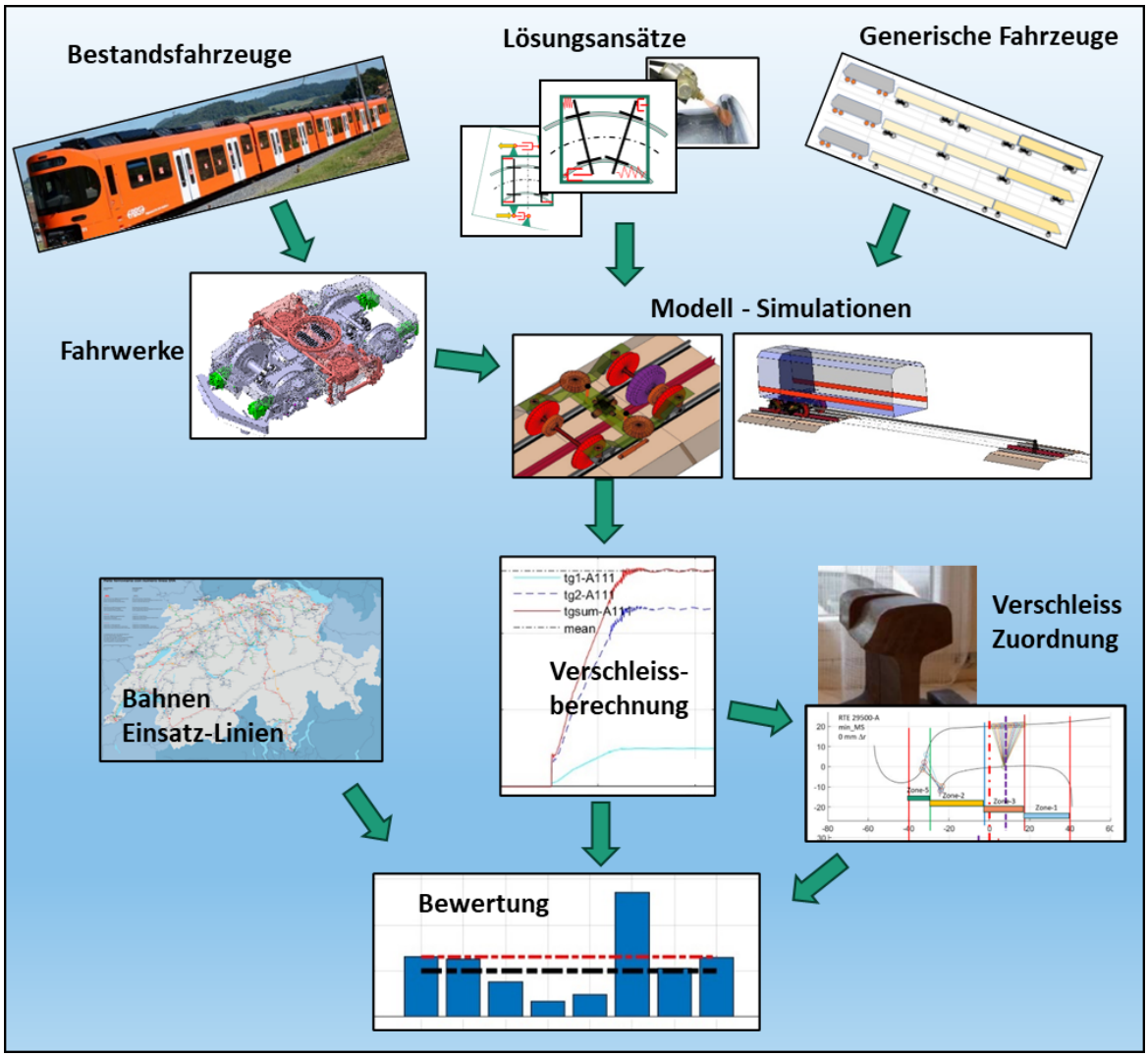
FIMO LO-1.4 Konzeptionelle Bewertung

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur
Projekt: 5 Fahrzeuge
Phase 1: Systemanalyse «FIMO»

Technischer Bericht



ID: **RAILPlusSF-00021**

Datum / Status:	08.11.2023 / Freigegeben	Seitenanzahl 85
Verfasser:	Richard Schneider / RS Engineering AG	
Geprüft:	Roland Müller / Gleislauftechnik Müller Meier Bruno / Stadler Rail AG Bianchi Alessandro / RhB Häni Claudio / RBS	
Freigegeben:	Claudio Häni / RBS	

Zitierweise: Schneider Richard, RAILplus / RSE: Inhaber: Technischer Bericht, **RAILPlusSF-00021**, 22.11.2023

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	28.08.2023	R. Schneider	Erster Entwurf
0.2	18.09.2023	R. Schneider	Bereinigter Entwurf und inhaltliche Freigabe durch PL
0.3	22.09.2023	R. Schneider	Bericht redigiert und finalisiert
1.0	27.09.2023	C. Häni	Formale Schlussbereinigung durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	28.09.2023
1.0	Management Board	19.10.2023

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Abkürzungsverzeichnis

Bereich	Abkürzung	Bezeichnung
Zug-Daten	EMU	Electrical-Multiple-Unit (Triebzug)
	RDF	Radsatz-Doppel-Fahrwerk
	RDF-J	Radsatz-Doppel-Fahrwerk, Jakobs Bauart
	RDF_Z	Radsatz-Doppel-Fahrwerk mit Zahnrad
	REF	Radsatz-Einzel-Fahrwerk
	K	Konventionelle Anordnung der Fahrwerke (zwei Fahrwerke pro Wagenkasten)
	J	Jakobs Anordnung des DG im Fahrzeug
	AM	Zug mit Antriebs-Modul (GTW-Konzept), generische Züge
	AMZ	Zug mit Antriebs-Modul (GTW-Konzept), Bestandsfahrzeuge
	LBS	Lokbespannter Zug, generische Züge
	LBZ	Lokbespannter Zug, Bestandsfahrzeuge
	TZ	Triebzug (EMU)
	2Qo	Radsatzlast
	2ak	Radstand im Fahrwerk
	Dw	Raddurchmesser
	Cx+	Steifigkeit der Radsatzführung in X-Richtung pro Radsatzlager
	dx+	Deformation der Radsatzführung in X-Richtung pro Radsatzlager
	Ct	Torsionssteifigkeit der Radsatzwelle
Rad-Schiene	Δr	Delta-r: Rollradien-Differenz zwischen den Rädern eines Radsatzes
	tan-γ	Tangens des Gradienten der Kontaktfläche
	RCF	Rolling-Contact-Fatigue (Rollkontakt Ermüdung)
	TAC	«Track-Access-Charges» bzw. Trassenpreismodell
Systeme (Lösungsansätze)	steif	Steife Radsatzführung
	elastisch	Elastische Radsatzführung
	GGA	Gegenseitig-Gesteuerte-Achsen (Querkoppelung, Kreuzanker) ohne /mit SKS
	ADD	Aktiver-Dreh-Dämpfer mit/ohne SKS
	aktiv	Aktive Radsatz-Steuerung
	HALL-Lager	Hydraulisches Achslenkerlager mit frequenzabhängiger Längssteifigkeit
	SKS	Spurkranzschmierung
	SKK	Schienenkopf Konditionierung
	Cx-Hall	Hydraulisches Achslenkerlager mit frequenzabhängiger Längssteifigkeit ohne SKS
	Cx-Hall-SKS	Hydraulisches Achslenkerlager mit frequenzabhängiger Längssteifigkeit mit SKS
	GGA-SKS	Gegenseitig-Gesteuerte-Achsen (Querkoppelung, Kreuzanker) mit SKS
	ADD-SKS	Aktiver-Dreh-Dämpfer mit SKS
	Cx-act-05-SKS	Aktive Radsatz-Steuerung mit 50% Steuerung und mit SKS
	Cx-act-025-SKS	Aktive Radsatz-Steuerung mit 25% Steuerung und mit SKS
	Cx-act	Aktive Radsatz-Steuerung mit 100% Steuerung, ohne SKS
	Cx-act-075	Aktive Radsatz-Steuerung mit 75% Steuerung, ohne SKS

Bereich	Abkürzung	Bezeichnung
Bahnen	AB	Appenzeller Bahnen
	FB	Forchbahn
	FW	Frauenfeld-Wil-Bahn
	GGB	Gornergrat Bahn
	MGB	Matterhorn Gotthard Bah
	MVR	Transports Montreux-Vevey-Riviera
	MOB	Montreux-Berner Oberland Bahn
	RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn
	RhB	Rhätische Bahn
	zb	Zentralbahn
	TPF	Transports Publics Fribourgeois
	TMR	Transports de Martigny et Régions
	SBB	Schweizerische Bundesbahnen
Andere	FIMO	Fahrzeug-Fahrweg Interaktion Meterspur Optimierung
	FZ	Fahrzeug
	FW	Fahrwerk
	RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn
	BAV	Bundesamt für Verkehr
	LCC	Life Cycle Costs
	MKS	Mehr-Körper-System der Modellierung für die Simulation
	DGL-System	Differentialgleichungssystem
	WK	Wagenkasten
	RS	Radsatz
	QFD	Quality Function Deployment
	mrad	Winkelmass in Milliradiant
	EN	Europäische Norm
	T-Kraft	Tangentialkraft
	Tx-Kraft	Kraft am Rad in X-Richtung
	MDG	Motordrehgestell
	LDG	Laufdrehgestell
	PID-Regler	Proportional-Integral-Differential Regler
	ZV-Diagramm	Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm
	RSI	Radial-Stellungs-Index
	SP	Simpack (kommerzielle MKS Software, Industriestandard)

Glossar

Begriff	Beschreibung
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
Bestandsfahrzeuge	Fahrzeuge, die im Einsatz bei den Meterspurbahnen sind
Generische Fahrzeuge	Fahrzeuge, die auf der Grundlage von Funktionalität und Betrieb konzipiert werden können

Begriff	Beschreibung
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
Äquivalente Konizität	Theoretische Kegelneigung des Radprofils, welche den sog. Sinuslauf des Radsatzes repräsentiert.
Kinematisches Rollen	Abrollen eines Radsatzes unter Einfluss äusserer Kräfte wie z.B. aus der Querbeschleunigung des Fahrzeugs, etc.
Anfahrbeschleunigung	Beschleunigung infolge Zugkraft (in der Ebene)
Quasistatischer Bogenlauf	Fahrt im Bogen mit konstantem Radius und konstanter Geschwindigkeit
Kurzzeit-Verschleiss	Verschleiss-Effekte, welche unmittelbar zu einem Materialabtrag führen
Langzeit-Verschleiss	Periodische Verschleiss-Effekte, welche über längere Einwirkungszeit zu entsprechenden, periodischen Schienenfehlern führen
Schädigungsgesetze nach Burstow	Von Burstow entwickelte Gesetze für den Verschleiss sowie die Rollkontaktermüdung, welche in den meisten Trassenpreismodellen Anwendung finden
PJM	Firma PJM in Graz: International renommierter System-Spezialist für den Schienenverkehr
Riffel	Riffel sind kurzwellige Fahrbahnunebenheiten mit geringer Tiefe (< 0,4 mm), die wellenförmig aussehen und aufgrund von Schlupfereignissen durch plastische Verformung des Schienenmaterials entstehen
Schlupfwellen	Schlupfwellen oder kurze Wellen sind periodische Oberflächenunebenheiten mit Längen von 5 bis 30 cm und einer Tiefe von 0,1–1 mm
Thermische Schäden	Schädigungen am Material, welche durch kurzzeitige, lokale Überhitzung entstehen wie z.B. Risse und/oder Ausbröckelungen
Wear	Verschleiss

Management Summary

FIMO ist eine Methode beziehungsweise ein Verfahren zur Analyse und Optimierung der Interaktion von Fahrzeug-Fahrweg. Der Begriff FIMO bedeutet:

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

Zur Analyse des Verhaltens bestehender und zukünftiger Fahrzeuge hat RSE mit Unterstützung weiterer Projekt-Teilnehmer ein Simulations- und Bewertungssystem entwickelt, mit welchem die komplexen Zusammenhänge der mechanischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg und Rad/Schiene sowie die sich daraus ergebenden vielfältigen Anforderungen systematisch analysiert und transparent dargestellt werden können.

Die evaluierten Lösungen sollen den Verschleiss an Rad und Schiene mindestens in dem Umfang reduzieren, dass auf keinen Fall mehr eine Schienenkopf-Konditionierung (SKK) notwendig sein wird und falls möglich, sogar auf eine Spurkranzschmierung (SKS) verzichtet werden könnte. Auf SKS kann unter Umständen wegen des Nachweises der Entgleisungssicherheit nach AB-EBV 54.1 ohnehin nicht verzichtet werden.

Da für den Rad-Schienen Bereich vereinfachte Modellierungen grundsätzlich ungeeignet sind, wurde ein vollständig 3-dimensionales Fahrzeugmodell [1], inkl. 2-Punkt Berührung und Vorverlagerung des Spurkranzkontaktes im Rad-Schienen Kontakt entwickelt, mit welchem das Verschleiss- und Schädigungsverhalten des Rades durch den Kontakt Rad/Schiene mit allen möglichen Zugskonzepten und Lösungsansätzen berechnet werden kann. Das Modell wurde mittels Vergleichsrechnungen mit Simpack verifiziert [9]. Die Verifikation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen mit den beiden Systemen Simpack und FIMO.

Die Qualität des Modells kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Modell entspricht dem Stand der Technik
- Der Rad-Schienen Kontakt ist sehr detailliert und kann als gleichwertig mit dem «*Equivalent Elastic Contact*» in Simpack angesehen werden.
- Das Modell liefert qualitativ wie quantitativ zuverlässige Ergebnisse

Neben den eigentlichen Berechnungen und Bewertungen muss bei der bestehenden Vielfalt an Varianten und Optionen eine stufenweise Eingrenzung durchgeführt werden, um einerseits den Aufwand zu begrenzen und andererseits eine Übersicht und Transparenz zu ermöglichen. Die Vielfalt und Komplexität lassen sich aus den folgenden Kennzahlen erkennen:

Einsatz-Linien:	43	von 12 Bahnen, davon 36 Adhäsion, 7 Adhäsion-Zahnrad, gemischt
Anzahl Züge:	28	von 8 Bahnen mit 16 Bestandsfahrzeugen und 12 generischen Zügen
Anzahl Fahrwerke:	74	davon 60 für Adhäsion und 14 für Zahnrad
Varianten:	11	von Spurkranzschmierung bis zur aktiven Radsatzsteuerung
Empfindlichkeiten:	9	mit 3 Rad/Schienenprofilen und 3 Traktionsniveaus
Bogenradien:	8	Radien-Klassen

Ohne entsprechende Reduktion der Varianten bei den Berechnungen, würde dies zu über 55'000 Berechnungen für über 2700 Varianten führen. Bei der Reduktion der Varianten wurde speziell darauf geachtet, dass keine, auch noch so utopisch anmutende Lösung, einfach übergangen wurde, aber auch nicht unnötig Zeit für Lösungen aufgewendet wurde, welche offensichtlich kein erfolgversprechendes Potential aufweisen.

Aus der ersten Untersuchung zur Analyse der Empfindlichkeit sowie Eingrenzung der Varianten können folgende Schlüsse gezogen werden:

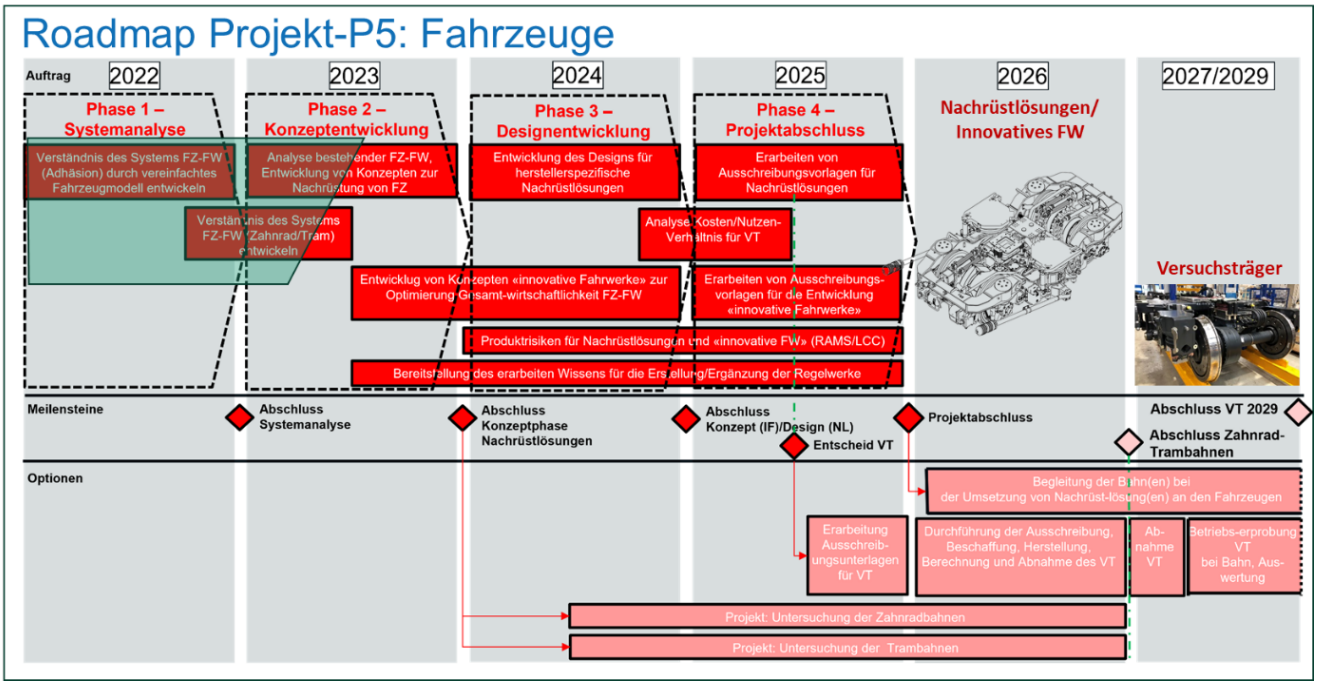
1. Für einen verschleissarmen Einsatz ist ein verschleissangepasstes Radprofil erforderlich.
2. Einer der massgebenden Parameter für das Verschleiss-Niveau eines Zuges mit konventionellen Fahrwerken kann das Produkt aus «Radsatzlast * Radstand» der Fahrwerke des betroffenen Zuges ermittelt werden.
3. Da die Radsatzlast schwierig zu reduzieren ist, ist bei neuen Fahrzeugen, unabhängig vom Zugskonzept, auf möglichst kurze Radstände bei den Fahrwerken zu achten (bei Zahnrad-Fahrzeugen ggf. nur beschränkt möglich).
4. Das Zugskonzept beeinflusst den Einbauraum sowie die Auflast auf die Fahrwerke und damit die Radsatzlast.
5. Ein nicht Verschleiss angepasstes Radprofil mit ungenügendem Δr (delta-r), kann weder durch irgendein Fahrwerk-Konzept noch durch eine aktive Radsatzsteuerung oder Traktionsregelung kompensiert werden.
6. Bei nicht vollständiger Radialeinstellung der Radsätze, also auch bei einer aktiven Radsatzsteuerung mit reduzierter Steuerung, ist weiterhin der Einsatz der Spurkranzschmierung erforderlich.
7. In Abhängigkeit der Grösse der Bogenhalbmesser (Bogenverteilungen), sind unterschiedliche Steuer-Mechanismen der Radsätze in den Fahrwerken notwendig.
   7.1. Die entsprechenden Bogenradien-Bereiche für die Anwendbarkeit der verschiedenen Steuer-Mechanismen werden in Forschungsarbeiten der Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug/Fahrweg erarbeitet.
   7.2. Der Einsatz der verschiedenen Steuer-Mechanismen für Nachrüst-Lösungen werden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie im Projekt P5 erarbeitet.
   7.3. Für Neubaufahrzeuge wird die Entwicklung «Innovativer Fahrwerke» in einer separaten Studie vertieft geprüft.
   7.4. Für die Verschleissbeurteilung wurden die Einsatz-Linien der Bahnen in 4 Bogenradien-Kategorien mit unterschiedlichen Bogenradien-Klassen eingeteilt. Diese bilden die entsprechenden Häufigkeiten in den vier Kategorien «sehr kleinen», «kleinen», «mittleren» und «grossen» Bogenhalbmessern ab.
8. Eine gute Radialeinstellung der Radsätze minimiert zusätzlich das Kurven-Kreischen sowie die Bildung von Schlupfwellen und Rad-Unrundheiten. Damit können allfällige Radschallabsorber entfallen. Diese Themen werden in den Projekten P3/P4 vertieft behandelt.
9. Bei hohen Schlupf-Geschwindigkeiten von über ca. 3 km/h steigt der Verschleiss am Rad stark an. Für den Fall eines häufigen Betriebes in solchen Zuständen, ist eine Traktionsregelung mit niedrigem Schlupf und wirksamem Schleuderschutz zu empfehlen. Schleuderstellen werden mit diesem Vorgehen automatisch eliminiert.
10. Bei Bogenradien kleiner ca. 200 m stossen passive Radsatzführungssysteme an ihre physikalischen Grenzen, unabhängig vom Radprofil.
11. Beim Zahnradbetrieb entsteht infolge der niedrigeren Geschwindigkeit sowie niedrigeren Querbeschleunigung ein geringerer Verschleiss am Spurkranz und der Lauffläche, das Risiko der Rissbildung steigt an.

Für eine detaillierte Bewertung, sowie vor einer Systementscheidung, sollen weiterhin Experten zur bahnspezifischen Beurteilung beigezogen werden.

Der FIMO-Prozess bietet zusätzliches Analyse- und Optimierungspotential in folgenden Bereichen an:

1. Unterstützung der Entwicklung von Lösungen zur Nachrüstung bestehender Fahrzeuge
2. Unterstützung der Evaluation von Fahrzeugen für die Neubeschaffung
3. Abschätzung der zu erwartenden Reprofilierung-Intervalle der vorgeschlagenen Lösungen auf Basis von Betriebserfahrungen
4. Inputs für die Entwicklung geeigneter Radprofile
5. Inputs für die Bewertung des Verschleissverhaltens der Schiene (z.B. Reduktion der Schlupfwellen, Ermittlung individueller Verschleissgesetze)
6. Massgebende Indikatoren zur weiteren Analyse der Wirtschaftlichkeit im Projekt P6
7. Herleitung der Grundlagen für die Entwicklung eines sog. Innovativen Fahrwerks
8. Optimierung der Traktionsregelungen, sowie Analysen von Torsionsschwingungen an Radsatzwellen
9. Unterstützung bei der Auswahl von erfolgsversprechenden Lösungen zur detaillierten Analyse

Die Zuordnung dieses Berichts zum Projektplan P5 ist in folgender Roadmap mittels einer grünen Fläche markiert. Der vorliegende Bericht repräsentiert im Wesentlichen die Ergebnisse der Phase 1 und ist dementsprechend vorwiegend allgemein und nicht Bahn-Spezifisch (FIMO-Bewertung-1) gehalten.



In der Phase 2 (Konzeptentwicklung) wird eine Bahn-Spezifische Bewertung (FIMO-Bewertung 2) auf der Grundlage der Analysen aus der Phase 1 (Systemanalyse), sowie der Machbarkeitsstudie für Nachrüstlösungen erfolgen. Damit werden dann die erfolgversprechenden und realisierbaren Lösungen für die einzelnen Bahnen ermittelt und spezifiziert.

Inhalt

1 Einleitung ... 10
2 Zielsetzung ... 10
3 FIMO: Tool- und Modell-Beschreibung ... 11
3.1 Tool-Übersicht ... 11
3.2 Modellbeschreibung ... 14
3.3 Berührgeometrie Rad/Schiene ... 16
3.4 Schadenselemente und -mechanismen ... 20
3.5 Bewertungsmethodik ... 24
3.6 Verifikation des Modells ... 25
3.7 Geltungsbereich des Modells ... 28
4 Fahrzeuge, Lösungsansätze und Einsatzbereiche ... 29
4.1 Bestandsfahrzeuge ... 29
4.2 Generische Fahrzeuge ... 32
4.3 Systeme/Lösungsansätze ... 34
4.4 Bahnen, Einsatzbereiche ... 36
5 Analysen ... 38
5.1 Vorgehensweise ... 38
5.2 Analyse zur Reduktion der Varianten ... 39
5.2.1 Verschleiss & Rissfortschritt = f(a) (Anlaufwinkel) ... 39
5.2.2 Verschleiss- & Schädigungspotential der Lösungsansätze ... 50
5.2.3 Verschleiss- und Schädigungspotential der Zugskonzepte ... 58
5.3 Empfindlichkeitsanalyse ... 64
5.3.1 Berührgeometrie-Δr ... 64
5.3.2 Traktion ... 66
5.3.3 Verschiedene Parameter wie Radsatzlast, Radstand, Raddurchmesser & Losrad ... 70
5.4 Bewertung von Zahnrad-Fahrzeugen bzw. -Betrieb ... 72
5.5 Schlussfolgerungen ... 73
6 Zuordnung zum Projektplan ... 76
7 Ausblick ... 77
7.1 Bereich-1: Bewertung der Konzepte bzw. Lösungsansätze für die Nachrüstung ... 78
7.2 Bereich-2: Bewertung der Konzepte für die Neubeschaffung ... 78
7.3 Bereich-3: Input für P6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ... 78
7.3.1 Radsatzunterhalt ... 78
7.3.2 Informationen für den Gleisunterhalt ... 79
7.3.3 Zusätzlicher Nutzen bezüglich Lärm und Erschütterungen ... 81
7.4 Bereich-4: Unterstützung für P2 und P3 ... 81
8 Verzeichnisse ... 83
8.1 Referenzen ... 83
8.2 Abbildungen ... 83
8.3 Tabellen ... 85

1 Einleitung

Auf Grund der steigenden Leistungs- und Kapazitätsanforderungen wurden in den letzten Jahrzehnten vermehrt Triebzüge eingesetzt, welche systembedingt höhere Radsatzlasten aufweisen, und mit konventionellen Fahrwerken ausgerüstet sind. Hinzu kommt, dass die dafür notwendige Weiterentwicklung des Rad-Schienen Kontaktes im Meterspurbereich vernachlässigt wurde. Ein wesentlicher Teil der aktuellen Probleme mit der Schädigung der Räder und Gleise wird in diesem Systemwechsel vermutet. Mittels Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung wurden von vielen Bahnen grosse Anstrengungen unternommen, die Auswirkungen dieser Fahrzeuge auf Rad und Infrastruktur zu reduzieren. Das übergeordnete Ziel des Projektes soll jedoch sein, gleis- und radfreundliche Fahrzeuge und Fahrwerke zu definieren, mit welchen die Probleme bereits an der Wurzel gelöst werden und damit auf sekundäre Massnahmen verzichtet werden kann.

Zur Analyse des Verhaltens bestehender und zukünftiger Fahrzeuge wurde ein Simulations- und Bewertungssystem entwickelt, mit welchem die systemischen Zusammenhänge und vielfältigen Anforderungen systematisch analysiert und transparent dargestellt werden können.

In diesem Bericht werden alle realistisch einsetzbaren Züge, Fahrwerke und Lösungsansätze analysiert und eine erste, konzeptionelle Bewertung durchgeführt. Der Bericht entspricht dem Lieferobjekt LO-1.4 des Projektantrags P5 - Fahrzeuge.

2 Zielsetzung

Die übergeordneten Ziele für diese erste konzeptionelle Bewertung des Systems Interaktion Fahrzeug-Fahrweg Meterspur, sind im Projektantrag wie folgt formuliert:

- Empfehlungen für wirtschaftlich/interaktiv optimale Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Einsatzbedingungen bei den Bahnen zu erarbeiten
- Erarbeitung der Empfehlungen und allfällige Vorgaben für die Beschaffung neuer Fahrzeuge (FZ) insbesondere hinsichtlich lebenszyklusoptimierter Fahrwerke (FW) für die unterschiedlichen Einsatzzwecke
- Erarbeitung von lebenszyklusoptimierten Lösungen zur Sanierung/Erneuerung bei Fahrzeugen und Fahrwerken bestehender Fahrzeugflotten

Konkret sollen die erfolgversprechendsten Lösungen bzw. Fahrzeug-Konfigurationen für Bestandsfahrzeuge, Neubaufahrzeuge sowie für die verschiedenen Einsatzbereiche ermittelt werden.

Die Realisierbarkeit potenziell erfolgversprechender Lösungen soll dann in einem nächsten Schritt untersucht werden.

Die evaluierten Lösungen sollen den Verschleiss an Rad und Schiene sowie das Kurven-Kreischen mindestens in dem Umfang reduzieren, dass auf keinen Fall mehr eine Schienenkopf-Konditionierung (SKK) notwendig sein wird und falls möglich, auch auf eine Spurkranzschmierung (SKS) verzichtet werden könnte, vorbehältlich des Nachweises der Entgleisungssicherheit nach AB-EBV 54.1.

3 FIMO: Tool- und Modell-Beschreibung

FIMO ist eine Methode bzw. ein Verfahren zur Analyse und Optimierung der Interaktion von Fahrzeug-Fahrweg, ohne eine Eingrenzung auf das Fahrwerk vorzunehmen (gemäss Hinweis des Forschungs- und Innovationsausschuss BAV vom 26.1.2022). Der Begriff FIMO bedeutet:

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

3.1 Tool-Übersicht

Eine Übersicht über das gesamte Tool ist in den Abbildungen 1-4 zusammengefasst. *Abbildung 1* zeigt den gesamten Prozess auf, von den Zugskonzepten über die Lösungsansätze, Berechnungen und Bewertungen bis hin zur Verifikation und Schlussfolgerung. Dieser Bericht dokumentiert die Entwicklungsergebnisse bis hin zur 1. Bewertung, welche noch allgemein gehalten wird und noch nicht Bahn-Spezifisch erfolgt.

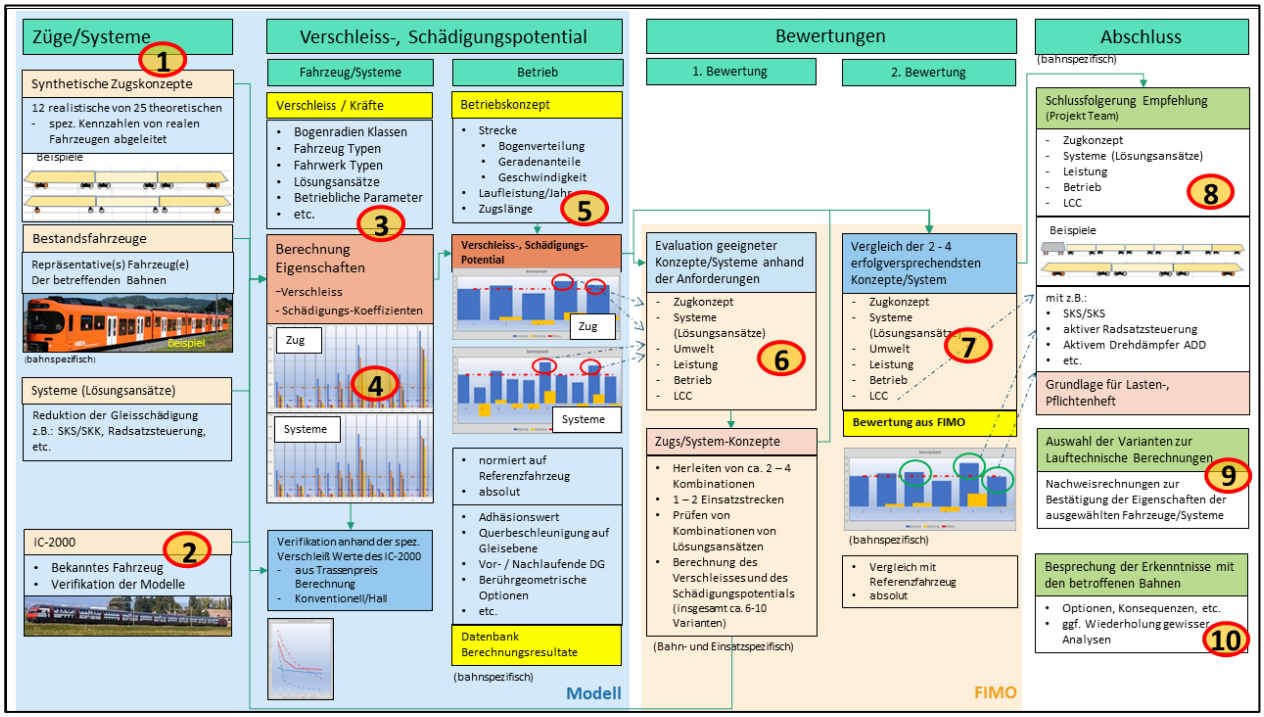


Abbildung 1: Prozess der FIMO-Analyse und Bewertung

Der Prozess beginnt mit der Definition der Fahrzeuge und Lösungsmöglichkeiten zur Reduktion von Verschleiss und Schädigungen (1). Neben den bestehenden Fahrzeugen (Bestandsfahrzeuge) werden alle realistisch einsetzbaren Zugskonzepte als sog. generische (synthetische) Zugskompositionen entwickelt. Alle Zugstypen werden mit praktisch allen Lösungsansätzen bzw. Systemen kombiniert. Für alle diese Varianten werden die Schädigungs- und Verschleisswerte (3) berechnet. Dazu wird ein detailliertes MKS-Modell verwendet, welches über Vergleichsrechnungen mit Simpack verifiziert wurde (2, 9). Damit kann das Verhalten der Züge sowie der Lösungsansätze in allen Bogenradien-Klassen analysiert werden (4). Unter Einbezug der Bogenverteilung der vorhandenen Linien kann eine linienbezogene Bewertung aller Varianten durchgeführt werden (5). Mittels einer ersten Bewertung werden 2 – 4 erfolgversprechende Lösungen für jede Bahngesellschaft evaluiert (6), welche danach detaillierter untersucht werden und einer zweiten Bewertung (7) zugeführt werden.

Daraus werden schliesslich Empfehlungen abgeleitet, welche bezüglich Zugskonzepte und Lösungsmöglichkeiten, die Eigenschaften im Betrieb aufzeigen, sowohl für Neubeschaffungen wie auch die Nachrüstung von bestehenden Fahrzeugen (8). Diese Erkenntnisse bilden zudem die Grundlage für die Lastenhefte zukünftiger Ausschreibungen.

