F Zürich.pdf.

## 5.1. Modell-Konzept

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. Diese Bedingungen umfassen sowohl nicht kontaminierte Szenarien, bei denen die Oberflächen trocken und sauber sind, als auch Situationen, in denen Reibungsmodifikatoren auf die Schiene aufgebracht werden. Diese stationären Kraftschluss-Schlupf-Kurven berücksichtigen jedoch nicht die vorübergehenden zeitlichen und räumlichen Effekte, die mit dem Produktverbrauch und der Produktmitnahme verbunden sind.

Um die Auswirkungen des Produkts zu berücksichtigen, enthält das Modell zwei Schlüsselkomponenten: das Modell des Produktverbrauchs auf dem Schienenkopf (Schienenkopf im englischen als TOR = Top Of Rail bezeichnet) und das Modell der Produktmitnahme auf dem Schienenkopf. Das Produktverbrauchsmodell konzentriert sich auf das Verständnis des Abbaus oder der Entfernung des Produkts, wenn die Anzahl der Radüberfahrten über die Schiene zunimmt. Das TOR-Produktmitnahmemodell hingegen untersucht den Prozess der Aufnahme des TOR-Produkts von der Schiene durch das Rad und seine anschließende Abtragung entlang des Gleises. Dieses Modell berücksichtigt die Auftragung und Verteilung von TOR-Produkten.

Durch die Integration des Kraftschlusskraft-Modells mit dem TOR-Produktverbrauchs- und dem TOR-Produktmitnahmemodell bietet das umfassende TOR-Produktmodell einen ganzheitlichen Ansatz. Es nutzt die aus dem Kraftschlusskraft-Modell gewonnenen stationären Kraftschlusskraft-Kurven als Basis und passt sie entsprechend an, basierend auf Faktoren wie der Anzahl der Radüberfahrten und dem Abstand zum Bereich der TOR-Produktapplikation. Dieser Anpassungsprozess liefert wichtige Ergebnisse, die wertvolle Reibungs- und Adhäsionswerte liefern. Diese Werte werden nicht nur von den inhärenten Eigenschaften der Schiene beeinflusst, sondern zeigen auch Variationen an verschiedenen Positionen entlang des Gleises auf, was detaillierte Einblicke ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Integration des Kraftschlusskraft-Modells, des TOR-Produktverbrauchsmodells und des TOR-Produktmitnahmemodells ein umfassendes Verständnis der Kraftschlusseigenschaften ermöglicht. Durch die Berücksichtigung des TOR-Produktverbrauchs und der Mitnahmeeffekte erzeugt das Modell wertvolle Ergebnisse, die zeitliche und räumliche Variationen berücksichtigen und das Wissen über Reibung und Kraftschluss entlang der Strecke verbessern.

## 5.2. Kraftschlusskraft-Modell

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. Der Kraftschlusskoeffizient ist das Verhältnis zwischen der resultierenden tangentialen Kontaktkraft und der normalen Kontaktkraft beim rollenden Kontakt. Das Modell von Polach, das für seine Effektivität bekannt ist, hat bei Mehrkörpersimulationen von Schienenfahrzeugen weite Verbreitung gefunden.

Das Modell von Polach bietet einen umfassenden Rahmen für das Verständnis der komplizierten Kräfte, die beim rollenden Kontakt wirken. Durch die Berücksichtigung der verschiedenen Schlupfarten, wie Längsschlupf (Bewegung entlang der Fahrtrichtung), Querschlupf (seitliche Bewegung) und Bohrschlupf (Rotation), erfasst das Modell die komplexe Interaktion zwischen den sich berührenden Oberflächen. Diese Oberflächen sind im vorstehenden Zusammenhang diejenigen von Schiene und Rad.

