

Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

P5 – Fahrzeuge

Phase 1: Systemanalyse FIMO, Präsentation BAV vom 6.12.2022

Claudio Häni, RBS

Richard Schneider, RSE

Alessandro Bianchi, RhB

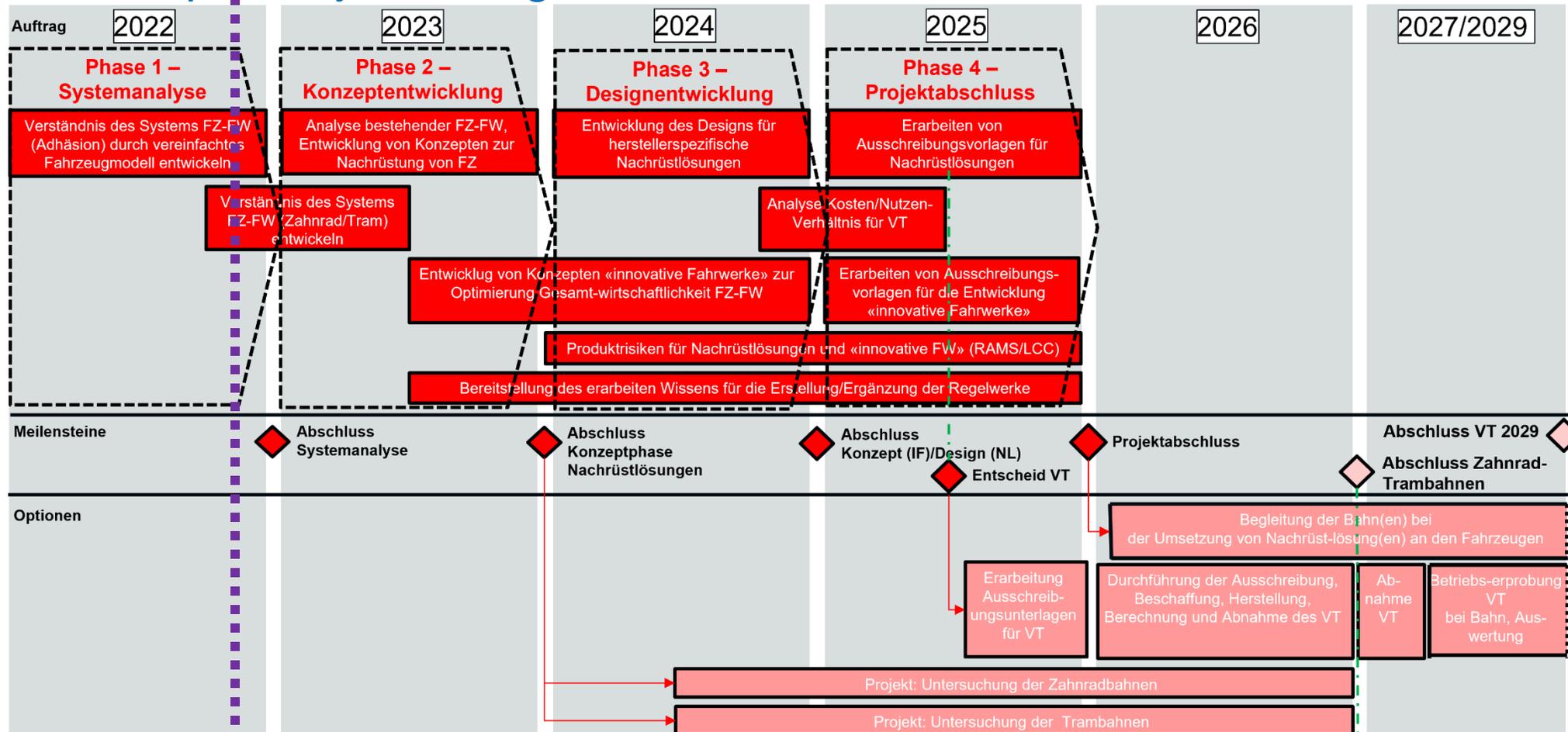
Agenda

Systemanalyse FIMO: Stand Dezember 2022

- Auftrag, Ziele und Vorgehen
- FIMO (Fahrzeug-Fahrweg Interaktion Meterspur Optimierung) Übersicht
- Simulationsmodell
 - Beschreibung
 - Rad-Schienen Kontakt
 - Verifikation
 - Software Optionen
- Berechnungsablauf und Datenbanken
- Berechnung des Schädigungspotentials aus den Verschleisswerten
- Bewertung der Lösungsansätze
 - Normalspur (Referenz: IC-2000)
 - Meterspur und Vergleich
- Auswahl der Varianten für eine erste Bewertung
 - Vorläufige Bewertung von 3 bzw. 4 Fahrzeugen
- Weiteres Vorgehen – Roadmap Projekt P5

Projekt P5

Roadmap - Projektantrag



Auftrag P5 – Fahrzeuge (Phase 1)

Systemanalyse FIMO

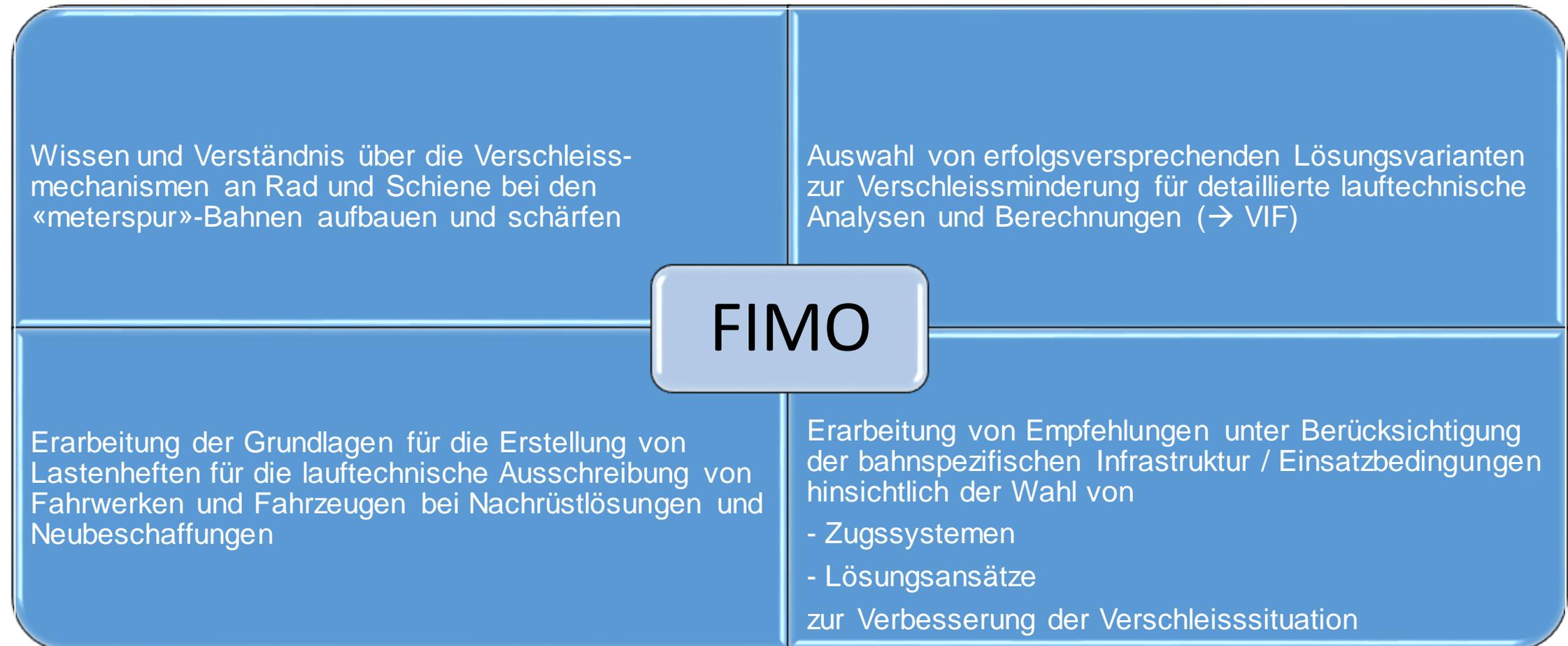
- ❑ Analyse und Bewertung der bestehenden Zugssysteme der Meterspurbahnen hinsichtlich dem Verschleiss von Rad-Schiene
- ❑ Vorschläge zur Optimierung des Systems Fahrzeug/Fahrweg ausgehend von den Kundenanforderungen und unter Berücksichtigung der kritischen Teilsysteme
- ❑ Entwicklung einer Methode zur Analyse und Optimierung der Interaktion von Fahrzeug-Fahrweg, ohne Eingrenzung auf das Fahrwerk (gemäss Hinweis des Forschungs- und Innovationsausschuss BAV vom 26.1.2022)