Mittels Nachweisrechnungen mit detaillierteren MKS-Simulationsmodellen des gesamten Fahrzeugs sollen Eigenschaften und Leistungen der ausgewählten Lösungen rechnerisch nachgewiesen werden (9). Der gesamte Prozess findet auf Grund der Komplexität teilweise iterativ statt. Dies gilt vor allem für die Besprechung der Erkenntnisse (10) mit den Bahnen. Der frühzeitige und kontinuierliche Einbezug der Bahnen in den Prozess ist sehr wichtig, denn die Bahnen liefern wichtige Informationen und Erkenntnisse aus dem Betrieb, welche die Entwicklung des Prozesses unterstützen. Am Ende führt dies auch zu einer guten Akzeptanz der Ergebnisse und damit erst zum Erfolg des Projektes.

Eine Übersicht über die zu untersuchenden Varianten wie Zugskonzepte, Lösungsansätze und deren Kombinationen sowie der zu untersuchenden Empfindlichkeiten bezüglich Traktion und Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene sind in *Abbildung 2* gezeigt.

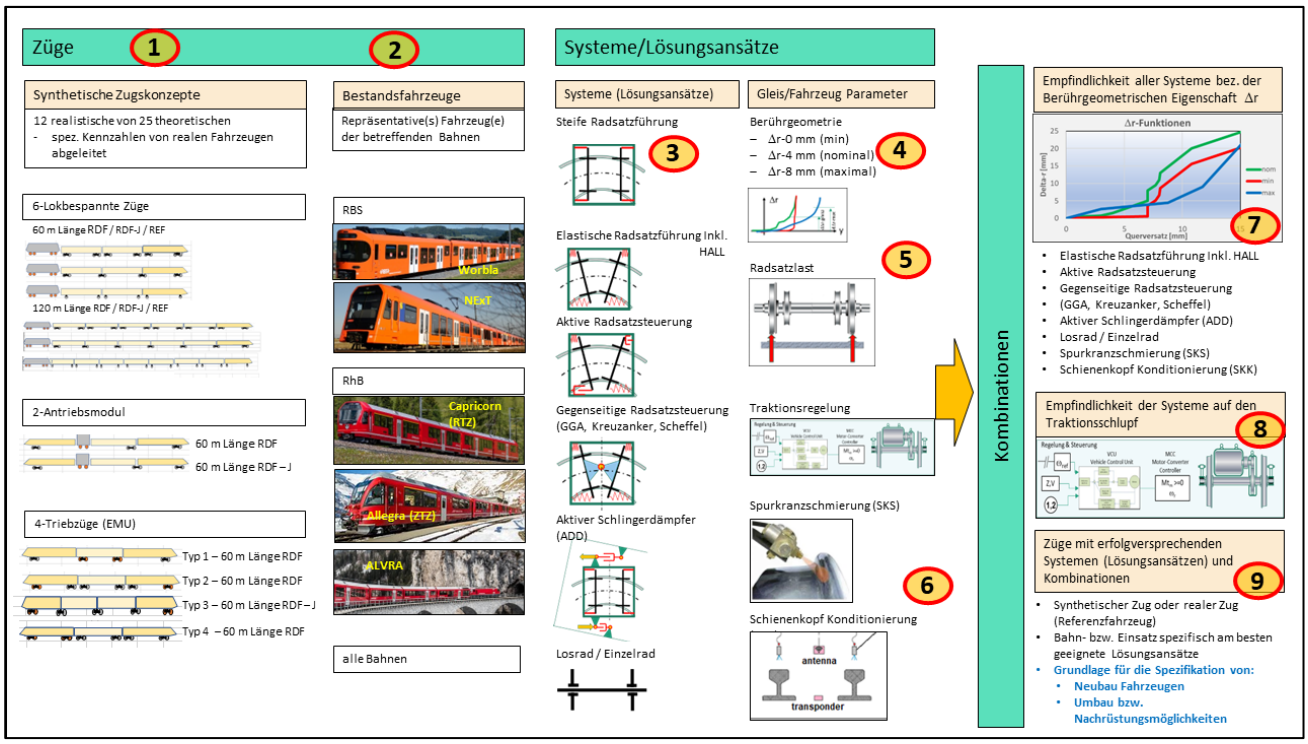


Abbildung 2: FIMO-Analyse: Varianten, Kombinationen und Empfindlichkeiten

Die verschiedenen Züge und Systeme bzw. Lösungsansätze werden in Kapitel 4 detaillierter beschrieben. Es sind insgesamt 12 generische (synthetische) Züge (1) und 16 Bestandsfahrzeuge (2), welche auf Grund der Verfügbarkeit von Daten, untersucht werden können. Diese Züge können theoretisch mit allen Lösungsansätzen kombiniert werden. Dies sind einerseits 6 mechanische Lösungsansätze der Radsatzführungen (3), die Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung (6) sowie die Radsatzlast als wichtiger Parameter eines Fahrwerks (5). Entscheidend für die Auswahl der Lösungsansätze wird jedoch auch deren Verhalten unter unterschiedlichen berührgeometrischen Verhältnissen (7), d.h., mit oder ohne Δr, sowie deren Abhängigkeit von Traktionskräften bzw. Traktionsschlupf (8).

Schliesslich können erfolgversprechende Lösungen, d.h., Kombinationen von Zügen und Lösungsansätzen sowohl für potenzielle Nachrüstungen bestehender Fahrzeuge als auch für die Neubeschaffung definiert werden.

Für die Durchführung der Analyse dieser grossen Variantenvielfalt, wurde ein spezielles Tool (FIMO) entwickelt.

Abbildung 3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau von FIMO bzw. dessen Elemente von den Datenbanken über die genutzte Software bis zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

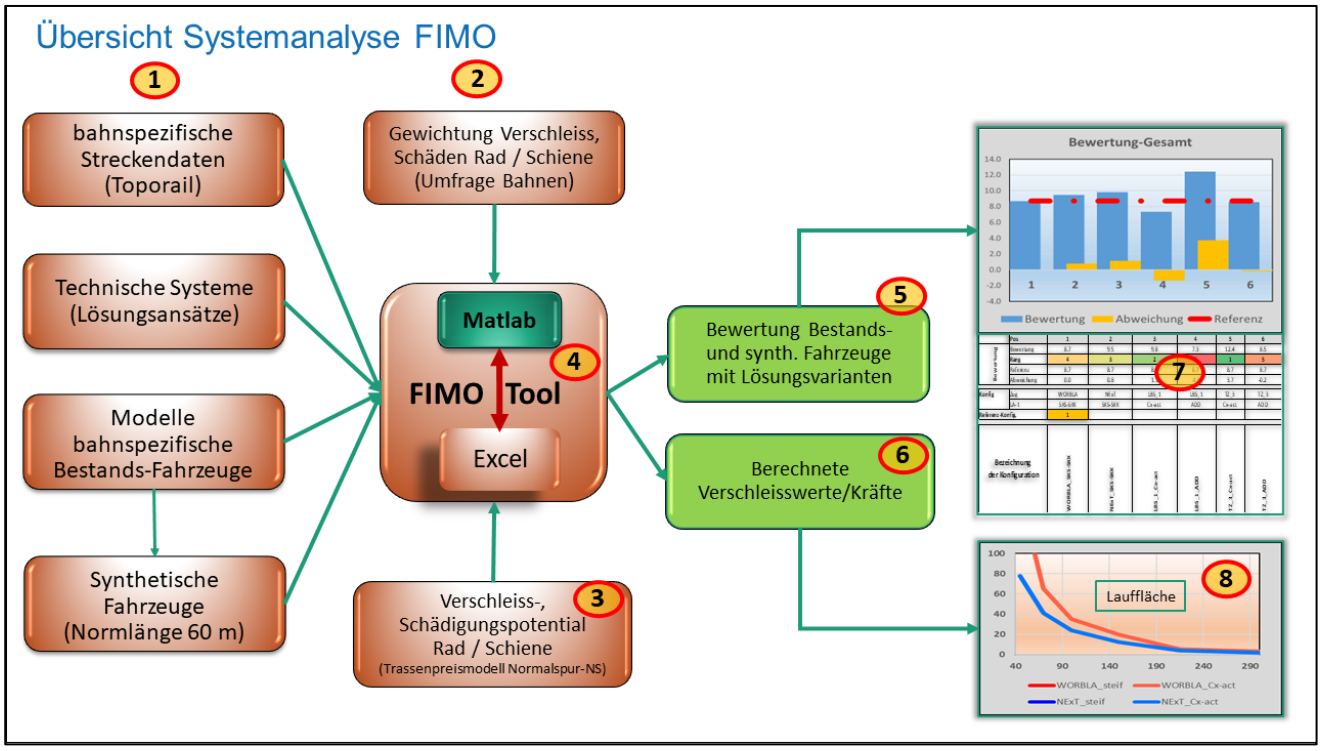


Abbildung 3: FIMO-Analyse: Datenbanken, Software, Resultate

Für alle technischen Daten (1) bestehen Datenbanken in Excel, welche die Grundlage für alle Berechnungen und Analysen bilden. Ebenso sind die Gewichtungen von Verschleiss und Schädigungen bei den verschiedenen Bahnen in einer Datenbank hinterlegt (2). Die Schädigungsgesetze (3) sind aus dem schweizerischen Trassenpreismodell der Normalspur [4] übernommen, es sind dies für den Verschleiss die spez. Reibarbeit und für Rollkontakt-Ermüdung (RCF) das Modell von Burstow. Die Simulation sowie der grösste Teil der Auswertungen findet in Matlab (4) statt. Es bestehen Schnittstellen zu Excel zur Steuerung der Simulationen, für den Daten-Import und -Export sowie gewisse Auswertungen in Excel (5-6). Es werden Datenbanken generiert, welche im Excel Bewertungs-Tool importiert werden und aus denen die entsprechenden Daten zur Visualisierung herausgelesen werden (7-8).

Abbildung 4 zeigt das Hauptmenü des Excel Bewertungstools [5]. Dies erlaubt allen Benutzern die Einsicht in alle Untersuchungsergebnisse und erlaubt zudem eigene Vergleiche und Bewertungen zu erstellen.

Unter (1) befinden sich insgesamt 7 Menü-Punkte, welche die Beschreibungen aller relevanten Themen des Tools beinhalten. Unter (2) können die Ergebnisse der Varianten und deren Empfindlichkeitsanalysen eingesehen werden. Unter (3) können detaillierte Resultate zu den verschiedenen Zügen und Fahrwerken ausgewählt werden. Unter (4) sind die Resultate der 1. Bewertung einsehbar. Für die 2. Bewertung sowie potenzielle, weitere Analysen sind bereits entsprechende Platzhalter (5) eingesetzt.

Die Analysen und Auswertungen, welche individuell- erstellt wurden, können in einer PDF-Datei für deren weitere Verwendung gespeichert werden (6). Unter (7) kann die Bedienungsanleitung aufgerufen werden.

Es ist geplant, nach Abschluss der bahnspezifischen Bewertung, das Tool den Bedürfnissen der Bahnen anzupassen, z.B. sollen damit die Prozesse des Radsatz-Unterhalts unterstützt werden.

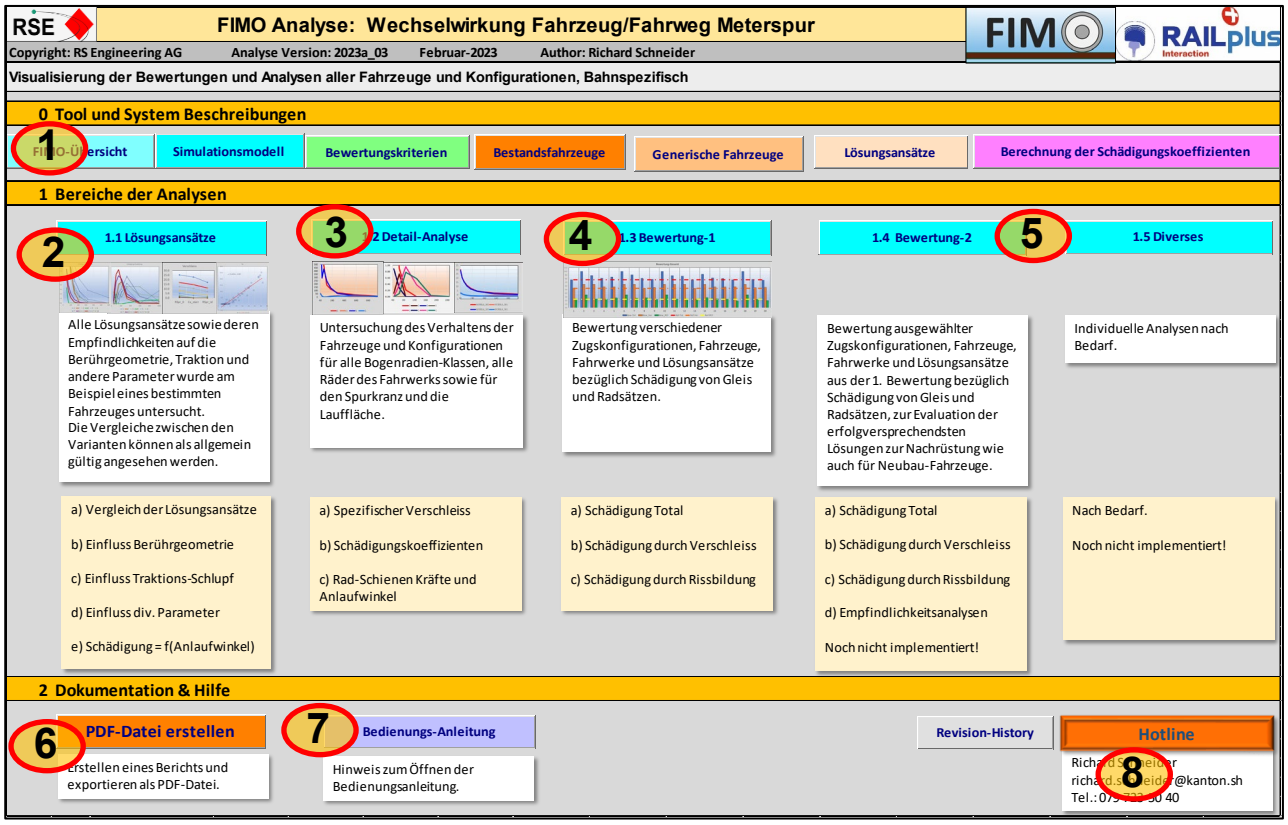


Abbildung 4: FIMO-Analyse-Tool zur Visualisierung und individuellen Bewertung

3.2 Modellbeschreibung

Die Modellierung des MKS-Systems ist in [1] detailliert beschrieben. An dieser Stelle wird eine kurze Übersicht über die wichtigsten Elemente gegeben.

In Hinblick auf eine einfache Handhabung sowie schnelle Berechnungen, wurden verschiedene Methoden einfacher Modellierungen und Berechnungsverfahren untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Aufgabenstellung speziell im Rad-Schienen Bereich, sowie der Radsatzführung praktisch keine Vereinfachungen erlauben und ein möglichst realistisches Abbild der Physik modelliert werden muss.

Zu diesem Zweck wurde ein vollständiges 3-dimensionales Fahrzeugmodell mit Elementen des Simulationspaketes RSESim [2] entwickelt, mit welchem die verschiedenen Varianten berechnet werden können und die Resultate (quasistatische Werte als Mittelwerte der letzten 3 Sekunden) automatisch ins Bewertungsverfahren übertragen werden können.

Das Modell ist grundsätzlich modular und flexibel aufgebaut, im Rahmen dieses Projektes RAILplus reicht jedoch die Untersuchung von Fahrzeugen mit 2-achsigen Fahrwerken (RDF) aus. Dies für Fahrzeuge mit zwei Fahrwerken und Fahrzeugen mit Jacobs Fahrwerken.

Auf die Modellierung von Radsatz-Einzel-Fahrwerken (REF) wird verzichtet, da der Aufwand dazu in keinem Verhältnis zum Nutzen steht. Da solche Fahrzeuge zwingend mit einer akkuraten Radsatzsteuerung ausgerüstet werden müssen und das Fahrzeugkonzept bezüglich Wagengeometrie sowie die Radsatzlasten grundsätzlich dem eines Zuges mit Jacobs Fahrwerken ähnelt, werden derartige Zugskonzepte über einen Vergleich mit entsprechenden Zügen mit Jacobs Fahrwerken abgeleitet. Der Aufbau des Modells ist in *Abbildung 5* dargestellt.

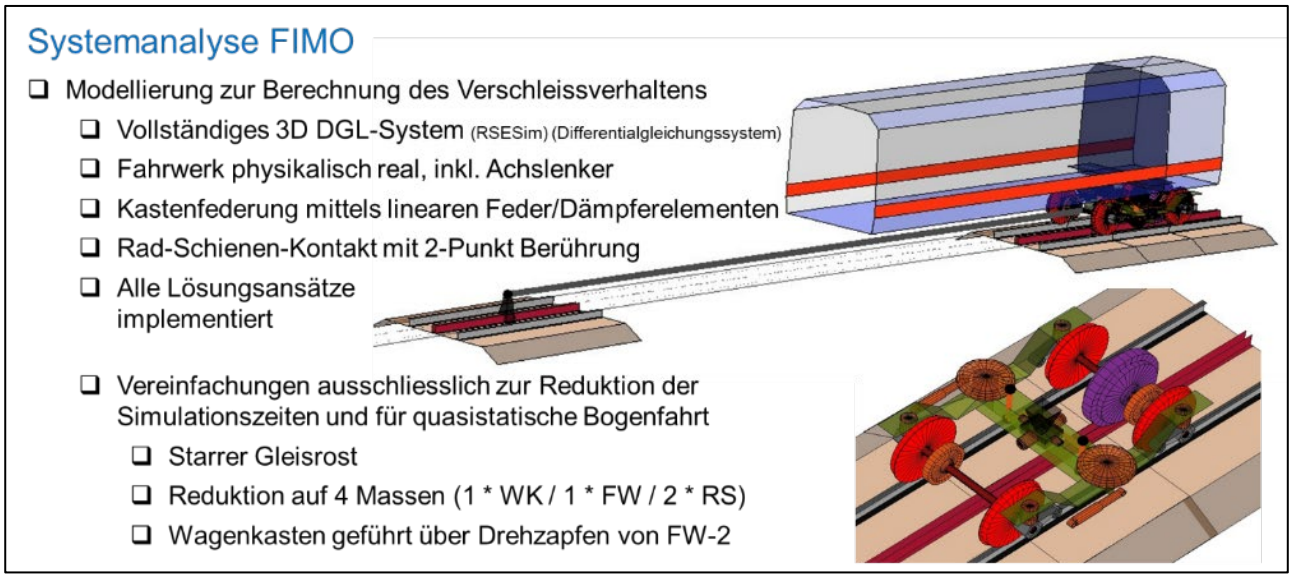


Abbildung 5: Aufbau des MKS-Modells

Die Analyse des Verschleissverhaltens am Spurkranz sowie an der Lauffläche verlangt per Definition eine 2-Punkt Modellierung im Rad-Schienen Kontakt.

Die Kinematik des 2-Punkt Kontaktes ist in *Abbildung 6* dargestellt. Ein 2-Punkt Kontakt tritt auf, wenn kein kontinuierlicher Verlauf des Kontaktpunktes erfolgt, sondern der Kontaktpunkt direkt von der Lauffläche zur Spurkranzflanke wechselt. Die vertikale Komponente der Kraft am Spurkranz entlastet dabei den Kontakt in der Lauffläche. Es wäre eine ausreichend hohe Querkraft am Spurkranz erforderlich, bis die Lauffläche vollständig entlastet wird.

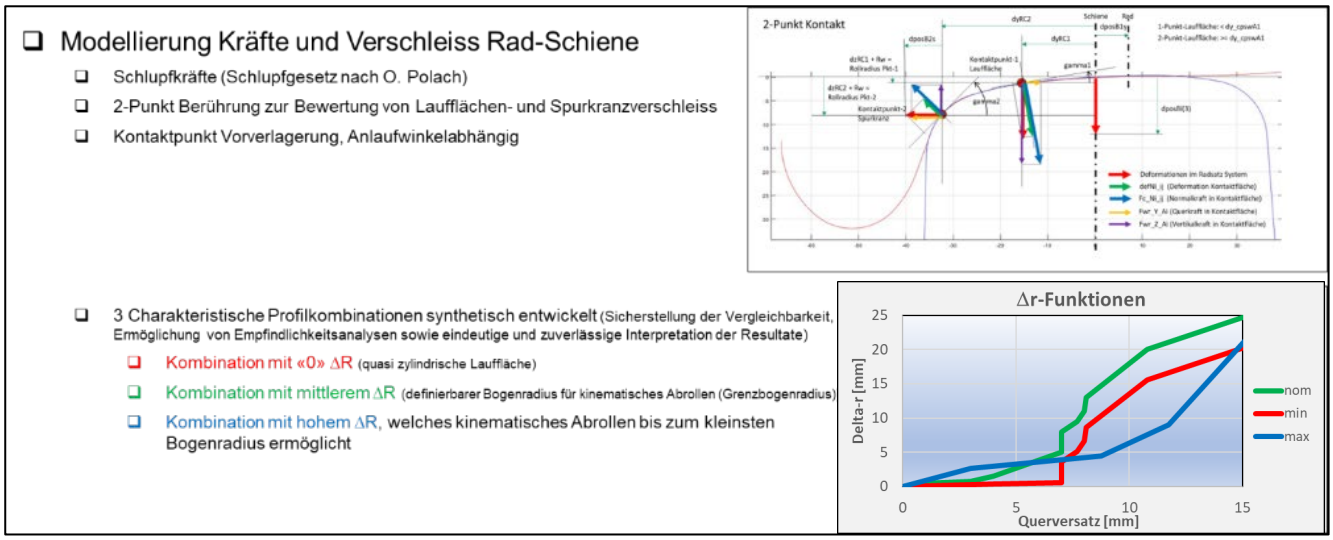


Abbildung 6: Aufbau des Rad-Schienen Kontaktes als 2-Punkt Berührung

Die Charakteristiken des Rad-Schienen Kontaktes wie Kontaktpunkte, Δr, Ellipsenachsen, Kalker Koeffizienten, etc. werden im Simulationsmodell tabellarisch hinterlegt (*Abbildung 7*).

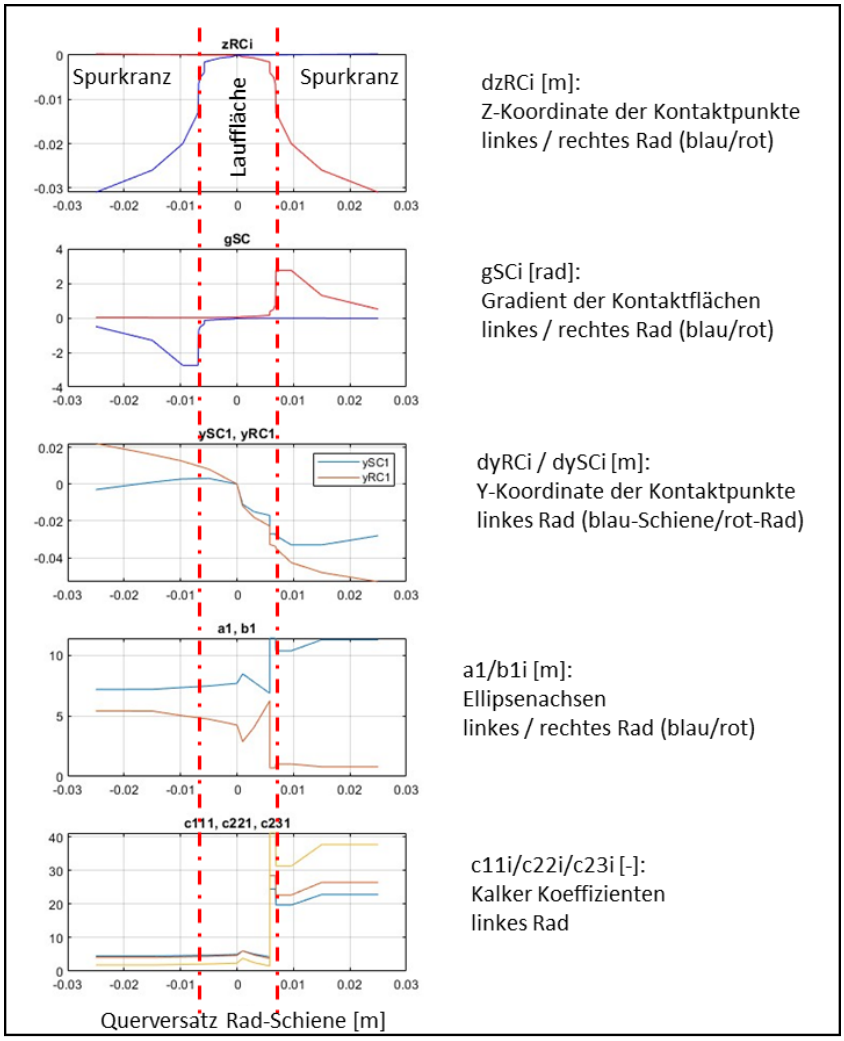


Abbildung 7: Charakteristiken des Rad-Schienen Kontaktes

Alle Charakteristiken sind tabellarisch in Funktion des Querversatzes zwischen Rad und Schiene im Programm als Bibliothek hinterlegt (Abbildung-7).

Diese werden über ein spezielles, von RSE entwickelten Programm, aus den Koordinaten der Rad- und Schienenprofile ermittelt.

Bei grösseren Anlaufwinkeln zwischen Rad und Schiene wandert der Kontaktpunkt des Spurkranzes mit der Schienenflanke nach vorne. Diese Vorverlagerung wird als lineare Funktion im Modell ebenfalls abgebildet.

Neben der 2-Punkt Berührung stellt auch diese Vorverlagerung des Kontaktpunktes eine unverzichtbare Eigenschaft des Modells dar, um zuverlässige Berechnungs-ergebnisse zu erzeugen.

Wichtig ist zu erwähnen, dass der Bereich Rad/Schiene, sowie die Radsatzführung inkl. Fahrwerkdimensionen sehr adäquat modelliert werden müssen, um aussagekräftige Resultate zu erhalten. Das Modell unterscheidet sich demzufolge in diesen Bereichen kaum von demjenigen eines entsprechenden Modells in einem kommerziellen Programmsystem wie z.B. Simpack (siehe auch Kapitel 6).

3.3 Berührgeometrie Rad/Schiene

Wie in Abbildung 6 gezeigt, werden drei verschiedene Profilkombinationen verwendet, um die Empfindlichkeit der Züge bzw. Lösungsansätze auf die Qualität der Berührgeometrie (Δr) für die Fahrt im Bogen aufzuzeigen.

Für alle Profilkombinationen wird die Schiene 46E1 mit Neigung 1:20 eingesetzt. Diese eignet sich grundsätzlich auch gut zum Erzielen eines hohen Δr.

Dieses Schienenprofil, kombiniert mit dem Radprofil RTE 29500_TypA, führt praktisch zu keinem Δr und ist damit nicht geeignet für ein verschleissarmes Fahren durch Gleisbögen. Dieses Profil wird als Profil mit «0»-Δr bezeichnet (*Abbildung 8*).

Der befahrbare Bogenradius dieser Profilkombination bei einem Radialstellungsindex von «1» liegt bei ca. 750m.

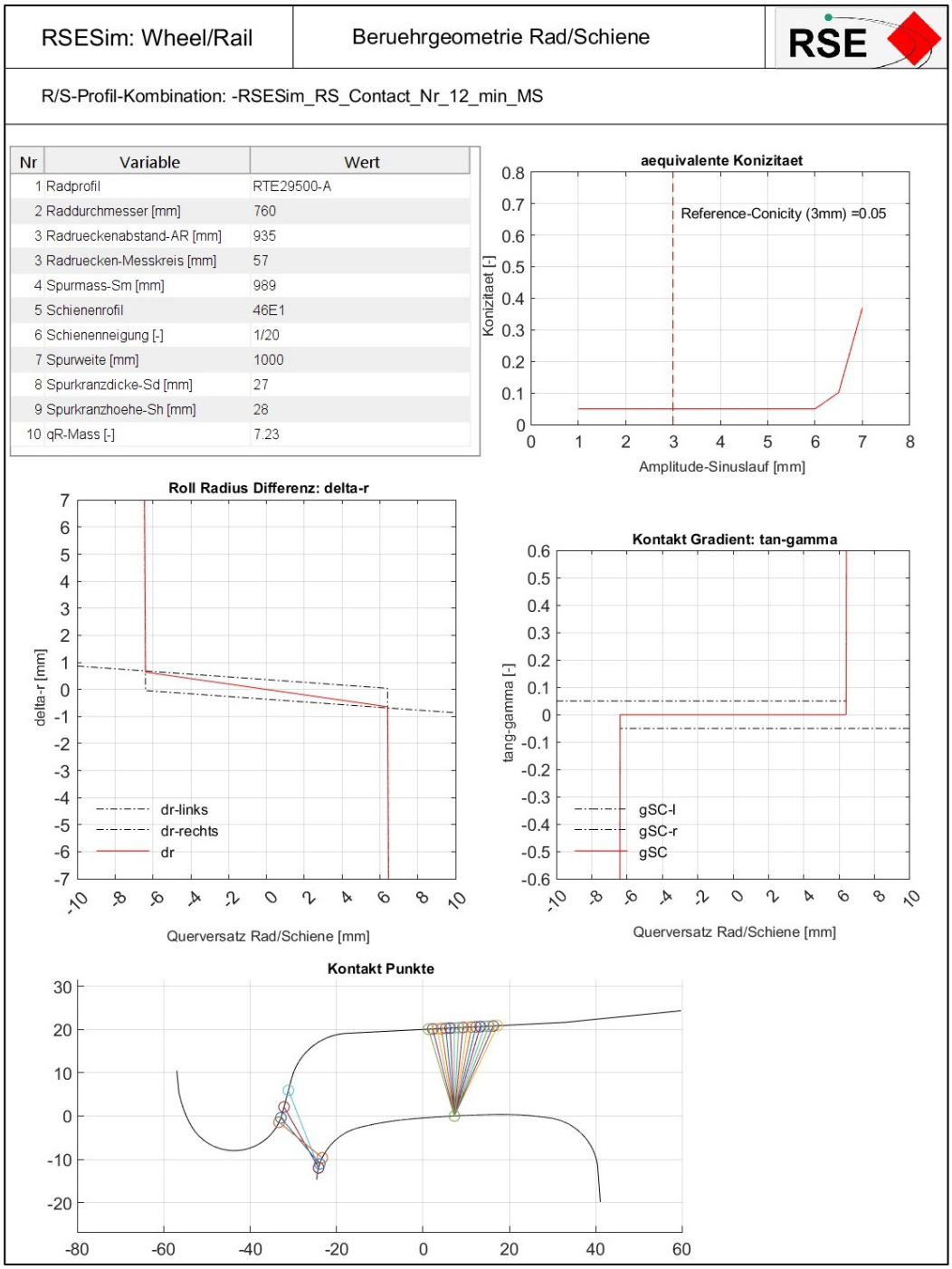


Abbildung 8: Profilkombination mit ca. 0 mm Δr (RTE 29500-A)

Bei der RhB wurde vor einigen Jahren ein Profil entwickelt, welches ein bogenfreundlicheres Verhalten, d.h. ein höheres Δr, aufweisen soll. Das Profil wird mit «W03» bezeichnet und liefert ca. 4mm Δr (*Abbildung 9*).

Es ist zu erwarten, dass sich nach einer gewissen Zeit bzw. Laufleistung nach dem Aufdrehen des RTE-Profils, ein Profil mit ähnlichen Eigenschaften wie dieses «W03» Profil einstellen wird. Deshalb wird für alle Untersuchungen diese Profilkombination verwendet und entsprechend als «nominal» bezeichnet.

Der befahrbare Bogenradius dieser Profilkombination bei einem Radialstellungsindex von «1» liegt bei ca. 120m.

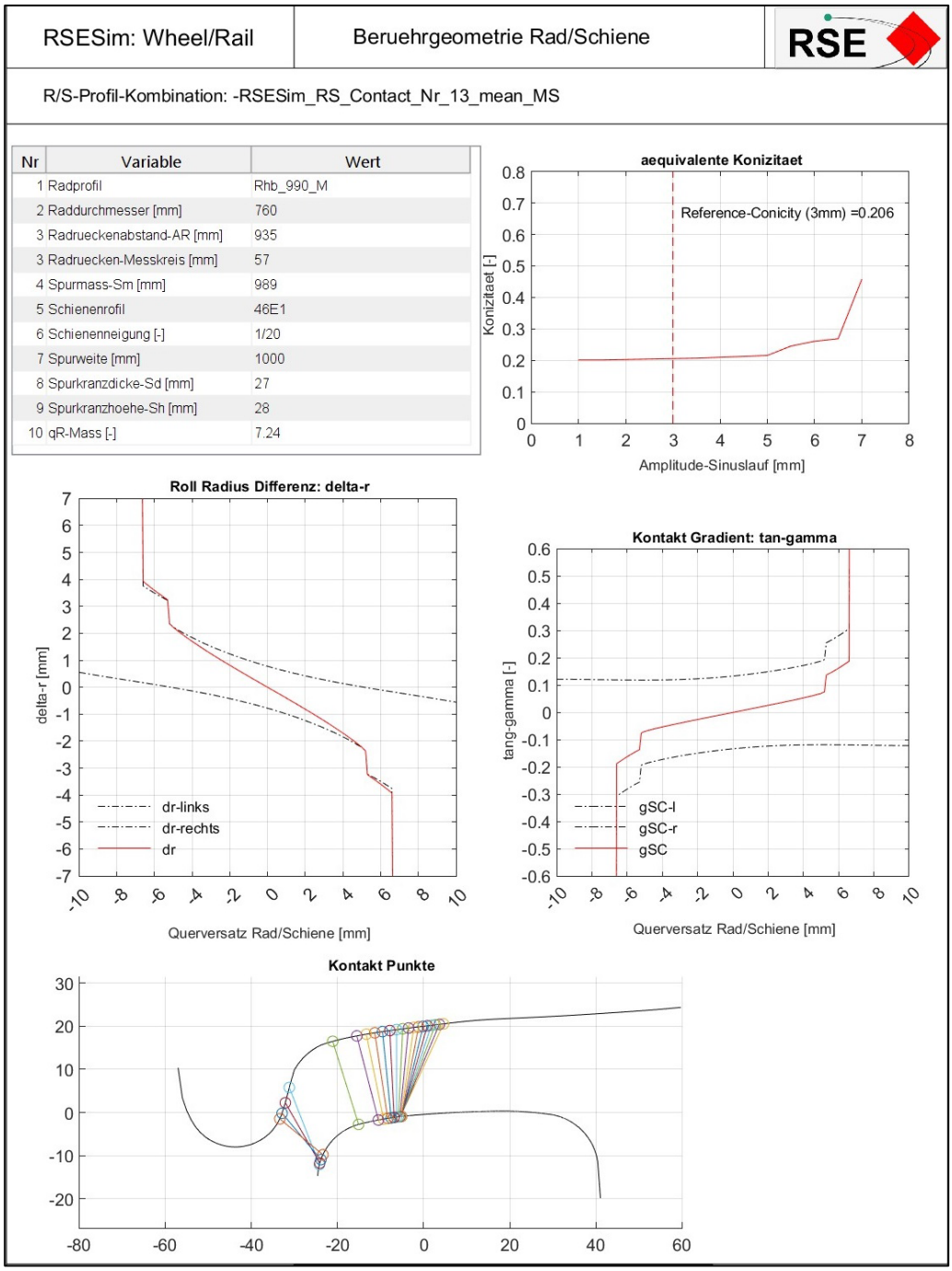


Abbildung 9: Profilkombination mit ca. 4mm ∆r (W03)

Zum verschleissarmen Befahren von sehr engen Bögen reicht dieses ∆r von 4mm nicht aus. Deshalb wurde von RSE auf Basis dieses W03 Profils ein Profil mit einem höchstmöglichen ∆r entwickelt, um die Abhängigkeit des Verschleissverhaltens in Funktion vom ∆r aufzeigen zu können. Die wesentlichen Anpassungen sind:

- Maximale Reduktion der Spurkranzdicke
- Anschmiegen der Lauffläche an das Schienenkopfprofil mit der Neigung 1:20, Richtung Spurkranz und Rad-Aussenseite

Das Profil wird als Profil mit einem hohen ∆r von ca. 8mm als «maximal» bezeichnet (*Abbildung 10*). Der befahrbare Bogenradius dieser Profilkombination bei einem Radialstellungsindex von «1» liegt bei ca. 50m.