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. Aufgrund seiner Robustheit und Zuverlässigkeit ist das Polach-Kraftschlusskraft-Modell zur ersten Wahl geworden, wenn es darum geht, realistische Kraftschlusskräfte in Mehrkörpersimulationen einzubeziehen, und bietet Forschern und Ingenieuren ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verbesserung des Verständnisses und der Leistung von Eisenbahnsystemen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das Polach-Kraftschlusskraftmodell in der Eisenbahndynamik, welches die Relativbewegung von Oberflächen mit dem Kraftschlusskoeffizienten verknüpft, als einflussreiche Rahmenbedingung erwiesen hat. Seine Integration in Mehrkörpersimulationen bietet wertvolle Einblicke in die komplexe Dynamik des rollenden Kontaktes. Durch die genaue Erfassung der Auswirkungen des Schlupfes und die Quantifizierung des Kraftschlusskoeffizienten ermöglicht dieses Modell Forschern und Ingenieuren ein tieferes Verständnis des Verhaltens von Schienenfahrzeugen und fundierte Entscheidungen zur Optimierung der Systemleistung.

### 5.3. TOR-Produktmodell

Im Zusammenhang mit dem Reibungsmanagement umfasst der Begriff "Produktverbrauch" die Verringerung der Produktmenge, die den Reibungskoeffizienten innerhalb der Kontaktfläche beeinflusst. Diese Verringerung, die im Modell als Produktmassenabnahme pro Zyklus ( $dm/dN$ ) quantifiziert wird, berücksichtigt sowohl den Abbau des Produkts als auch das Aufbringen des Produkts an der Kontaktfläche. Dieser kombinierte Effekt erklärt die dynamische Natur des Produktverhaltens während wiederholter Betriebszyklen.

Unter Produktzersetzung versteht man die allmähliche Verschlechterung oder den Abbau des Reibungsmodifikators oder Konditioniermittels im Laufe der Zeit. Da das Produkt im Kontaktbereich mechanischen Belastungen und thermischen Einflüssen ausgesetzt ist, können sich seine Eigenschaften ändern, wodurch seine Wirksamkeit abnimmt. Dieser Abbauprozess wird bis zu einem gewissen Grad bei der Bewertung des Produktverbrauchs durch das Modell berücksichtigt, so dass die mit jedem Zyklus abnehmende Wirksamkeit des Produkts abgeschätzt werden kann.

Das Herausdrücken des Produkts bezieht sich auf die Verschiebung oder das Herausdrücken des Produkts aus dem Kontaktbereich aufgrund der einwirkenden Kräfte und Oberflächenwechselwirkungen. Da die Schnittstelle zwischen Rad und Schiene Druck und Bewegung ausgesetzt ist, kann das Produkt aus der Kontaktzone herausgedrückt werden, was zu einem Produktverlust und potenziellen Änderungen des Reibungskoeffizienten führt. Durch die Berücksichtigung dieses Phänomens innerhalb des Modells können die Auswirkungen der Produktverdrängung auf den Gesamtproduktverbrauch angemessen berücksichtigt werden.

Das Konzept des Produktverbrauchs im Reibungsmanagementmodell erfasst das komplizierte Zusammenspiel zwischen Produktabbau und Hinausdrängen aus der Kontaktzone. Durch die Quantifizierung der Massenabnahme pro Zyklus ermöglicht das Modell ein umfassendes Verständnis dafür, wie die Verringerung der Produktmenge den Reibungskoeffizienten in der Kontaktfläche beeinträchtigt. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Optimierung von Reibungsmanagementstrategien und die Aufrechterhaltung einer optimalen Leistung und Sicherheit in Eisenbahnsystemen. Die Ausbreitung und der Verbrauch des Produkts sind in der nachstehenden Abbildung 17 zu sehen.