→ **FIMO** = **F**ahrzeug-Fahrweg **I**nteraktion **M**eterspur **O**ptimierung

- ❑ Abgrenzung
 - ❑ Adhäsionsfahrzeuge
 - ❑ Optionen: Zahnrad- und Tramfahrzeuge

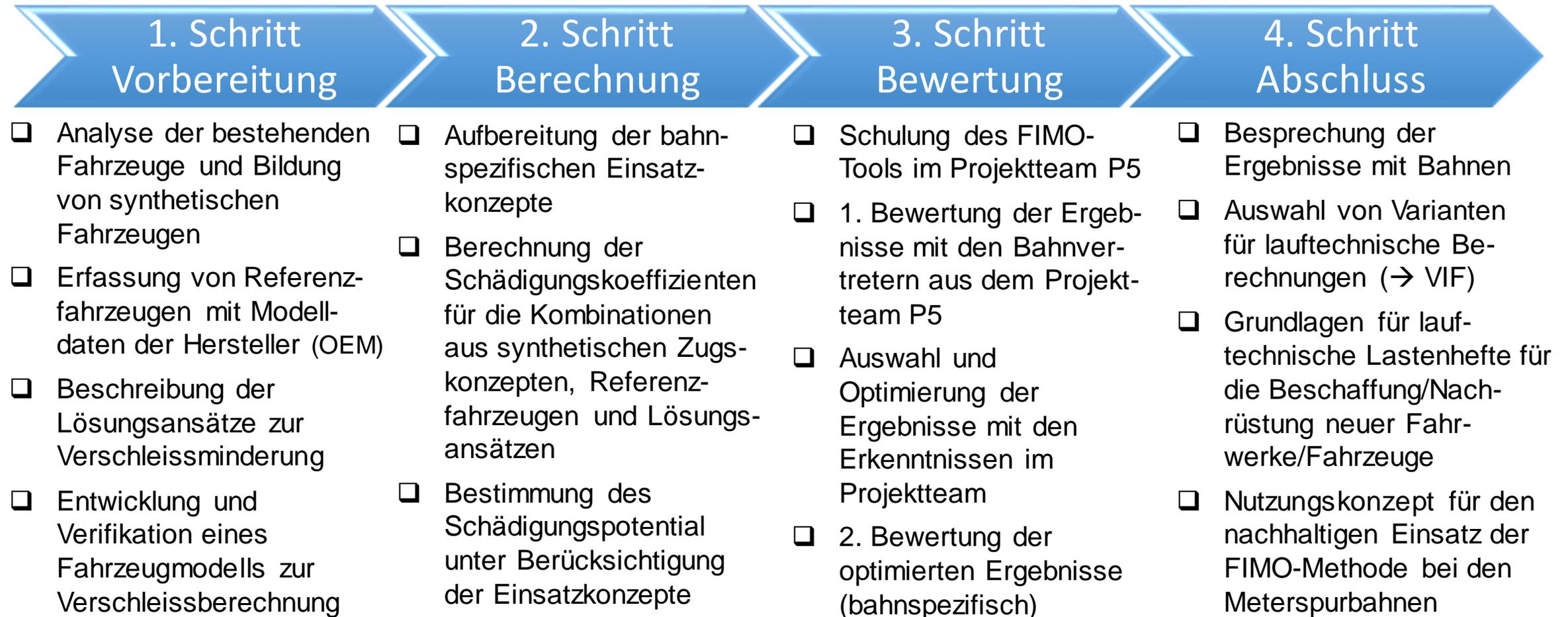
Ziele

Systemanalyse FIMO



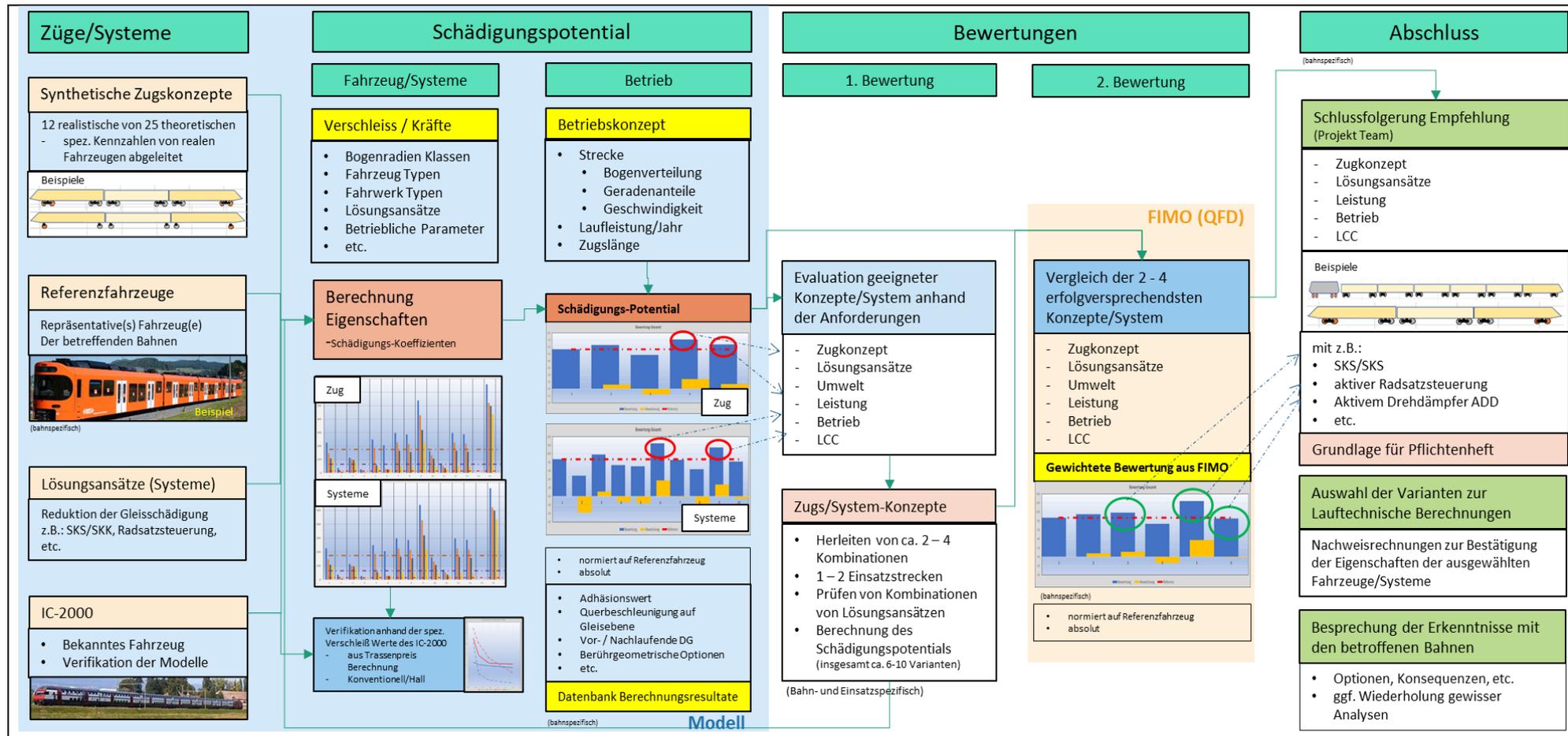
Vorgehen

Systemanalyse FIMO



FIMO

Übersicht-Prozess



FIMO

Übersicht-Varianten

Züge

Synthetische Zugskonzepte
 12 realistische von 25 theoretischen
 - spez. Kennzahlen von realen Fahrzeugen abgeleitet

6-Lokbespannte Züge

2-Antriebsmodul

60 m Länge RDF
60 m Länge RDF - J

4-Triebzüge (EMU)

Typ 1 – 60 m Länge RDF
Typ 2 – 60 m Länge RDF
Typ 3 – 60 m Länge RDF - J
Typ 5 – 60 m Länge RDF

Systeme/Lösungsansätze

Referenzfahrzeuge
 Repräsentative(s) Fahrzeug(e)
 Der betreffenden Bahnen

RBS

Worbli

NExT

RhB

RTZ

ZTZ

AMVRA

alle Bahnen

Lösungsansätze (Systeme)

Starre Radsatzführung

Elastische Radsatzführung inkl. HALL

Aktive Radsatzsteuerung

Gegenseitige Radsatzsteuerung (GGA, Kreuzanker, Scheffel)

Aktiver Schlingerdämpfer (ADD)

Losrad / Einzelrad

Gleis/Fahrzeug Parameter

Berührgeometrie
 - $\Delta R=0$
 - ΔR -Grenzbogen
 - ΔR -maximal

Traktionsregelung

Spurkranschmierung (SKS)

Schienenkopf Konditionierung (SKK)

Kombinationen

➔

Empfindlichkeit aller Lösungsansätze bez. der Berührgeometrischen Eigenschaft ΔR

Empfindlichkeit der Lösungsansätze auf den Traktionsschlupf

Züge mit erfolgversprechenden Lösungsansätzen und Kombinationen

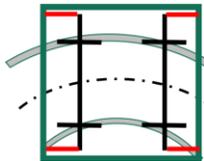
- Synthetischer Zug oder realer Zug (Referenzfahrzeug)
- Bahn- bzw. Einsatz spezifisch am besten geeignete Lösungsansätze
- Grundlage für die Spezifikation von:**
 - Neubau Fahrzeugen
 - Umbau bzw. Nachrüstungsmöglichkeiten

Lösungsansätze

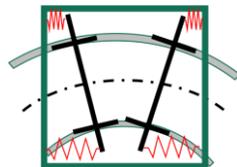
Systemanalyse FIMO

11 verschiedene Lösungsansätze zur Reduktion von Verschleiss an Rad-Schiene

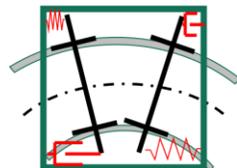
Starre Radsatzführung



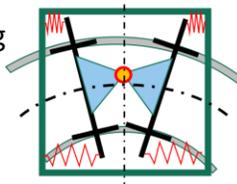
Elastische Radsatzführung
Inkl. HALL



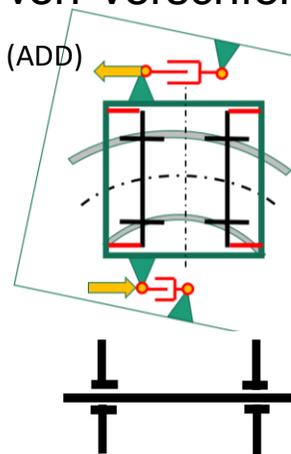
Aktive Radsatzsteuerung



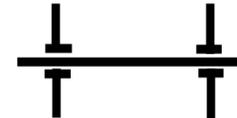
Gegenseitige Radsatzsteuerung
(GGA, Kreuzanker, Scheffel)



Aktiver Schlingerdämpfer (ADD)

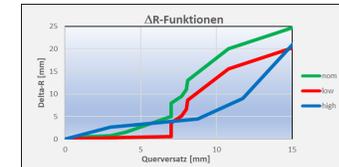


Losrad / Einzelrad

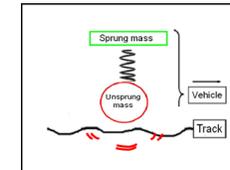


Berührgeometrie

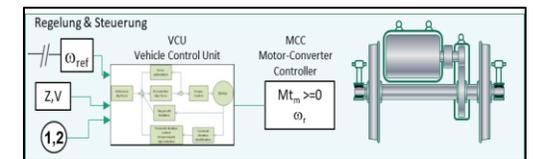
- DR-0
- DR-Grenzbogen
- DR-maximal



ungefederte Masse
Radsatzlast
Fahrbahn Steifigkeit



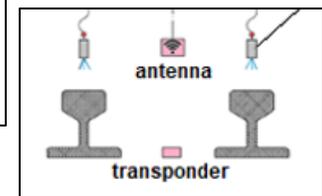
Traktionsregelung



Spurkranzschmierung
(SKS)



Schienenkopf
Konditionierung (SKK)

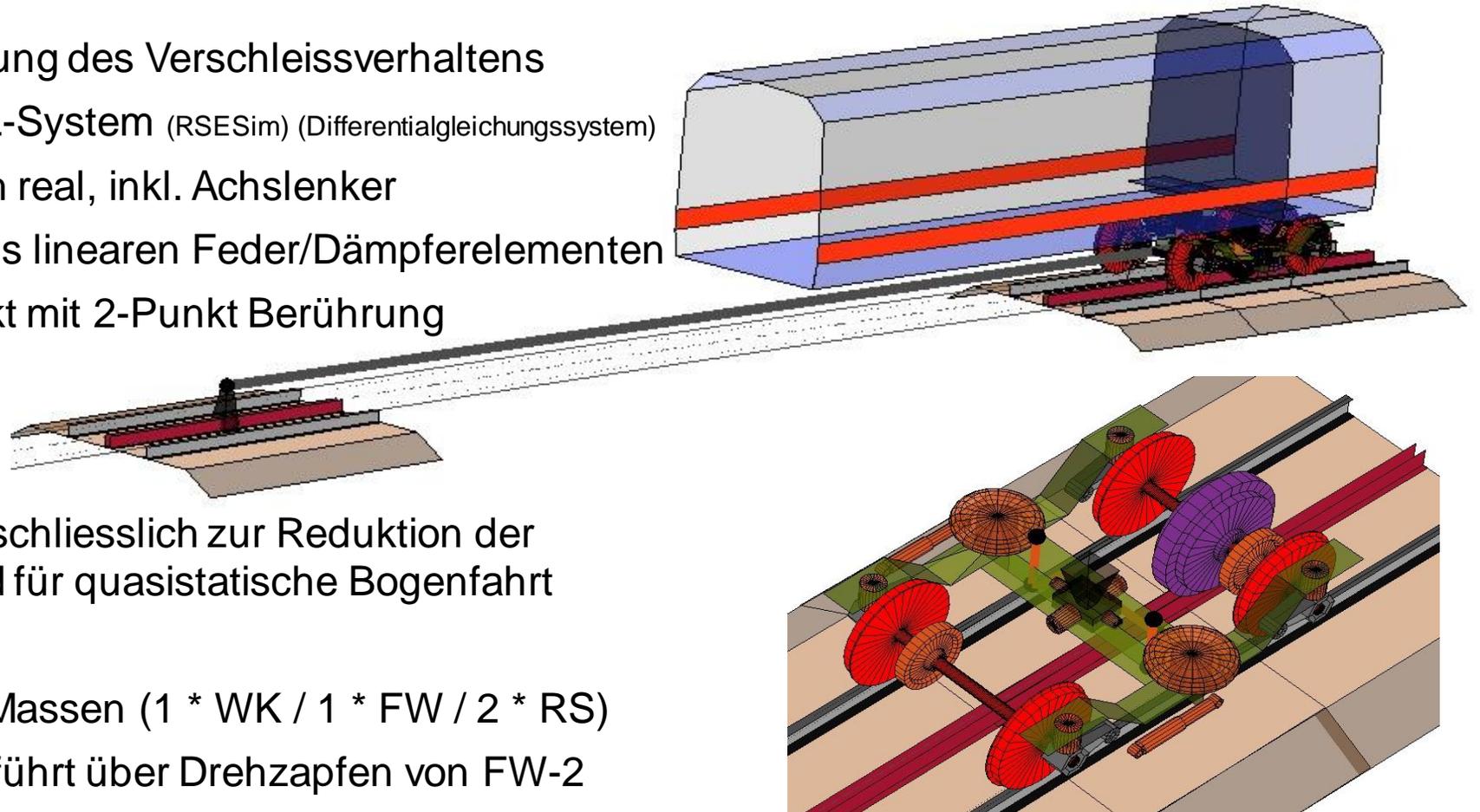


Simulationsmodell

Systemanalyse FIMO

- ❑ Modellierung zur Berechnung des Verschleissverhaltens
 - ❑ Vollständiges 3D DGL-System (RSESim) (Differentialgleichungssystem)
 - ❑ Fahrwerk physikalisch real, inkl. Achslenker
 - ❑ Kastenfederung mittels linearen Feder/Dämpferelementen
 - ❑ Rad-Schienen-Kontakt mit 2-Punkt Berührung
 - ❑ Alle Lösungsansätze implementiert