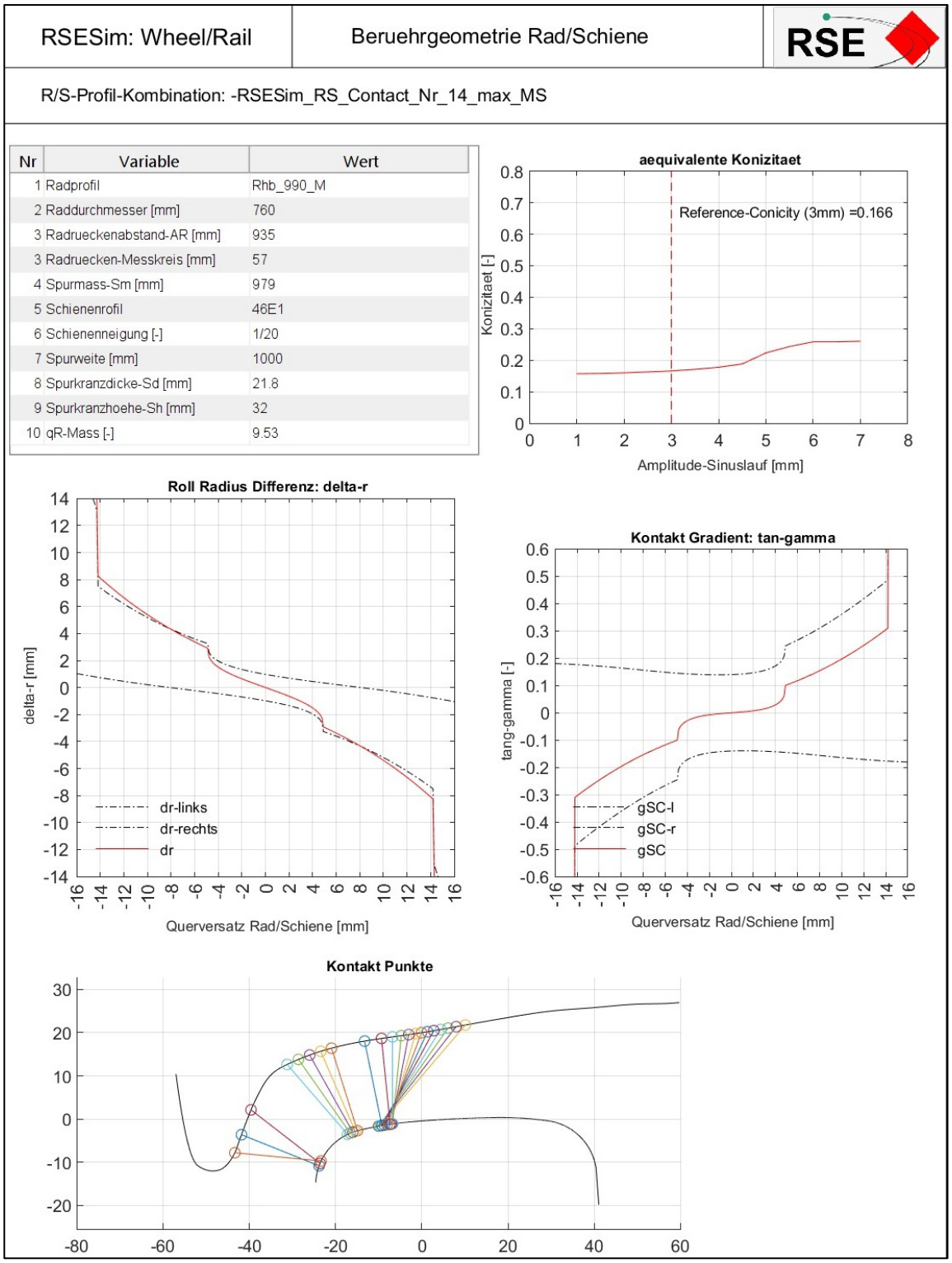


Abbildung 10: Profilkombination mit hohem ∆r (ca. 8mm) (synthetisches Profil)

Die Realisierbarkeit dieses Profils mit dem «dünnen» Spurkranz in Bezug auf alle Grenzwerte der Richtlinie RTE 29500 muss noch geprüft werden.

Alle drei Profile weisen bei einer nominellen Spurweite von 1000 mm eine äquivalente Konizität von unter 0.2 auf.

3.4 Schadenselemente und -mechanismen

Zu Beginn des Projektes wurde im Rahmen des Teilprojektes P1 eine Umfrage bei allen Meterspurbahnen der Schweiz durchgeführt, mittels derer eine Bestandesaufnahme des Verschleisses und der Schädigungen, sowie der negativen Eigenschaften an Rad und Schiene erhoben wurde. Die Schadenselemente und Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Hauptaufgabe des Projektes P5, also des Fahrzeugs, ist die Analyse des Verschleissverhaltens der Fahrzeuge und Lösungsansätze, vor allem im Kurzzeitverhalten (quasistatischen Verschleiss). Die Schadenselemente, welche dazu direkt über Berechnungsergebnisse bewertet werden können, sind in der Tabelle 1 grün gekennzeichnet (Pos 1-4 und 8-12). Elemente, welche indirekt bewertet werden können (Pos 7, 15, 21 und 27) sind gelb markiert. Schäden, welche z.B. durch Traktion oder andere Effekte verursacht werden (rot-braun markiert: Pos 5, 6, 13, 14 und 16), können mittels dieser Analysen nicht bewertet werden, ebenso die nicht farblich markierten Elemente.

Trotz der quasistatischen Berechnung können auch dynamische Effekte (Langzeitverhalten) indirekt bewertet werden, wie z.B. Schlupfwellen, Lärm, etc., da diese Effekte für ein bestimmtes Fahrwerk in bestimmten Bögen in Abhängigkeit des Anlaufwinkels auftreten (Pos 7, 15, 27). Die Beeinträchtigung der Schienenbefestigung kann über den Quotienten Y/Q (Pos 21) bewertet werden.

					Berechnungsmodell-FIMO		
					Variable		
Pos	Bereich	Frage	Nr	Schadenselement	direkt	indirekt	Bemerkung
1	Rad	301b)	1	Radverschleiss - Spurkranz	Wb_sk	-	
2		301b)	2	Radverschleiss - Fahrfläche	Wb_lf	-	
3		301b)	3	Risse an Radoberflächen	Wb_lf	-	
4		301b)	4	Materialausbrüche an Radoberflächen	Wb_lf	-	Nicht korrigierte Risse aus: 301b)-3
5		301b)	5	Thermisch verursachte Schäden	-	-	Traktions-, Bremsregelung
6		301b)	6	Flachstellen	-	Schlupf	Traktions-, Bremsregelung
7		301b)	7	Radpolygonisierung	-	Wb_lf	
8	Schiene	301d)	1	Schienenverschleiss (Vertikal, Horizontal, Kombiniert)	Wb_sk/Wb_lf	-	
9		301d)	1a	Schienenverschleiss vertikal	Wb_lf	-	
10		301d)	1b	Schienenverschleiss horizontal	Wb_sk		
11		301d)	2	Risse an Schienenoberflächen (head checks, ...)	Wb_Llf	-	
12		301d)	3	Materialausbrüche an Schienenoberflächen	Wb_Llf	-	
13		301d)	4	Thermisch verursachte Schäden	-	-	
14		301d)	5	Schleuderstellen	-	Schlupf	Traktionsregelung
15		301d)	6	Schlupfwellen	Wb_Llf	α	Anlaufwinkel
16		301d)	7	Schienenriffel	-	Schlupf	Traktionsregelung
17	Ober-/Unterbau	301f)	1	vertikale Gleislage	-	-	
18		301f)	2	laterale Gleislage	-	-	
19		301f)	3	Verwindung	-	-	
20		301f)	4	Einzelfehler in der Gleislage	-	-	
21		301f)	5	Schienenbefestigung	-	Y/Q-qst	
22		301f)	6	Zwischenlage	-	-	
23		301f)	7	Schwellen	-	-	
24		301f)	8	Schwellenbesohlung	-	-	
25		301f)	9	Schotterreinigung und Schottertausch	-	-	
26		301f)	10	Zahnstange	-	-	
27	Andere	305	1	Lärm	-	α	Anlaufwinkel

Tabelle 1: Schadenselemente mit Angabe des Bezugs zu FIMO

Daneben treten einige Effekte auf, welche direkt mit dem Verhalten der Traktions- bzw. Bremsregelung in Verbindung gebracht werden können. Dank dem Know-How sowie der Erfahrung in der Systemführerschaft im Bereich der Traktionsregelungen und Torsionsschwingungen kann zu diesen Effekten (Pos 5, 6, 13, 14, 16) zumindest qualitativ eine Bewertung erfolgen.

Eine Auswertung mit Vergleich der Umfrageergebnisse mit den Berechnungen ist in Kapitel 3.6 enthalten.

Zur Bewertung des Verschleisses sowie der Schädigung infolge Rissbildung sind sog. Schädigungsgesetze erforderlich [8] (*Abbildung 11*). Diese wurden vor vielen Jahren von Burstow entwickelt und finden heute noch Anwendung, z.B. im Trassenpreismodell der Schweiz der Normalspur. Diese Gesetze wurden für weiche Schienenmaterialien mit einer Brinellhärte von 220 HB entwickelt und sind daher nicht allgemein gültig.

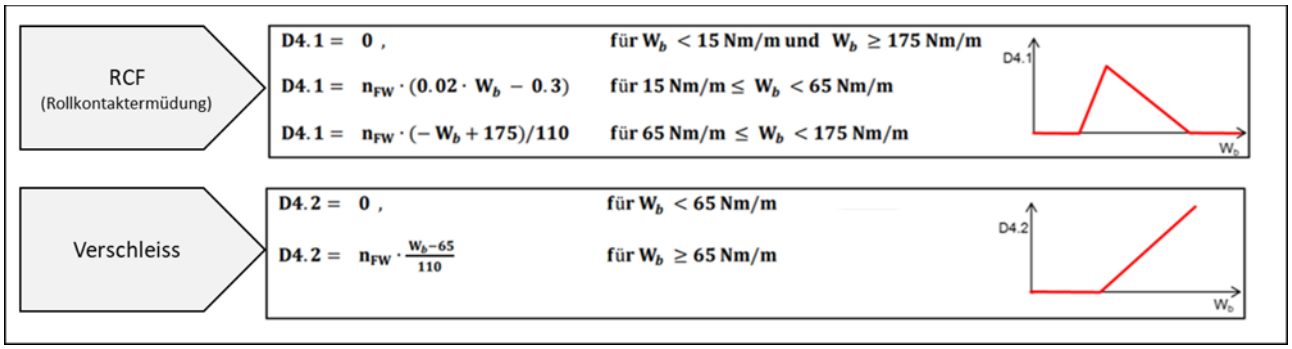


Abbildung 11: Schädigungsgesetze an Rad und Schiene nach Burstow

Vor allem im Bereich der Meterspurbahnen werden in den Bögen und bei den Triebradsätzen häufig Stähle mit höheren Brinellhärten eingesetzt. Es wird erwartet, dass der qualitative Verlauf zwar derselbe sein wird, dass sich aber die Kurven jedoch etwas verschieben. Da zurzeit kein gültiges Schädigungsgesetzt für die Randbedingungen bei der Meterspur besteht, wird die Bewertung bezüglich Rissfortschritt aus der Rollkontaktermüdung (RCF) dennoch mit dem Burstow Gesetz durchgeführt, um so die Tendenzen aufzuzeigen. Das Konzept der Bewertung des Verschleisses sowie des Rissfortschritts unter Einbezug aller Räder eines Fahrzeugs sowie dessen Einsatzbereich, ist in [8] detailliert beschrieben.

Mit dem Einsatz der Schienenkopf-Konditionierung (SKK) wurden bisher keine Risse festgestellt. Damit wird offenbar die Rissentstehung verhindert, sodass in Folge auch kein Rissfortschritt stattfinden kann. Das Gesetz von Burstow ist damit beim Einsatz von SKK nicht anwendbar.

Aus Erfahrungen der Systemführerschaft im Normalspurbereich können spezifische Reibarbeits-Werte zwischen ca. 100 - 300 Nm/m bzw. Wear-Werte zwischen ca. 0.5 – 2.0 als «mild» bezeichnet werden. Spezifische Verschleisswerte zwischen ca. 40 und 120 Nm/m (Schädigungskoeffizienten grösser 0.5) führen zu hohem Rissfortschritt und sollten, wenn immer möglich vermieden werden. Wie bereits erwähnt dürfte sich dieser Bereich durch die Verwendung von höher festeren Stahlsorten bei etwas höheren Werten einstellen.

Der Verschleiss sowie die Schädigungen werden, für die in *Abbildung 12* definierten Zonen an Rad und Schiene ermittelt und ausgewertet.

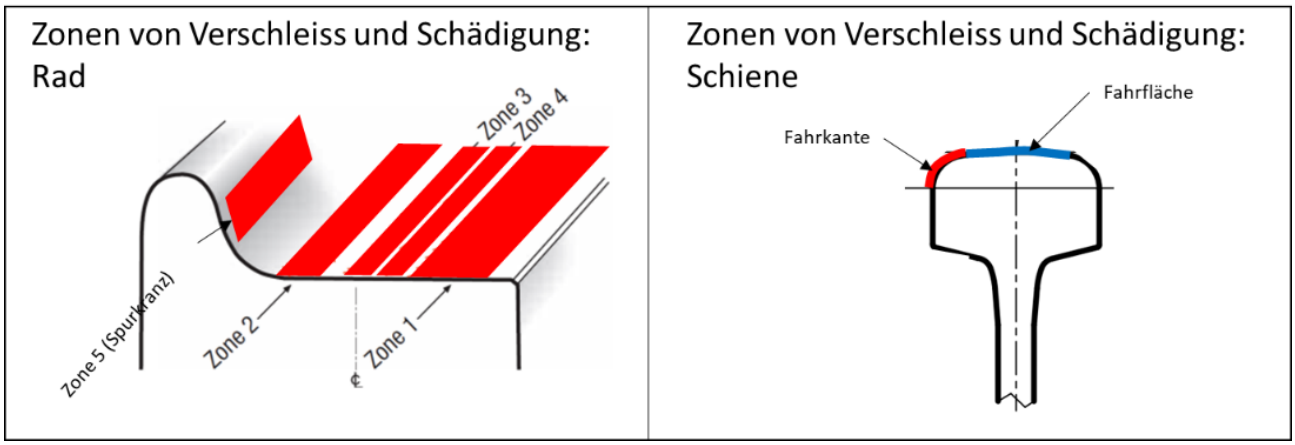


Abbildung 12: Zonen der Schädigungen an Rad und Schiene

Zur Illustration der Schädigungselemente aus Tabelle 1 werden in *Abbildung 13* Schadensbilder des Rades und in *Abbildung 14* Schadensbilder der Schiene aufgezeigt.

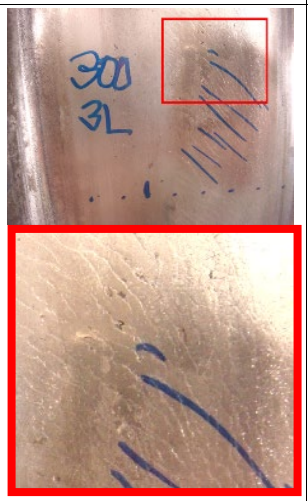
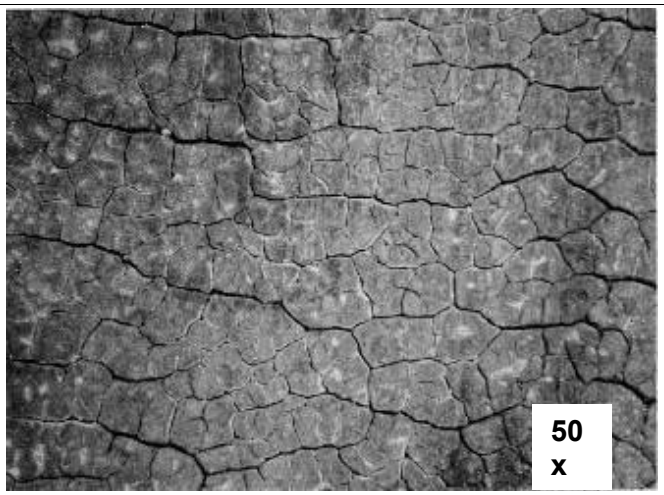
Verschleiss Spurkranz	Verschleiss Laufläche und Spurkranz	Risse in Zone 1 der Laufläche	Materialausbrüche
Handbook of Wheelset service faults" von Lucchini RS	Handbook of Wheelset service faults" von Lucchini RS		
Flachstellen	**Thermische Risse**		**Polygonisierung**
			

Abbildung 13: Schadensbilder des Rades

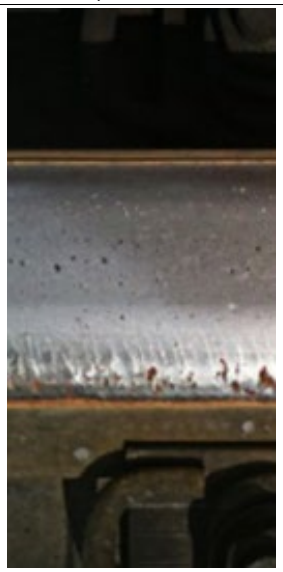
Schleuderstelle	Riffel	Verschleiss Fahrkante und Schienenflanke	Verschleiss Lauffläche
	Schienenfehlerkatalog von Voestalpine)		
Schlupfwellen	**Risse (RCF, Head Checks)**	**Materialausbrüche**	**Thermische Schäden**
			

Abbildung 14: Schadensbilder der Schiene

3.5 Bewertungsmethodik

Zur Bewertung der verschiedenen Varianten wurde ursprünglich die klassische QFD-Methodik [5] (Quality Function Deployment) angedacht (*Abbildung 15*), welche sich ideal zur Bewertung von Systemen mit unterschiedlichen Kriterien wie z.B. Technik, Betrieb, Kosten, etc. eignet. Dabei werden alle Eigenschaften auf eine Skala von 1 – 10 normiert und anschliessend je nach deren Wichtigkeit gewichtet.

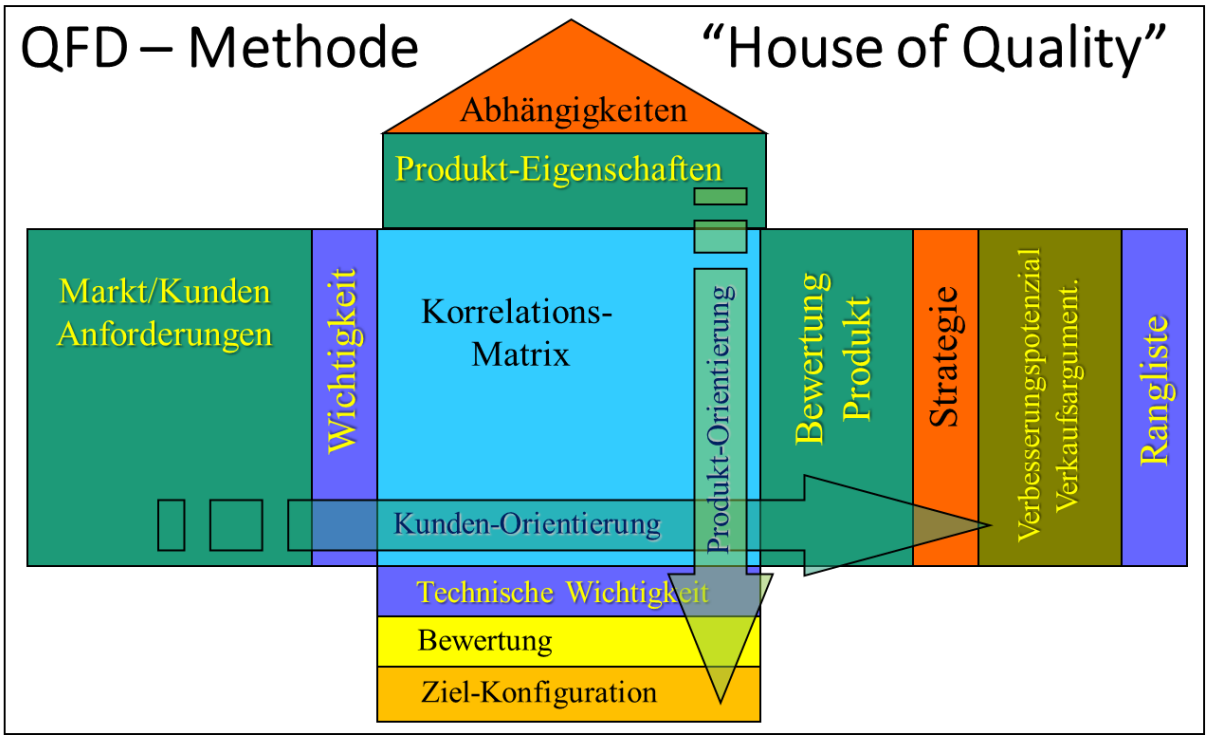


Abbildung 15: QFD-Bewertungsmethodik

Diese Methodik kann zu einem späteren Zeitpunkt angewandt werden, wenn es darum geht, für die erfolgversprechenden Varianten eine Gesamtbewertung über Technik, Kosten, Betrieb, etc. durchzuführen (in Zusammenarbeit mit P6). Dabei werden zusätzlich zur Schädigung von Rad und Schiene ebenfalls die Kosten, der Betrieb und der Unterhalt etc. bewertet. In der jetzigen Phase der Analyse, in der ausschliesslich der Verschleiss sowie das Schädigungspotential der verschiedenen Varianten bewertet wird, macht ein direkter Vergleich mit absoluten Verschleiss-, oder Schädigungswerten mehr Sinn. Durch einen Vergleich der spez. Verschleisswerte, der Verschleissarbeit, der Schädigungskoeffizienten oder sogar der Reprofilierung-Intervalle kann ein direkter Bezug zur Realität (Betriebseinsatz) erzielt werden, was am Ende auch eine monetäre Bewertung ermöglicht.

Vor allem sollen die verschiedenen Analysen auch Antworten auf die wesentlichen Fragen, welche von verschiedenen Stellen und Beteiligten geäussert wurden, wie z.B.:

- Wie verhalten sich Triebzüge gegenüber lokbespannten Zügen bez. Verschleiss?
- Welchen Einfluss auf den Verschleiss kann der Radsatzlast zugeordnet werden?
- Gibt es fahrzeugspezifische Parameter, welche einen erhöhten Verschleiss begründen könnten?
- Was kann als milder Verschleiss bezeichnet werden?
- Wie ist der Einfluss der Berührgeometrie (Δr)?
- Wie verhalten sich die verschiedenen Systeme unter Einfluss von Traktionskräften bzw. Traktionsschlupf?
- Bis zu welchen Bogenradien kann mit passiven Lösungen verschleissarm gefahren werden?

- Wie hoch ist der Reibwert zwischen Rad und Schiene und wie ist der Einfluss auf den Verschleiss?
- Wie wirkt sich die Verteilung der Antriebe auf das Verschleissverhalten aus? (z.B. 4/12 im Vergleich zu 6/12 Anordnung)
- etc.

Neben der eigentlichen Bewertung muss bei der bestehenden Vielfalt an Varianten und Optionen eine stufenweise Eingrenzung durchgeführt werden. Einerseits um den Aufwand zu begrenzen und andererseits eine Übersicht und Transparenz zu ermöglichen. Die Vielfalt und Komplexität lassen sich aus den folgenden Kennzahlen erkennen:

Einsatz-Linien:	43	von 12 Bahnen, davon 36 Adhäsion, 7 Zahnrad (gemischt Zahnrad/Adhäsion)
Anzahl Züge:	28	von 8 Bahnen mit 16 Bestandsfahrzeugen und 12 generischen Zügen
Anzahl Fahrwerke:	74	davon 60 für Adhäsion und 14 für Zahnrad
Varianten:	11	von Spurkranzschmierung bis zur aktiven Radsatzsteuerung
Empfindlichkeiten:	9	mit 3 Rad/Schienenprofilen und 3 Traktionsniveaus
Bogenradien:	8	Radien Klassen

Ohne entsprechende Reduktion der zu betrachtenden Fälle bei Berechnungen und Analysen, würde dies zu über 55'000 Berechnungen für über 2700 Varianten führen. Bei der Begrenzung wurde auch speziell darauf geachtet, dass keine, auch noch so utopisch anmutende Lösung, einfach übergangen wurde aber auch nicht unnötig Zeit für Lösungen aufgewendet wurde, welche offensichtlich kein erfolgversprechendes Potential aufweisen.

Art und Umfang der Eingrenzungen werden an den entsprechenden Stellen in den nachfolgenden Kapiteln detailliert erläutert.

3.6 Verifikation des Modells

Auf Grund fehlender Messwerte aus dem Betrieb, kann ausschliesslich eine Verifikation des Modells durchgeführt werden. Zudem können die Verschleisswerte an Rad und Schiene nicht gemessen werden, sodass für diese Verifikation nur ein Vergleich mit alternativen Berechnungen in Frage kommen kann. Die Verifikation findet in folgenden sechs Stufen statt:

1. Plausibilitätsbetrachtung durch Entwickler und Fachexperten
2. Visualisierung der Ergebnisse über Animation des Fahrzeugs bzw. Fahrwerks
3. Auswertung der Charakteristiken der Koppelelemente und Vergleich mit den Vorgaben
4. Vergleich mit Berechnungsresultaten anderer kommerziell verfügbarer Programme, z.B. mit Simpack
5. Korrelation der Simulationsergebnisse mit den Umfragewerten zu Schädigungen und Verschleiss (Projekt P1 Grundlagenscanning)
6. Begutachtung des Modells durch externe Fachexperten sowie Vergleichsrechnungen mit vergleichbarem Modell in Simpack [9]

Die Ergebnisse der Begutachtung sowie der Vergleichsrechnungen wurden in [9] wie folgt zusammengefasst:

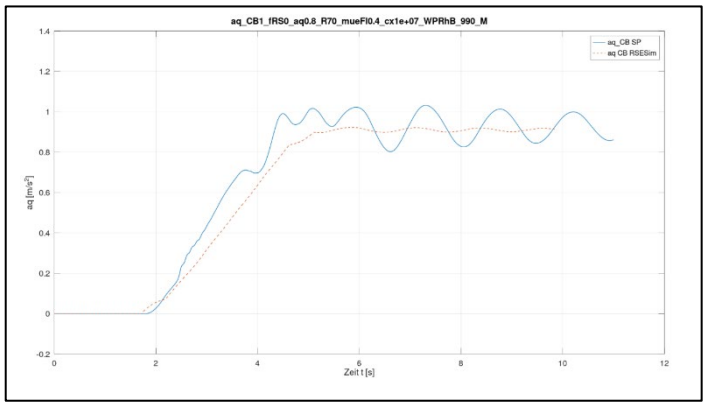
PJM entwickelte ein Modell desselben Fahrzeugs in Simpack. Zur Abbildung des Rad-Schienen Kontakts wurde in Simpack die Methode Equivalent Elastic Contact verwendet, welche de facto als Industriestandard für Simulationen des dynamischen Fahrzeugverhaltens gilt. Im Zuge des Ergebnisvergleichs wurde mittels Parametervariation der relevanten Fahrzeugparameter die Übereinstimmung der Modelle in einem möglichst breiten Band an Konfigurationen geprüft. In Summe wurden so 560 Varianten der Fahrzeugmodelle untersucht.

Beim Modellvergleich wurde der Schwerpunkt der Untersuchung auf die folgenden Bereiche gelegt:

- Vergleich Modellierung
- Vergleich RS-Kontakt (Excel Plots Querverschiebung
- Vergleich der Ergebnisse Simpack vs. RSESim: RS-Kräfte, Verlagerungseigenschaften, Position Kontaktpunkte und Kontaktwinkel, Verschleißwerte

Die Modellierung wurde durch Studium der Modellbeschreibung [1,2], Ergebnisvergleich und Rückfragen bzw. Abstimmung mit RS-Engineering geprüft. Das vorliegende Modell kann nach Betrachtung der Modellierungsmethodik, der Abbildung von Kraftelementen (Federn, Dämpfer), der Masseneigenschaften und des Rad-Schiene Kontakts durchwegs als am Stand der Technik bezeichnet werden. Dabei zeigt sich speziell in der Implementierung des Rad-Schiene Kontakts ein hoher Detaillierungsgrad. Dies ist vor allem bei der Untersuchung des Fahrverhaltens von Schienenfahrzeugen wichtig, da es sich stark auf die exakte Ermittlung der Rad-Schiene Interaktionsgrößen (u.a. Kräfte, Schlupfe, Verschleiß, Berührpunkte) auswirkt.

Die Prüfung der quasistatischen Verlagerungseigenschaften wurde u.a. mittels Vergleichs der Querbeschleunigung auf Radsatz-, Drehgestell- und Wagenkastenebene umgesetzt. Ein Beispiel ist dazu in untenstehender Abbildung für die Wagenkastenquerbeschleunigung dargestellt.



Stimmt diese (im Mittel) überein, so sind die Verlagerungseigenschaften (Wankverhalten) der Modelle vergleichbar. Im Zuge dieser Betrachtung wurden auch der Wankwinkel, das Moment des Wankstabilisators und die Be- bzw. Entlastung der bogenäußeren bzw. -inneren Sekundärfeder geprüft.

Abbildung 16: Vergleich Querbeschleunigung Wagenkasten (SP-RSESim)

Zur Darstellung in *Abbildung 16:* Vergleich Querbeschleunigung Wagenkasten (SP-RSESim) ist noch zu ergänzen, dass hier die strichlierte Kurve bereits in gefilterter Form zum Vergleich herangezogen wurde und daher weniger dynamisches Verhalten zeigt.

Die Prüfung des Rad-Schiene Kontakts erfolgte im ersten Schritt über den Vergleich ausgewählter Ergebnisplots, welche die Veränderung der Ergebnisgrößen über der Querverschiebung des Radsatzes im Gleis darstellen. Als Beispiel ist in *Abbildung 17* der Verlauf des Kontaktpunkts am Rad quer (y) und vertikal (z) dargestellt. Die Übereinstimmung ist sowohl qualitativ als auch quantitativ klar ersichtlich. In den gezeigten Diagrammen ist die Profilpaarung 46E1 (Schienenprofil) und RhB_990_M (Radprofil) dargestellt. Für das zweite untersuchte Radprofil RTE29500_MS_A ist die Übereinstimmung ebenfalls von ähnlich guter Qualität.

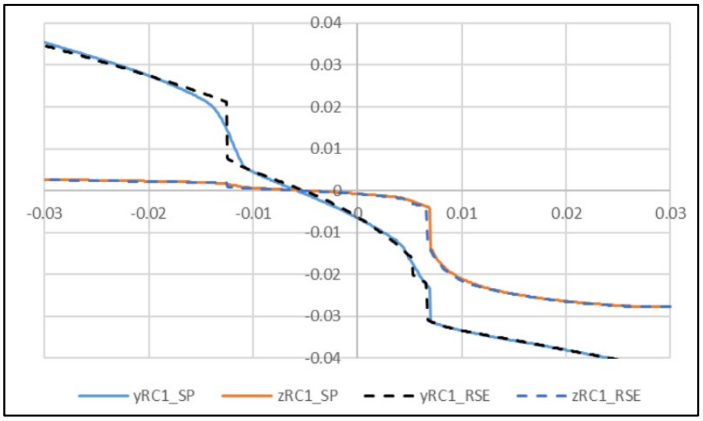


Abbildung 17: Verlauf Kontaktpunkt am Rad quer (y) und vertikal (z), SP vs. RSESim

Um die Übereinstimmung im Verschleißverhalten sicherzustellen, wurden die Rad Schiene Kräfte sowie die spezifische Reibarbeit Wb ebenfalls vergleichend geprüft. In *Abbildung 18* ist als Beispiel die Führungskraft Y am bogenäußeren Rad des führenden Radsatzes abgebildet.