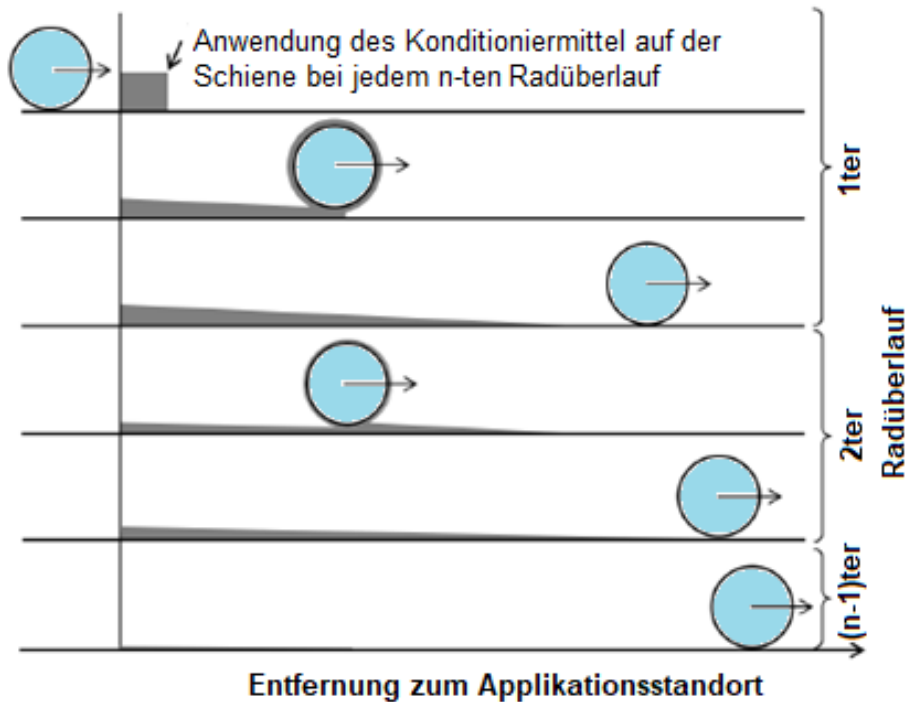


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Ausbringung von TOR-Produkten entlang des Gleises. Die Produkte werden entlang der Schiene verteilt und von den vorbeifahrenden Rädern verbraucht. Die Produkthöhen (in grau) sind übertrieben dargestellt. (Mit freundlicher Genehmigung von Trummer et al. 2021).

Wenn sich die Oberflächen von Rad und Schiene an der Hinterkante des Kontakts trennen, bleibt ein Teil des Produkts am Rad haften, während der Rest auf der Schienenoberfläche verbleibt. Die Umverteilung des Produkts zwischen diesen Oberflächen spielt eine wichtige Rolle bei der Weiterbeförderung des Produktes im nicht aktiv konditionierten Bereich des Gleises. Konkret wird nur das Produkt, das sich auf der Radoberfläche befindet, entlang der Schiene weitertransportiert und tritt schliesslich nach einer Umdrehung wieder in die Kontaktfläche ein.

Bei einem einmaligen Kontakt wird davon ausgegangen, dass nur ein Teil des Produkts von der Oberfläche mit der höheren Konzentration auf die in der Fahrtrichtung darauffolgende Oberfläche übertragen wird. Bei wiederholtem Kontakt wird davon ausgegangen, dass sich die Produktmenge über eine Reihe von Kontaktzyklen allmählich gleichmässig auf die Rad- und Schienenoberflächen verteilt, unabhängig von den anfänglich auf jede Oberfläche aufgetragenen Mengen.

Dieses Phänomen deutet darauf hin, dass sich die Produktverteilung bei fortgesetzter Interaktion zwischen Rad und Schiene einem Gleichgewichtszustand annähert. Mit jedem weiteren Kontaktzyklus wird ein Teil des überschüssigen Produkts von der Oberfläche mit der höheren Konzentration auf die Oberfläche mit der niedrigeren Konzentration übertragen. Diese allmähliche Angleichung der Produktverteilung wird durch die am Kontaktprozess beteiligten Wechselwirkungen, Kräfte und Dynamiken beeinflusst.

Das Verständnis der Dynamik der Produktumverteilung ist für die genaue Modellierung des Produktmitnahmeeffekts von wesentlicher Bedeutung. Durch die Berücksichtigung des allmählichen Ausgleichs der Produktmengen zwischen den Rad- und Schienenoberflächen kann das Modell Einblicke in das langfristige Verhalten und die Leistung des Reibungsmanagementsystems geben. Dieses Wissen kann die Entwicklung effektiver Strategien zur Optimierung der Produkthanwendung und -verteilung anleiten, was zu einem verbesserten Reibungsmanagement und einer höheren Gesamtleistung des Eisenbahnsystems führt.

### 5.4. Erweitertes FRA-Modell

Das bestehende FRA-Modell enthält bestimmte Elemente des Meterspur-Projektes und muss parametrisiert werden, damit es mit dem Messsystem in der Schweiz übereinstimmt. Für eine umfassendere Analyse, die die Auswirkungen des Klimas, wie Feuchtigkeit, Temperatur und Taubildung, einbezieht, müssen jedoch zusätzliche Funktionen in ein erweitertes FRA-Modell integriert werden.