- ❑ Vereinfachungen ausschliesslich zur Reduktion der Simulationszeiten und für quasistatische Bogenfahrt
 - ❑ Starrer Gleisrost
 - ❑ Reduktion auf 4 Massen (1 * WK / 1 * FW / 2 * RS)
 - ❑ Wagenkasten geführt über Drehzapfen von FW-2

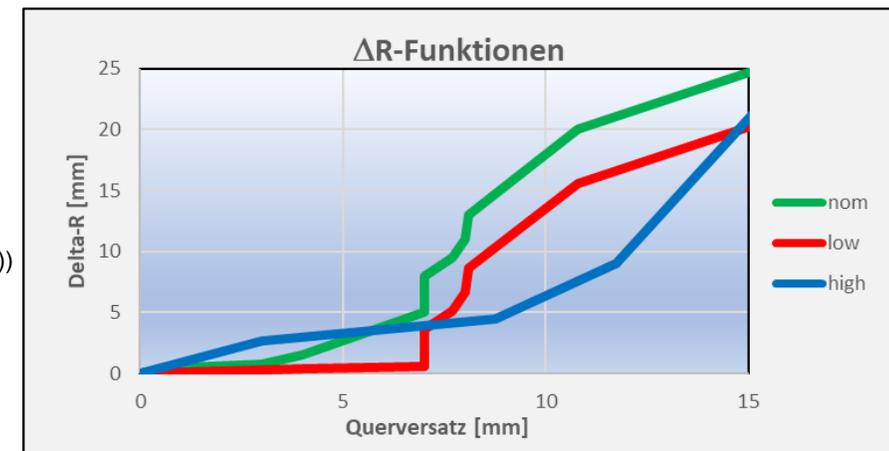
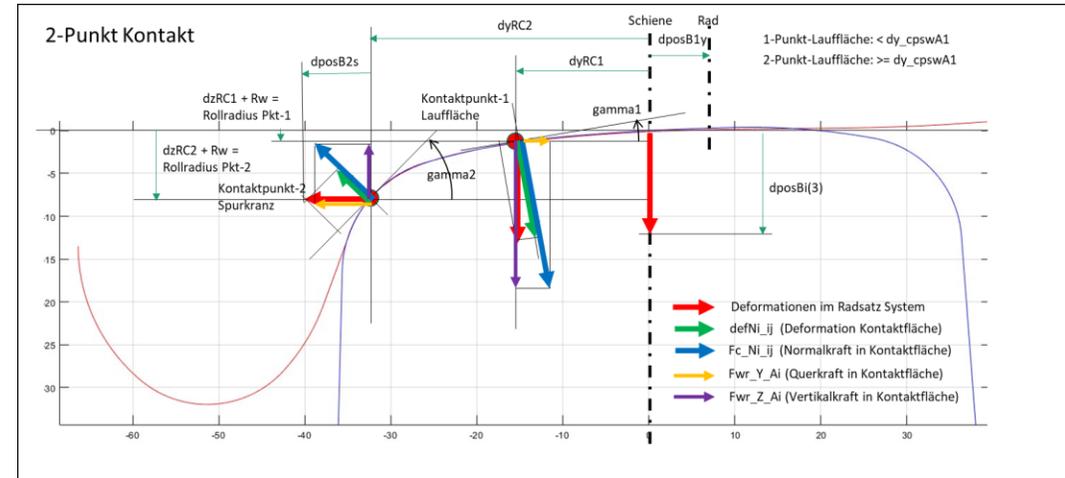


Fahrzeugmodell

Rad-Schienen Kontakt

□ Modellierung Kräfte und Verschleiss Rad-Schiene

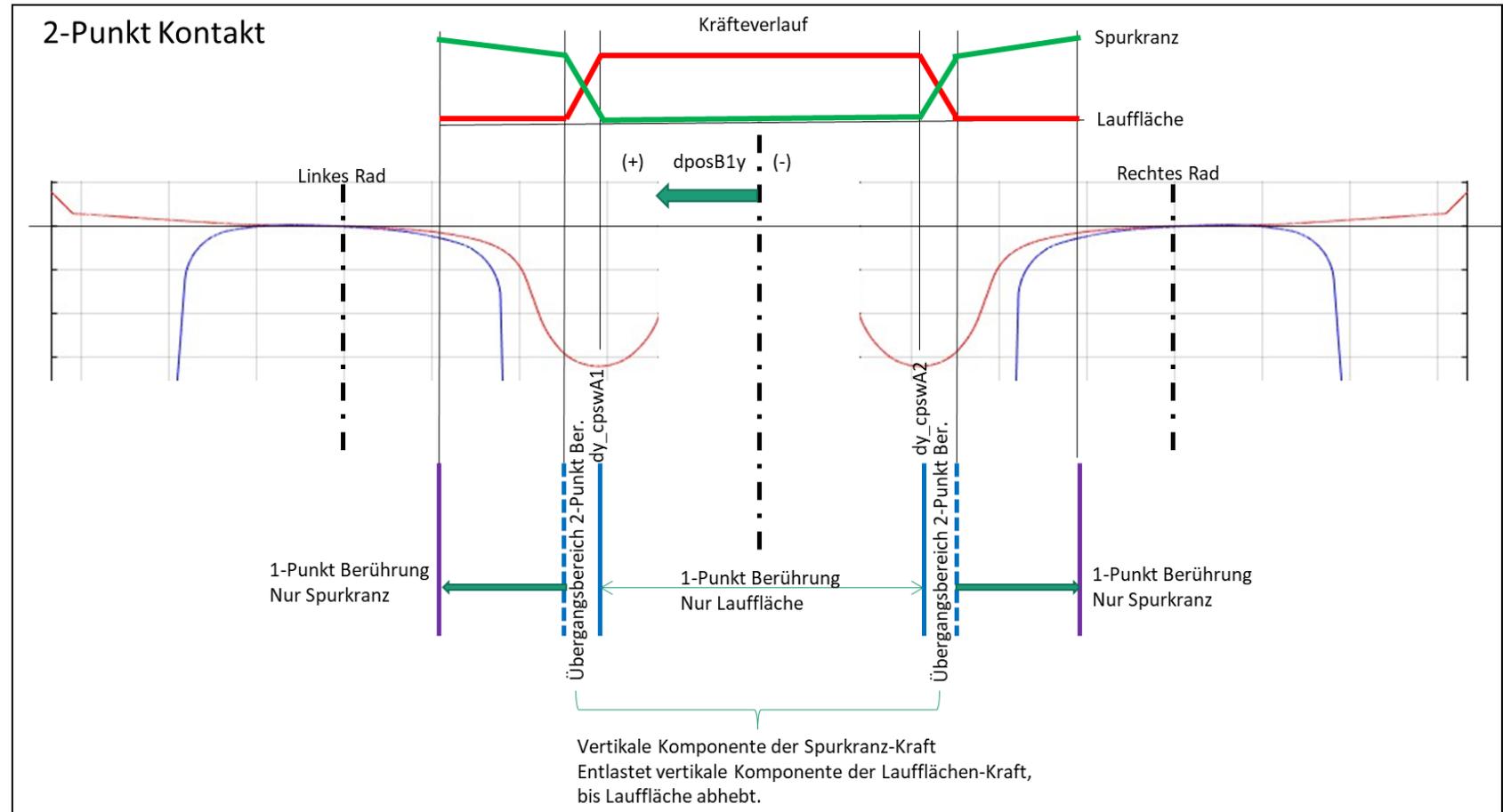
- Schlupfkräfte (Schlupfgesetz nach O. Polach)
- 2-Punkt Berührung zur Bewertung von Laufflächen- und Spurkranzverschleiss
- Charakteristiken der Profilkombinationen tabellarisch hinterlegt
 - Kontaktpunkt Koordinaten Rad und Schiene
 - ΔR Rollradien Differenz
 - Kontaktfläche-Steigung
 - Kalker Koeffizienten
 - Ellipsenachsen
- Kontaktpunkt Vorverlagerung, Anlaufwinkelabhängig
- 3 Charakteristische Profilkombinationen synthetisch entwickelt (Sicherstellung der Vergleichbarkeit, Ermöglichung von Empfindlichkeitsanalysen sowie eindeutige und zuverlässige Interpretation der Resultate)
 - **Kombination mit «0» ΔR** (quasi zylindrische Lauffläche)
 - **Kombination mit mittlerem ΔR** (definierbarer Bogenradius für kinematisches Abrollen (Grenzbogenradius))
 - **Kombination mit hohem ΔR** , welches kinematisches Abrollen bis zum kleinsten Bogenradius ermöglicht



Fahrzeugmodell

Rad-Schienen Kontakt

□ 2-Punkt Berührung

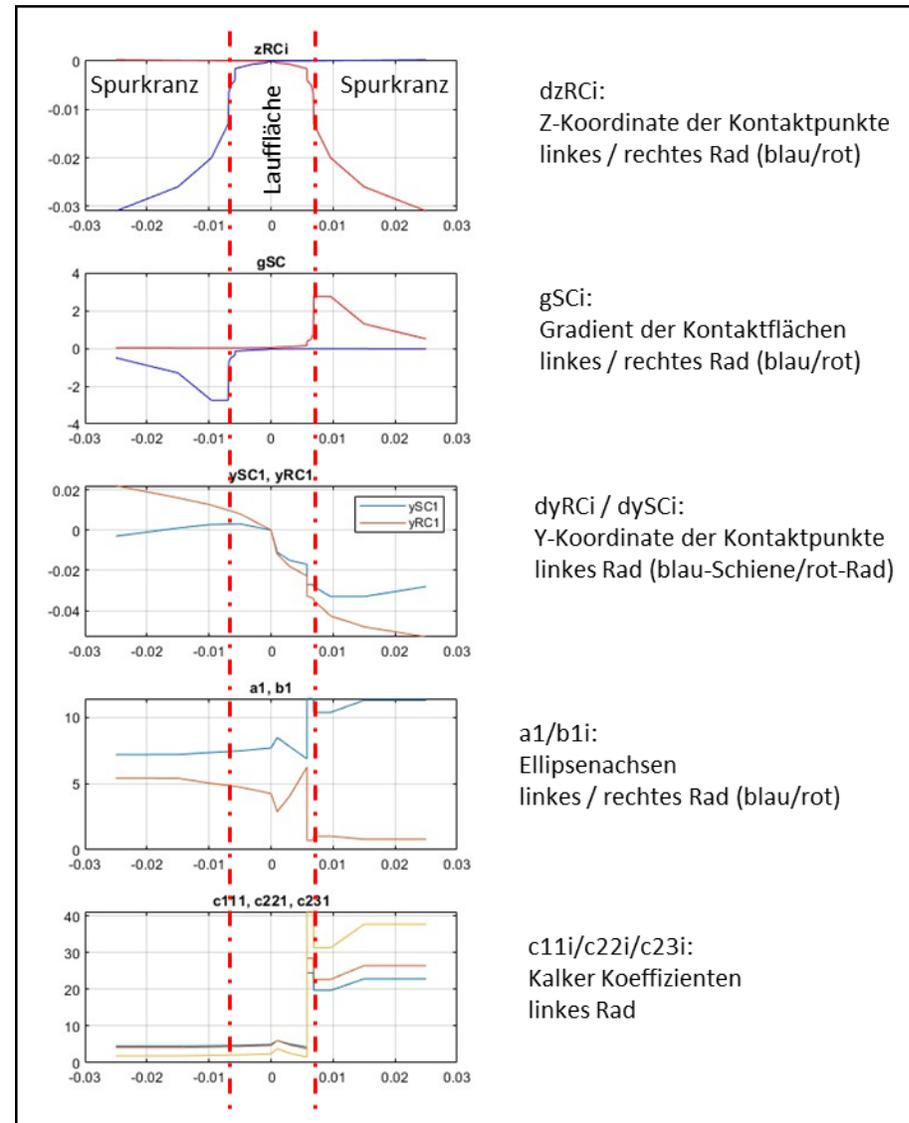


Fahrzeugmodell

Charakteristiken

☐ Kontakt Charakteristiken

- ☐ Koordinaten in $-Z$ (ΔR)
- ☐ Kontakt Gradient
- ☐ Koordinaten in $-Y$
- ☐ Abstand: Rad-Schiene in $-Z$
- ☐ Ellipsenachsen
- ☐ Kalker Koeffizienten
- ☐ Bereich des Kontakt-Wechsels



dzRCi:
Z-Koordinate der Kontaktpunkte
linkes / rechtes Rad (blau/rot)

gSCi:
Gradient der Kontaktflächen
linkes / rechtes Rad (blau/rot)

dyRCi / dySCi:
Y-Koordinate der Kontaktpunkte
linkes Rad (blau-Schiene/rot-Rad)

a1/b1i:
Ellipsenachsen
linkes / rechtes Rad (blau/rot)