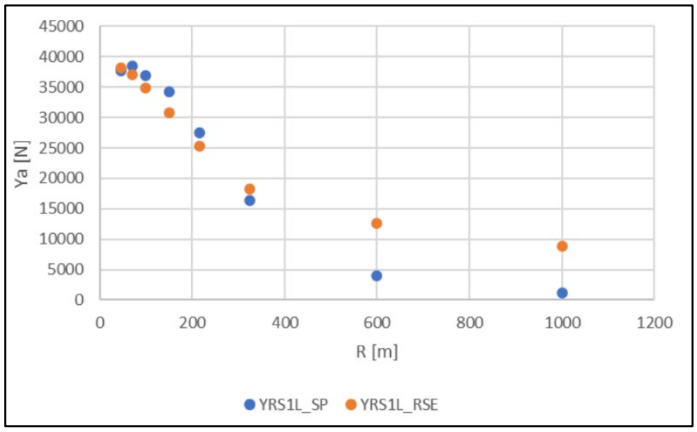


Abbildung 18: Verlauf Führungskraft äußeres Rad RS1 (Ya) über Bogenradius

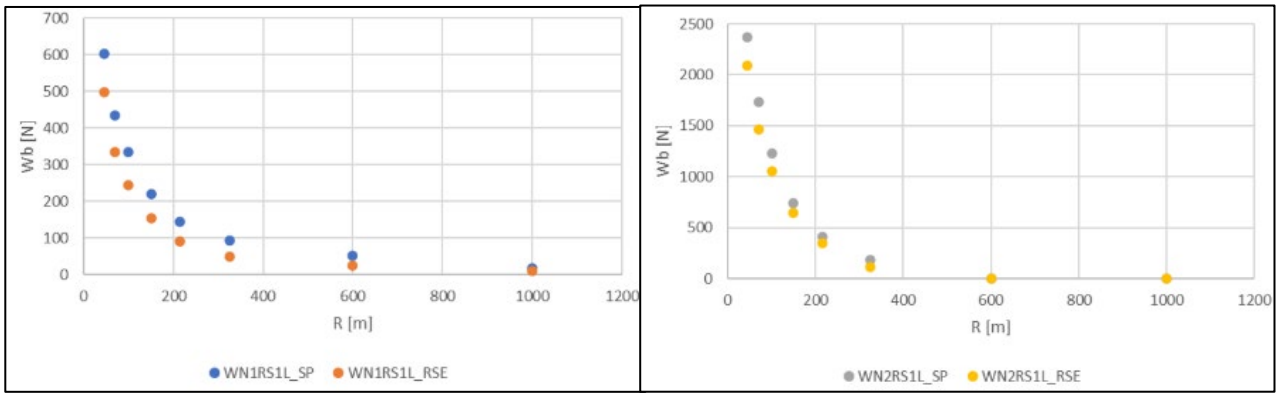
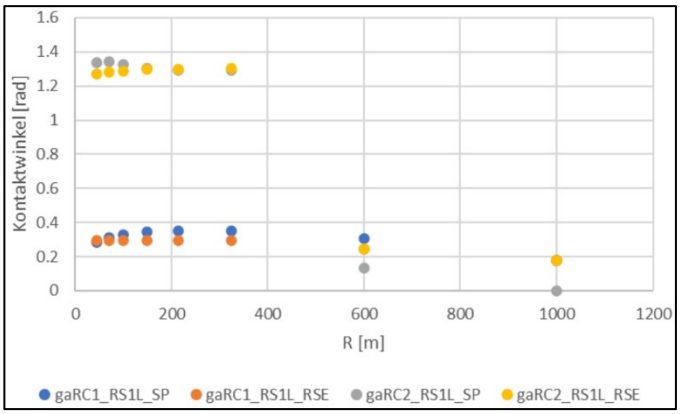


Abbildung 19: Verlauf Wb äußeres Rad RS1 über Bogenradius (Kontaktpunkt 1 links, 2 rechts)

Weiter ist in *Abbildung 19* im linken Diagramm die spezifische Reibarbeit Wb an der Lauffläche des bogenäußeren Rads und im rechten Diagramm ebenfalls Wb, jedoch für den Kontakt am Spurkranz, dargestellt. Diese Darstellungen sollen den Verlauf der Ergebnisgrößen über die verschiedenen untersuchten Bogenradien zeigen.



In weiterer Folge wurde der Rad-Schiene Kontakt auch durch den Vergleich des Kontaktwinkels und der Kontaktpunkte bei Variation der Simulationsparameter (z.B. Radius) untersucht. In der folgenden Darstellung ist dazu der Kontaktwinkel über dem Bogenradius aufgetragen. Hier lässt sich auch der Zwei-Punkt Kontakt im unteren Radienbereich bis 325m bzw. der Übergang auf Ein-Punkt Kontakt in den Bögen mit größerem Radius gut erkennen (*Abbildung 20*).

Abbildung 20: Verlauf Wb äußeres Rad RS1 über Bogenradius (Kontaktpunkt 1 oben, 2 unten)

Zusammenfassend ist an dieser Stelle nochmals die sehr detaillierte Modellierung des Rad-Schiene Kontakts und der zugehörigen Interaktionsgrößen hervorzuheben, da dies der Schlüssel zu einer auch physikalisch korrekten Bestimmung der Ergebnisgrößen ist. Unter Berücksichtigung der Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen und Vergleiche, lässt sich abschließend sagen, dass das Modell sowohl für vergleichende Berechnungen als auch für absolute Betrachtungen geeignet ist.

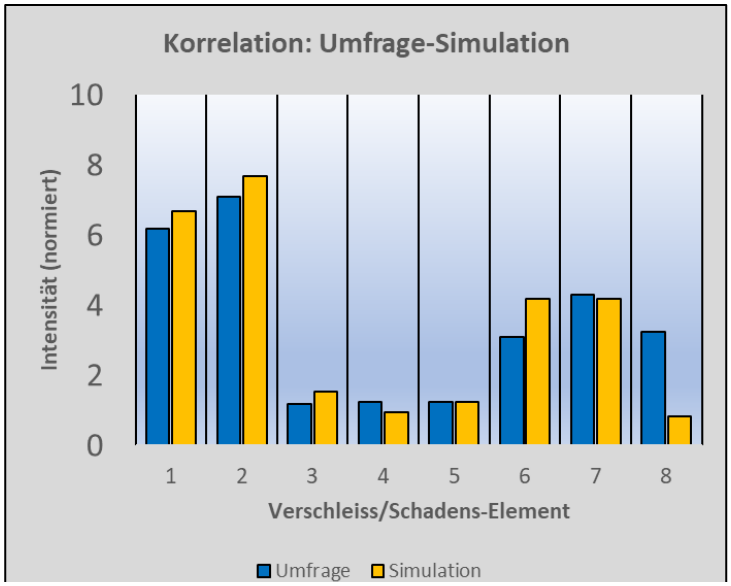
Als zusätzlicher Validierungsschritt ist der Vergleich der Berechnung der Radprofilentwicklung mit Radprofilaufzeichnungen aus dem Betrieb für ein ausgewähltes Fahrzeug geplant.

Im Rahmen des Projektes P3 sind zudem Messungen vorgesehen, welche zu gegebenem Zeitpunkt für eine zusätzliche Validierung des Modells genutzt werden können.

Als interessanter Ansatz zur Verifikation des Modells kann der Vergleich zwischen den berechneten Verschleiss-Werten und den Angaben zu den Verschleiss- und Schädigungssangaben aus der Umfrage des Grundlagenscannings (Projekt P1) gewertet werden. Die Vergleiche sind in *Abbildung 21* für alle Strecken und Fahrzeuge zusammengefasst aufgezeigt.

Dabei zeigt sich eine gute Korrelation zwischen den gerechneten Verschleisswerten und den Werten aus der Umfrage der Bahnen. Dies kann einerseits als Zeichen dafür gewertet werden, dass die Umfrage seriös und sachgerecht beantwortet wurde und dementsprechend für weitere Analysen genutzt werden kann. Andererseits kann daraus auch gefolgert werden, dass das Modell, und vor allem der Rad-Schienen Kontakt, die Verhältnisse im Meterspurbereich recht gut repräsentieren.

Die 8 Positionen auf der horizontalen Achse stellen die 8 relevanten Schädigungselemente dar:



Rad
1-Verschleiss Spurkranz
2-Verschleiss Lauffläche Zone-1
3-Verschleiss Lauffläche Zone-3
4-Risswachstum RCF Zone-4
5-Risswachstum RCF Zone-3

Schiene
6-Verschleiss auf Fahrfläche
7-Risswachstum RCF auf Fahrfläche
8-Verschleiss an Schienen-Kante

Die blauen Balken zeigen die Ergebnisse der Auswertung der Umfrage, die orangen die Ergebnisse der Simulationen.

Abbildung 21: Korrelation der Berechnungsergebnisse mit den Umfragewerten der Bahnen

Die Qualität des Modells kann dementsprechend wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Modell entspricht dem Stand der Technik
- Der Rad-Schienen Kontakt ist sehr detailliert und kann als gleichwertig mit dem «*Equivalent Elastic Contact*» in Simpack angesehen werden.
- Das Modell liefert qualitativ wie quantitativ zuverlässige Ergebnisse

3.7 Geltungsbereich des Modells

Das Modell ist grundsätzlich modular und flexibel aufgebaut. Im Rahmen des Projektes der Systemführerschaft reicht jedoch die Untersuchung von Fahrzeugen mit 2-achsigen Fahrwerken (RDF) aus. Dies für Fahrzeuge mit zwei Fahrwerken und Fahrzeuge mit sogenannten Jacobs Fahrwerken.

Auf die Modellierung und die Simulation von Radsatz-Einzel-Fahrwerken (REF) wird verzichtet, da der Aufwand dazu in keinem Verhältnis zum Nutzen steht. Da solche Fahrzeuge des Reiseverkehrs zwingend mit einer akkuraten Radsatzsteuerung ausgerüstet werden müssten, werden derartige Zugs-Konzepte über Vergleichsrechnungen von entsprechenden Zügen mit ähnlichen Konfigurationen, Ausrüstungen und Parametern, speziell der Radsatzsteuerung sowie der Radsatzlast, hergeleitet.

Das Modell eignet sich dementsprechend grundsätzlich für die Untersuchung aller Verhaltensweisen und Eigenschaften eines Fahrzeugs, welche sich auf den quasistatischen Bogenlauf begrenzen. Diese sind zusammengefasst:

- Rad- und Schienen Kräfte, sowie Verschleiss im Bogen und Übergangsbogen, mit den betreffenden Kontaktpunkten
- Entgleisungssicherheit (Verwindungsentgleisung)
- Federungseigenschaft, wie Neigungskoeffizient, Deformationen, Wege, etc.
- Eigenfrequenzen und Dämpfungen
- Torsionsschwingungen der Radsätze

FIMO beschränkt sich zum jetzigen Zeitpunkt auf die Berechnung der quasistatischen Rad- und Schienen Kräfte sowie dem Verschleiss im Bogen.

4 Fahrzeuge, Lösungsansätze und Einsatzbereiche

Auf Grund der Vielfalt von Bahnen, Linien, Einsatzbereichen, Anforderungen und Problemstellungen liegen die bestmöglichen Zugs- bzw. Lösungs-Konfigurationen nicht einfach auf der Hand. Es wird deshalb als wichtig erachtet, alle realistisch umsetzbaren Fahrzeugkonzepte und Fahrwerktypen in Kombination mit allen möglichen Lösungsansätzen zu analysieren und zu bewerten.

Dazu werden neben den Bestandsfahrzeugen (Fahrzeuge, welche sich aktuell im Einsatz befinden) auch generische Zugskonzepte entwickelt, mit denen die gesamte Bandbreite an Zugskonzepten analysiert werden kann. Zudem können alle Zugskonzepte mit allen Lösungsansätzen «ausgerüstet» (modelliert) werden.

4.1 Bestandsfahrzeuge

Bis zum heutigen Zeitpunkt liegen für insgesamt 16 Bestandsfahrzeuge von 8 Bahnen die Daten vor. Diese sind in *Abbildung 22* aufgelistet und in *Abbildung 23* und *Abbildung 24* sind Typenbilder dieser Fahrzeuge enthalten.

Die wichtigsten technischen Daten dieser Fahrzeuge sind in den Tabellen 2 und 3 aufgelistet.

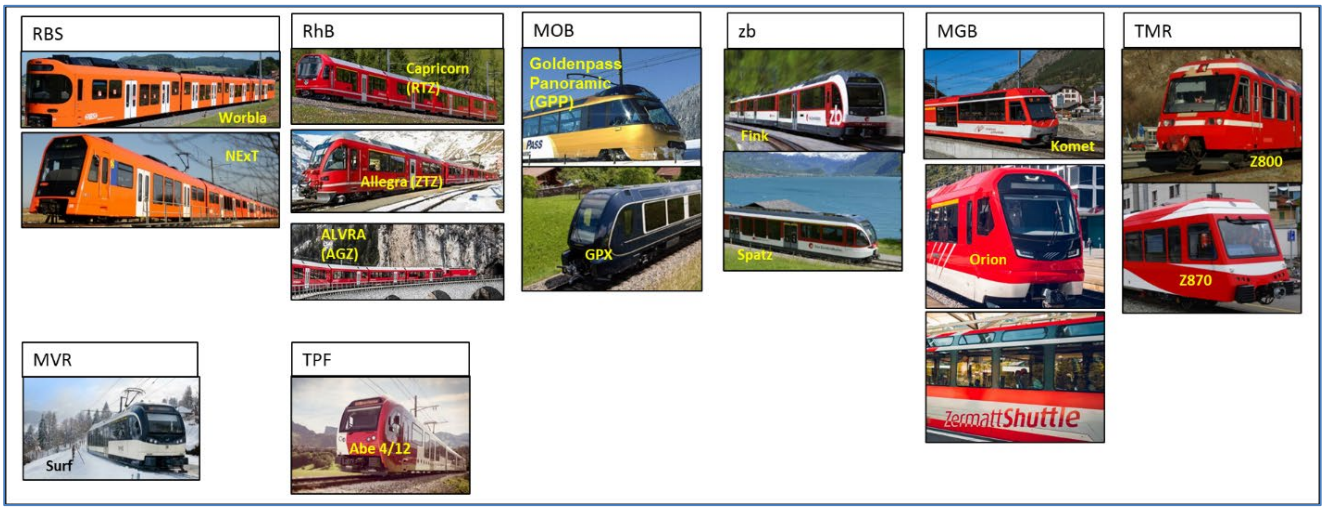


Abbildung 22: Übersicht der Bestandsfahrzeuge

Als Referenz-Fahrzeug wird das jeweilige Fahrzeug mit seiner aktuellen Konfiguration bezeichnet, welches bei der betreffenden Bahn im Betrieb ist. Als bestehender Lösungsansatz wird dabei standardmässig die Spurkranzschmierung eingesetzt.

Im Rahmen dieser ersten konzeptionellen Bewertung werden die Fahrzeuge anonymisiert behandelt, um ungewollten Rückschlüssen oder Schlussfolgerungen vorzubeugen. Schlussfolgerungen sollen nur mittels einer Bahn-, Fahrzeug- und Einsatzspezifischen Bewertung erfolgen. Diese 2. Bewertung ist im Anschluss an diese konzeptionelle Bewertung gemeinsam mit den jeweiligen Bahnen geplant.

Pos	Gruppe	Bezeichnung	Einheit	1	1	2	2	2	3	4	4
1	Zug Typ	Zug-Konzept Nr.	-	Ref_1	Ref_2	Ref_3	Ref_4	Ref_5	Ref_6	Ref_7	Ref_8
2	Identifikation	Bahngesellschaft	-	RBS	RBS	RhB	RhB	RhB	MVR	MOB	MOB
3		Zug, Fahrzeug Bezeichnung	-	Be4_10	RABe4_12	Abe_4_16	Abe_4_12	Ge_4_4_III	Abeh_2_6	Be_4_4	Ge_4_4
4		Zug, Fahrzeug Name	-	WORBLA	NExT	RTZ	ZTZ	AGZ	SURF	Goldenpass Panoramic	GPX
5						Capricorn	Allegra				
6		Zug-Konzept Bezeichnung	-	EMU	EMU	EMU	EMU	LBS	AM	LBS	LBS
7		Wagen/Fahrwerk Anordnung	-	J	K	K	K	K	K	K	K
8		Fahrwerk Typ (Z-mit Zahnrad)	-	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF_Z	RDF	RDF
9		Zugslänge	m	60	60	75	49.5	148	39.23	92.75	76.18
10		Anzahl Wagen	-	3	3	4	3	4	3	5	4
11		Anzahl Loks	-	0	0	0	0	1	1	0	1
12		Anzahl unterschiedlicher Fahrwertypen	-	2	2	3	2	3	2	2	2
13		Anzahl Triebfahrwerke: Typ-1	-	2	2	2	4	2	1	2	2
14		Anzahl Lauffahrwerke Typ-2	-	3	4	5	2	13	2	8	8
15		Anzahl Lauffahrwerke Typ-3	-	0	0	1	0	1	0	0	0
16		Anzahl Lauffahrwerke Typ-4	-	0	0	0	0	0	0	0	0
17		Radstand Triebfahrwerke: Typ-1	m	2	1.9	2	2	2.4	2.48	2	2.4
18		Radstand Lauffahrwerke Typ-2	m	2.15	1.8	2	1.8	1.8	1.9	1.8	1.5
19		Radstand Lauffahrwerke Typ-3	m			1.8		2			
20		Raddurchmesser Triebfahrwerke: Typ-1	m	0.77	0.77	0.81	0.81	1.07	0.798	0.81	1.1
21		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-2	m	0.77	0.77	0.81	0.685	0.685	0.7	0.75	0.665
22		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-3	m			0.685		0.81			
23		mittl. Radsatzlast Triebfahrwerke: Typ-1	t	11.7	9.9	11.6	11.2	15.5	14.1	13	15.5
24		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-2	t	10.3	7.1	8.6	5.9	6.3	8	6	7.3
25		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-3	t			6.4		9			

Tabelle 2: Wichtigste Parameter der Bestandsfahrzeuge Teil-1

Pos	Gruppe	Bezeichnung	Einheit	5	5	6	6	7	7	8	9
1	Zug Typ	Zug-Konzept Nr.	-	Ref_9	Ref_10	Ref_11	Ref_12	Ref_13	Ref_14	Ref_15	Ref_16
2	Identifikation	Bahngesellschaft	-	zb	zb	MGB	MGB	TMR	TMR	TPF	MGB
3		Zug, Fahrzeug Bezeichnung	-	Abeh_160	Abe_4_8	ABeh_4_8	ABeh_8_12	BDeh_4_8	Beh_4_8	Abe_4_12	Abe_4_13
4		Zug, Fahrzeug Name	-	FINK_Adler	SPATZ	Komet	Orion	Z800	Z870	Abe_4_12	Shuttle
5											
6		Zug-Konzept Bezeichnung	-	EMU	EMU	AM	EMU	EMU	EMU	EMU	AM
7		Wagen/Fahrwerk Anordnung	-	K	K	K	K	K	K	K	K
8		Fahrwerk Typ (Z-mit Zahnrad)	-	RDF_Z	RDF	RDF_Z	RDF_Z	RDF_Z	RDF_Z	RDF	RDF_Z
9		Zugslänge	m	54	51.3	56.6	56.6	37.8	40.8	55.2	56.6
10		Anzahl Wagen	-	3	3	4	3	2	3	3	4
11		Anzahl Loks	-	0	0	0	0	0	0	0	0
12		Anzahl unterschiedlicher Fahrwertypen	-	2	2	2	2	2	2	3	2
13		Anzahl Triebfahrwerke: Typ-1	-	2	2	2	4	2	2	2	2
14		Anzahl Lauffahrwerke Typ-2	-	2	2	2	2	2	2	2	2
15		Anzahl Lauffahrwerke Typ-3	-	0	0	0	0	0	0	2	0
16		Anzahl Lauffahrwerke Typ-4	-	0	0	0	0	0	0	0	0
17		Radstand Triebfahrwerke: Typ-1	m	2.38	1.9	2.54	2.4	2.88	2.54	2	2.54
18		Radstand Lauffahrwerke Typ-2	m	2	1.8	1.8	1.9	2.7	1.9	1.8	1.8
19		Radstand Lauffahrwerke Typ-3	m							1.8	
20		Raddurchmesser Triebfahrwerke: Typ-1	m	0.82	0.685	0.796	0.82	0.864	0.868	0.81	0.796
21		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-2	m	0.82	0.78	0.685	0.82	0.864	0.66	0.77	0.685
22		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-3	m							0.77	
23		mittl. Radsatzlast Triebfahrwerke: Typ-1	t	14.7	14.3	15.1	11.8	11.4	13	11.1	15.1
24		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-2	t	10.7	8.5	7.3	8.2	8.6	8.1	7.1	7.3
25		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-3	t							6.9	

Tabelle 3: Wichtigste Parameter der Bestandsfahrzeuge Teil-2

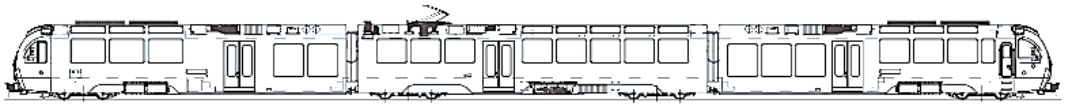
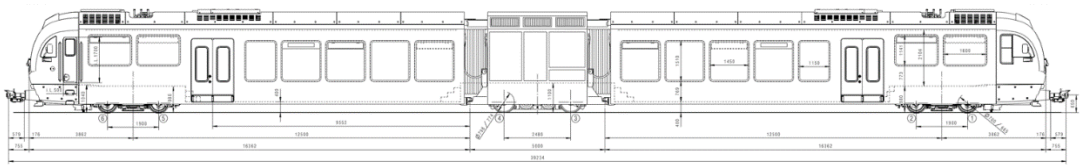
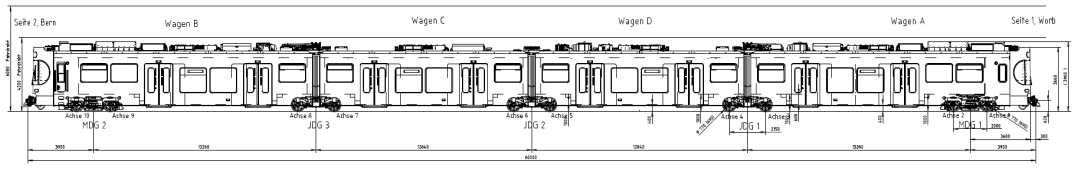
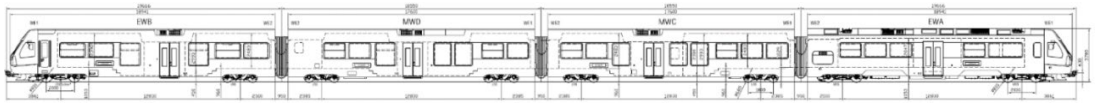
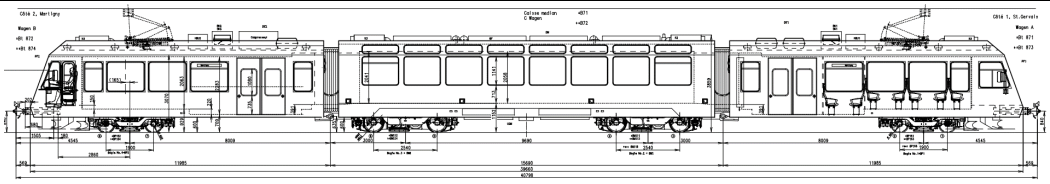
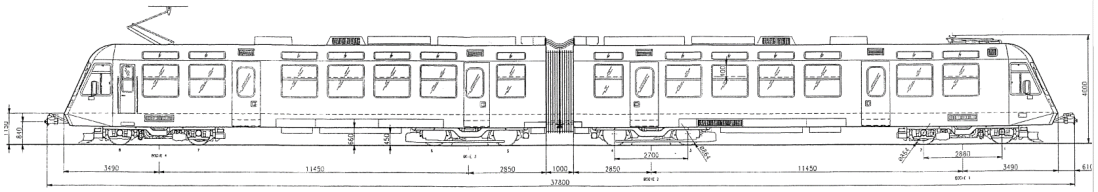
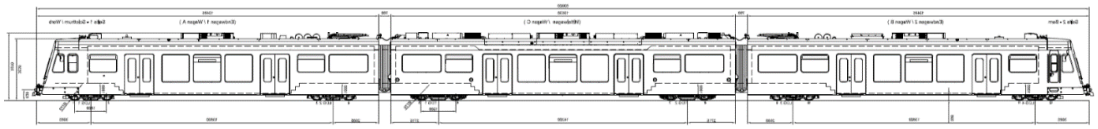
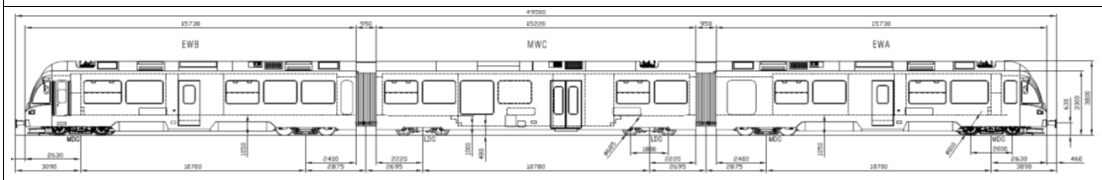
	Fink
	Surf
	Worbla
	ALVRA (AGZ)
	Capricorn (RTZ)
	Z870
	Z800
	NExT
	Allegra (ZTZ)

Abbildung 23: Typenbilder der Bestandsfahrzeuge Teil-1

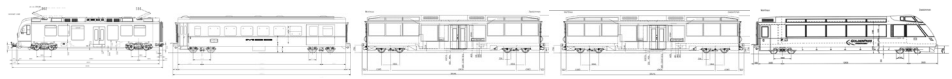
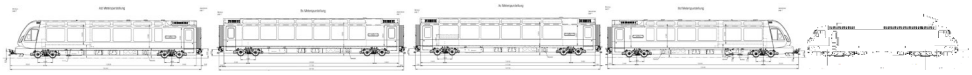
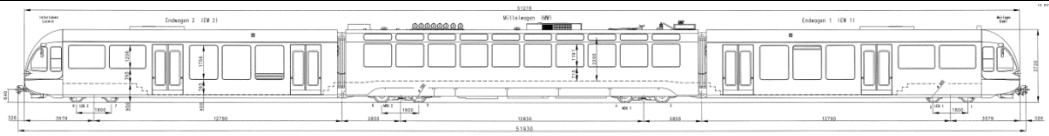
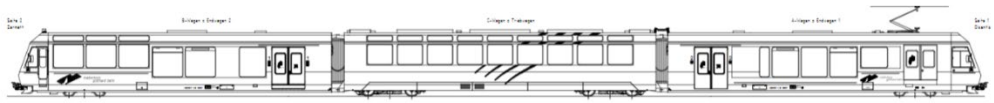
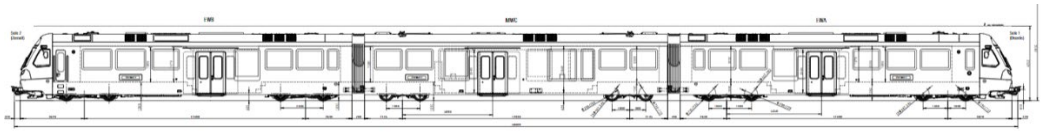
	GPP
	GPX
	SPATZ
	Komet Shuttle
	Orion
	Abe_4/12

Abbildung 24: Typenbilder der Bestandsfahrzeuge Teil-2

4.2 Generische Fahrzeuge

Aus insgesamt 25 theoretisch denkbaren Zugskonzepten wurden mittels eines Ausscheidungsverfahrens (*Abbildung 26*) 12 realistische, sogenannte generische Zugskonzepte ermittelt, welche in *Abbildung 25* aufgezeigt sind. Mit total 6 lokbespannten Zügen, 2 Zügen mit Antriebsmodulen, 4 Triebzügen und alle mit jeweils unterschiedlichen Fahrwerkkonzepten kann ein vollständiges Bild der technisch und gesetzlich (AB-EBV) möglichen Fahrzeugkonzepte aufgezeigt werden.

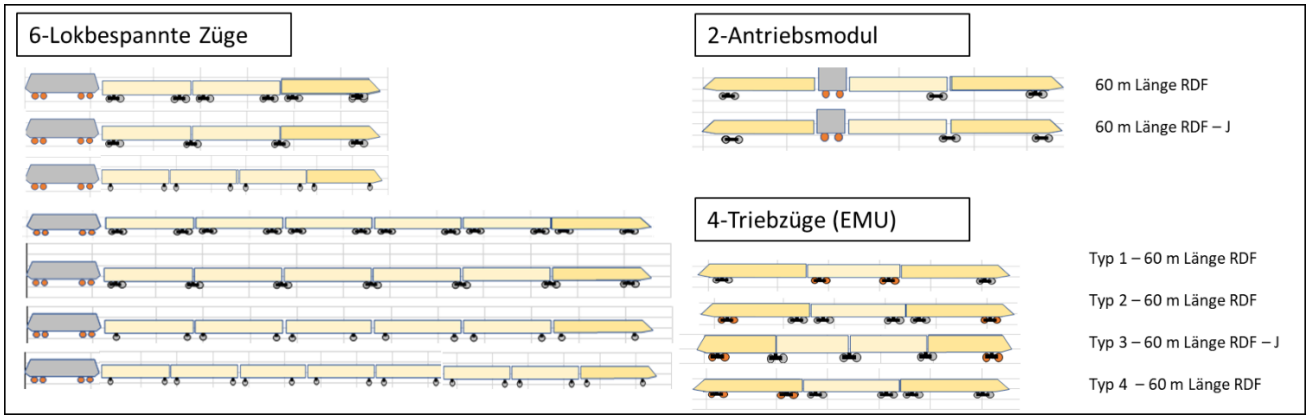


Abbildung 25: Übersicht der generischen Zugskonzepte

Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen sind diese Züge einheitlich auf 60m Länge normiert worden. Bei den lokbespannten Zügen werden jeweils 3 Züge mit 60m Länge und 3 Züge mit 120m Länge definiert, um den Vergleich von langen, lokbespannten Zügen mit Triebzügen in Doppeltraktion aufzuzeigen. Bei den lokbespannten Zügen werden auch Radsatz-Einzel-Fahrwerke (REF) eingesetzt, um auch deren Eignung für derartige Betriebseinsätze aufzuzeigen. Bei den Triebzügen und Zügen mit Antriebsmodulen kommen derartige Fahrwerke infolge zu hoher Radsatzlast nicht in Frage.

Die wichtigsten Parameter dieser generischen Zugskonzepte sind in Tabelle 4 aufgelistet.

				Lokbespannt			Antriebsmodul		Triebzug				Lokbespannt		
				60m			60m		60m				120m		
Pos	Gruppe	Bezeichnung	Einheit	RDF	RD-J	REF	RDF	RD-J	Typ-1	Typ-2	Typ-3	Typ-4	RDF	RD-J	REF
1	Zug Typ	Zug-Konzept Nr.	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	Identifikation	Bahngesellschaft	-	Generisch											
3		Zug-Konzept Bezeichnung	-	LBS_1	LBS_2	LBS_3	AM_1	AM_2	TZ_1	TZ_2	TZ_3	TZ_4	LBS_4	LBS_5	LBS_6
4		Wagen/Fahrwerk Anordnung	-	K	J	K	K	J	K	J	K	K	K	J	K
5		Fahrwerk Typ	-	RDF	RDF	REF	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF	RDF	REF
6		Zuglänge	m	76	76	76	60	60	60	60	60	60	136	136	136
7		Anzahl Wagen	-	3	3	4	3	3	3	3	4	3	6	6	8
8		Anzahl Loks	-	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9		Anzahl unterschiedlicher Fahrwertypen	-	3	4	3	3	3	2	2	2	3	3	4	3
10		Anzahl Triebfahrwerke: Typ-1	-	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
11		Anzahl Lauffahrwerke Typ-2	-	5	2	6	1	1	2	4	3	1	11	1	11
12		Anzahl Lauffahrwerke Typ-3	-	1	1	2	2	2	0	0	0	3	1	5	1
13		Anzahl Lauffahrwerke Typ-4	-	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14		Radstand Triebfahrwerke: Typ-1	m	2.4	2	2.4	2.48	2.48	1.9	2	2	2	2.4	2	2.4
15		Radstand Lauffahrwerke Typ-2	m	1.8	2	0	2	2.15	1.8	1.8	2.15	2	1.8	2	0
16		Radstand Lauffahrwerke Typ-3	m	2	1.7	0	1.9	1.9				1.8	2	1.7	0
17		Radstand Lauffahrwerke Typ-4	m		1.7									1.7	
18		Raddurchmesser Triebfahrwerke: Typ-1	m	1.07	1.07	1.07	0.798	0.798	0.685	0.81	0.77	0.81	1.07	1.07	1.07
19		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-2	m	0.685	0.77	0.8	0.81	0.77	0.78	0.685	0.77	0.81	0.685	0.77	0.8
20		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-3	m	0.81	0.81	0.8	0.685	0.685				0.685	0.81	0.81	0.8
21		Raddurchmesser Lauffahrwerke Typ-4	m		0.685									0.685	
22		mittl. Radsatzlast Triebfahrwerke: Typ-1	t	15.5	15.5	15.5	14.1	14.1	14.3	11.6	11.7	11.6	15.5	15.5	15.5
23		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-2	t	6.3	11.7	12	11.6	10.3	8.5	6.4	10.3	8.6	6.3	11.7	12
24		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-3	t	9	9	14.4	14.3	14.3				6.4	9	9	14.4
25		mittl. Radsatzlast Lauffahrwerke Typ-4	t		6.3									6.3	

Tabelle 4: Wichtigste Parameter der generischen Zugskonzepte

Zur Entwicklung dieser Zugskonzepte wurden aus den bestehenden Zügen spezifische Charakteristiken ermittelt wie:

- Spezifische Wagenkastenmasse (kg/m)
- Primär gefederte Masse des Fahrwerks
- Ungefederte Masse des Fahrwerks

Als Auswahlkriterien wurden folgende Eigenschaften festgelegt:

- Radsatzlast < 16 t (mit Sicherheitsfaktor 0.9)
- Wagenkastenlänge > 12 m
- Anfahrtsbeschleunigung > 0.8 m/s^2 (in der Ebene)

Der Prozess der Herleitung ist in Abbildung 22 aufgezeigt. Für jedes Zugskonzept wurde im ersten Schritt die Anzahl benötigter Wagen zur Einhaltung der Grenze der Radsatzlast ermittelt.