Das Hauptziel des erweiterten FRA-Modells besteht darin, das Verständnis der Reibungs- und Kraftschlussdynamik durch Einbezug dieser zusätzlichen Variablen zu verbessern. Durch die Berücksichtigung des Einflusses der Umgebungsbedingungen auf die Rad-Schiene-Schnittstelle wird das erweiterte FRA-Modell eine genauere Bewertung des Reibungsmanagements unter realen Betriebsbedingungen ermöglichen. Variablen wie Feuchtigkeitsschwankungen, Temperaturschwankungen und das Vorhandensein von Tau auf den Oberflächen können die Leistung des Systems und die Hafteigenschaften erheblich beeinflussen.

Die folgende Abbildung 18 veranschaulicht die derzeitige grafische Benutzeroberfläche des FRA-Modells und zeigt eine Beispielsimulation, die mit dem bestehenden Modell erstellt wurde. Während das aktuelle Modell als wertvoller Ausgangspunkt dient, wird das erweiterte FRA-Modell auf dieser Grundlage aufbauen, indem die relevanten Klimaparameter integriert werden. Diese Integration wird umfassendere Simulationen ermöglichen und ein tieferes Verständnis der komplizierten Wechselwirkungen zwischen dem Eisenbahnsystem und seiner Umgebung vermitteln.