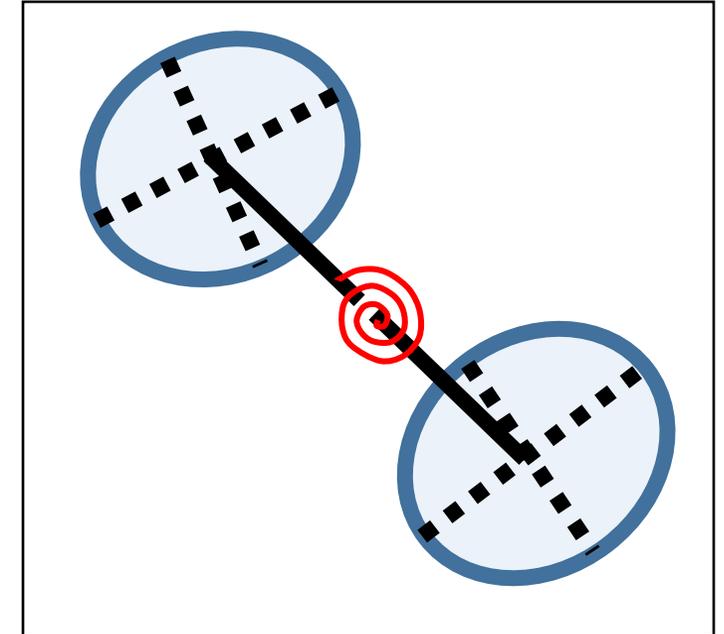
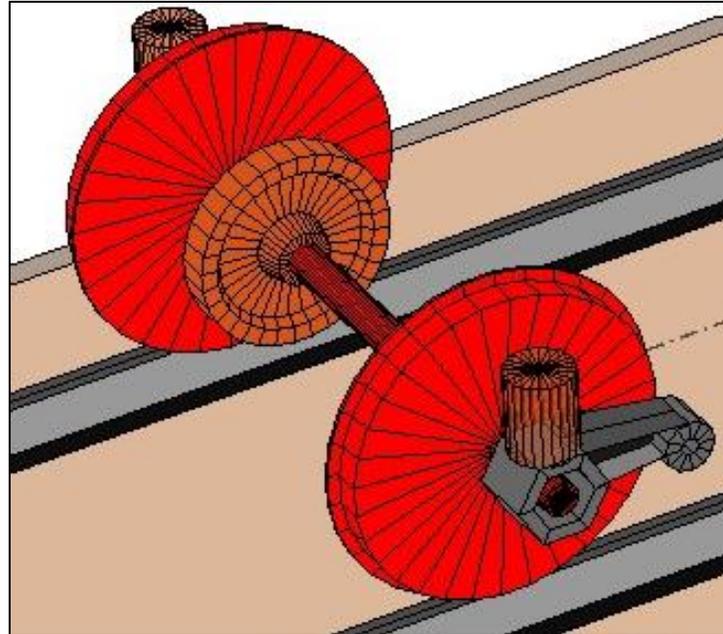
c11i/c22i/c23i:
Kalker Koeffizienten
linkes Rad

Fahrzeugmodell

Radsatz

❑ Radsatz-Körper

- ❑ 5-Freiheitsgrade (Rotation um -Y- blockiert)
- ❑ Achslenker fest mit Radsatz verbunden
- ❑ Vertikalsteifigkeit Achslenkerlager = 0
- ❑ Zwei Räder auf Radsatzwelle
 - ❑ Nur Freiheitsgrad um -Y-
 - ❑ Torsionselastisch gekoppelt

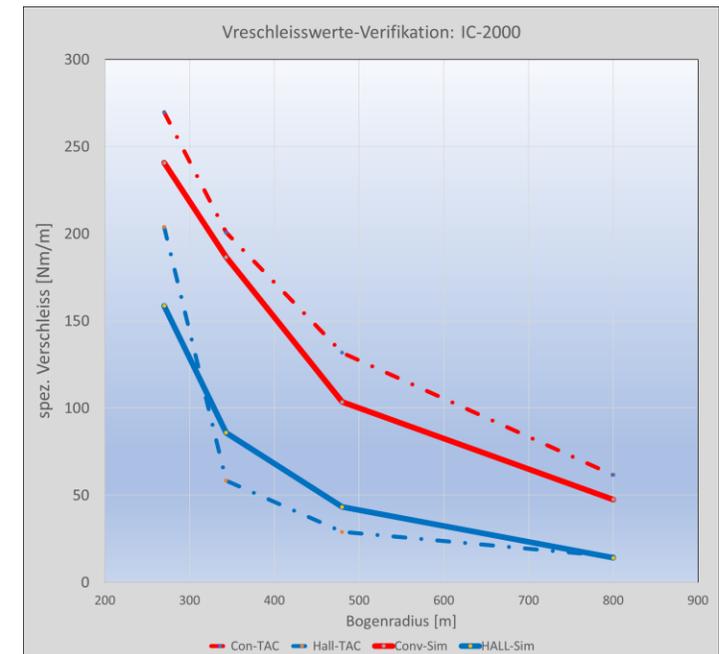
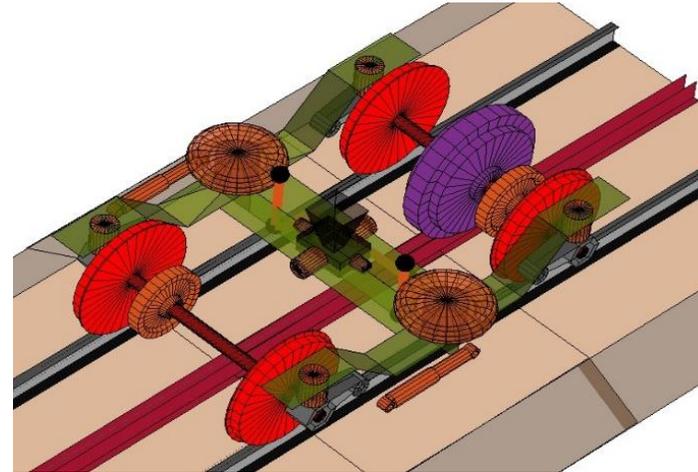


Fahrzeugmodell

Verifikation

- ❑ Verifikation erfolgt in mehreren Stufen
 - ❑ Plausibilitätsbetrachtungen
 - ❑ Koppелеlemente mittels Teilmodellen geprüft
 - ❑ Animation der Simulation
 - ❑ Verschleisswerte über Vergleich mit IC-2000 Daten
 - ❑ Hergeleitet aus Trassenpreismodell (nur Fahrzeugverhalten)
 - ❑ Für steife Radsatzführung und HALL Lager
 - ❑ Mit 2-Punkt Kontakt ausreichende Übereinstimmung erreicht
 - ❑ Aufwand für genauere Übereinstimmung nicht mehr gerechtfertigt
 - ❑ Zus. Vergleichsrechnungen mit Berechnungen von Stadler mit Simpack geplant

- ❑ Begutachtung durch externes Berechnungsinstitut geplant
 - ❑ Anhand Modellbeschreibung (z.B. PJM)

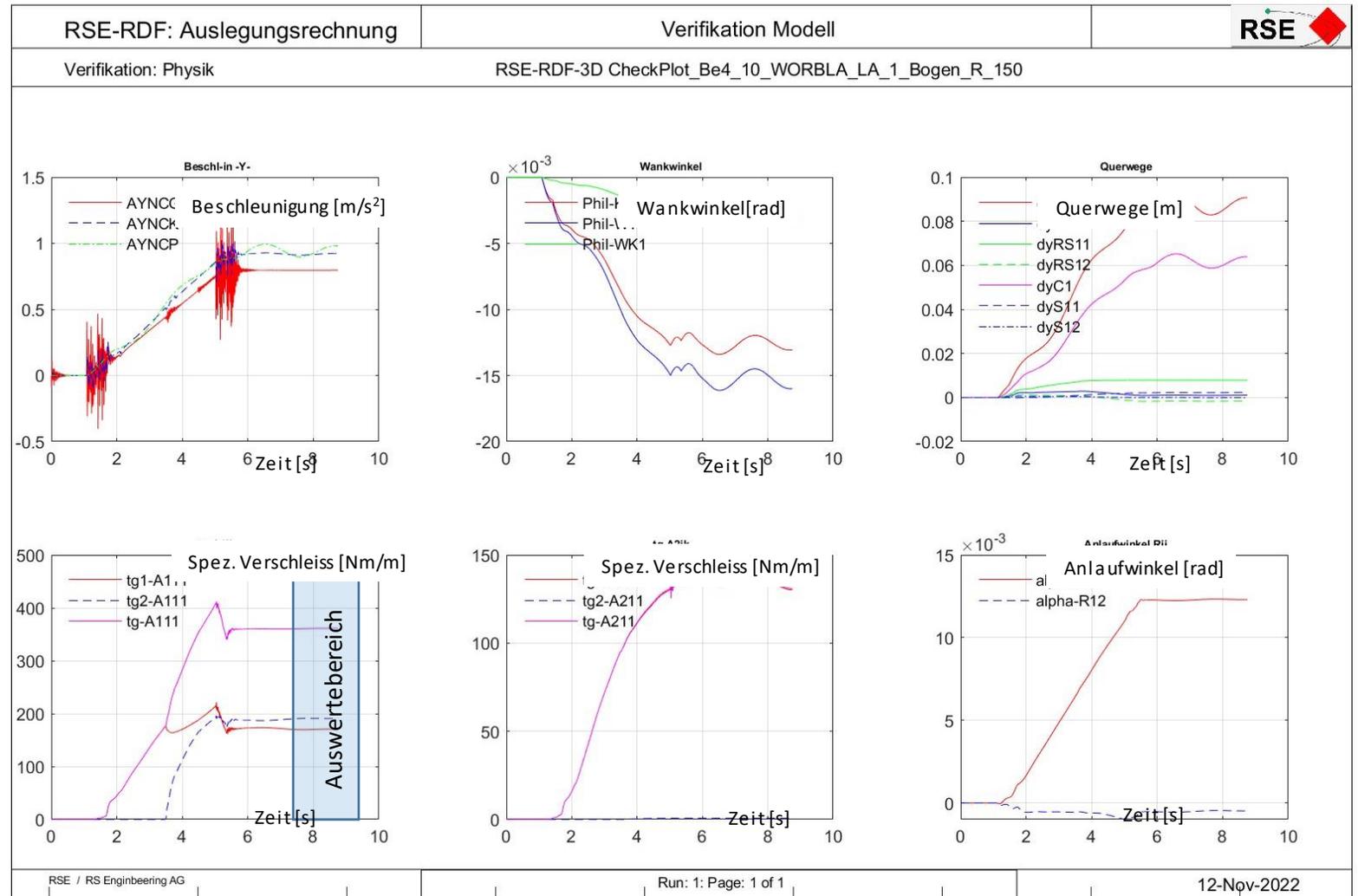


Fahrzeugmodell

Berechnungsbeispiel

Check-Plot für jede Berechnung

- Querbeschleunigungen
- Wankwinkel
- Querwege
- Spez. Verschleisswerte
- Anlaufwinkel