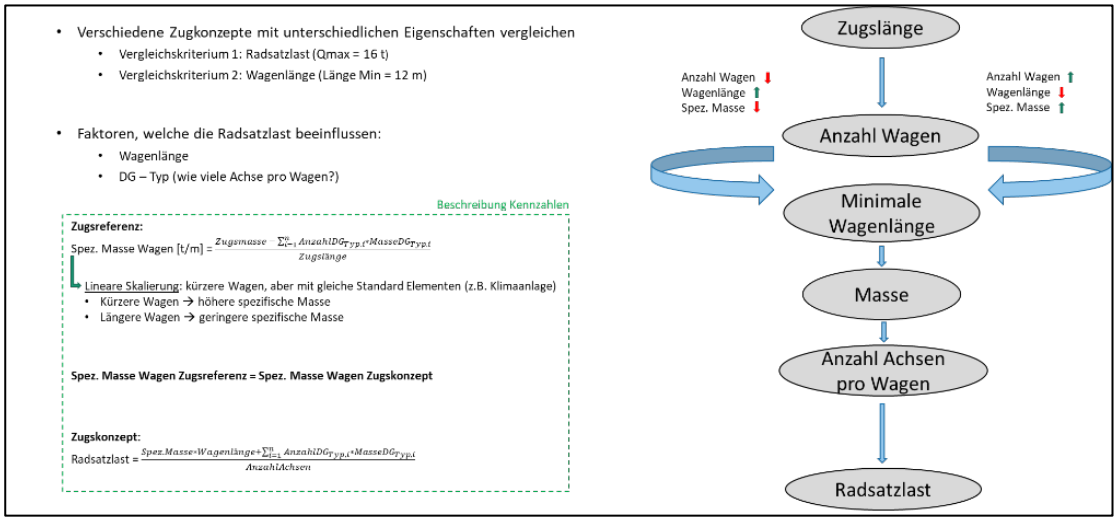


Abbildung 26: Prozess der Berechnung von Radsatzlast und Wagenlänge

Konnte die minimale Wagenlänge nicht erreicht werden, wurde das entsprechende Zugskonzept ausgeschieden. Ebenso, wenn die maximale Radsatzlast überschritten wurde oder die minimale Anfahrbeschleunigung nicht erreicht werden konnte.

4.3 Systeme/Lösungsansätze

Die Fahrwerke aller heutigen Fahrzeuge sind bis auf wenige Ausnahmen mit einer steifen Radsatzführung ausgeführt. Die Längssteifigkeiten liegen in der Grössenordnung von ca. 10 kN/mm und lassen damit keine Radialeinstellung der Radsätze in den Bögen zu. Sie sind damit nicht geeignet für ein verschleissarmes Befahren von engen Bögen. Für ein verschleissarmes (milder Verschleiss) Befahren von engeren Bögen müssten deutlich kleinere Längssteifigkeiten eingesetzt werden. Der minimal zulässigen Längssteifigkeit sind wiederum Grenzen durch den Antrieb, die Bremse sowie die Laufstabilität des Fahrzeugs gesetzt.

In der Vergangenheit wurden verschiedenste Lösungsansätze entwickelt, mit welchen radiale Einstellungen der Radsätze erreicht oder zumindest unterstützt werden sollten, um das Ziel der Verschleissminderung anzustreben. Eine Übersicht der in FIMO eingesetzten Systeme bzw. Lösungsansätze zur Radialeinstellung der Radsätze ist in *Abbildung 27* aufgezeigt.

Neben diesen eigentlichen Lösungsansätzen spielt auch deren Empfindlichkeit auf die Berührgeometrie (Δr) sowie die Traktionskraft eine wesentliche Rolle. Die unabgefederten Massen, sowie die Eigenschaften der Fahrbahn, z.B. die Fahrbahnsteifigkeit, werden bei der quasistatischen Betrachtung von FIMO keine Rolle spielen. Diese Einflüsse werden in den Projekten P3/P4 vertieft behandelt.

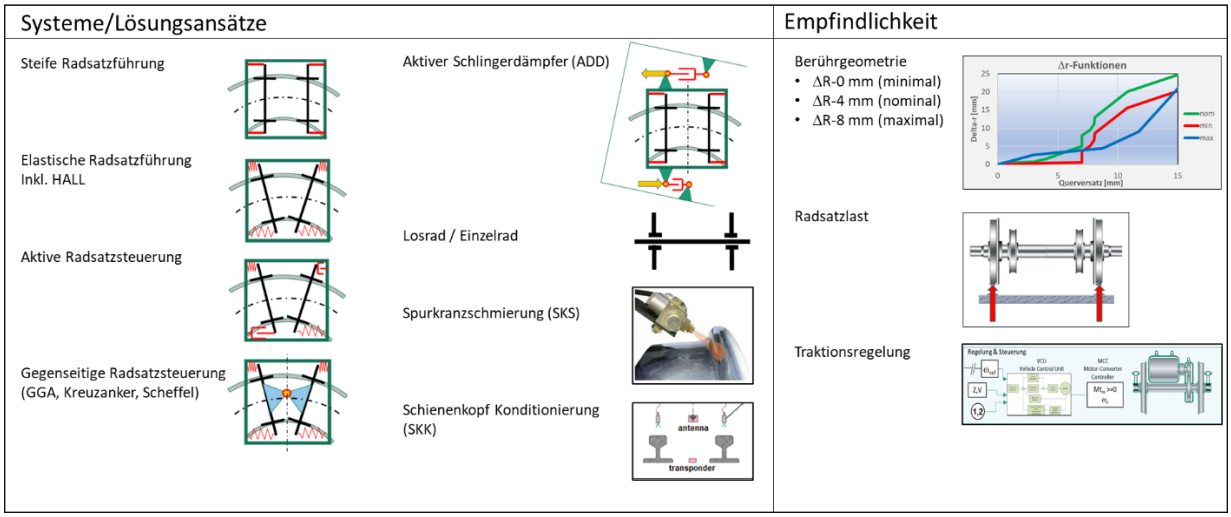


Abbildung 27: Übersicht der Lösungsansätze und Empfindlichkeiten

Die elastische Radsatzführung wird in FIMO gleichgesetzt mit dem sogenannten HALL-Lager, einem hydraulischen Achslenkerlager, welches seine Längssteifigkeit frequenzabhängig verändert. Dieses wird heute vor allem im Normalspurbereich eingesetzt. Bei sehr kleinen Bogenradien gemäss EN 14363 (250 – 400 m) und zulässigen Geschwindigkeiten in der Geraden bis 200 km/h bieten diese im Normalspur-Bereich eine wesentliche Verringerung des Verschleisses bei entsprechend niedrigen Investitionskosten. Da dieser Effekt bei der quasistatischen Bogenfahrt nicht zum Tragen kommt, wird in FIMO die untere Steifigkeit (statische Steifigkeit) des HALL-Lagers einer rein elastischen Radsatzführung gleichgesetzt.

Als weitere, rein passive Lösungen der Radialsteuerungen können die gegenseitig gesteuerten Radsätze (GGA) bezeichnet werden. Bei der GGA-Lösung werden die beiden Radsätze mit einer sogenannten Querkoppelung versehen, sodass sich der vorlaufende Radsatz immer in entgegengesetzter Richtung zum nachlaufenden Radsatz einstellt. Die Energie bzw. Kräfte zur Einstellung des vorlaufenden Radsatzes werden durch die Reibenergie zwischen Rad und Schiene des nachlaufenden Radsatzes generiert.

Bei Losrädern oder Einzelrädern drehen sich alle Räder unabhängig voneinander. In FIMO wird diese Bauart durch «0»-Setzen der Torsionssteifigkeit der Radsatzwelle realisiert. Physikalisch verhalten sich Losräder identisch wie Einzelräder.

Allen passiven Lösungen sind in der Regel die Nachteile gemein, dass diese bei unzureichender Berührgeometrie ihre Selbststeuerung verlieren (ausser GGA) und unter Einfluss von Traktionskräften nicht mehr richtig steuern.

Als wirksamste Lösung in kleinen bis sehr kleinen Bogenradien der Meterspur mit geringer Empfindlichkeit auf diese Faktoren und damit mit nachhaltiger Wirkung in Bezug auf die Kräfte und den Verschleiss in sehr engen Bögen, ist die aktive Radsatzsteuerung zu betrachten. Diese steuert die Radsätze entsprechend dem Bogenradius aktiv in eine radiale oder teilradiale Stellung. Da bei den engen Bogenradien im Meterspurbereich, sowie durch die konstruktiven Grenzen bestehender Fahrwerke davon auszugehen ist, dass nicht immer eine vollständige Radialeinstellung realisiert werden kann, werden die Analysen für 100, 75, 50 und 25% aktive Radialeinstellung durchgeführt. Dabei wird für 100, 75 und 50% ohne SKS und bei 50 und 25% zusätzlich SKS berücksichtigt.

Mit einem aktiven Schlingerdämpfer oder Drehdämpfer (ADD) wird im Bogen ein Moment auf das Fahrwerk um die Hochachse aufgebracht und das Fahrwerk in eine Sehnenstellung gebracht. Damit wird der Anlaufwinkel etwas reduziert, die Radsätze werden dabei jedoch nicht ausgelenkt.

Für die beiden Lösungsvarianten, aktive Radsatzsteuerung und aktiven Drehdämpfer (ADD), wurde im Vorfeld eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt, um die optimalen Steuerungsparameter zu ermitteln, welche die niedrigsten spez. Reibarbeitswerte über alle Bogenradien liefern.
Bei der aktiven Radsatzsteuerung erweist sich die 100%ige Steuerung als beste Konfiguration. Beim ADD ergibt sich ein, entsprechend dem Bogenradius, abgestuftes Moment, welches zudem entsprechend dem Radstand sowie der Radsatzlast für jedes Fahrwerk skaliert wird.

Spurkranzschmierung (SKS) und Schienenkopfkonditionierung (SKK) zielen ausschliesslich auf die Reduktion des Verschleisses bzw. der Schädigungen ab. Diese werden mittels unterschiedlicher Reibwerte am Spurkranz sowie an der Lauffläche in FIMO berücksichtigt.

Sollten auf dem Markt weitere Lösungsansätze angeboten werden, lassen sich diese als Untervarianten zu den gewählten Systemen einstufen und damit deren Wirksamkeit über entsprechende Vergleiche der Parameter erzielen.

Die wesentlichen Parameter der Lösungsansätze sowie Empfindlichkeitsanalyse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

		Variante				
Bezeichnung	**Einheit**	**1**	**2**	**3**	**4**	**Bemerkung**
Elastische Radsatzführung: Steifigkeit Cxk_el / Hall	kN/mm	(1.5)	3.55			mit SKS
Aktive Radsatzsteuerung: Steuerungsfaktor (Wert)	- -	1 0.4	0.75 0.4	0.5 0.4/0.15	0.25 0.15	
Aktiver Schlingerdämpfer: Ausdrehmoment (Wert)	kNm	18.98	12.65	0		mit SKS u. lineare
für Bogenradius	m	45 -325	600	1000		Interpolation über "R"
Reibwert Spurkranz-SKS	-	0.15				
Reibwert Lauffläche-SKK	-	0.2				
Traktionsschlupf (Schlupfgeschwindigkeit)	km/h	0	1.5	4		
Radstand	m	2	1.6	1		
Raddurchmesser	m	0.77	0.616	0.385		
Radsatzlast	t	11.7	9.36	5.85		

Tabelle 5: Wesentliche Parameter der Lösungsansätze und Empfindlichkeitsanalyse

4.4 Bahnen, Einsatzbereiche

Zum heutigen Zeitpunkt sind die Bogenverteilungen für insgesamt 32 Linien von 11 Bahnen in FIMO eingepflegt. In *Abbildung 28* sind die prozentualen Anteile der Bogenradien aller Linien aufgezeigt. Für die Berechnungen und Analysen werden die in Tabelle 6 aufgelisteten, repräsentativen Bogenradien-Klassen verwendet.

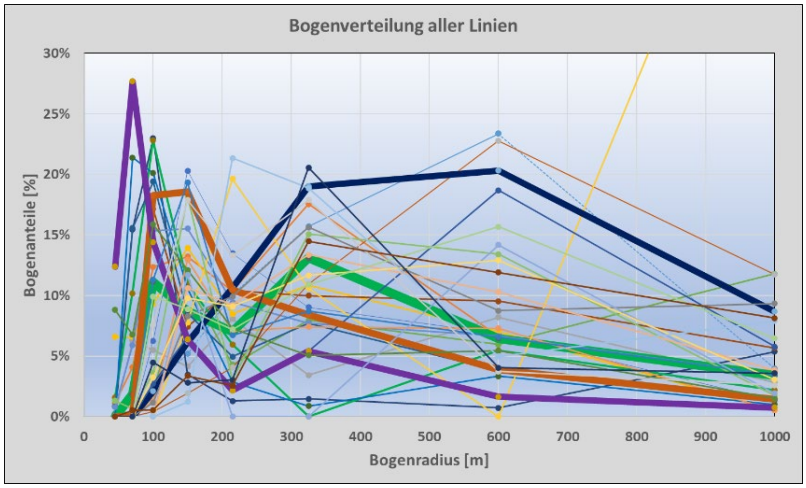


Abbildung 28: Bogenverteilung aller Linien

Mittels vergleichen der einzelnen Linien konnten vier charakteristische Streckenprofile ermittelt werden.

Diese sind in *Abbildung 28* als fette Linien hervorgehoben und in *Abbildung 29* separat dargestellt. Die konzeptionelle Bewertung wird mit diesen vier Linien durchgeführt werden.

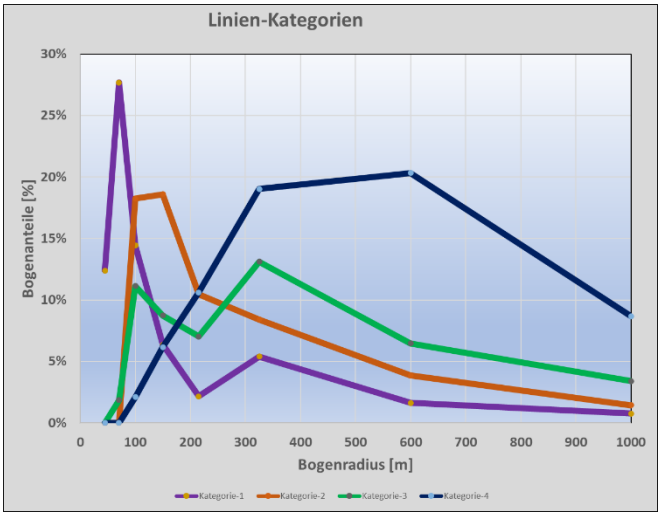


Abbildung 29: Bogenverteilung der 4 Linien-Kategorien

Bereich	Radius
40 -50 m	45
60-80 m	70
80-120 m	100
120-180 m	150
180-250 m	215
250-400 m	325
400-800 m	600
800 - 2000 m	1000

Tabelle 6: Bogenradien-Klassen

In Tabelle 7 sind alle Linien mit ihrer Zuordnung zu den vier Kategorien dargestellt.

Str-Nr	Bahn	Linie	Start-Ort	Ziel-Ort	Länge	Geraden	Kat
1	AB	854	Gossau	Wasserauen	32026	42.2%	2
2	AB	855	Appenzell	St. Gallen	20355	30.8%	2
3	AB	856	Gais	Altstätten Stadt	7595	60.2%	3
4	AB	859	St. Gallen	Trogen	9278	31.7%	2
5	FB	731	Zürich Rehalp	Esslingen	12796	36.8%	4
6	FW	851	Frauenfeld	Will	17132	54.0%	3
7	GGB	142	Zermatt	Gornergrat	9161	46.7%	1
8	MGB	140	Brig	Zermatt	42790	37.7%	2
9	MGB	610	Brig	Disentis/Mustér	94967	47.8%	3
10	MGB	611	Göschenen	Andermatt	3618	37.3%	1
11	MVR	112	Vevey	Blonay	5599	36.4%	1
12	MOB	113	Blonay	Les Pléiades	4782	38.7%	1
13	MOB	120	Montreux	Zweisimmen	62084	34.8%	2
14	MOB	321	Zweisimmen	Lenk im Simmental	12684	63.0%	2
15	RBS	292	Solothurn	Zollikofen	32525	45.0%	4
16	RBS	293	Unterzollikofen	Bern	1575	6.6%	2
17	RBS	294	Worb Dorf	Worblaufen	11115	32.1%	4
18	RBS	295	Bern Egghölzli	Worb Dorf	6666	42.6%	2
19	RhB	910	Landquart	Davos	54248	57.3%	4
20	RhB	915	Klosters	Filisur	36928	38.4%	2
21	RhB	920	Landquart	Disentis Mustér	72150	46.1%	4
22	RhB	930	Chur	Arosa	25777	28.6%	1
23	RhB	940	Reichenau Thamins	St. Moritz	78288	42.9%	2
24	RhB	950	St. Moritz	Tirano	60485	36.8%	2
25	RhB	959	Samedan	Pontresina	5396	71.9%	4
26	RhB	960	Bever	Scuol-Tarasp	49554	43.0%	4
27	zb	469	Meiringen	Interlaken-Ost	28087	43.6%	2
28	zb	470	Luzern	Meiringen	44128	39.3%	4
29	zb	474	Meiringen	Innerkirchen	5045	59.7%	3
30	zb	480	Hergiswil	Engelberg	24214	57.7%	4
31	TPF	117	Palézieux	Chatel-Saint-Denis	6658	35.6%	2
32	TPF	118	Palézieux	Montbovon	36514	49.5%	4

Tabelle 7: Übersicht der verfügbaren Linien sowie deren Zuordnung zu den Kategorien

Insgesamt können folgende Zuweisungen der Linien zu den Kategorien erfolgen:

Kategorie	Anzahl Linien	Linien-Nr.	Bahnen
1	5	142, 611, 112, 113, 930	MGB, MVR, MOB, RhB
2	13	854, 855, 859, 140, 120 321, 293, 295, 915, 940 950, 469, 117	AB, MGB, MOB, RBS, RhB, zb, TPF
3	4	856, 851, 610, 474	AB, FW, MGB, zb
4	10	731, 292, 294, 910, 920 959, 960, 470, 480, 118	FB, RBS, RhB, zb, TPF

Tabelle 8: Zusammenfassung der Linien, Kategorien und zugehörigen Bahnen

Nach dem Vorliegen der entsprechenden Daten werden die Linien noch bezüglich Adhäsions- und Zahnrad-Bereiche aufgeteilt, sowie die Bereiche mit Schienenkopfkonditionierung ausgewiesen.

5 Analysen

Dieses Kapitel beinhaltet alle Analysen und Auswertungen bis zu einer Abschätzung der zu erwartenden, erfolgversprechenden Lösungen. Das Konzept zur Analyse und Bewertung, vor Allem der Prozess von der Berechnung bis zur eigentlichen Bewertung, ist in [8] detaillierter beschrieben. Im ersten Schritt wird die Vorgehensweise kurz erläutert, im zweiten werden Analysen zur Eingrenzung der Varianten sowie Empfindlichkeitsanalysen durchgeführt und im dritten Schritt erfolgt die eigentliche Definition der erfolgversprechenden Lösungen bzw. die erste konzeptionelle Bewertung.

Die Analysen werden für die vier Linien-Kategorien aus Kapitel 4 durchgeführt. Die Gewichtung der Wear- und RCF-Kennwerte erfolgt entsprechend der Angaben aus der Umfrage Grundlagenscanning (Projekt P1) der entsprechenden Bahnen, deren Linien die Kategorien repräsentieren (Tabelle 9).

Gewichtung von Wear und RCF				
Bahn	**RhB**	**RhB**	**MGB**	**RBS**
Kat	**1**	**2**	**3**	**4**
Start-Ort	Chur	Klosters	Brig	Worb Dorf
Ziel-Ort	Arosa	Filisur	Disentis/Mustér	Worblaufen
Wear-SK	50.0%	50.0%	11.0%	100.0%
Wear-LF	50.0%	50.0%	61.6%	0.0%
RCF	0.0%	0.0%	27.4%	0.0%

Tabelle 9: Gewichtung der Wear- & RCF-Werte

Die Berechnungen wurden für die angegebenen Linien durchgeführt. Die Gewichtung erfolgte jedoch Bahn- und nicht Linienspezifisch, sodass diese Gewichtung für die konzeptionelle Bewertung nur als Indikation angesehen werden kann. In einer späteren, bahnspezifischen Bewertung müssen diese Gewichtungen Linienspezifisch eingesetzt werden.

5.1 Vorgehensweise

Da anzunehmen ist, dass aus Sicht von Verschleiss und Schädigung die «beste Lösung» sowohl beim schwersten Motordrehgestell als auch beim leichtesten Laufdrehgestell gleich ist, werden die grundsätzlichen Analysen zur Eingrenzung der Varianten und Lösungsansätze mit dem Motordrehgestell des Fahrzeugs «WORBLA» durchgeführt.

Zur Ermittlung der erfolgversprechenden Lösungen wird dementsprechend folgendes Vorgehen gewählt:

1. Untersuchung der Empfindlichkeit von Verschleiss und Rissfortschritt in Funktion des Anlaufwinkels (α) für Radsatzlasten mit folgenden Fahrwerken:
    a. RhB RTZ Fahrwerktyp-3 mit 2Qo = 6.4 t
    b. RBS Worbla Fahrwerktyp-1 mit 2Qo = 11.7 t
    c. RhB AGZ Fahrwerktyp-1 mit 2Qo = 15.5 t
    d. Untersuchung des Verhaltens aller Lösungsansätze in allen Bogenradien Klassen gemäss Tabelle 7 mit RBS Worbla, Fahrwerktyp-1 mit 2Qo = 11.7 t
2. Untersuchung der Lösungsansätze auf den verschiedenen Kategorien der Linien gemäss Abbildung 24 mit RBS Worbla, Fahrwerktyp-1 mit 2Qo = 11.7 t
3. Untersuchung des Verhaltens der Zugskonzepte auf den verschiedenen Kategorien der Linien
4. Untersuchung der Empfindlichkeit der Lösungsansätze mit RBS Worbla, Fahrwerktyp-1 auf:
    a. Berührgeometrie (Δr)
    b. Traktionskraft bzw. Traktionsschlupf
    c. Verschiedene Fahrzeug- bzw. Fahrwerkparameter

5. Vorausscheidung bzw. Favorisierung von Varianten aus den Ergebnissen der Untersuchungen aus 1. – 4.
6. Weiterführende Analysen (in 2. Bewertung)
    a. Bahnspezifische Bewertung aller Zugskonzept und Lösungsansätze
    b. Fahrzeug- bzw. Fahrwerkspezifische Abschätzung der Reprofilierung-Intervalle für alle Lösungsansätze
    c. Ableiten der erfolgversprechenden Varianten, Bahn- bzw. Einsatzspezifisch

5.2 Analyse zur Reduktion der Varianten

Im Folgenden werden die Punkte 1 - 6 detaillierter beschrieben.

5.2.1 Verschleiss & Rissfortschritt = f(a) (Anlaufwinkel)

Die Analyse (siehe *Abbildung 30* bis *Abbildung 36*) zeigt, dass sich der Verschleiss (Wear) sowie der Rissfortschritt (RCF) am Rad und an der Schiene proportional zum Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene verhalten. Die Darstellung der Abhängigkeit des Verschleisses am Spurkranz und der Lauffläche sowie des Risswachstums in Funktion des Anlaufwinkels sollen ein Gefühl der Empfindlichkeit und Grössenordnungen vermitteln und damit die Interpretation sowie das Verständnis der nachfolgenden Analysen schärfen.

Die Analyse wurde für alle Lösungsansätze mit und ohne Spurkranzschmierung sowie drei verschiedenen Radsatzlasten durchgeführt. Die Lösungsansätze sind:

- Mit SKS: 'steif-SKS', 'Cx-Hall-SKS', 'GGA-SKS', 'ADD-SKS', 'Cx-act-05-SKS', 'Cx-act-025-SKS'
- Ohne SKS: 'Cx-act', 'Cx-act-075', 'steif', 'Cx_Hall', 'GGA', 'ADD'

Die Radsatzlasten sind 6.4 t, 11.7 t und 15.5 t.

Eine Rad- und Zonenspezifische Auswertung ist in den folgenden Abbildungen für das Worbla MDG mit dem nominalen Radprofil mit Δr = 4 mm dargestellt. *Abbildung 30* zeigt die spez. Reibarbeiten Wb, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die Verschleisskoeffizienten (Wear), und

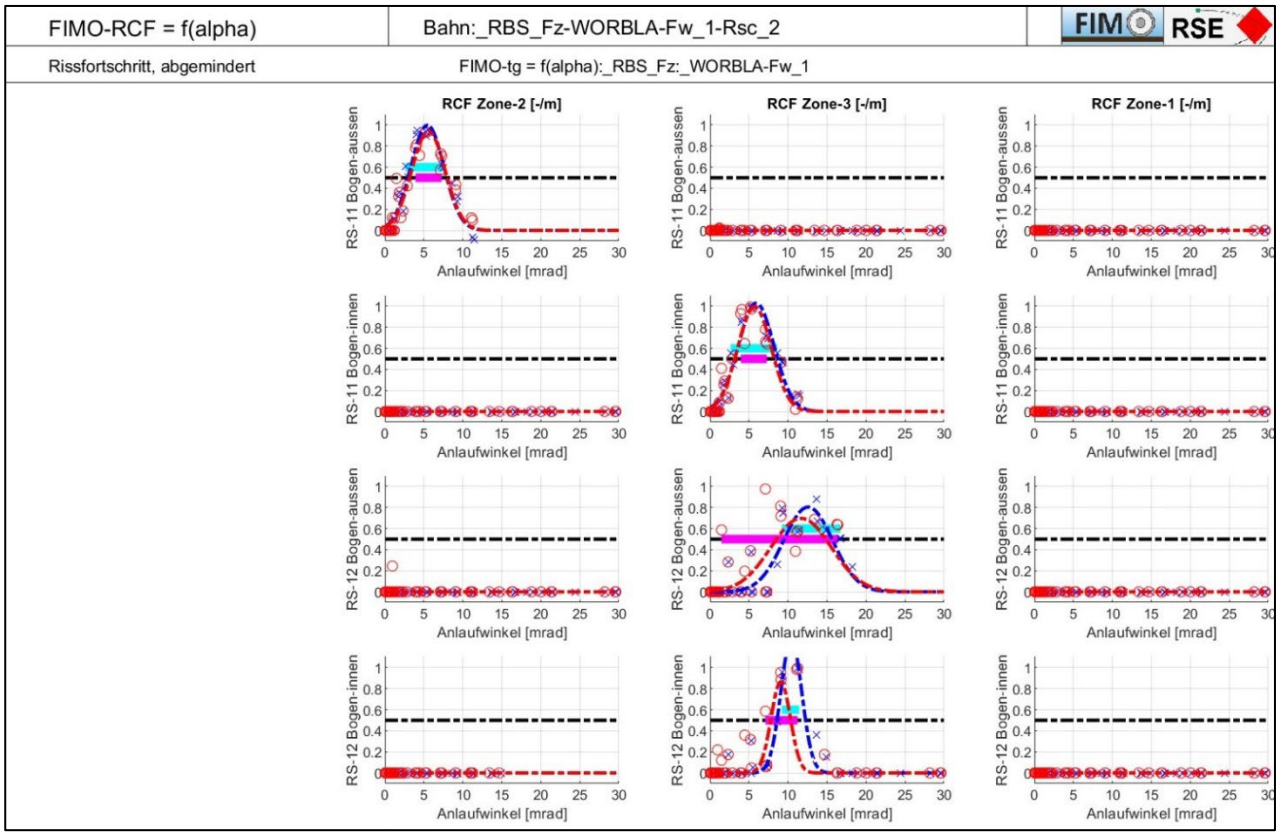


Abbildung 32 zeigt die RCF-Werte der Zonen der Lauffläche.

In allen diesen Abbildungen lässt sich gut erkennen, über welche Zonen und Räder der Verschleiss (Wear) bzw. der Rissfortschritt (RCF) für diese Profilkombination stattfinden.

Für eine absolute Bewertung von Wear und RCF sind nicht die Werte der Zonen der einzelnen Räder massgebend, sondern die Akkumulation der Werte über das Fahrwerk, also aller vier Räder. Diese Auswertungen sind in *Abbildung 33*, *Abbildung 34* und *Abbildung 35* für die drei Radprofile angegeben. Zusätzlich sind zum besseren Verständnis auch die Querwege der beiden Radsätze gegenüber der Schiene dargestellt.

Eine umfassende Interpretation der Ergebnisse wird für die Zusammenfassung aller Analysen über die Radsatzlasten, Radprofile und Varianten, mit und ohne Spurkranzschmierung (SKS), zu *Abbildung 36* gegeben.

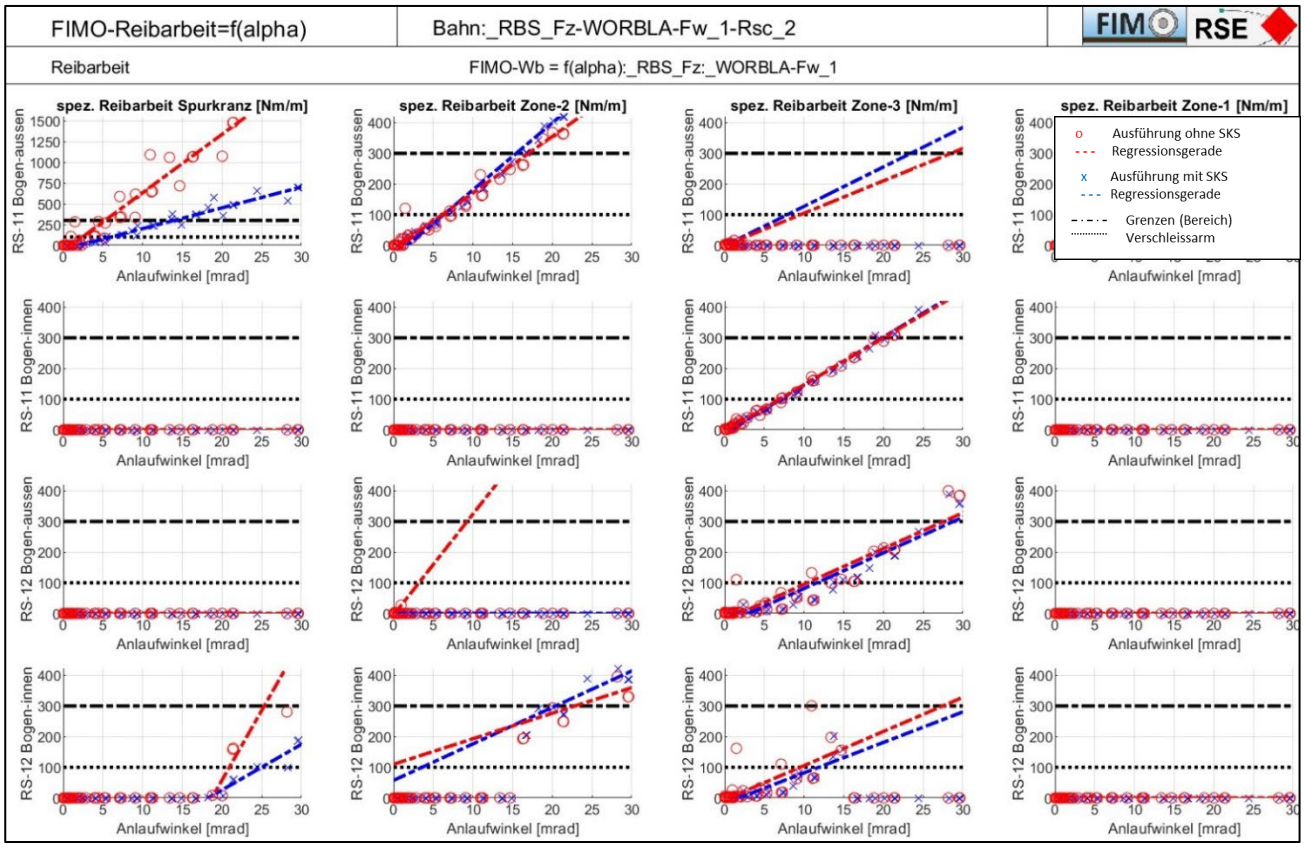


Abbildung 30: spez. Reibarbeit für ⊿r = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast
(Legenden zur besseren Lesbarkeit über Graphik mit «0» Werten angeordnet)

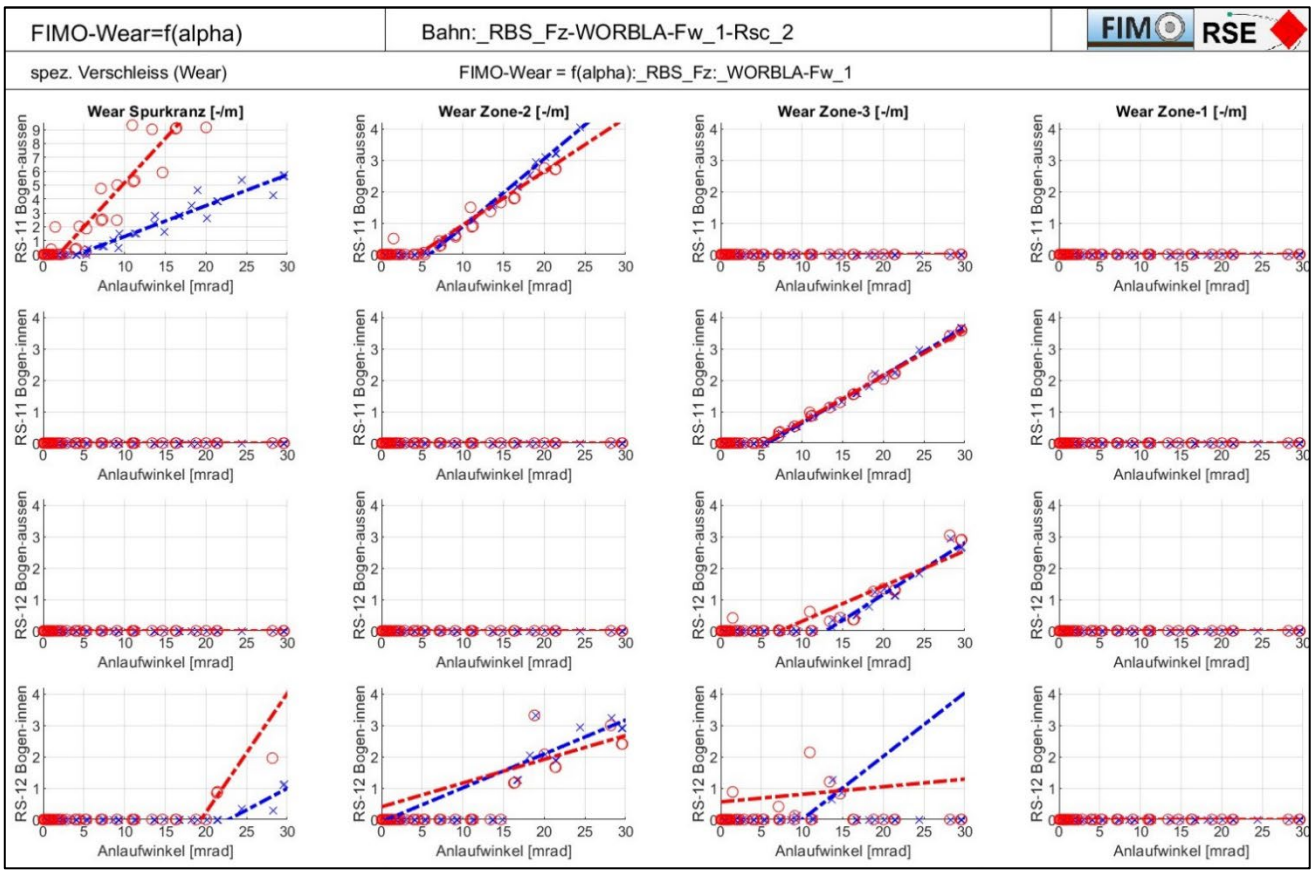


Abbildung 31: Wear-Werte für ⊿r = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast

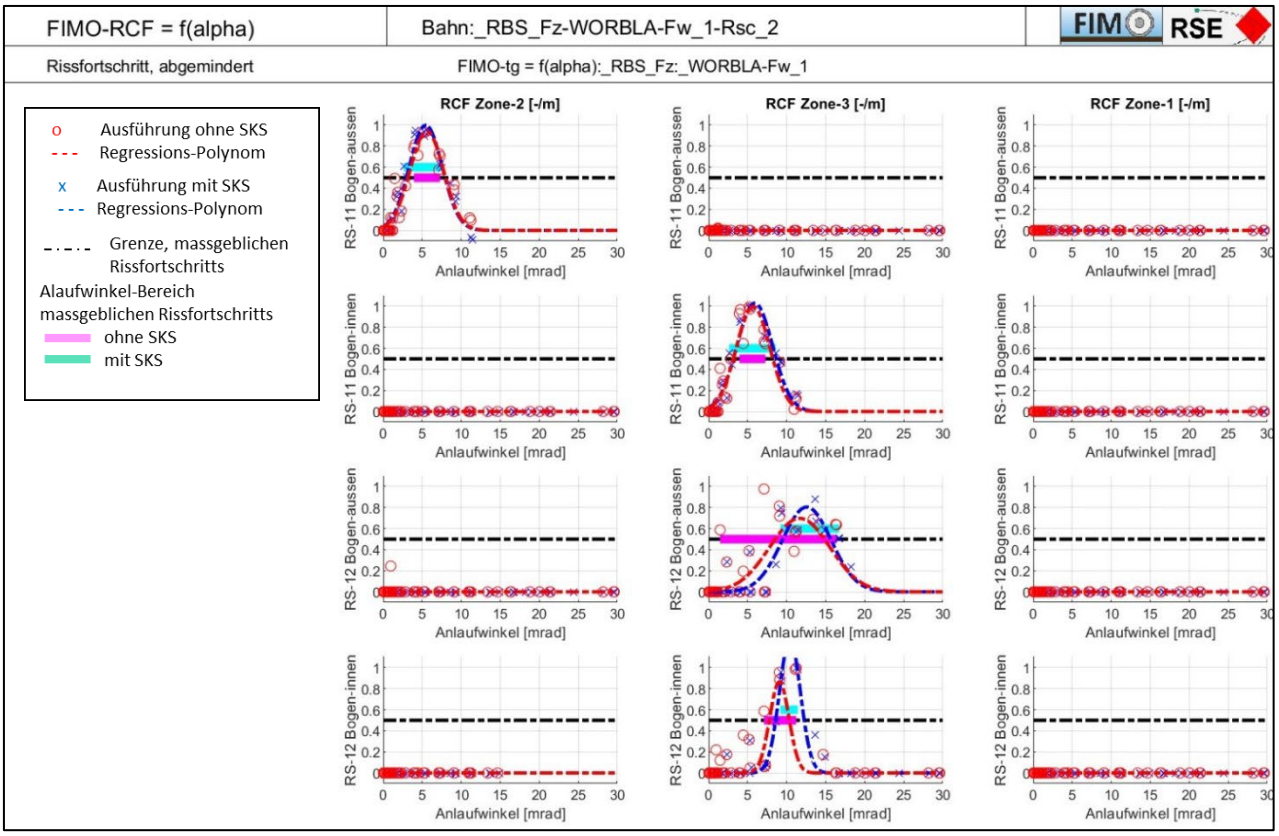


Abbildung 32: RCF-Werte für Δr = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast

Abbildung 33, *Abbildung 34* und *Abbildung 35* zeigen wie bereits erwähnt, die akkumulierten Wear- und RCF-Werte über das Fahrwerk.