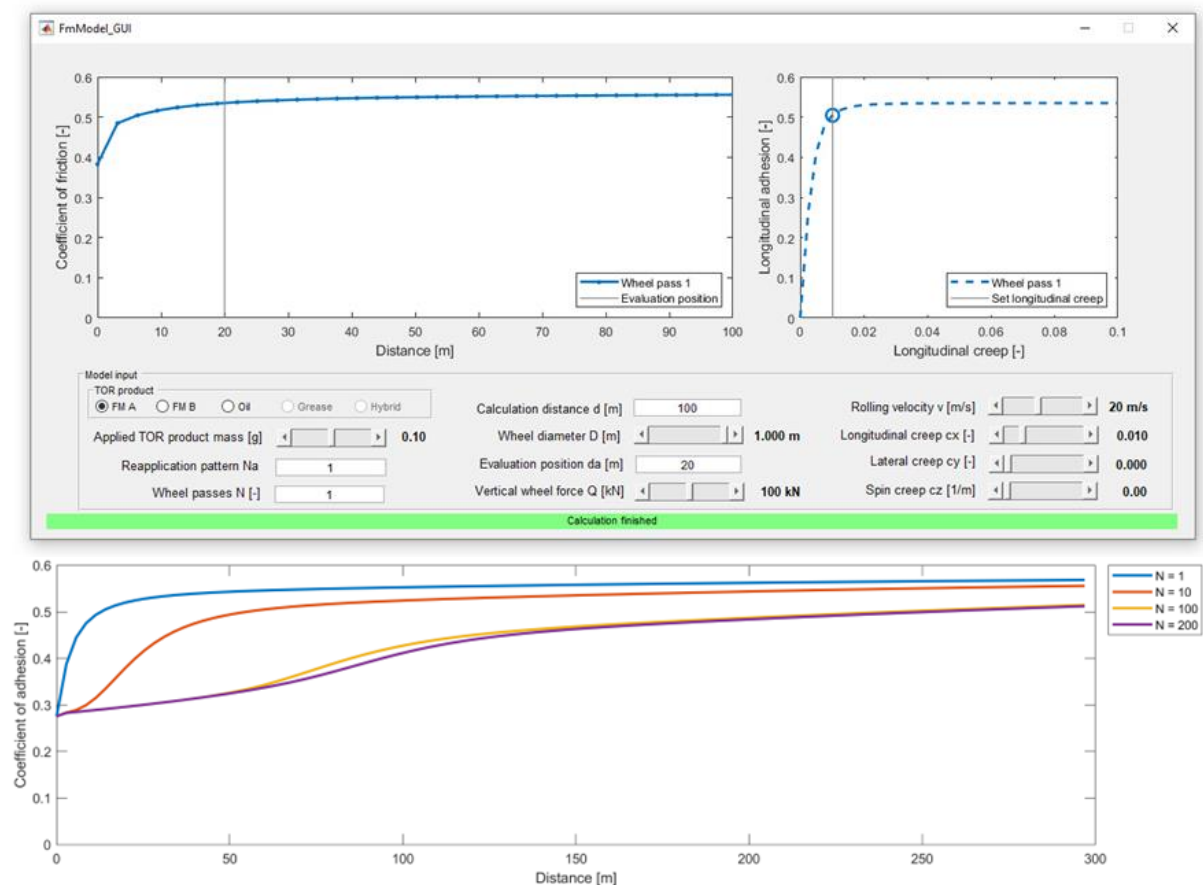


Abbildung 18: Die grafische Benutzeroberfläche des aktuellen FRA-Modells zusammen mit einer Beispielsimulation aus diesem Modell.

---

Die Entwicklung des erweiterten FRA-Modells zielt darauf ab, ein leistungsfähiges Werkzeug bereitzustellen, das potenziell klimatische Einflüsse berücksichtigt und damit genauere Vorhersagen und eine bessere Entscheidungsfindung in Bezug auf Reibungsmanagementstrategien ermöglicht. Darüber hinaus können die Ergebnisse dieses erweiterten FRA-Modells auch für die Bereiche "Verschleiss" und "Lärm und Erschütterungen" genutzt werden, wodurch ein synergetischer Ansatz zwischen diesen miteinander verbundenen Themen gefördert wird. Durch die Berücksichtigung dieser Auswirkungen auf das Reibungsmanagement könnte das erweiterte FRA-Modell dazu beitragen, den Eisenbahnbetrieb zu optimieren, den Verschleiss zu mindern und die Lärm- und Erschütterungspegel zu minimieren.

---

## 6. Erforderliche Daten, geplante Prüfstands- und Feldversuche

Die Messungen werden durchgeführt, um Simulationsmodelle für Verschleiss, Kurvenkreischen und Reibungsmanagement am ViF zu entwickeln, zu kalibrieren und zu validieren. Darüber hinaus werden im Rahmen der Messkampagne Messdaten erhoben, um den Effekt des "Spurkranzanlaufs" besser zu verstehen und zukünftige Modelle auf Basis phänomenologischer Untersuchungen erstellen zu können.

Synergien zwischen den Themen "dynamischer Verschleiss", "Lärm" und "Reibungsmanagement" werden so weit wie möglich genutzt, indem Messkampagnen so dimensioniert werden, dass die gewonnenen Daten für mehrere Themen genutzt werden können.

Die folgende Abbildung 19 zeigt eine Übersicht über alle geplanten Messkampagnen und deren Zusammenspiel mit der Simulation und Optimierung. Details zu den einzelnen Messkampagnen können bei Interesse dem Spezifikationsdokument (Arbeitsdokument) entnommen werden.