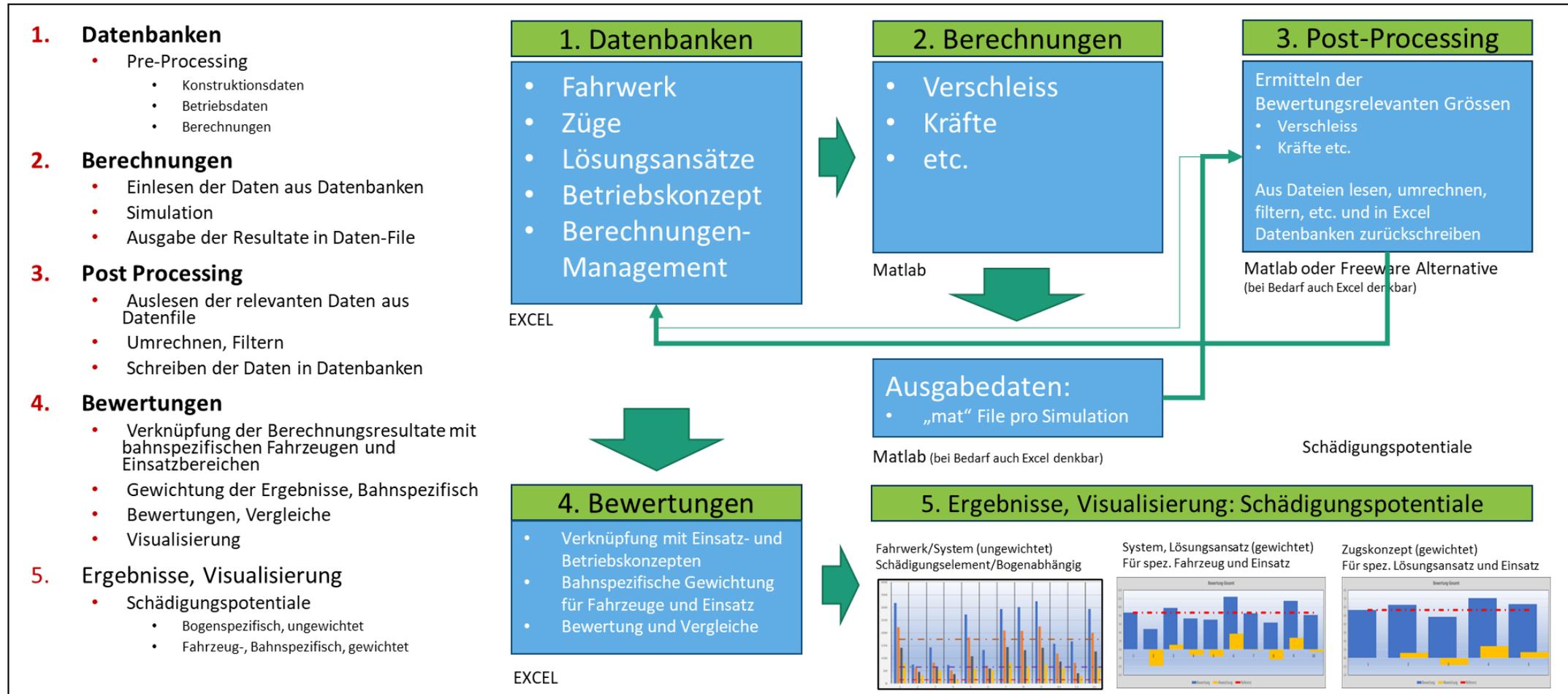
Fahrzeugmodell

Software Optionen

- Pre-Processing: Excel
- Simulation: Matlab
- Animation: Matlab
- Post-Processing: Matlab
- Analyse & Visualisierung: Excel
- Alternative Software
 - Die Nutzung von Octave (Matlab Generica) wird geprüft
 - Post Processing sollte auf jeden Fall möglich sein

Berechnungen

Struktur und Ablauf



Berechnungen

Auswahl für erste Berechnungen

Empfindlichkeit

Alle 12 Lösungsansätze und Kombinationen:

- IC-2000 (Normalspur)
 - Zur Verifikation

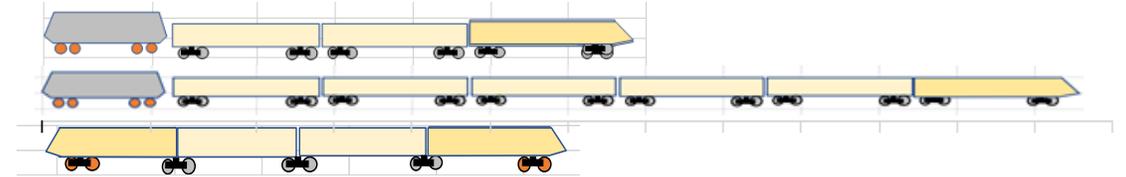
- RBS-Worbla Triebdrehgestell

Bewertung und Prüfung des Verfahrens

12 Zug-Typen

3-Generische Fahrzeuge

- LBS_1
- LBS_10
- TZ_3



9-Referenzfahrzeuge

- RBS-Worbla
- RBS-Next
- RhB-RTZ
- RhB-ZTZ
- RhB-AGZ
- MVR-Surf
- zb-Fink
- zb-Spatz
- MOB-GPX

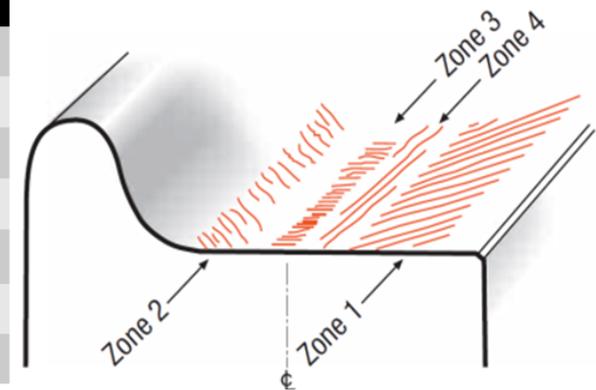


Berechnungen

Berechnung des Schädigungspotentials: Rad

☐ Rad → Fragen 301a/b aus P1

Betroffene Frage	Verschleiss/Schäden	Verschleisswerte aus Matlab	Schädigungspotential FIMO
301b_1	Radverschleiss-Spurkranz (Zone 2)	Verschleiss Spurkranz	D4.2
301b_2	Radverschleiss Lauffläche (Zone 3 & 4)	Verschleiss Lauffläche	D4.2
301b_3	Rissen an Radoberfläche (Zone 3 & 4)	Verschleiss Lauffläche	D4.1
301b_4	Materialausbrüche Radoberfläche (Zone 3)	RCF Lauffläche	D4.1
301b_5	Thermische Schäden	Nicht behandelt	-
301b_6	Flachstellen	Nicht behandelt	-
301b_7	Radpolygonisierung (Zone 3)	Verschleiss Lauffläche	D4.2

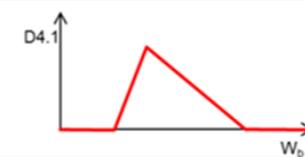


RCF
(Rollkontaktermüdung)

D4.1 = 0 , für $W_b < 15 \text{ Nm/m}$ und $W_b \geq 175 \text{ Nm/m}$

D4.1 = $n_{FW} \cdot (0.02 \cdot W_b - 0.3)$ für $15 \text{ Nm/m} \leq W_b < 65 \text{ Nm/m}$

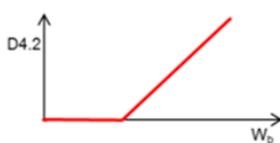
D4.1 = $n_{FW} \cdot (-W_b + 175)/110$ für $65 \text{ Nm/m} \leq W_b < 175 \text{ Nm/m}$



Verschleiss

D4.2 = 0 , für $W_b < 65 \text{ Nm/m}$

D4.2 = $n_{FW} \cdot \frac{W_b - 65}{110}$ für $W_b \geq 65 \text{ Nm/m}$

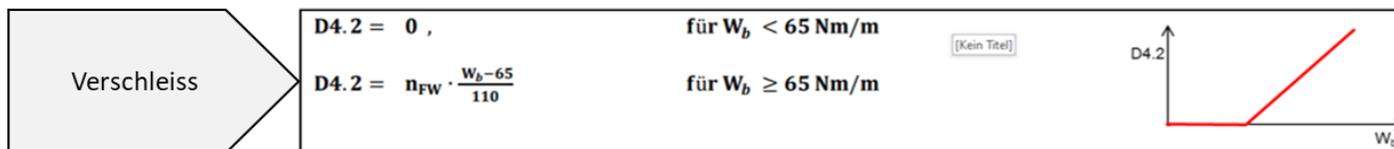
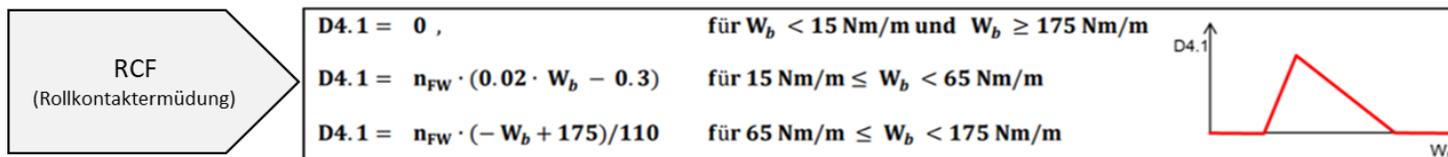
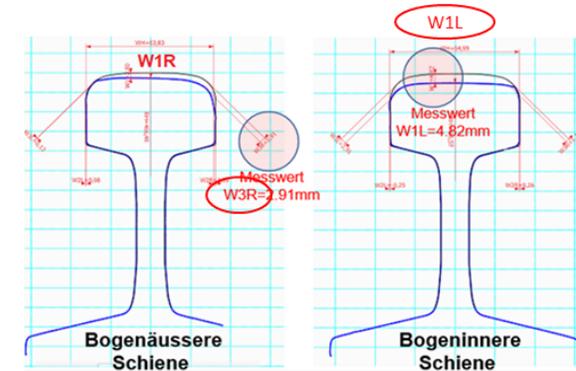


Berechnungen

Berechnung des Schädigungspotentials: Schiene

☐ Schiene → Fragen 301c/d aus P1

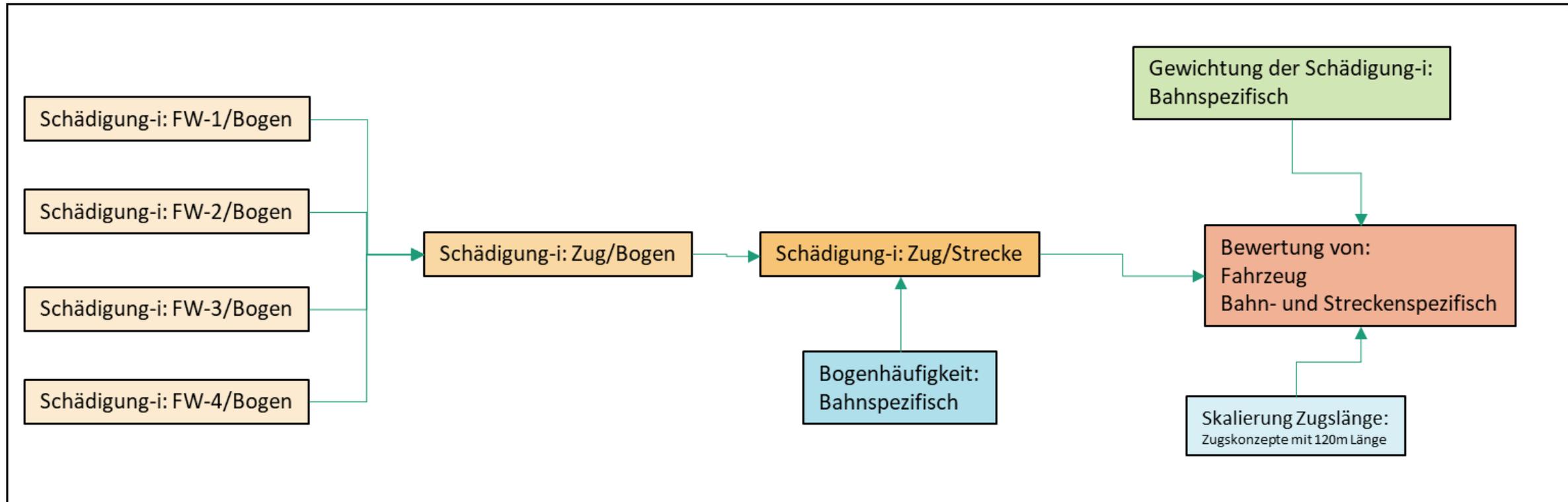
Betroffene Frage	Verschleiss/Schäden	Verschleisswerte aus Matlab	Schädigungspotential FIMO
301c_1	Schienenverschleiss Fahrfläche (W1) Bogeninnen	Verschleiss Lauffläche	D4.2
301c_2	Schienenverschleiss Fahrkante (W3) Bogenaussen	Verschleiss Spurkranz	D4.2
301c_3	Rissen an Radoberfläche (W1+W3)	Verschleiss Lauffläche	D4.1
301c_4	Materialausbrüche Schienenoberfläche (W3)	RCF Radlauffläche	D4.1
301c_5	Schleuderstellen	In Traktionsregelung behandelt	-
301c_6	Schlupfwellen	Verschleiss Lauffläche	D4.2
301c_7	Schienenriffel	In Traktionsregelung behandelt	-
301c_8	Gleisbeanspruchung	Mit P2 zu besprechen (Auswertung auf Weichenschädigung)	-