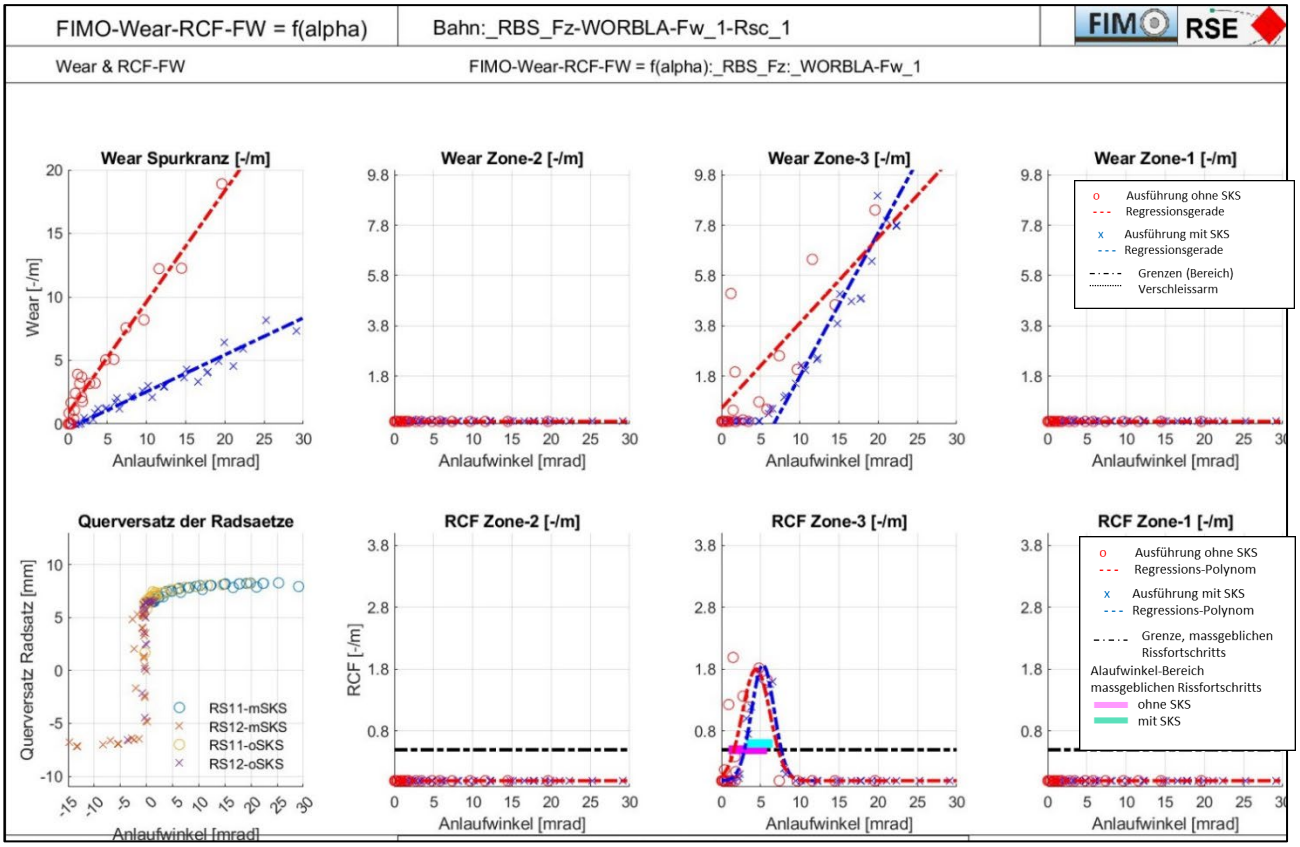


Abbildung 33: Wear, RCF & Querversatz Werte für Δr = 0 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast

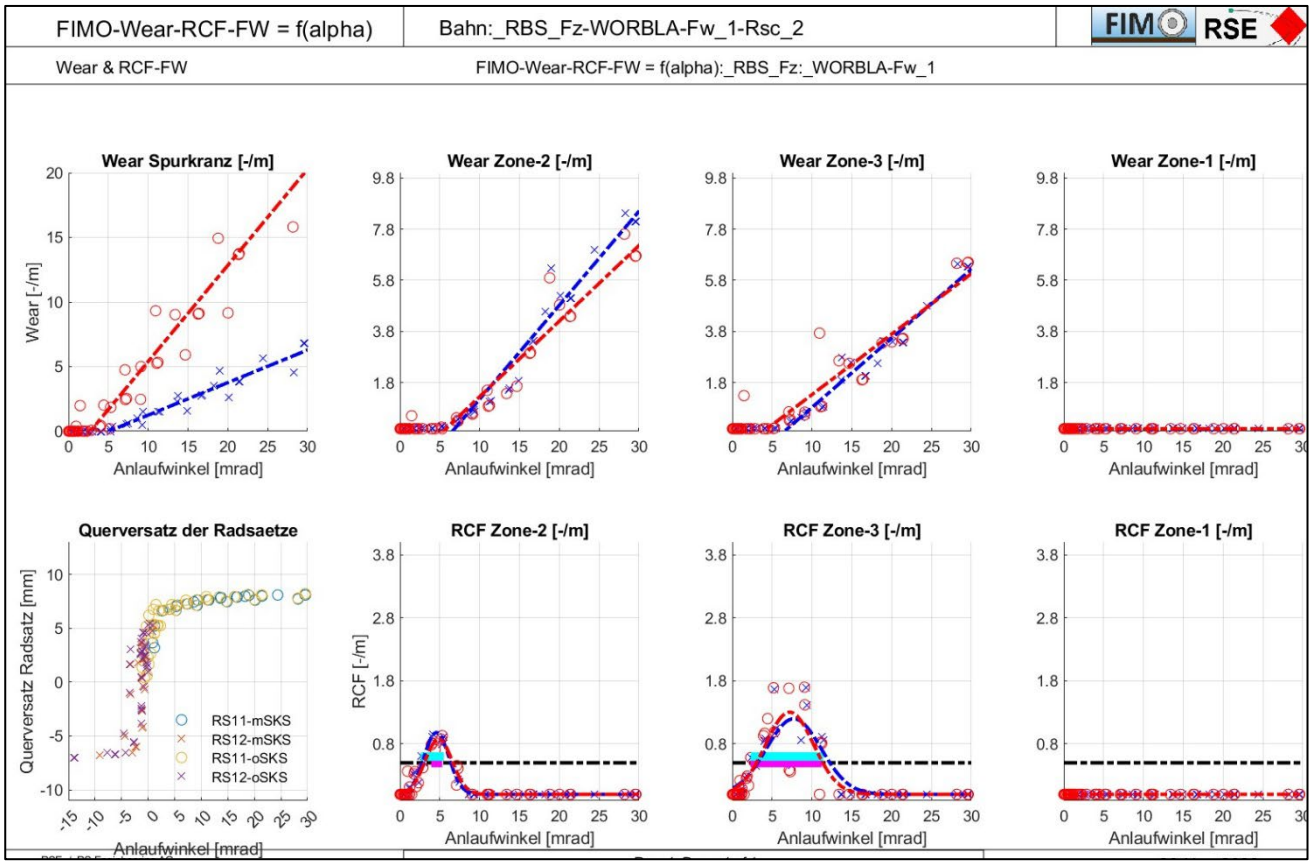


Abbildung 34: Wear, RCF & Querversatz Werte für ∆r = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast

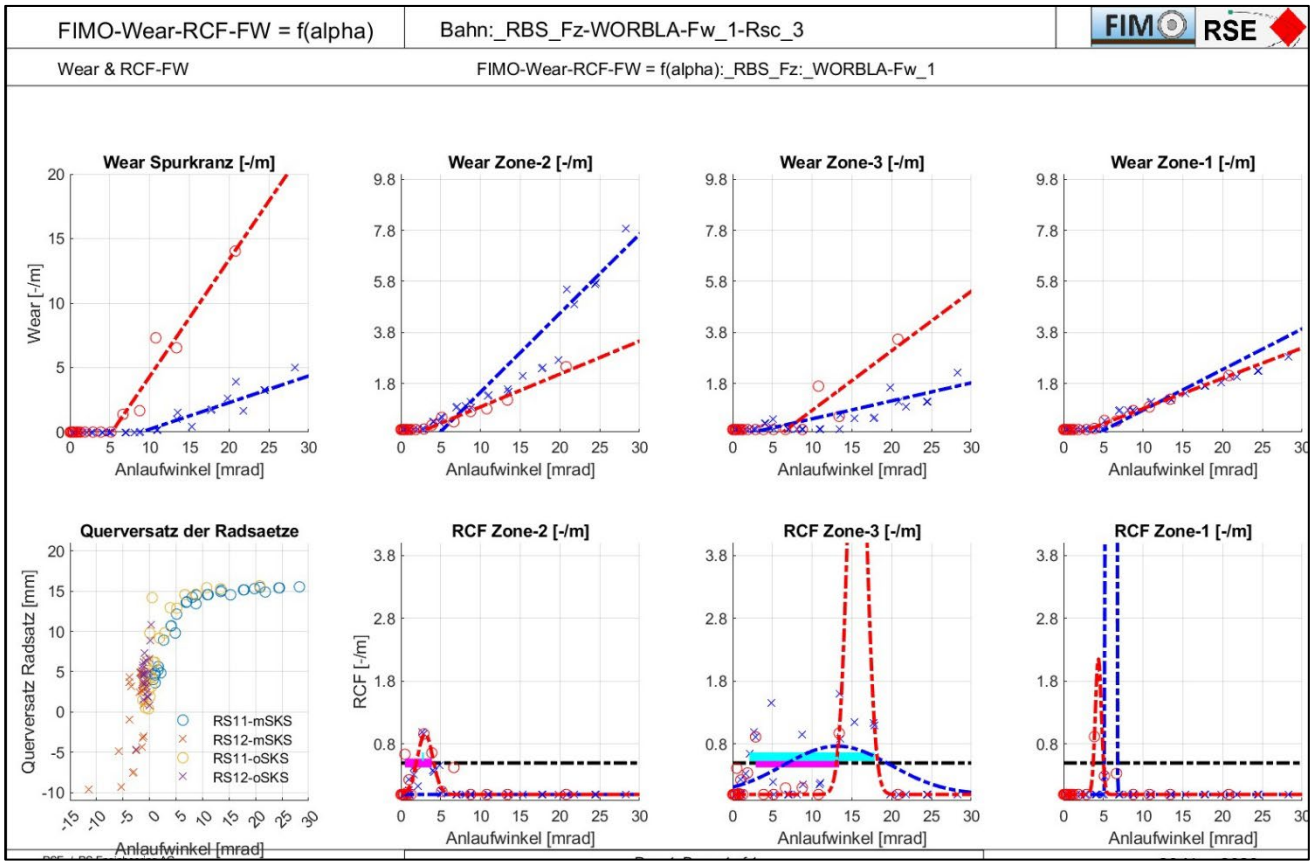


Abbildung 35: Wear, RCF & Querversatz Werte für ∆r = 8 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast

Es zeigt sich ein deutlich unterschiedliches Verhalten bezüglich Wear und RCF über die Zonen zwischen den drei Radprofilen. Beim Profil mit 0 mm Δr, konzentriert sich der Verschleiss auf die Zone 3 sowie den Spurkranz. Mit Zunahme des zur Verfügung stehenden Δr, verteilt sich der Verschleiss auf die Zonen 3 und 2. Der Verschleiss am Spurkranz ist praktisch unabhängig vom Δr, ausser bei hohen Radsatzlasten. Der Einsatz der Spurkranzschmierung führt zu einer massiven Reduktion des Spurkranzverschleisses, unabhängig vom Δr.

Der Rissfortschritt (RCF) wird bei allen Profilen gefördert, vor allem in der Zone 3. Auf Grund der kleineren Kontaktfläche sowie dem höheren Verschleiss beim Radprofil mit fehlendem Δr, konzentriert sich der Rissfortschritt auf einen Bereich an Anlaufwinkel kleiner ca. 10 mrad. Bei Radprofilen mit höheren Δr entsteht der Rissfortschritt in einem breiteren Bereich unter ca. 15 mrad. Damit deutet sich allerdings bereits an, dass das Risiko von Rissfortschritt sich mit bogenfreundlichen Lösungen und Profilkombinationen erhöhen wird.

Über den Querversatz der Radsätze kann der Anlaufwinkel ermittelt werden, bei welchem der Spurkranzkontakt sowie das Auftreten einer sog. Spiessgangstellung eintreten.

- Der Spurkranzkontakt tritt am vorlaufenden Radsatz bei den Profilen mit 0 bzw. 4 mm Δr bereits bei Anlaufwinkeln kleiner ca. 2-5 mrad auf,
- Beim Profil mit 8 mm Δr tritt der Spurkranzkontakt erst ab ca. 5mrad auf
- Ein vollständiger Spiessgang, d.h., ein Spurkranzanlauf am vorlaufenden Radsatz Bogenaussen und am nachlaufenden Radsatz Bogeninnen, tritt bei den Profilen mit 0 mm Δr und mit 4 mm Δr bereits bei ca. 5 mrad Anlaufwinkel des vorlaufenden Radsatzes ein.
- Auf Grund des deutlich grösseren Spurspiels von ca. +/- 14 mm tritt beim Profil mit 8 mm Δr kein vollständiger Spiessgang mehr auf.

Die vielschichtigen Einflüsse und Abhängigkeiten lassen sich am besten über die Gradienten der Wear-Werte über dem Anlaufwinkel für den Verschleiss sowie über den Anlaufwinkel-Bereich des massgebenden Rissfortschritts darstellen (*Abbildung 36*).

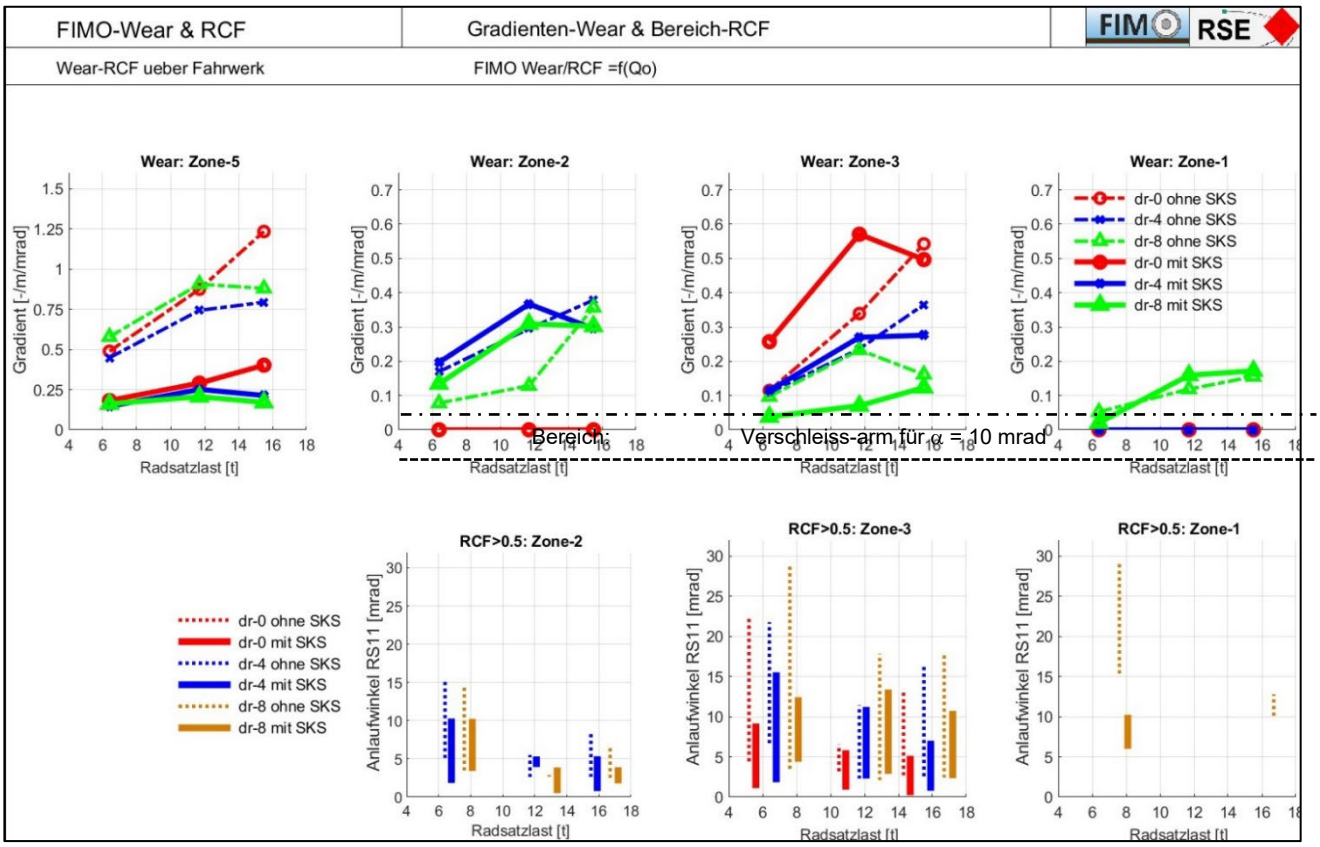


Abbildung 36: Wear-Gradienten & RCF-Bereiche für alle Radprofile und Radsatzlasten

Verschleiss (Wear):
Die roten Linien zeigen die Gradienten für die die Verschleissentwicklung (Wear) für das Radprofil mit 0mm-Δr mit SKS als ausgezogene Linie ohne SKS als gestrichelte Linie. Die blauen Linien zeigen analog den Verschleiss (Wear) für das Radprofil mit 4mm-Δr und die grünen Linien analog für das Radprofil mit 8 mm-Δr.

Die Verschleissentwicklung (Wear) nimmt mit steigender Radsatzlast für alle Profile stetig zu. Die Spurkranzschmierung (SKS) führt zu einer deutlichen Reduktion von Wear am Spurkranz, unabhängig vom Radprofil. Bei höheren Radsatzlasten ergibt sich eine bessere Radialeinstellung der Radsätze, sodass das vorhandene Δr besser genutzt werden kann.

Die Verschleissentwicklung in Zone-2 ist praktisch unabhängig vom Radprofil. In Zone 3 schneidet das Radprofil mit 8 mm Δr bei allen Radsatzlasten deutlich günstiger ab. Ein Verschleiss in Zone 1 findet praktisch mit keinem der theoretischen Profilkombinationen statt. Dies liegt in den Kontaktzonen der Profile (Kapitel 3.3) begründet bei realen, verschlissenen bzw. eingefahrenen Profilkombinationen würde sich in den meisten Fällen auch in Zone 1 ein Verschleiss zeigen.

Die beiden schwarz gestrichelten Linien zeigen den Bereich Verschleiss-armen Fahrens für einen Anlaufwinkel von <=10 mrad auf. In der Zone 2 kann, unabhängig vom Radprofil, nur mit Radsatzlasten unter ca. 7t verschleissarm gefahren werden. In Zone 3 kann mit dem Profil mit 8 mm Δr bei allen Radsatzlasten verschleissarm gefahren werden.

Der starke Anstieg des Gradienten auf der Lauffläche in Zone 3 mit dem Radprofil mit Δr = 0mm unterstreicht die Wichtigkeit des Einsatzes eines verschleissangepassten Profils mit ausreichendem Δr.

Zudem stellt verschleissarmes Fahren ohne SKS sehr hohe Anforderungen an die Radialeinstellbarkeit der Radsätze. Falls diese nicht erfüllt werden können, und um den Nachweis der Entgleisungssicherheit zu erfüllen, ist ein weiterer Einsatz von SKS erforderlich.

Rissfortschritt-RCF:
Die roten Linien zeigen RCF für das Radprofil mit 0mm-Δr mit SKS als ausgezogene Linie ohne SKS als gestrichelte Linie. Die blauen Linien zeigen analog RCF für das Radprofil mit 4mm-Δr und die braunen Linien analog für das Radprofil mit 8 mm-Δr.

Der Anlaufwinkel-Bereich mit massgebendem Rissfortschritt liegt beim Radprofil mit 0mm-Δr ausschliesslich in Zone 3 zwischen ca. 0 und 10 mrad, ca. 1 – 15 mrad für das Profil mit 4mm-Δr und ca. 3 – 13 mrad für das Profil mit 8mm-Δr an. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass das zur Verfügung stehende Δr in allen Bogenradien wirksam wird und damit auch bei grösseren Bögen höhere Längsschlupfkräfte erzeugt werden als dies mit Profilen mit kleineren Δr der Fall ist. Eine deutliche Verbreiterung des Anlaufwinkel-Bereichs entsteht bei Wegfall der Spurkranzschmierung (SKS), dies bei allen Profilen.

Zur Verhinderung eines Rissfortschritts müssten für niedrigere Radsatzlasten Anlaufwinkel kleiner ca. 2 mrad und für höhere Radsatzlast sogar Anlaufwinkel von unter 1 mrad realisiert werden. Auf Grund von fehlendem oder überschüssigem Δr sowie konstruktiven Einschränkungen wird eine derartige Einstellgenauigkeit selbst mit einer aktiven Steuerung kaum zu realisieren sein. Mit bogenfreundlichen Fahrwerken kann der Verschleiss derart abgemindert werden, dass die Verschleissgeschwindigkeit kleiner als die Rissfortschrittsgeschwindigkeit wird, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von RCF erhöht. In diesem Falle kann die RCF-Entwicklung mittels eines «gesunden» Masses an Verschleiss auch mit bogenfreundlichen Fahrwerken bzw. Lösungsansätzen verhindert werden.

Querversatz-Radsatz:
Der Effekt, dass das zur Verfügung stehende Δr in allen Bogenradien wirksam wird, lässt sich aus *Abbildung 37* erkennen, in welcher die Querwege beider Radsätze über dem Anlaufwinkel des vorlaufenden Radsatzes aufgetragen sind. In *Abbildung 38* sind die Querwege des vor- bzw. nachlaufenden Radsatzes über dem Anlaufwinkel des vor- bzw. nachlaufenden Radsatzes aufgetragen.

Der Spurkranzkontakt tritt bei den Profilen mit 0 bzw. 4 mm Δr bereits ab Anlaufwinkeln von unter ca. 2 mrad auf, beim Profil mit 8 mm Δr erst ab ca. 5 mrad. Ein vollständiger Spiessgang tritt nur bei den Profilen mit 0 bzw. 4 mm Δr ein, dies bei Anlaufwinkeln des vorlaufenden Radsatzes von ca. 15 - 20 mrad bzw. bei Bogenradien kleiner ca. 70 – 100 m.

Bei 0 mrad Anlaufwinkel wird der Radsatz infolge der unausgeglichenen Querbeschleunigung auf Gleisebene bis zu der Stelle des Radprofils nach Bogen-Aussen verschoben, bei welcher die Rückstellkraft als Komponente aus der vertikalen Radkraft und der Steigung der Kontaktfläche die Spurführung gewährleisten. Mit zunehmendem Anlaufwinkel erhöht sich die Querkraft am Bogen-Inneren Rad (Spreizkraft), welche das Bogen-Äussere Rad an den Spurkranz drückt, was je nach Höhe der Kraft zu einer leichten Erhöhung des Querweges führt. Ab ca. 10 mrad Anlaufwinkel stellt sich eine Sättigung der Spreizkraft ein.

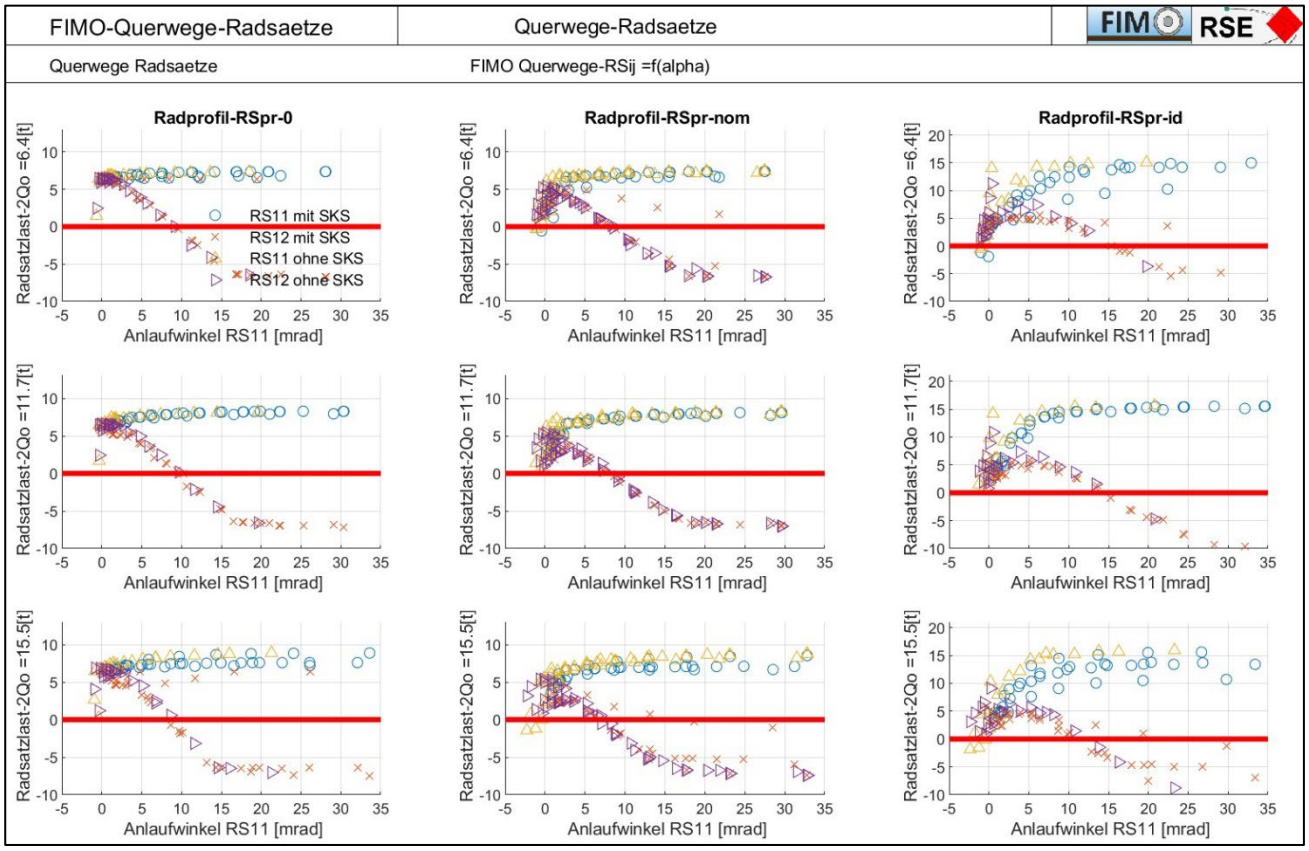


Abbildung 37: Querwege der Radsätze für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz 11

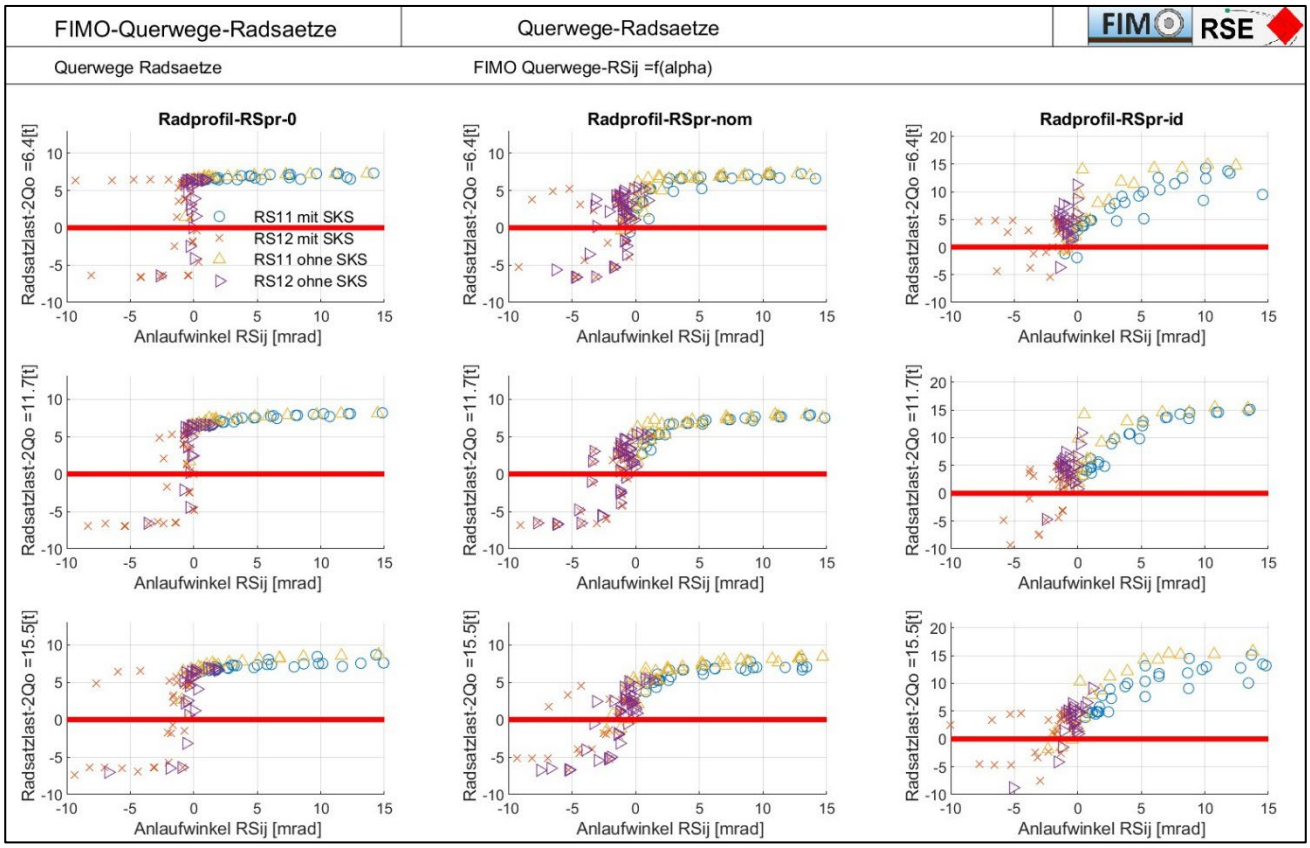


Abbildung 38: Querwege der Radsätze für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz ij

Tx-Kräfte & Radialeinstellbarkeit:

Die Tx-, also die Längskräfte zwischen Rad und Schiene sind verantwortlich dafür, ob, und wie effektiv eine Radsatzsteuerung funktioniert. Bei passiven Lösungen, z.B. einer elastischen Radsatzführung, deformieren die Tx-Kräfte die Lager der Radsatzführung und bewirken damit eine Reduktion des Anlaufwinkels. Bei aktiven Radsatzsteuerungen wirken sich die Tx-Kräfte eher negativ aus, da sie bei diesen Systemen den Steuerungseffekt entweder erhöhen oder abmindern. Die Tx-Kräfte werden in erster Linie durch Längsschlupf zwischen Rad und Schiene, sowohl auf der Lauffläche wie dem Spurkranz erzeugt, wozu auch eine entsprechende Rollradiusdifferenz- Δr erforderlich ist.