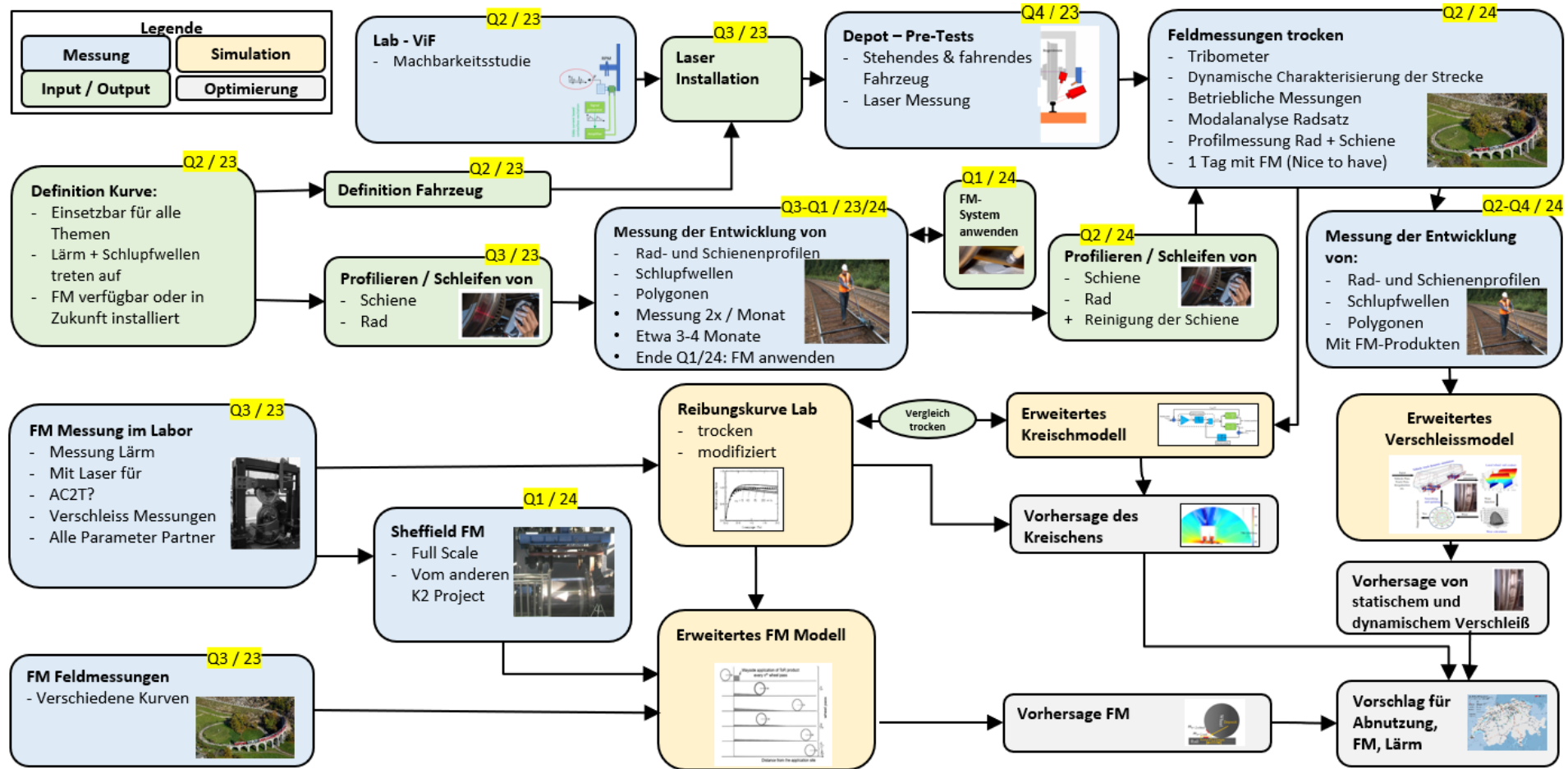


Abbildung 19: Alle Messkampagnen im Überblick

Ein grober Zeitplan wird in Form von Quartalen und Jahr (z.B. Q1 / 2023) angegeben. Zum einen müssen einzelne Messkampagnen zu bestimmten Zeiten im Jahr durchgeführt werden, um eine stabile Witterung und das häufige Auftreten von z.B. Kurvenkreischen zu gewährleisten (z.B. "Feldmessungen trocken"). Andererseits müssen für diese Messkampagne z.B. Vorarbeiten/Untersuchungen durchgeführt werden, um die Erfolgsaussichten zu maximieren. Ausserdem müssen die Messdaten zu bestimmten Zeitpunkten zur Verfügung stehen, damit auch im Bereich der Modellierung Fortschritte erzielt werden. Daraus ergeben sich die hier dargestellten zeitlichen Abläufe und Abhängigkeiten.

Im Zuge der "Definition der Bögen" werden im Netz der MGB-Bögen gesucht, die für Messungen des dynamischen Verschleisses, des Lärms und des Reibungsmanagements geeignet sind. Dabei ist zu beachten, dass in diesen Bögen derzeit kein Reibungsmanagement ausgeführt wird, dieses aber für später geplant ist.

Sobald die Bögen definiert sind, können die Fahrzeuge, die auf den entsprechenden Strecken fahren, innerhalb der Fahrzeugdefinition festgelegt werden. Die für die Modellierung benötigten Fahrzeugdaten werden von Stadler zur Verfügung gestellt.