Berechnungen

Prozess der Bewertung

- ☐ Schritte von der Berechnung bis zur Bewertung



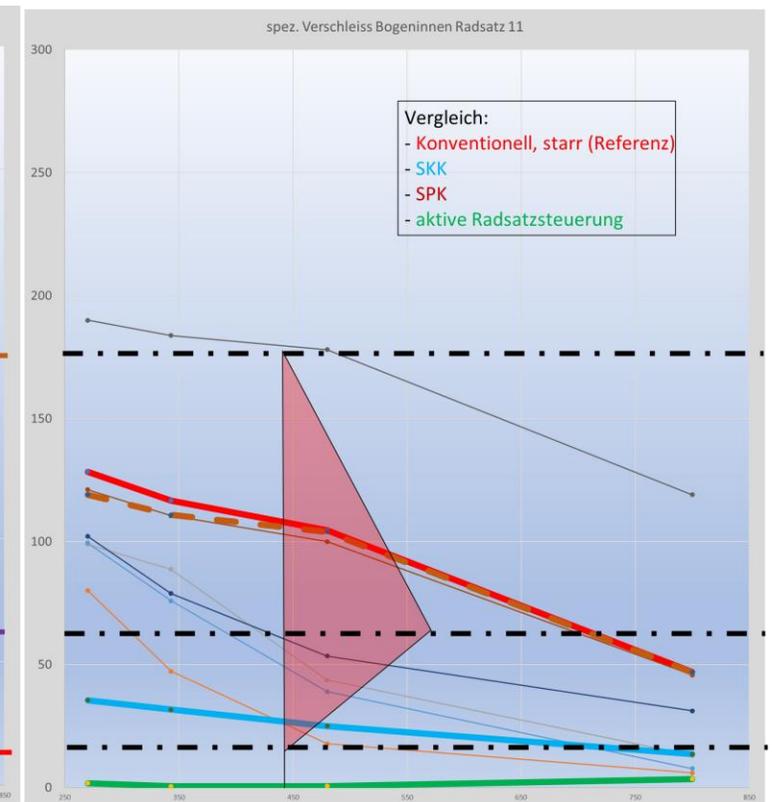
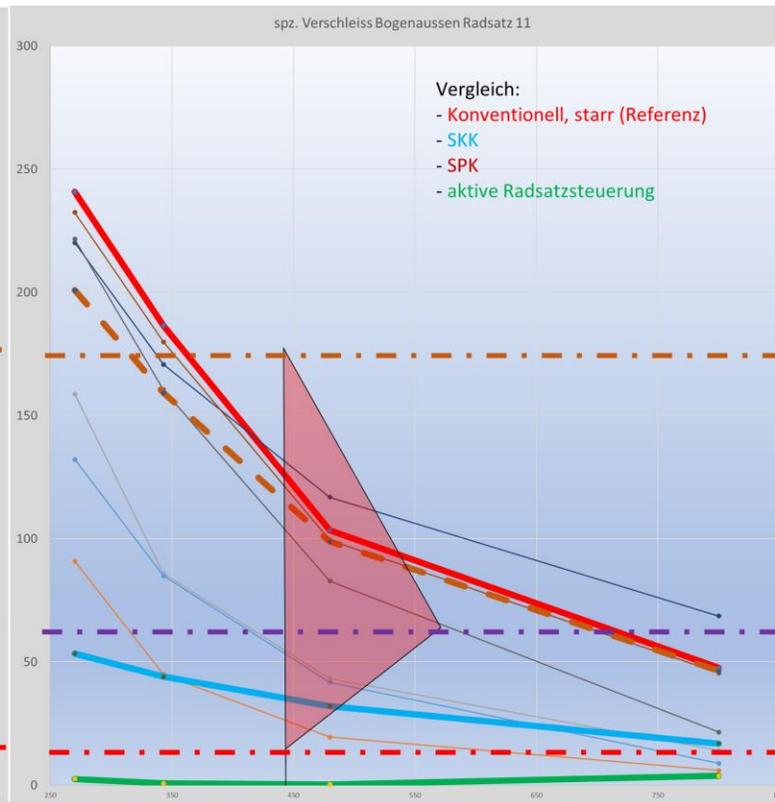
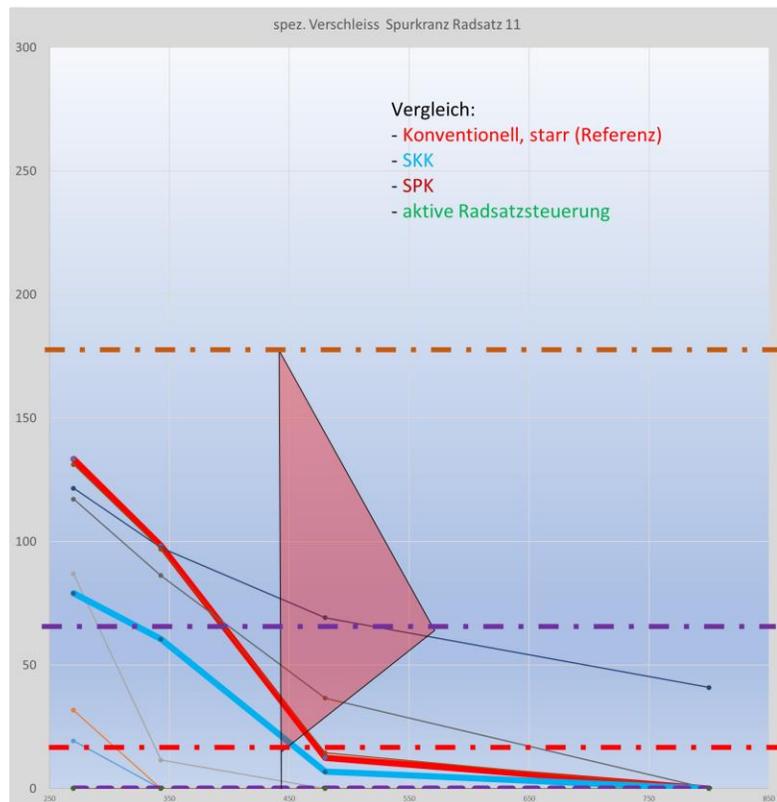
Ergebnisse zur Empfindlichkeit

Vergleich anhand IC-2000

☐ Spurkranzverschleiss

Ganzes Rad, Bogenaussen

Bogeninnen



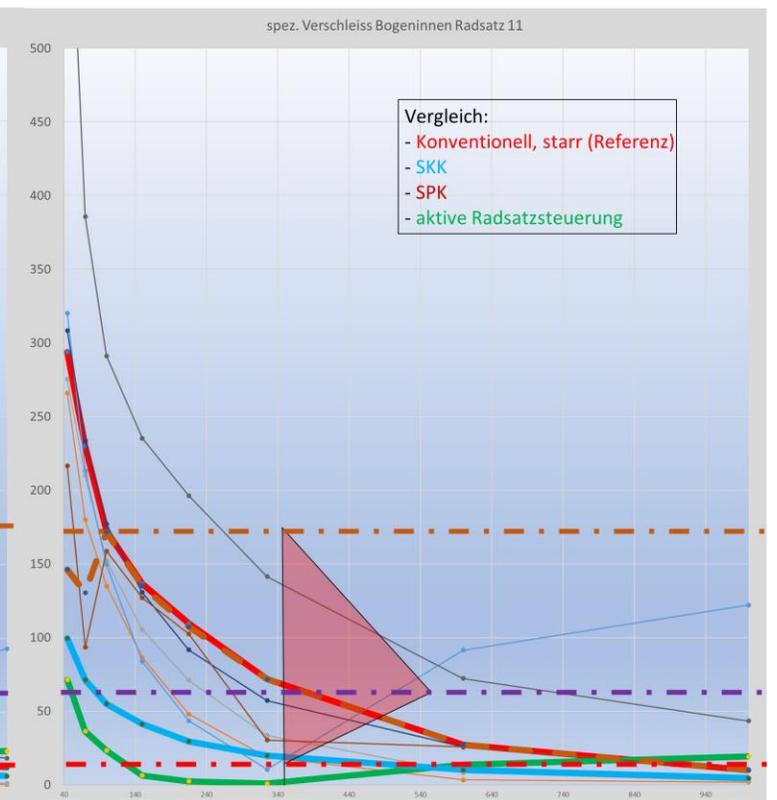
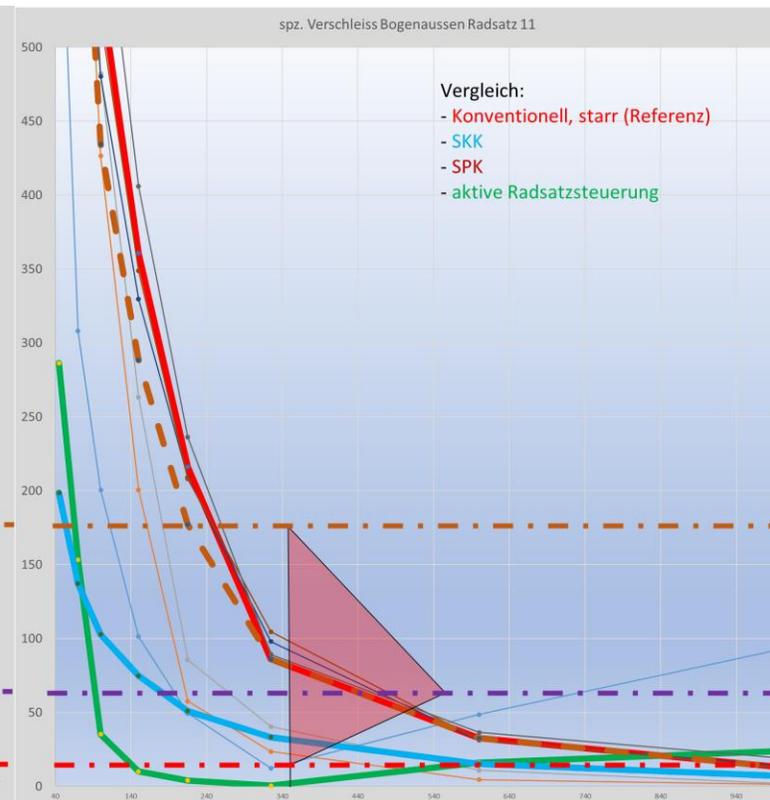
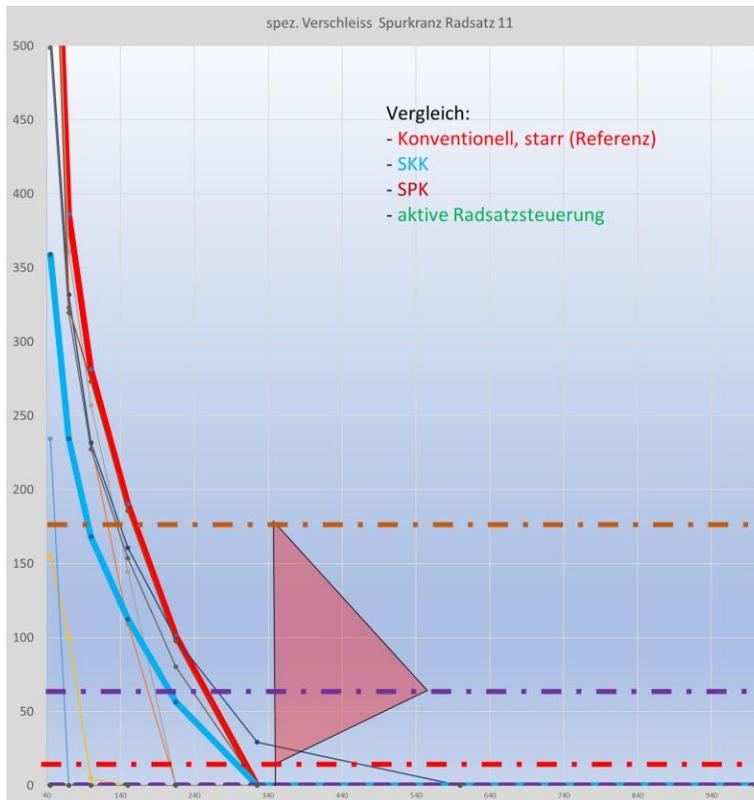
Ergebnisse zur Empfindlichkeit