Abbildung *39* zeigt den Verlauf der Tx-Kräfte über dem Anlaufwinkel für die drei Radprofile sowie die drei untersuchten Radsatzlasten.

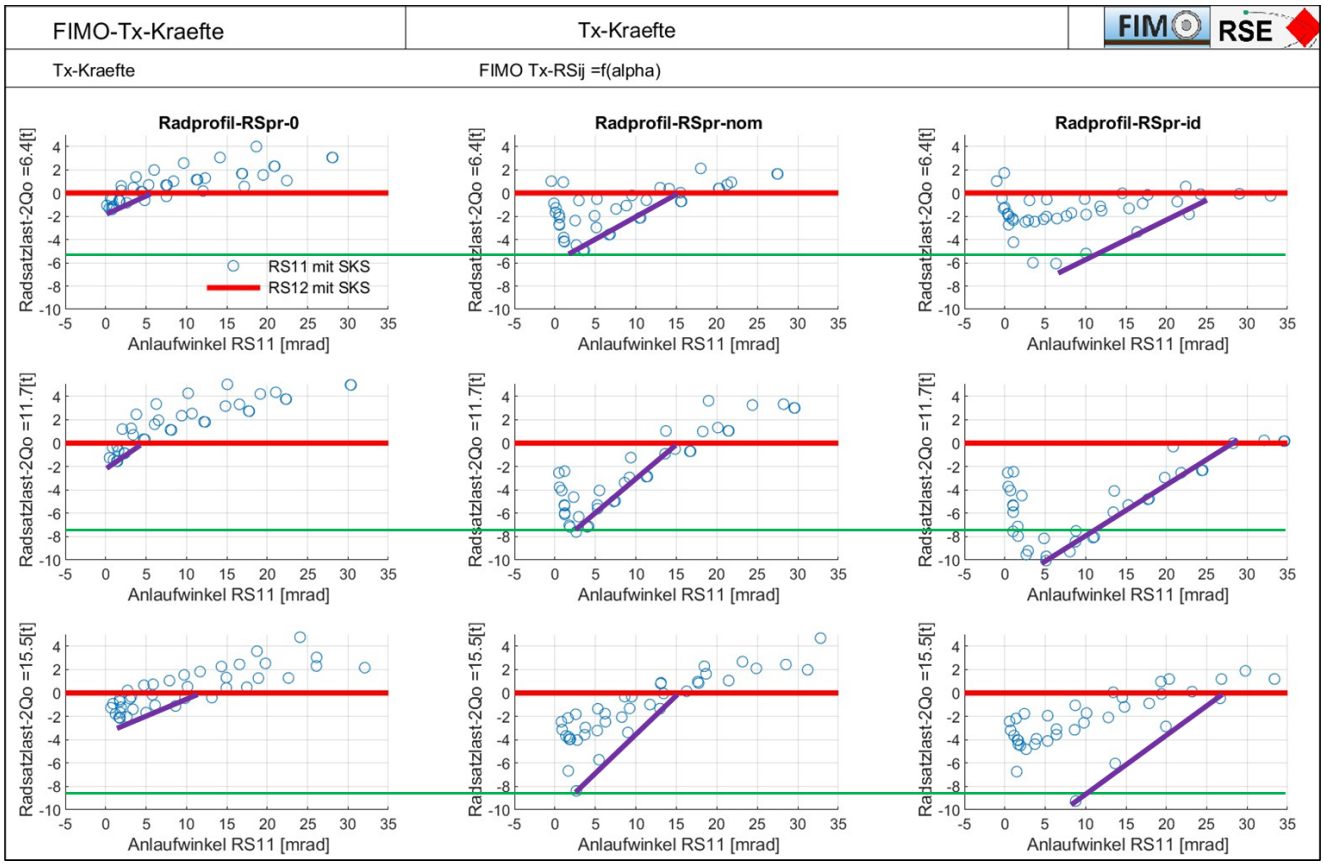


Abbildung 39: Tx-Kräfte für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz ij

Die maximal erreichbare Tx-Kraft liegt entsprechend der Radsatzlast zwischen ca. 5 kN und 10 kN, vorausgesetzt, eine minimales Δr von ca. 4 mm ist verfügbar. Bei wachsendem Anlaufwinkel wächst der Querschlupf an, was zu einer Abminderung der Tx-Kraft führt. Je nach verfügbarem Δr nimmt die Tx-Kraft linear ab. Vom Maximum bei einem Anlaufwinkel von ca. 2 – 5 mrad auf «Null» bei einem Anlaufwinkel von ca. 15 – 25 mrad, je nach Radprofil. Berücksichtigt man zusätzlich, dass nur 2/3 der Tx-Kraft auf Grund der Hebelarme bei der Radsatzführung wirksam werden, können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei 4 kN Tx-Kraft und 2 kN/mm Längssteifigkeit kann eine maximale Anlaufwinkel-Reduktion von ca. 1.7 mrad erreicht werden
- Dazu ist ein Anlaufwinkel von kleiner als ca. 5 mrad Voraussetzung, was in etwa einem Bogenradius von 200 m entspricht (*Abbildung 40*)
- In Bogenradien kleiner als 150 – 200 m erfolgt praktisch keine selbständige Radialeinstellung mehr
- Die beste Wirksamkeit einer elastischen Radsatzführung besteht in Bogenradien grösser ca. 200 – 400 m

Einfluss SKS auf Verschleiss der Lauffläche:
Der Verschleiss (Wear) nimmt am Spurkranz, unabhängig von der Radsatzlast, um einen Faktor von ca. 3-5 ab, was die Wirksamkeit der Spurkranzschmierung bestätigt (*Abbildung 33* bis *Abbildung 35*). Der spezifische Verschleiss (Wear) mit Spurkranzschmierung und dem Radprofil mit 0 mm Δr nimmt bis zu einem Anlaufwinkel von ca. 20 mrad ab, bei höheren Anlaufwinkeln nimmt er sogar zu. Beim Radprofil mit 4 mm Δr verteilt sich der Verschleiss auf die beiden Zonen 2 und 3, die Höhe des Verschleisses ist jedoch unabhängig vom Anlaufwinkel. Beim Radprofil mit 8 mm Δr verteilt sich der Verschleiss ebenfalls auf die beiden Zonen 2 und 3. Dabei führt die Spurkranzschmierung zu einer Erhöhung des Verschleisses in Zone 2 und zu einer Verringerung in Zone 3.

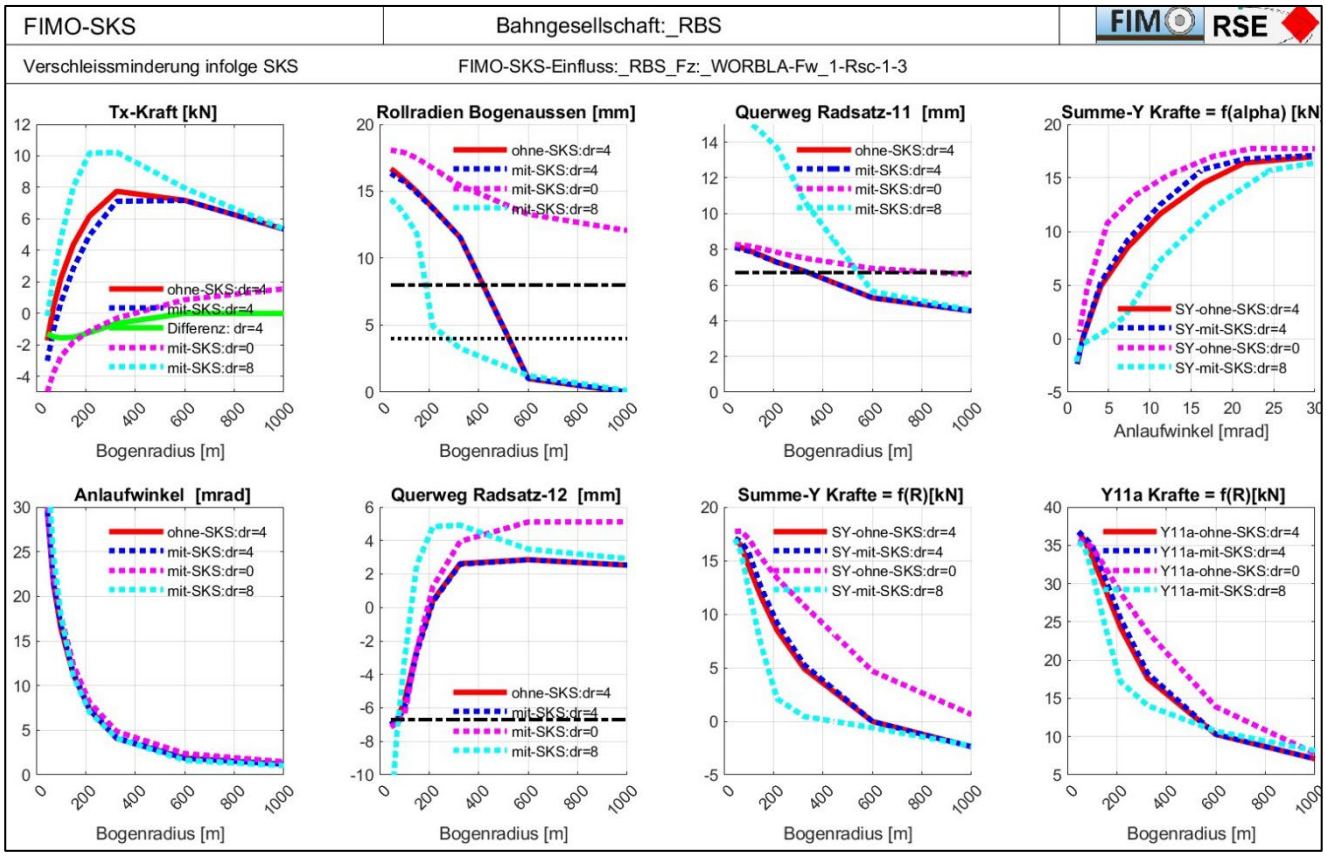


Abbildung 40: Tx- und Rad-Schienen Kräfte mit und ohne Spurkranzschmierung

Dieses Verhalten ist auf die Wechselwirkung zwischen Spurkranz- und Laufflächenkontakt zurückzuführen, was in *Abbildung 40* veranschaulicht wird:

- Mit kleiner werdenden Bogenradien und damit steigenden Anlaufwinkeln, drückt die Querkraft am Bogeninneren Rad das Bogenäussere gegen den Spurkranz (Querweg Radsatz-11)
- Mit Δr = 4mm wird der Spurkranzkontakt erst bei einem Bogenradius von ca. 350 m erreicht, bei 0 mm Δr bereits unterhalb eines Radius von ca. 800 m.
- In engsten Bögen drückt es den Radsatz auf bis zu 8mm Querversatz.
- Dies führt zu einem effektiv wirkenden, grösseren Rollradius (Rollradien Bogenaussen).
- Die Summe der Kräfte am Spurkranz wie der Lauffläche führt zur Tx-Kraft.
- Auf Grund des Reibwertes am Spurkranz sinkt die Tx-Kraft in engsten Bögen um bis zu ca. 20% ab (grüne Linie)
- Die realisierbare Tx-Kraft steigt mit zunehmendem Δr an.
- Die Rad- Schienenkräfte bleiben bei einem Δr von 4 mm praktisch unverändert, mit und ohne Spurkranzschmierung

Zum besseren Verständnis, vor allem der Tx-Kräfte, wird die Berechnung der Schlupfgeschwindigkeit auf der Lauffläche wie dem Spurkranz kurz erläutert (*Abbildung 41*).

Das Rad bewegt sich mit einer Geschwindigkeit Vx entlang des Gleises. Im kraftfreien Zustand dreht sich das Rad um die Achse der Radsatzwelle bzw. der Radsatzlager mit einer Winkelgeschwindigkeit ω. Treten Kräfte in Längsrichtung auf, beschleunigt oder verlangsamt sich die Winkelgeschwindigkeit, sodass sich eine relative Geschwindigkeit zwischen Rad und Schiene einstellt, die Schlupfgeschwindigkeit.

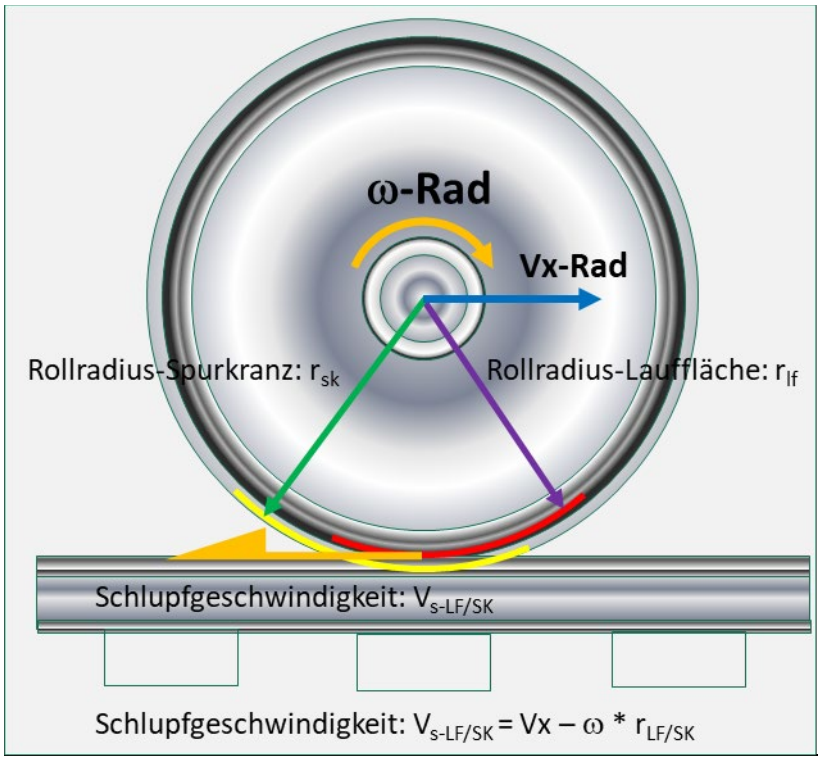


Abbildung 41: Berechnung der Schlupfgeschwindigkeiten

Diese Schlupfgeschwindigkeit errechnet sich aus der Fahrgeschwindigkeit Vx minus des wirksamen Rollradius x der Winkelgeschwindigkeit des Rades. Da der Rollradius am Spurkranz in der Regel ca. 2-3% grösser ist als auf der Lauffläche, stellt sich am Spurkranz eine entsprechend höhere Schlupfgeschwindigkeit ein, welche in der gleichen Richtung orientiert ist.

Bei einem 2-Punkt Kontakt treten also hohe Schlupfkräfte, sowohl am Spurkranz wie auch an der Lauffläche auf. Die Summe beider Kräfte wird als Tx-Kraft bezeichnet. Fällt der Spurkranzkontakt weg oder wird die Schlupfkraft am Spurkranz mittels Spukranzschmierung reduziert, stellt sich insgesamt eine niedrigere Tx-Kraft ein. Da die Tx-Kraft am gegenüberliegenden Rad den gleichen Betrag haben muss, jedoch entgegengesetzt ist, stellt sich ein entsprechendes Gleichgewicht am Radsatz ein.

5.2.2 Verschleiss- & Schädigungspotential der Lösungsansätze

In *Abbildung 42* sind die Wear- und RCF-Werte des Motordrehgestells des WORBLA Fahrzeugs in Funktion des Bogenradius und für die wichtigsten Lösungsansätze aufgezeigt.

Es zeigt sich, dass alle passiven Lösungsansätze ohne Spurkranzschmierung für sehr enge Bögen hohes Verschleiss- und Schädigungspotential aufweisen.

Eine steife Radsatzführung ohne Spurkranzschmierung (rote Linie) führt am Spurkranz zu sehr hohen Wear-Werten. Nach den festgelegten Grenzwerten sind diese mit dem «nominal» Profil mit Δr = 4 mm für Bogenradien kleiner als ca. 200 m nicht geeignet. Mit Spurkranzschmierung (blaue Linie) kann bis Bogenradien von ca. 200m verschleissarm gefahren werden. Dieser Bogenradius kann auch mit einer elastischen Radsatzführung (pink-gestrichelt) nicht weiter reduziert werden.

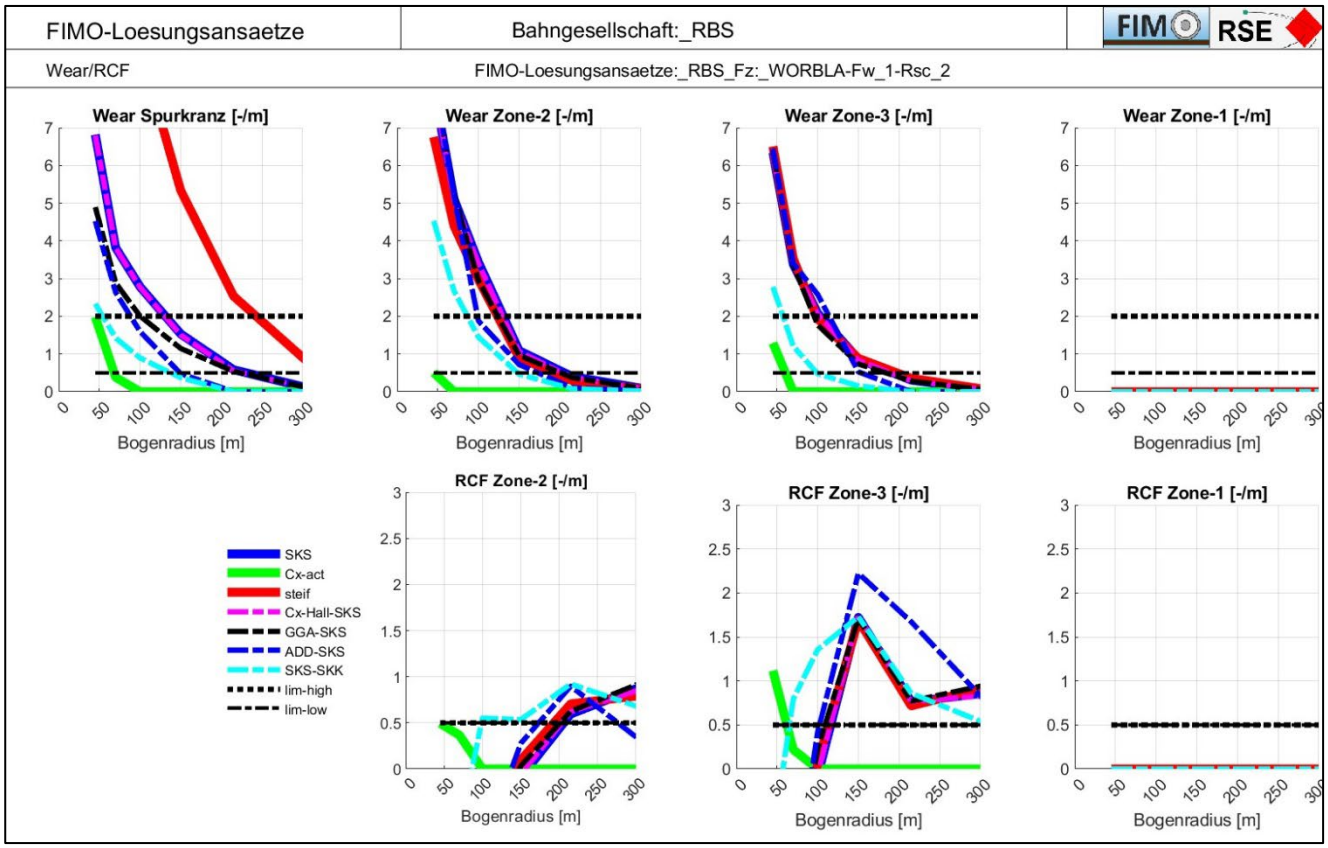


Abbildung 42: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei ∆r = 4 mm (nominal Profil)

In kleineren Radien Bereichen (< ca. 200 m) können gewisse Verbesserungen durch den Einsatz der aktiven Drehdämpfer (ADD) oder der gegenseitigen Radsatzsteuerung (GGA) erreicht werden (schwarze und blaue, strichpunktierte Linie). Bei Bogenradien kleiner ca. 150 - 200 m kann nur noch mit aktiven Radsatzsteuerungen verschleissarm gefahren werden (grüne Linie), dies allerdings auch nur, wenn die Berührgeometrie bzw. das ∆r, dies unterstützt. In engsten Bogenradien unter ca. 70 m Radius ist dies mit dem Nominalprofil auch nicht mehr der Fall. Die Verschleisswerte fallen dabei noch niedriger aus als dies mit der Schienenkopf-Konditionierung (SKK, Cyan Linie) erreicht werden kann.

Der Verschleiss auf der Lauffläche (Zonen 2 und 3) verläuft praktisch identisch für alle Lösungsansätze und praktisch unabhängig vom ∆r. Mit aktiver Radsatzsteuerung kann der Verschleiss praktisch eliminiert werden, ausser in engsten Bögen unter 100 m Radius in Kombination mit 0 mm ∆r.

Bezüglich Rissbildung besteht bei allen Lösungsansätzen ein hohes Schädigungspotential in allen Radien-Bereichen unter ca. 300m. Nur eine aktive Radsatzsteuerung kann das Schädigungspotential in allen Radien-Bereichen nachhaltig und ausreichend reduzieren, vorausgesetzt dass die Berührgeometrie bzw. dass das ∆r, dies unterstützt.

Die Erhöhung des Verschleisses mit dem Radprofil mit 0-∆r ist zur Illustration in *Abbildung 43* aufgezeigt. Damit steigen die Verschleisswerte am Spurkranz um ca. Faktor 2-4 an, auf der Lauffläche (Zone 3) um ca. Faktor 2.

Die hohen Verschleisswerte bei der aktiven Radsatzsteuerung (grüne Linien) resultieren aus dem Umstand, dass diese ohne Spurkranzschmierung gerechnet worden sind und mit den Varianten mit Spurkranzschmierung verglichen werden. Dies zeigt, dass es auch beim Einsatz einer aktiven Radsatzsteuerung wichtig ist ein Radprofil mit ausreichenden ∆r-Eigenschaften einzusetzen.

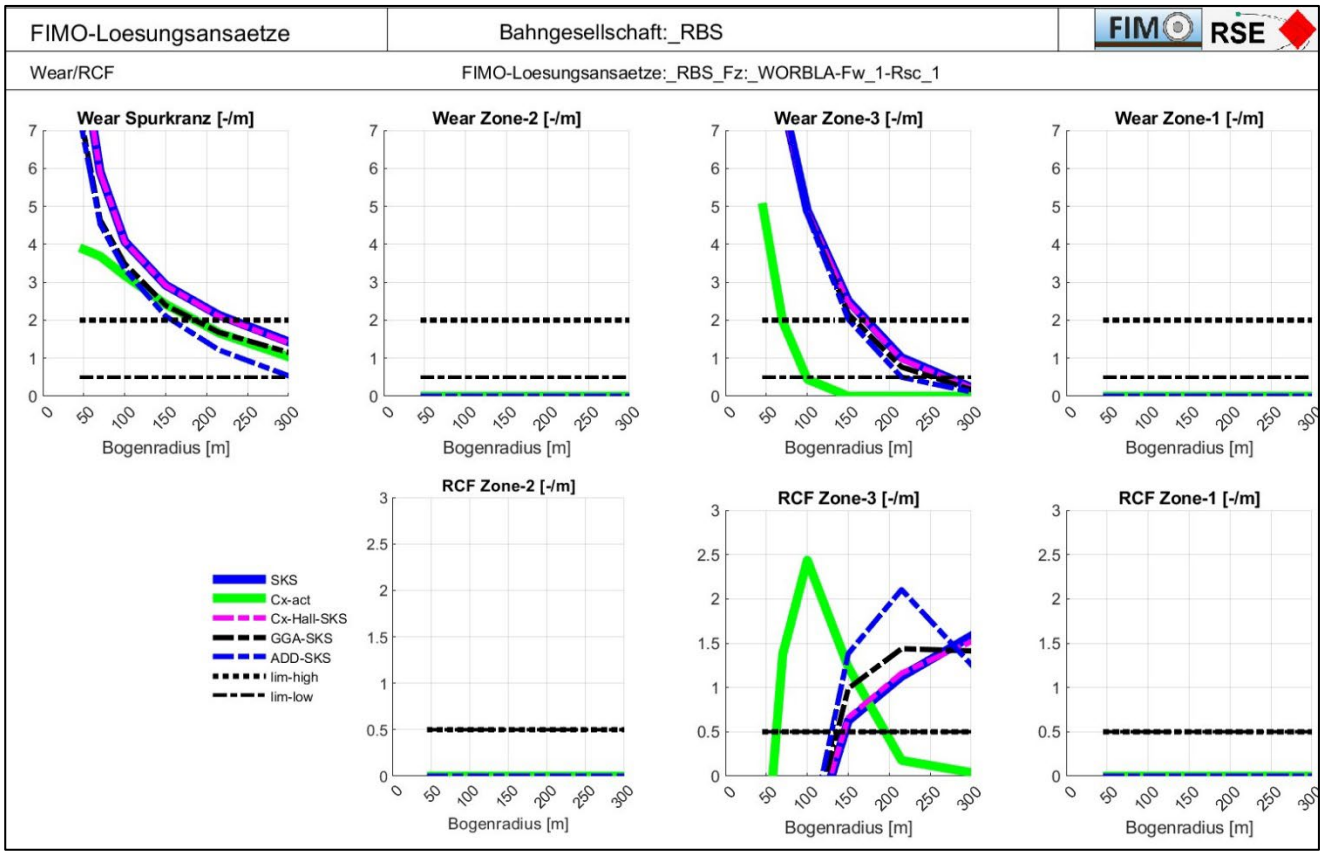


Abbildung 43: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei ∆r = 0 mm

Das Verhalten von Wear und RCF mit dem Radprofil mit 8 mm-∆r ist zur Illustration in *Abbildung 44* aufgezeigt. Die Verschleisswerte werden weiter reduziert und verlagern sich in Zone 2, der Spurkranz-verschleiss wird ebenfalls deutlich reduziert.

Der effektive auftretende Verschleiss sowie die Schädigung sind erwartungsgemäss sehr stark abhängig von der Bogenverteilung und Bogenlängen also von einer bestimmten Linie. Deshalb werden diese auf die vier Referenzstrecken hochgerechnet, um herauszufinden, welche Lösungsansätze für welche Linien-Kategorien noch sinnvoll eingesetzt werden könnten. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurden die vier Linien auf die gleiche Länge skaliert (*Abbildung 45*, *Abbildung 46*, *Abbildung 47* und *Abbildung 48*).

Es werden die wichtigsten Lösungsansätze miteinander verglichen. Die rote gestrichelte Linie markiert die Referenzlösung einer steifen Radsatzführung mit Spurkranzschmierung, ausgerüstet mit dem «nominal» Profil mit 4mm ∆r. Da grundsätzlich Lösungen gesucht werden, mit welchen auf eine Spurkranzschmierung verzichtet werden könnte, wurden die beiden Lösungen mit aktiver Radsatzsteuerung mit 100% und 75% Steuerungsfaktor ohne Spurkranzschmierung gerechnet (orange markierte Fläche). Die Grenze des verschleissarmen Fahrens wird durch eine schwarz gestrichelte Linie angezeigt.

Abbildung 45, *Abbildung 46* und *Abbildung 47* zeigen Wear am Spurkranz und der Lauffläche sowie RCF auf der Lauffläche für alle drei Profilkombinationen. *Abbildung 48* zeigt die Gesamtschädigung für alle drei Profilkombinationen.

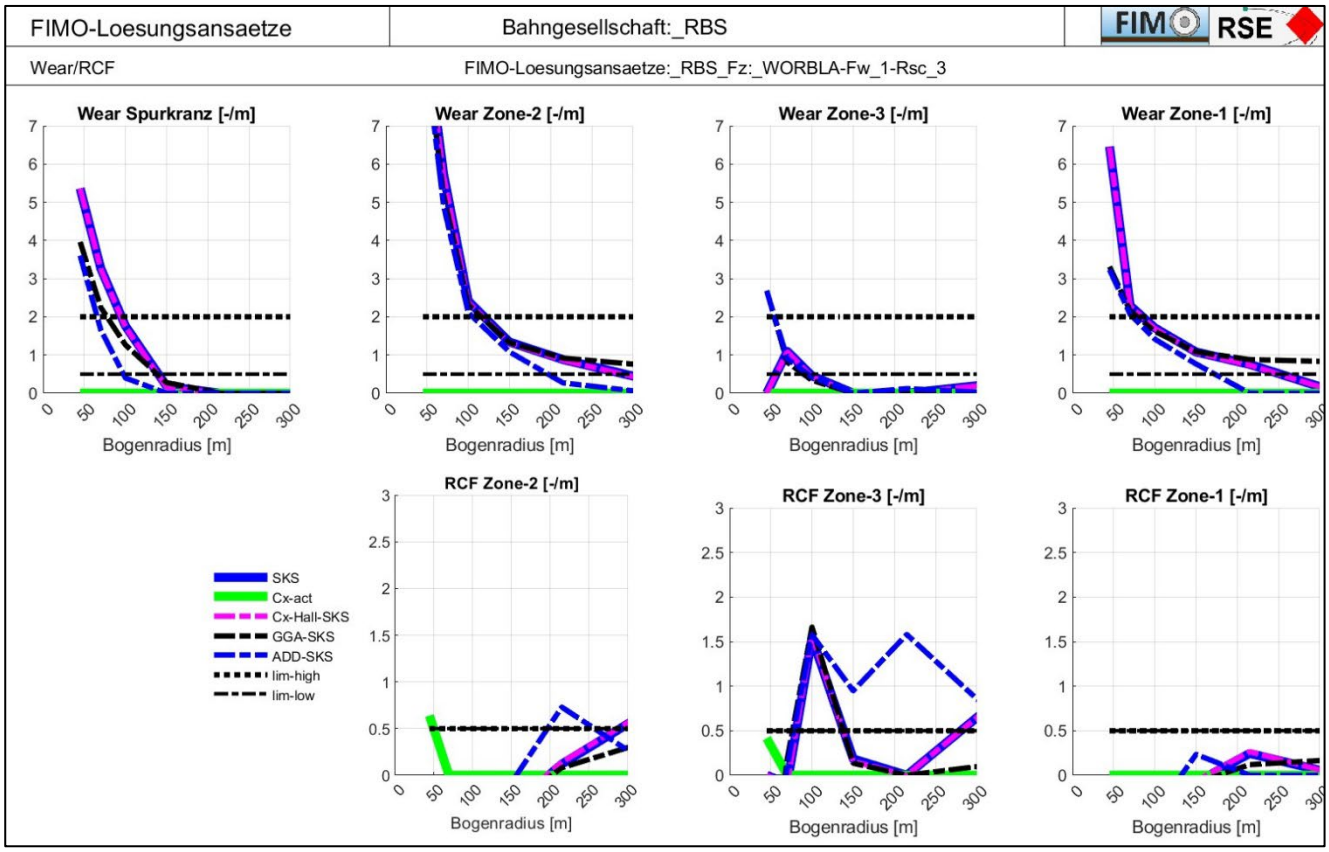


Abbildung 44: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei ∆r = 8 mm

Aus *Abbildung 46* lässt sich erkennen, dass mit dem RTE-Radprofil mit 0mm ∆r praktisch alle Lösungsansätze auf Linien der Kategorien 1-3 einen wesentlichen Spurkranzverschleiss aufweisen. Auf Linien der Kategorie 2 und 3 liegt der Verschleiss knapp an der Grenze zu verschleissarm. Der Laufflächenverschleiss steigt vor allem auf Linien der Kategorie 1 stark an. Bei den anderen Linien bleibt der Laufflächenverschleiss knapp im verschleissarmen Bereich. Der Rissfortschritt steigt ebenfalls bei allen Linien-Kategorien an.

Bereits mit einem ∆r von 4mm (*Abbildung 45*) können mit einzelnen Lösungsansätzen deutliche Reduktionen der Verschleisswerte am Spurkranz und auf der Lauffläche erreicht werden. Für Linien der Kategorien 2 – 4 reicht bereits der Einsatz dieses Profils aus, um den Verschleiss deutlich unterhalb der Verschleissarm-Grenze zu bewegen. Auf Linien der Kategorie 1 kann der Spurkranzverschleiss nur mit den Lösungen GGA, ADD und Cx-act in den Verschleissarmen Bereich gelegt werden. Der Laufflächenverschleiss liegt auf den Linien der Kategorie 2 bis 4 deutlich innerhalb der Grenze zu verschleissarm. Auf Linien der Kategorie 1 kann der Laufflächenverschleiss nur mit der aktiven Radsatzsteuerung Cx-act in den verschleissarmen Bereich gelegt werden.

Beim Rissfortschritt reduzieren sich die geeigneten Lösungsansätze zusätzlich. Auf Grund der hohen Verschleisswerte auf den Linien der Kategorie-1 liegen die Rissfortschritts-Werte unterhalb des Grenzwertes, für die aktive Radsatzsteuerung mit 100% Steuerung sowie alle Lösungen mit Spurkranzschmierung. Auf den Linien der Kategorien 2-4 kann ausschliesslich mit aktiven Lösungen mit Steuerungsfaktoren über 50% der Grenzwert unterschritten werden.