Um eine Ausgangssituation für die Verschleissmessung zu schaffen, wird eine Reprofilierung des Rades und ein Schleifen der Schiene durchgeführt. Anschliessend werden in regelmässigen Abständen Schienenrauheitsmessungen an der Schiene durchgeführt. Parallel dazu wird die Polygonisierung des Rades bestimmt. Weiterhin wird die Entwicklung des statischen Verschleisses (Kurzzeitverhalten) durch Messung der Profilveränderung von Rad und Schiene untersucht. Ziel ist es, die Wachstumsrate sowohl des statischen als auch des dynamischen Verschleisses (Langzeitverhalten) zu bestimmen. Wenn genügend Messungen durchgeführt worden sind, wird das Konditioniersystem eingeschaltet, um zu sehen, ob dies das weitere Wachstum stoppt.

Anschliessend wird eine Neuprofilierung der Schiene durchgeführt und die Schiene vom Reibungsmodifikator gereinigt, so dass eine Ausgangssituation für die Trockenfeldversuche geschaffen werden kann.

Im Labor ViF wird in einer Machbarkeitsstudie untersucht, inwieweit die Lasermesstechnik für Schwingungsmessungen an einem bewegten Rad eingesetzt werden kann. Dabei geht es um die Ermittlung der Rahmenbedingungen für eine korrekte Messung während der Rotation des Rades und um die Festlegung der einzusetzenden Messgeräte. Die Messkampagne wird komplett vom ViF durchgeführt.

Anschliessend wird in "Engineering Installation Laser" eine Befestigung der Laser am Achslager des Radsatzes eines der zuvor in "Definition Fahrzeug" definierten Fahrzeuge entwickelt.

Anschliessend werden in "Unterhaltsanlage - Vorversuche" die Laser an einem entsprechenden Fahrzeug in der Unterhaltsanlage montiert und letzte Vorversuche durchgeführt. Zunächst werden Messungen am stehenden Fahrzeug vorgenommen, dann wird das Fahrzeug in einem Bereich der Unterhaltsanlage durch einen Bogen gefahren, um das entstehende Rauschen und den Signal-Rausch-Abstand der Laser zu ermitteln. Wird dieser Test bestätigt, kann die Messkampagne "Feldversuche trocken" freigegeben werden.

Im Rahmen der "Feldversuche trocken" wird eine Messkampagne von 3-5 Tagen Dauer im Netz des MGB durchgeführt. Ziel ist es, Daten für phänomenologische, physikalische Untersuchungen der Auswirkungen des Kurvenkreischen und der Schlupfwellenbildung sowie Daten für die Modellkalibrierung und -validierung zu erhalten. Unter anderem wird ein Fahrzeug mit Lasern und Beschleunigungsmessern ausgestattet und 2-3 Bögen werden vor Ort mit Beschleunigungsmessern instrumentiert. Die Messkampagne ist somit der Kern der Modellentwicklung und des tieferen Verständnisses der Ursachen von dynamischem Verschleiss und Kurvenkreischen.

In "Erweitern des Modells Kreischen" werden die bestehenden Modelle entsprechend der in "Feldversuche trocken" beobachteten Effekte erweitert, um eine "Vorhersage des Kreischen" zu ermöglichen.

Parallel dazu wird eine ähnliche Messung wie zuvor in "Schienenrauheit + Polygonisierung Rad mit SKK" durchgeführt, aber hier wird das Wachstum von Schlupfwellen, Polygonisierung und statischem Verschleiss in Kombination mit einem Reibungsmodifikator untersucht.

Basierend auf diesen und den Daten aus "Feldversuche trocken" werden die bestehenden Modelle für den dynamischen Verschleiss in "Modell für Verschleiss erweitern" erweitert und kalibriert, um eine "Vorhersage der Schlupfwellenbildung" zu ermöglichen.

Parallel dazu werden im "SKK-Messlabor" am Zwei Scheiben-Prüfstand bei AC2T Messungen mit verschiedenen Reibungsmodifikatoren durchgeführt. Die ermittelten "Reibungskurven Labor" werden mit dem Kurvenkreischmodell verglichen und für die "Vorhersage Kurvenkreischen" verwendet.

Zur Kalibrierung des Verschleissmodells werden bei AC2T im "SKK-Messlabor" zusätzlich Langzeit-Doppelscheibenversuche durchgeführt. Hier werden Verschleisskoeffizienten/ Verschleissraten für die interessierenden Materialkombinationen bei für Messgeräteanwendungen relevanten Parametern ermittelt.