Vergleich anhand RBS-Worbla Triebdrehgestell

☐ Spurkranzverschleiss

Ganzes Rad, Bogenausssen

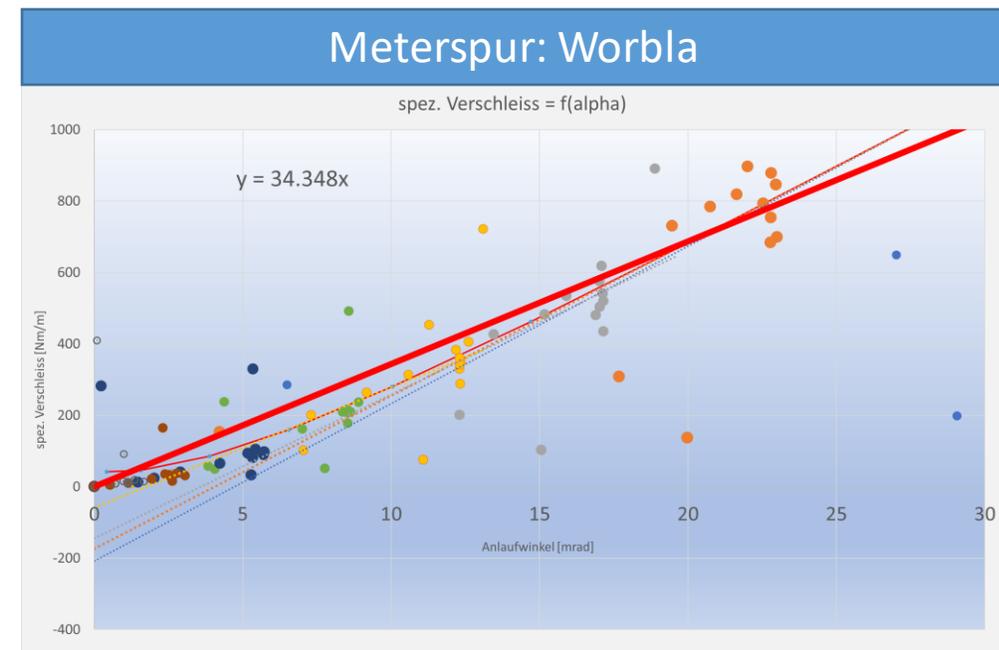
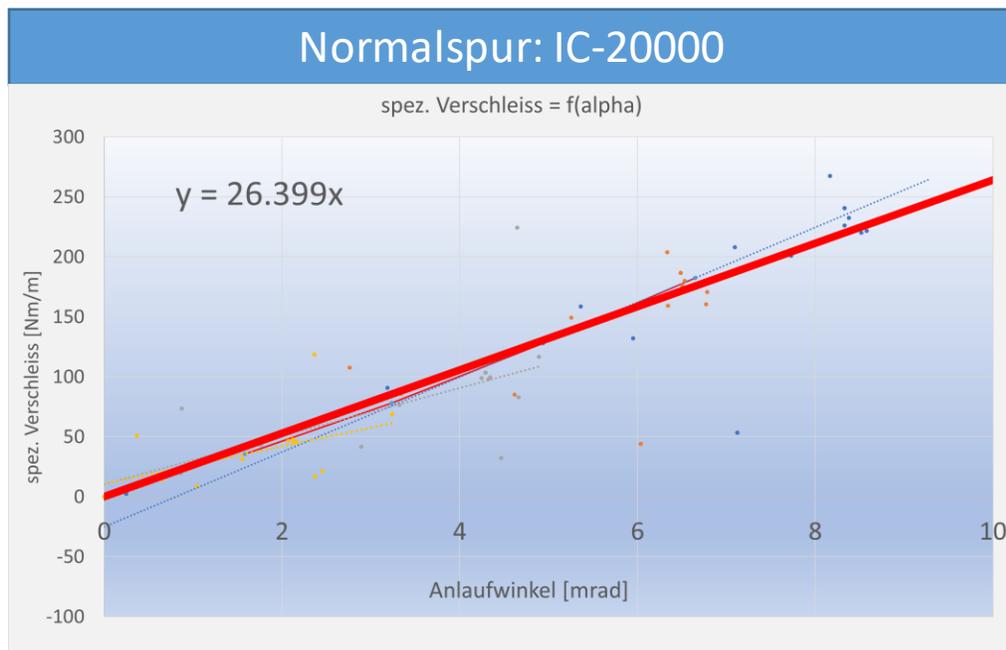
Bogeninnen



Ergebnisse zur Empfindlichkeit

Spez. Verschleiss in Funktion des Anlaufwinkels

- ❑ Spez. Verschleisswerte nehmen zwischen ca. 26 und 34 Nm/m und pro mrad Anlaufwinkel zu
 - ❑ Der Verlauf ist für beide Fahrzeuge annähernd linear
- ❑ Bereits bei ca. 2 mrad Anlaufwinkel besteht das grösste Schädigungspotential von Rollkontaktermüdung (RCF)



FIMO-Analyse-Tool

Selektion der Fahrzeug-Konfigurationen und Bahnen

Auswahl der Bahn, Fahrzeuge und Lösungsansätze

Mit Hilfe der Auswahlkriterien in den untenstehenden Boxen können praktisch alle möglichen Kombinationen ausgewertet und miteinander verglichen werden.
 In den Boxen sind nur Bahnen, Fahrzeuge und Optionen angezeigt, welche bereits gerechnet wurden und deren Daten vorhanden sind.
 Nach Auswahl der Fahrzeuge und Lösungsansätze muss noch das Referenzfahrzeug mit den entsprechenden Optionen bestimmt werden.

Wähle von links nach rechts die gewünschten Konfigurationen.
 Es sind maximal 24 Kombinationen möglich!

Bahn		Referenz-Fahrzeuge						
1 Bahn		max. 2 Fahrzeuge		max. 4 Optionen				
Bahn	Typ	Zug_name	Zug-Bez	Länge	Option	LA_h	Skij	ny_tr
<input checked="" type="radio"/> RBS	<input type="checkbox"/> Ref_1	WORBLA	Be4_10	60	<input type="checkbox"/> 1	steif	none	0
<input type="radio"/> RhB	<input type="checkbox"/> Ref_2	NEXT			<input type="checkbox"/> 2	SKS-SKK	SKS-SKK	0
<input type="radio"/> MVR	<input type="checkbox"/> Ref_3	RTZ			<input type="checkbox"/> 3	steif	none	1.5
<input type="radio"/> MOB	<input type="checkbox"/> Ref_4	ZTZ			<input type="checkbox"/> 4	steif	none	4
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_5	AGZ			<input type="checkbox"/> 5	SKS-SKK	SKS-SKK	1.5
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_6	SURF			<input type="checkbox"/> 6	SKS-SKK	SKS-SKK	4
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_7	Goldenpass Pan			<input type="checkbox"/> 7	Cx-act	none	0
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_8	GPX			<input type="checkbox"/> 8	ADD	none	0
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_9				<input type="checkbox"/> 9			
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_10				<input type="checkbox"/> 10	Cx-act	none	1.5
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_11				<input type="checkbox"/> 11	ADD	none	1.5
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_12				<input type="checkbox"/> 12			
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_13				<input type="checkbox"/> 13	Cx-act	none	4
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_14				<input type="checkbox"/> 14	ADD	none	4
<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> Ref_15				<input type="checkbox"/> 15			

Generische Fahrzeuge								
max. 4 Fahrzeuge		max. 4 Optionen						
Bahn	Typ	Zug_name	Zug-Bez	Länge	Option	LA_h	Skij	ny_tr
<input type="checkbox"/> Generic	1	LBS_1	RDF	60	<input type="checkbox"/> 1	steif	none	0
<input type="checkbox"/> Generic	2				<input type="checkbox"/> 2	SKS-SKK	SKS-SKK	0
<input type="checkbox"/> Generic	3				<input type="checkbox"/> 3	steif	none	1.5
<input type="checkbox"/> Generic	4				<input type="checkbox"/> 4	steif	none	4
<input type="checkbox"/> Generic	5				<input type="checkbox"/> 5	SKS-SKK	SKS-SKK	1.5
<input type="checkbox"/> Generic	6				<input type="checkbox"/> 6	SKS-SKK	SKS-SKK	4
<input type="checkbox"/> Generic	7				<input type="checkbox"/> 7	Cx-act	none	0
<input type="checkbox"/> Generic	8	TZ_3	Typ-3	60	<input type="checkbox"/> 8	ADD	none	0
<input type="checkbox"/> Generic	9				<input type="checkbox"/> 9			
<input type="checkbox"/> Generic	10	LBS_4	RDF	120	<input type="checkbox"/> 10	Cx-act	none	1.5
<input type="checkbox"/> Generic	11				<input type="checkbox"/> 11	ADD	none	1.5
<input type="checkbox"/> Generic	12				<input type="checkbox"/> 12			
<input type="checkbox"/> Generic	13				<input type="checkbox"/> 13	Cx-act	none	4
<input type="checkbox"/> Generic	14				<input type="checkbox"/> 14	ADD	none	4
<input type="checkbox"/> Generic	15				<input type="checkbox"/> 15			