In "Sheffield SKK" werden Messungen mit Reibungsmodifikatoren auf dem Full-Scale-Prüfstand der Universität Sheffield durchgeführt. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der Verdrängung des Produkts aus dem Rad-Schiene Kontakt.

Bei "SKK-Feldmessungen" werden Messungen im Feld durchgeführt, die sich auf verschiedene Eigenschaften der Reibungsmodifikatoren konzentrieren.

Auf der Grundlage dieser Reibungsmanagementmessungen wird das Modell für das Reibungsmanagement in "Modell SKK erweitern" auf die Anforderungen des Messgeräts erweitert, um eine "Vorhersage von SKK" zu ermöglichen.

Parallel dazu werden in "Betriebserprobung SKK" bestehende Messungen aus dem Projekt P2 genutzt, in dem Langzeittests im tpf-Netz mit Reibungsmodifikatoren untersucht wurden. Hier sind keine neuen Messungen geplant.

In "Vorschlag für Verschleiss, SKK, Lärm" schliesslich werden die Modelle für dynamischen Verschleiss, Kurvenkreischen und Reibungsmanagement auf ausgewählte andere Teile des Meterspurnetzes angewandt, um umfassendere Vorschläge zur Reduzierung von dynamischem Verschleiss und Kurvenkreischen zu entwickeln.

## 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Organisation K2-Projekte und Projektpartner .....	6
Abbildung 2: Überblick K2-Projekt ViF/RAILplus .....	7
Abbildung 3: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept «Verschleiss» .....	8
Abbildung 4: Iterationsschleife, die das Herzstück des Modells darstellt .....	9
Abbildung 5: Erforderliche Eingaben für die Mehrkörpersimulation .....	10
Abbildung 6: Berücksichtigung von anfänglichen Oberflächenunregelmässigkeiten in der Mehrkörpersimulation sowie daraus die Ableitung des Entstehungsmechanismus von dynamischen Verschleissarten .....	11
Abbildung 7: Einbeziehung flexibler Komponenten in MBS .....	12
Abbildung 8: Bereitstellung von Inputs für das Verschleissmodell aus MKS und Laborversuchen.....	13
Abbildung 9: Aktualisierung des Anfangsprofils in Abhängigkeit von der Menge des abgetragenen Materials, berechnet durch das Verschleissmodell.....	14
Abbildung 10: Vergleich des Verschleissprofils mit Feldversuchen und Versuchen auf dem Prüfstand zur Kalibrierung bzw. Validierung des Modells .....	15
Abbildung 11: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept .....	16
Abbildung 12: Kraftschlusskräfte für positive und negative Steigung.....	19
Abbildung 13: Geschwindigkeiten und Anlaufwinkel.....	19
Abbildung 14: Axiale Modi eines Rades .....	21
Abbildung 15: (a) Spektrogramm der seitlichen Radverschiebung mit 300 N, beginnend bei 1,3 s. (b) Verringerung der seitlichen und vertikalen Verschiebungswerte an der Kontaktposition von Rad und Schiene als Funktion der Amplitude der Ditherkraft. Die Ditherkraft beginnt immer bei 1,3 s. Die Verringerung wird durch Auswertung des Effektivwerts zwischen 1,8 und 2 Sekunden für den Fall mit Dither und den Fall ohne Dither berechnet.....	22
Abbildung 16: Überblick über das Thema Reibungsmanagement in diesem Projekt. Eine grössere Version dieser Abbildung befindet sich auf Seite 70 der Präsentation 20230424-25_1.Technical Meeting_F2F Zürich.pdf. ....	23
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Ausbringung von TOR-Produkten entlang des Gleises. Die Produkte werden entlang der Schiene verteilt und von den vorbeifahrenden Rädern verbraucht. Die Produkthöhen (in grau) sind übertrieben dargestellt. (Mit freundlicher Genehmigung von Trummer et al. 2021). ....	26
Abbildung 18: Die grafische Benutzeroberfläche des aktuellen FRA-Modells zusammen mit einer Beispielsimulation aus diesem Modell.....	27
Abbildung 19: Alle Messkampagnen im Überblick.....	30