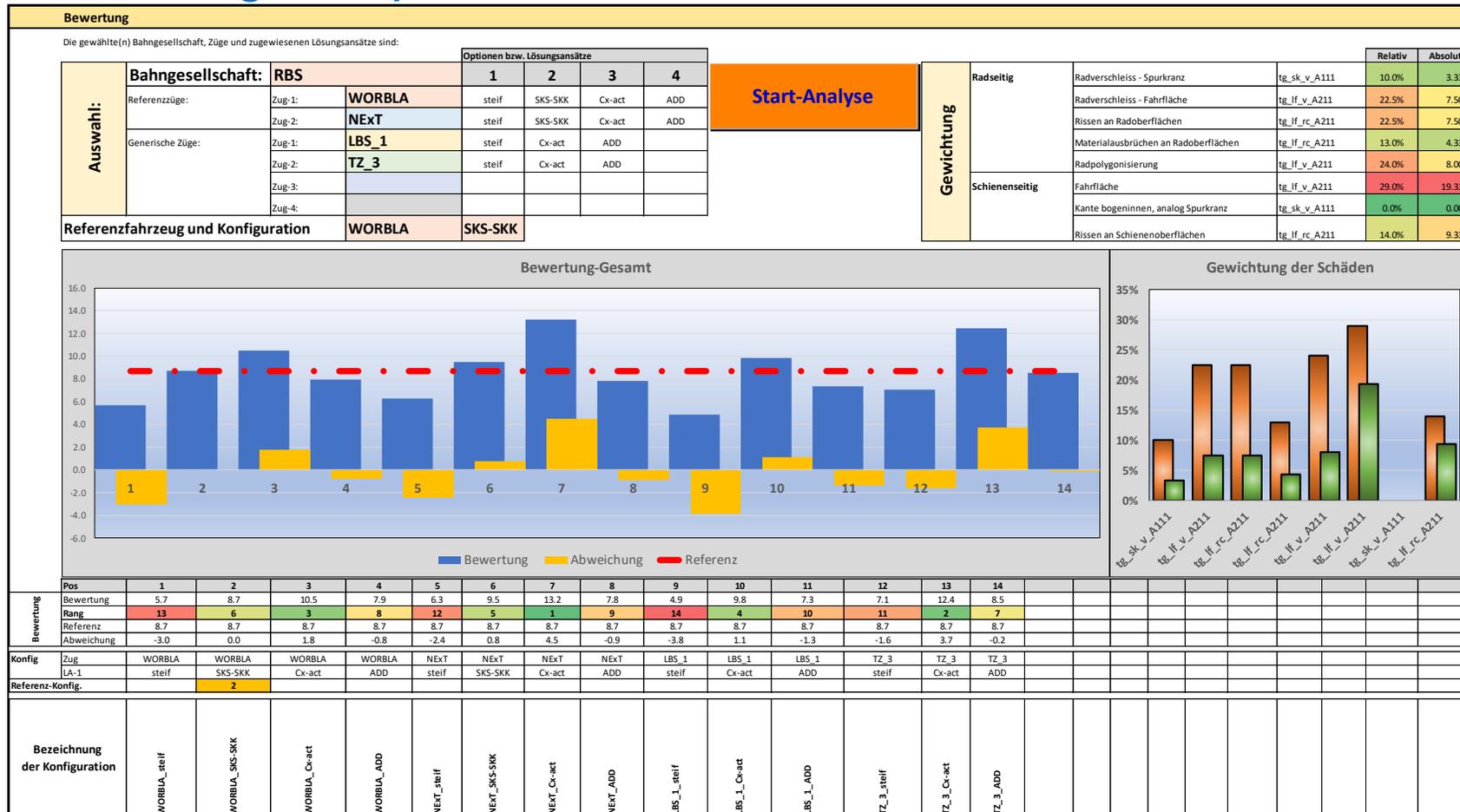
'Bestimmung des Referenzfahrzeugs mit der entsprechenden Option bzw. Konfiguration (aus Auswahl):

Typ	Zug_name	Zug-Bez	Länge	Option	LA_h	Skij	ny_tr
Ref_1	WORBLA	Be4_10	60	2	SKS-SKK	SKS-SKK	0
Ref_2	NEXT			3	steif	none	1.5
Ref_3	RTZ			4	steif	none	4
Ref_4	ZTZ			5	SKS-SKK	SKS-SKK	1.5
Ref_5	AGZ			6	SKS-SKK	SKS-SKK	4
Ref_6	SURF			7	Cx-act	none	0

* Legende der Abkürzungen, siehe unten

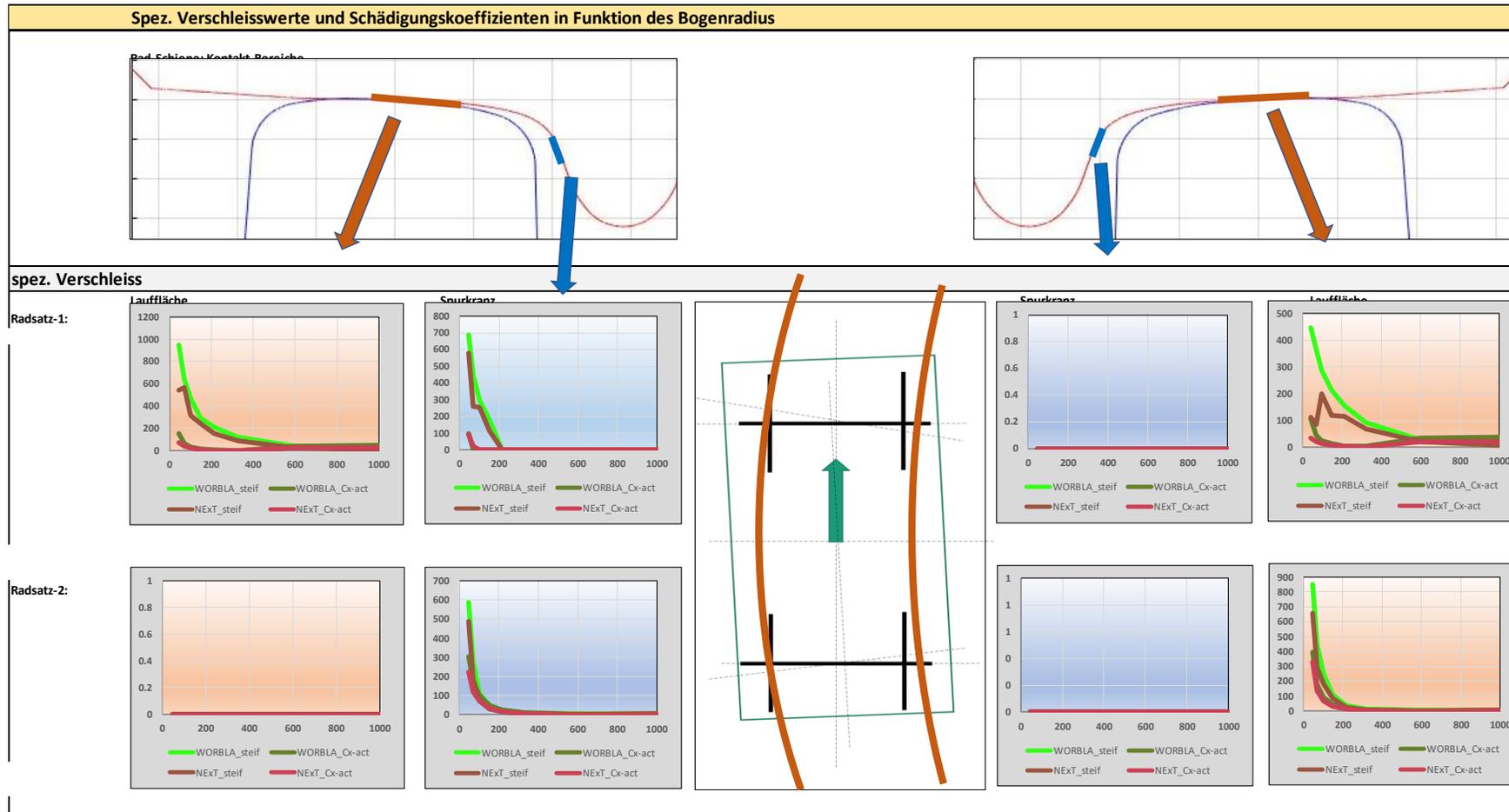
FIMO-Analyse-Tool

Bewertungsbeispiel



FIMO-Analyse-Tool

Beispiel Verschleiss



FIMO-Analyse-Tool

Stand der Entwicklung

- Der Prozess ist vollständig programmiert
- Es wurden 1808 Berechnungen durchgeführt
- Folgende Varianten sind noch nicht geprüft bzw. laufen noch nicht korrekt
 - GGA gegenseitig gesteuerte Achsen
 - Traktionsregelung
 - ADD Aktiver Schlingerdämpfer (nur provisorische Resultate)
 - Hangabtrieb, sehr niedrige Geschwindigkeit
 - Radprofil-Kombination mit hohem ΔR
- Das Modell muss noch optimiert werden, um die teilweise extremen, physikalischen Verhältnisse der Meterspur robuster zu bewältigen (Entgleisungen sollen nicht zu Abbruch führen)

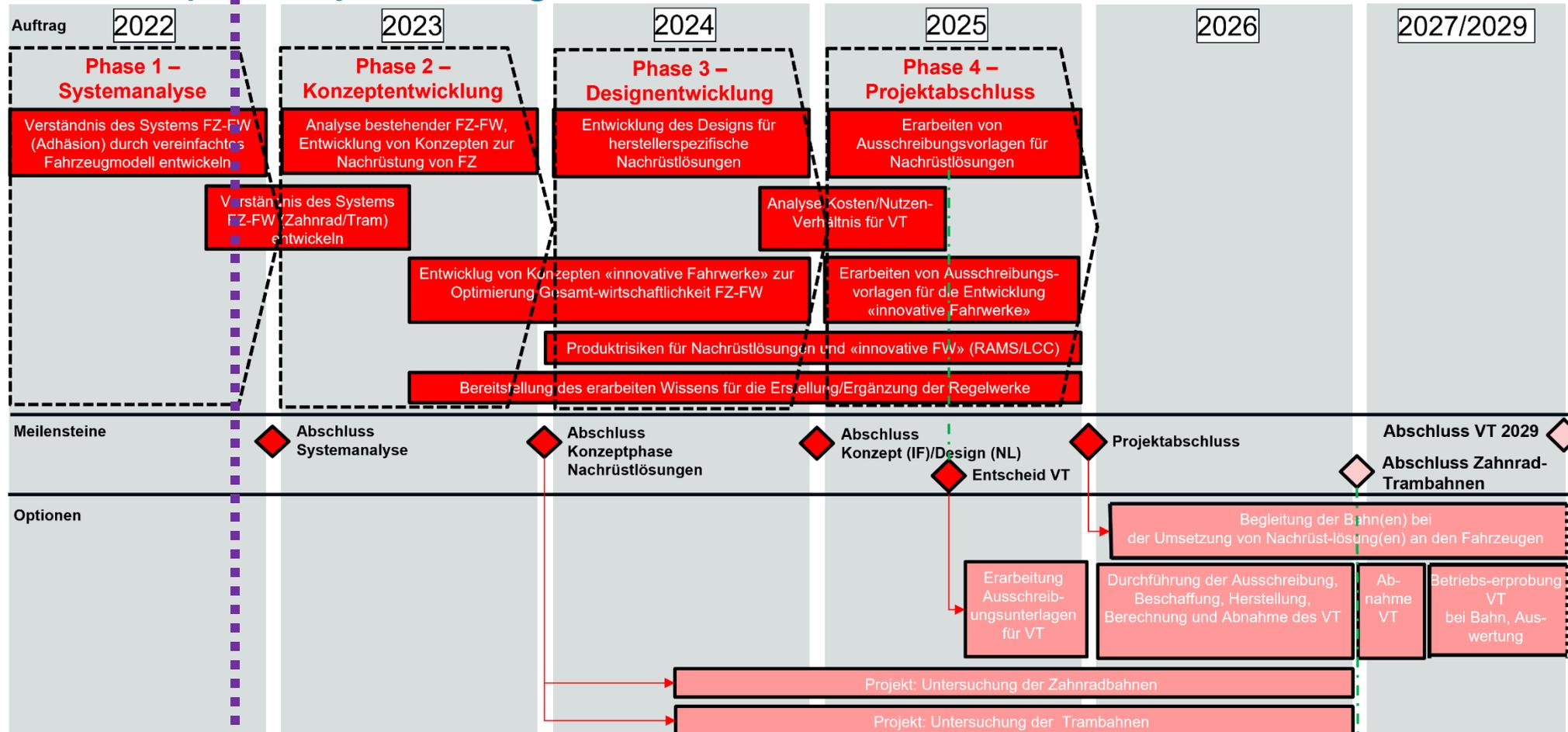
Weiteres Vorgehen

Systemanalyse FIMO

- Prüfung der Berechnungen und des gesamten Prozesses
- Berechnungen für weitere Zugkonzepte
- Beauftragung Gutachten durch externes Institut
- Erweiterung der Datenbanken der Streckendaten
- Optimierung des Modells
- «Meterspurisierung» verschiedener Elemente (Rad/Schiene, Gleisgeometrie, Querbeschl., etc.)
- Workshop mit Bahnvertretern aus Kernteam-P5 – Rollout FIMO-Tool (Beta Version)
 - Schulung
 - Erste bahnspezifische Bewertungen
 - Input für weitere Optimierung des FIMO-Tools
- Weitere Aktivitäten entsprechend Projektantrag P5

Projekt P5

Roadmap - Projektantrag



Projekt P5

Diskussion mit BAV

- Rückmeldungen/ Inputs zur Systemanalyse FIMO
 - Analysen, Vergleiche mit speziellem Interesse des BAV
 - Nachhaltige Nutzung FIMO-Tool für «meterspur»-Bahnen
 - Weitere Anwendungen FIMO-Tool

- Optionen
 - Untersuchung Zahnradbahnen
 - Untersuchung Trambahnen

- Anpassung Projektantrag P5 (Roadmap Projektantrag)
 - Antrag in Bearbeitung

Herzlichen Dank!