Mit einem ∆r von 8mm (*Abbildung 47*) lässt sich der Spukranzverschleiss mit allen Lösungsansätzen auf den Linien der Kategorie 2–4 praktisch eliminieren, auf Linien der Kategorie-1 verlagert sich der Verscheiss unterhalb des Grenzwertes des verschleissarmen Bereichs. Der Laufflächenverschleiss ist auf allen Linien Kategorien unbedeutend. Beim Rissfortschritt (RCF) gilt das Gleiche wie beim Radprofil mit 4mm ∆r. Das Risiko des Rissfortschritts liegt bei allen Lösungen, ausser den aktiven, über dem Grenzwert. Für die Lauffläche werden die Werte für alle 3 Zonen (Zonen 2, 3 1) zusammengefasst, sowohl für den Verschleiss wie für RCF.

Bei der Gesamtbewertung (*Abbildung 48*) zeigt sich praktisch das gleiche Bild wie bei der differenzierten Bewertung (Spurkranz, Lauffläche, Wear, RCF). Mit elastischen Radsatzführungen können keine Verbesserungen erreicht werden. Geringe Verbesserungen sind durch den Einsatz der aktiven Drehdämpfer (ADD) oder der gegenseitigen Radsatzsteuerung (GGA) möglich, deutliche Verbesserungen ausschliesslich mit einer aktiven Radsatzsteuerung. Bei einer aktiven Radsatzsteuerung mit 75% Steuerungsfaktor kann mit zusätzlicher Spurkranzschmierung ebenfalls eine deutliche Verbesserung erreicht werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass als Grundvoraussetzung für ein verschleiss- und schädigungsarmes Fahren der Einsatz eines Radprofils erforderlich ist, welches mindestens ein Δr von 4mm, in Kombination mit dem entsprechenden Schienenprofil bieten kann. Zumindest auf den Linien der Kategorien 2 – 4 wären damit keine zusätzlichen Massnahmen am Fahrzeug notwendig. Für Linien der Kategorie 1 können passive Lösungsansätze keine Verbesserungen bieten. Beim Rissfortschritt bieten alle Lösungsansätze, ausser der aktiven Radsatzsteuerung, auf allen Linien ein erhöhtes Risikopotential, ausser beim Einsatz eines Radprofils mit hohem Δr.

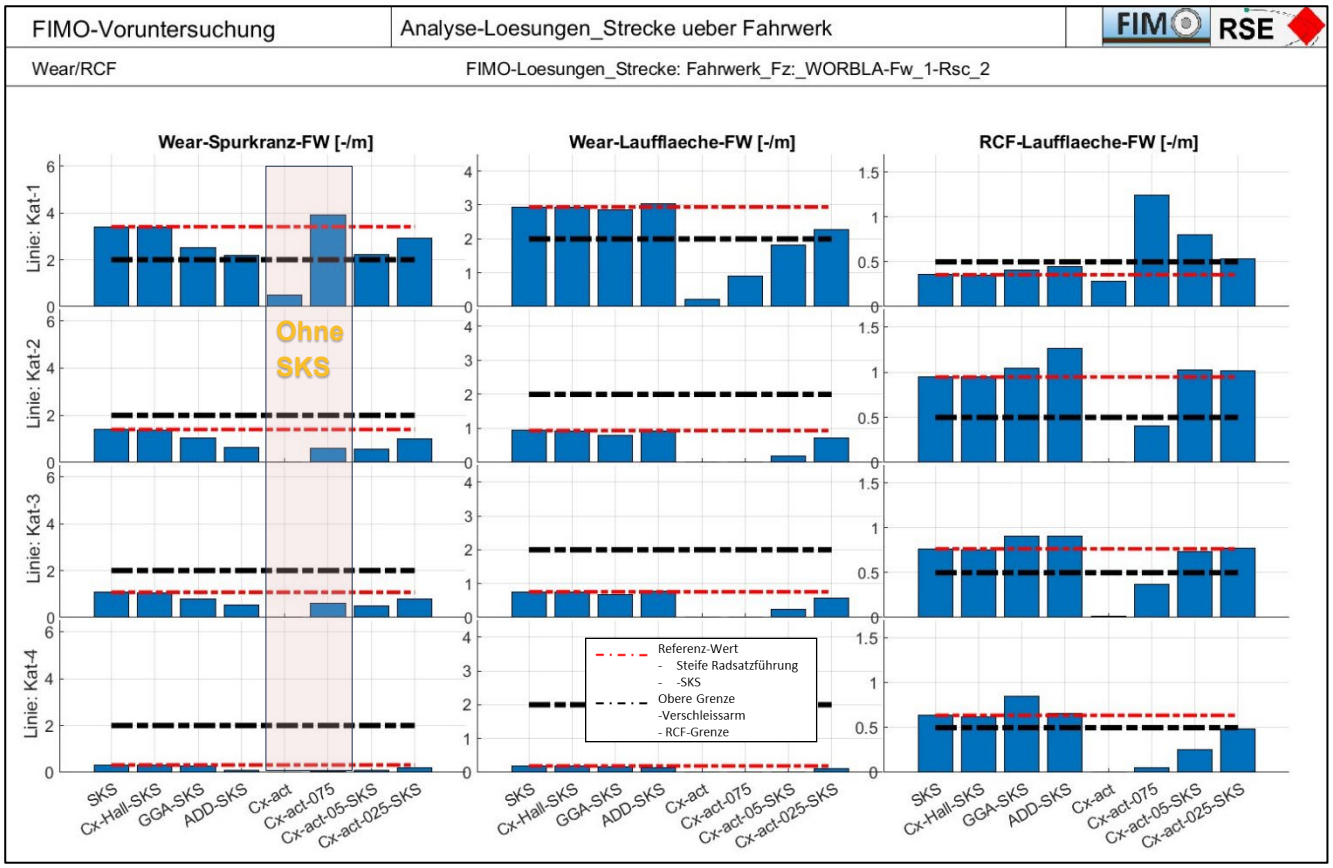


Abbildung 45: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit Δr = 4 mm

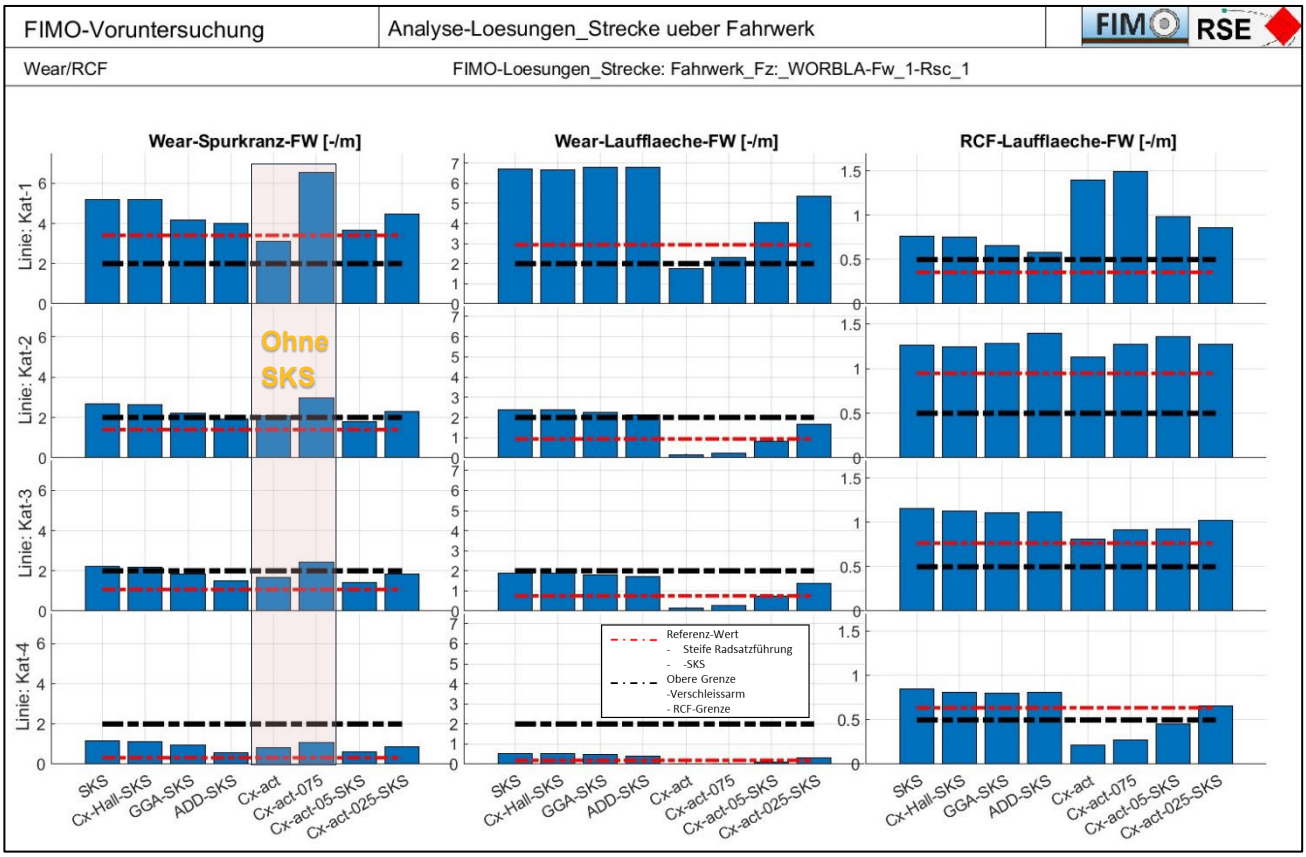


Abbildung 46: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit ⊿r = 0 mm

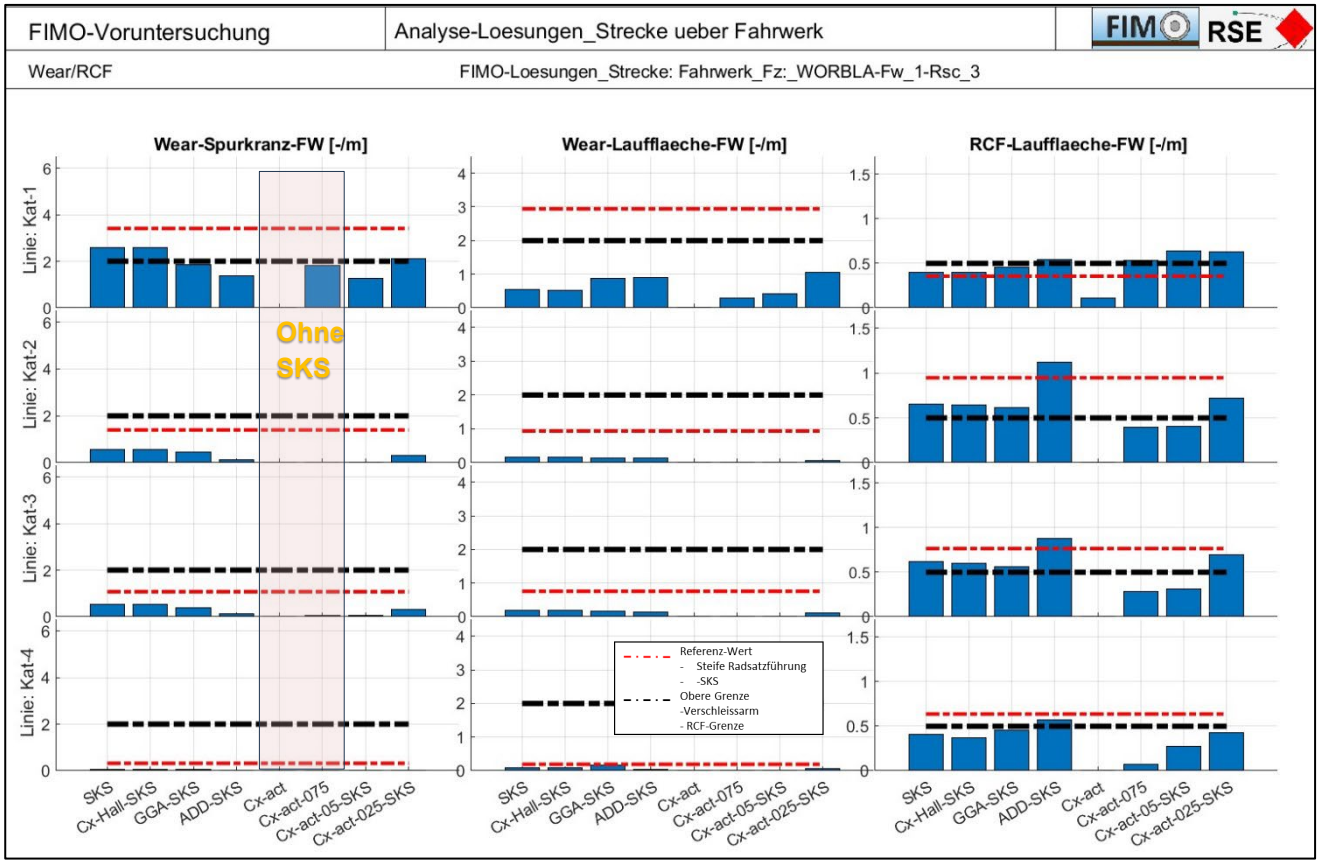


Abbildung 47: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit ⊿r = 8 mm

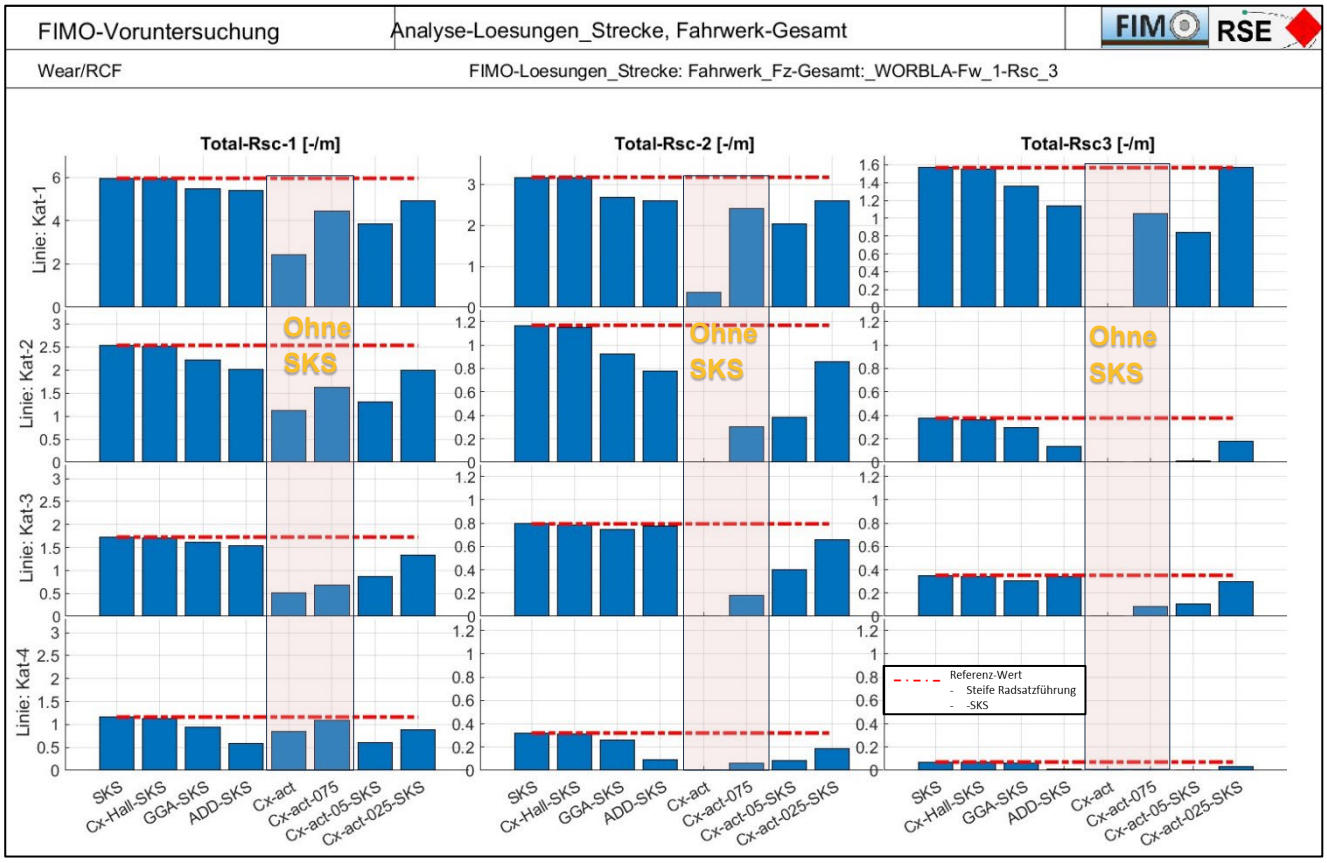


Abbildung 48: Gesamt-Bewertung der Lösungsansätze auf Referenzstrecken allen Profilen

Da vor allem bei Nachrüstlösungen nicht alle Lösungsansätze umgesetzt werden können, z.B. bei der aktiven Steuerung nicht 100% gesteuert werden kann, wird dazu eine einfache Bewertung über den Anlaufwinkel der verschiedenen Varianten durchgeführt (*Abbildung 49*).

Die dicke blaue Linie zeigt den aktiven Schlingerdämpfer, die gestrichelte schwarze, die steife Radsatzführung.

Von unten nach oben folgen die aktiven Varianten mit 100% ohne SKS (grün), 75% ohne SKS (rot), 50% mit SKS (pink), 25% mit SKS (pink gestrichelt).

Der ADD liefert also in allen Bereichen einen Vorteil von um die 2 mrad gegenüber der reinen steifen Führung.

ADD ist in etwa gleichwertig wie aktiv mit nur 25% Steuerung.

Ab 50% Steuerung ist die aktive Steuerung immer besser.

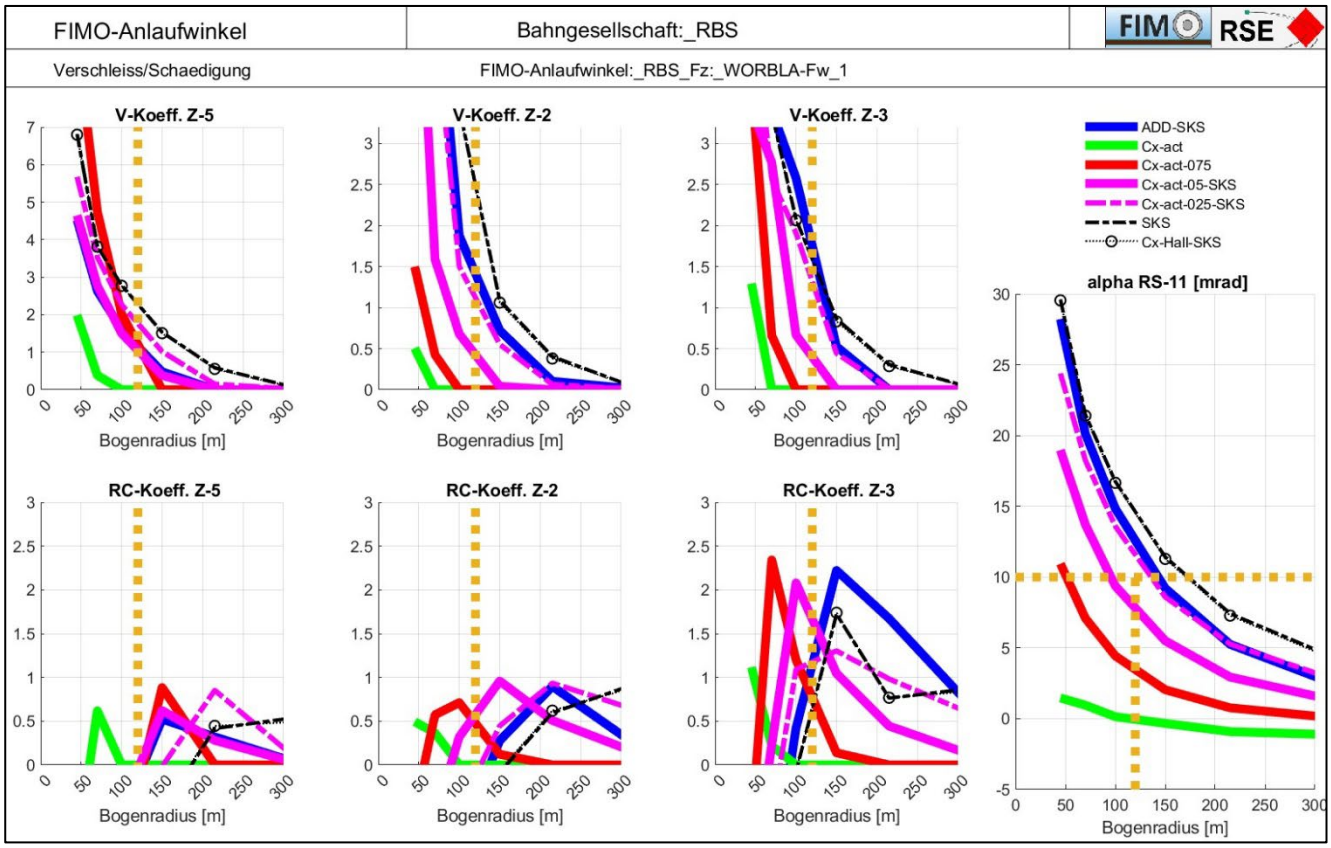


Abbildung 49: Anlaufwinkel für verschiedene Lösungen (Profil Δr = 4 mm)

Bis zu einem Anlaufwinkel von ca. 15 mrad steigt die Querkraft am Bogen inneren Rad ohne Spurkranzschmierung an, bei grösseren Anlaufwinkeln ist der Querschlupf gesättigt und die Querkraft bleibt praktisch konstant. Mit Spurkranzschmierung bleibt die Querkraft am Bogen inneren Rad praktisch konstant. Die Querkraft am Bogen inneren Rad, die sog. Spreizkraft, drückt das Bogen äussere Rad gegen den Spurkranz, sodass dieses auf einem entsprechend der Höhe der Kraft, grösseren Δr fahren kann. Wenn das Radprofil diesen Effekt unterstützt, wirkt sich also ein Anlaufwinkel bis zu ca. 15 mrad positiv auf das Bogenlaufverhalten aus.

Aus diesen Gründen sollte ein Anlaufwinkel von unter ca. 10 – 15 mrad angestrebt werden. Dies würde mit ADD das Befahren eines Bogenradius von ca. 100 m Radius ermöglichen. Darunter wäre eine aktive Lösung mit mindestens 50% Steuerung notwendig, was einem Bogen von ca. 80 m entspricht. Mit 75% Steuerung kann auch der kleinste Bogen mit 45 m Radius befahren werden (ohne SKS). Mit zusätzlichem Einsatz von SKS könnte dieses Verhalten weiter verbessert werden. Die punktierte Linie mit kreisförmigen Markern zeigt noch das HALL-Lager mit einem Bogenradius von ca. 120 m. Der ADD schneidet in allen Bereichen besser ab als die passiven Lösungen.

5.2.3 Verschleiss- und Schädigungspotential der Zugskonzepte

Speziell für Neubeschaffungen stellt sich die Frage, welches Zugskonzept sich für einen verschleiss-armen Betrieb am besten eignen würde. Zu diesem Zweck werden die Verschleiss- und Schädigungs-werte aller Zugskonzepte auf eine Zuglänge von 60 m skaliert und für die Referenzstrecken aufge-zeichnet, analog den Auswertungen der Lösungsansätze.

Es werden alle Bestands- und generischen Fahrzeuge, alle mit SKS ausgerüstet und mit allen drei Radprofilen, miteinander verglichen. Für die Züge mit dem «nominal» Profil mit 4mm Δr werden die statistischen Werte wie Maximalwert, Mittelwert und Mindestwert ermittelt. Die rote gestrichelte Linie markiert den Zug mit dem höchsten Wert, die grüne den Zug mit dem niedrigsten Wert und die blaue den Mittelwert aller Züge, alle für das. Diese Linien werden auch bei den Auswertungen mit den beiden Radprofilen mit 0 und 8 mm Δr eingezeichnet. Dies erlaubt gleichzeitig einen Vergleich des Verhaltens über die Profilkombinationen bzw. das vorhandene Δr.

Das gewählte Referenzfahrzeug ist als Vergleich orange eingefärbt. Die punktierte Linie (cyan) erleichtert den Vergleich der anderen Züge mit dem Referenzfahrzeug. Die Grenze für verschleissarmen Fahrens ist mit der schwarz gestrichelten Linie angezeigt. Bei einer späteren, bahn-spezifischen Bewertung, kann das Referenzfahrzeug individuell festgelegt werden. Die Bestands-Fahrzeuge (dunkelgrün) sind zur besseren Unterscheidung mit einer gelben Fläche markiert. Die generischen Fahrzeuge werden durch blaue Balken dargestellt.

In *Abbildung 50*, *Abbildung 51*, *Abbildung 52* und *Abbildung 53* werden alle Züge, ausser Fahrzeuge REF- Fahrwerke, für alle drei Radprofile verglichen. Die Züge mit REF-Fahrwerken werden separat in *Abbildung 54*, *Abbildung 55* und *Abbildung 56* verglichen.

Da grundsätzlich Lösungen gesucht werden, mit welchen auf eine Spurkranzschmierung verzichtet werden könnte, wurden die beiden Lösungen mit aktiver Radsatzsteuerung mit 100% und 75% Steuerungsfaktor ohne Spurkranzschmierung gerechnet (orange markierte Fläche).

Abbildung 50, *Abbildung 51* und *Abbildung 52* zeigen Wear am Spurkranz und der Lauffläche, sowie RCF auf der Lauffläche für alle drei Profilkombinationen. *Abbildung 53* zeigt die Gesamtschädigung für alle drei Profilkombinationen. Als Lauffläche werden die Zonen 2, 3 und 1 zusammengefasst, sowohl für den Verschleiss wie für RCF.

In Bezug auf die drei Radprofile bzw. Δr-Niveaus zeigt sich systematisch das gleiche Verhalten wie bereits bei den Vergleichen der einzelnen Fahrwerke. Der Verschleiss nimmt mit zunehmendem Δr ab, RCF bleibt auf relativ hohem Niveau bei allen Profilen.

In Bezug auf den Verschleiss, Lauffläche oder Spurkranz, erweisen sich für die Profile mit 0 und 4mm Δr die folgenden Züge

- am günstigsten: EMU-3, EMU-4, LBZ-1, LBS-1, LBS-2, LBS-5
- am ungünstigsten: AM-1, AM-2, EMU-1, EMU-8, TZ-3

In Bezug auf den Rissfortschritt erweisen sich für die Profile mit 0 und 4mm Δr die folgenden Züge als:

- am günstigsten: EMU-3, LBZ-1, LBS-1, LBS-2, LBS-5
- am ungünstigsten: LBZ-2, TZ-2, TZ-4

Mit dem Radprofil mit 8 mm Δr reduziert sich der Spurkranzverschleiss auf den Linien der Kategorien 2 – 3 stark, auf der Linie der Kategorie 4 verschwindet er sogar. Der Laufflächenverschleiss sinkt zwar, es schaffen es jedoch nur wenige Züge unterhalb des Bereichs verschleissarmen Fahrens. Die Zugskonzepte LBS-4 und LBS-5 repräsentieren Züge mit 120m Länge und schneiden deshalb so günstig ab.

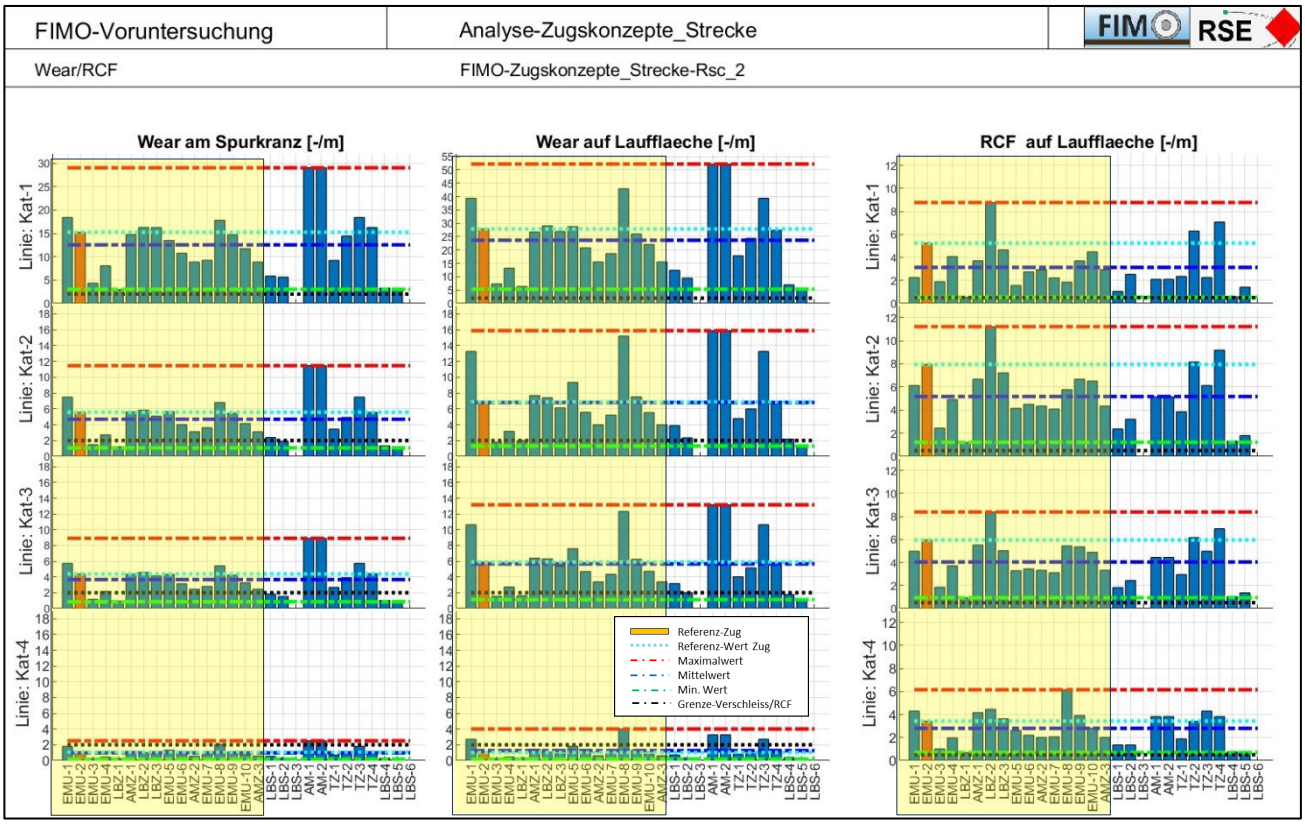


Abbildung 50: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 4 mm

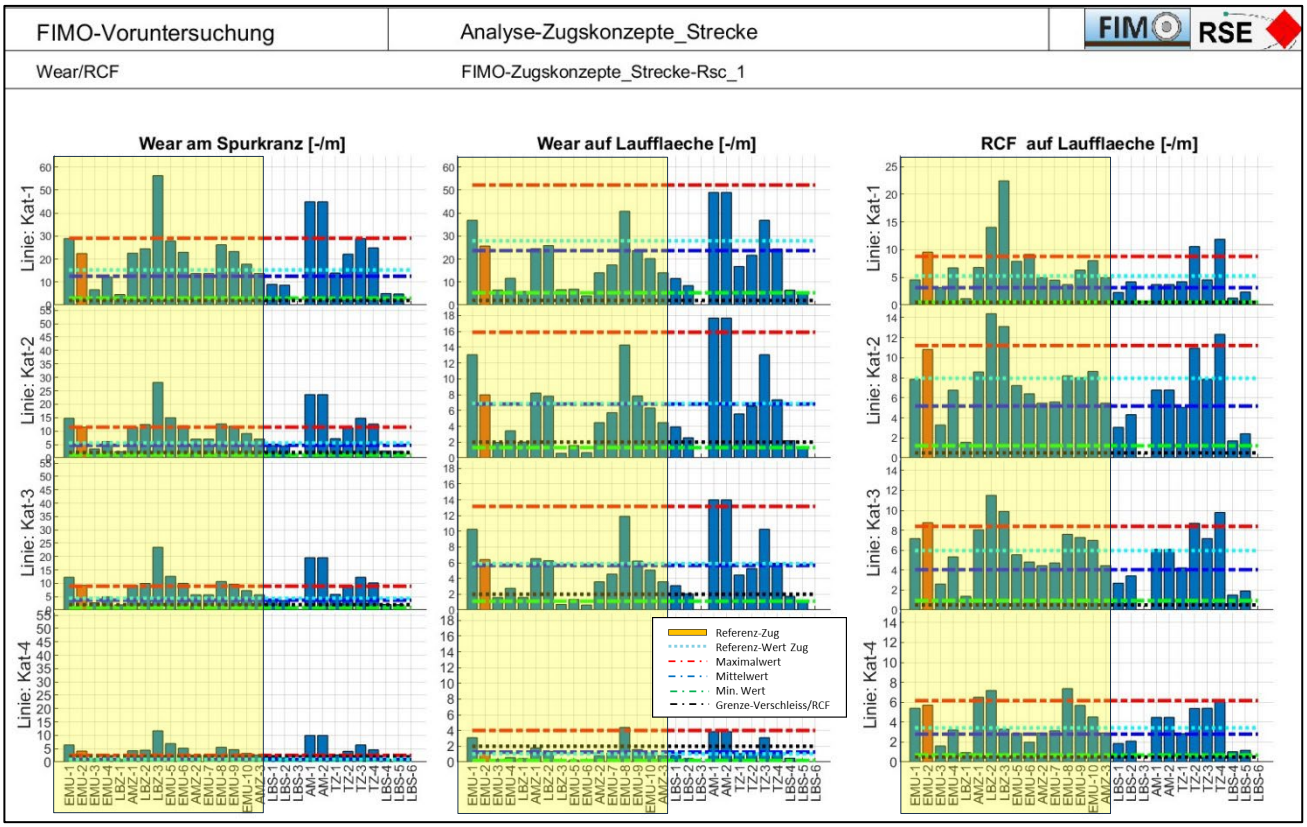


Abbildung 51: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0 mm

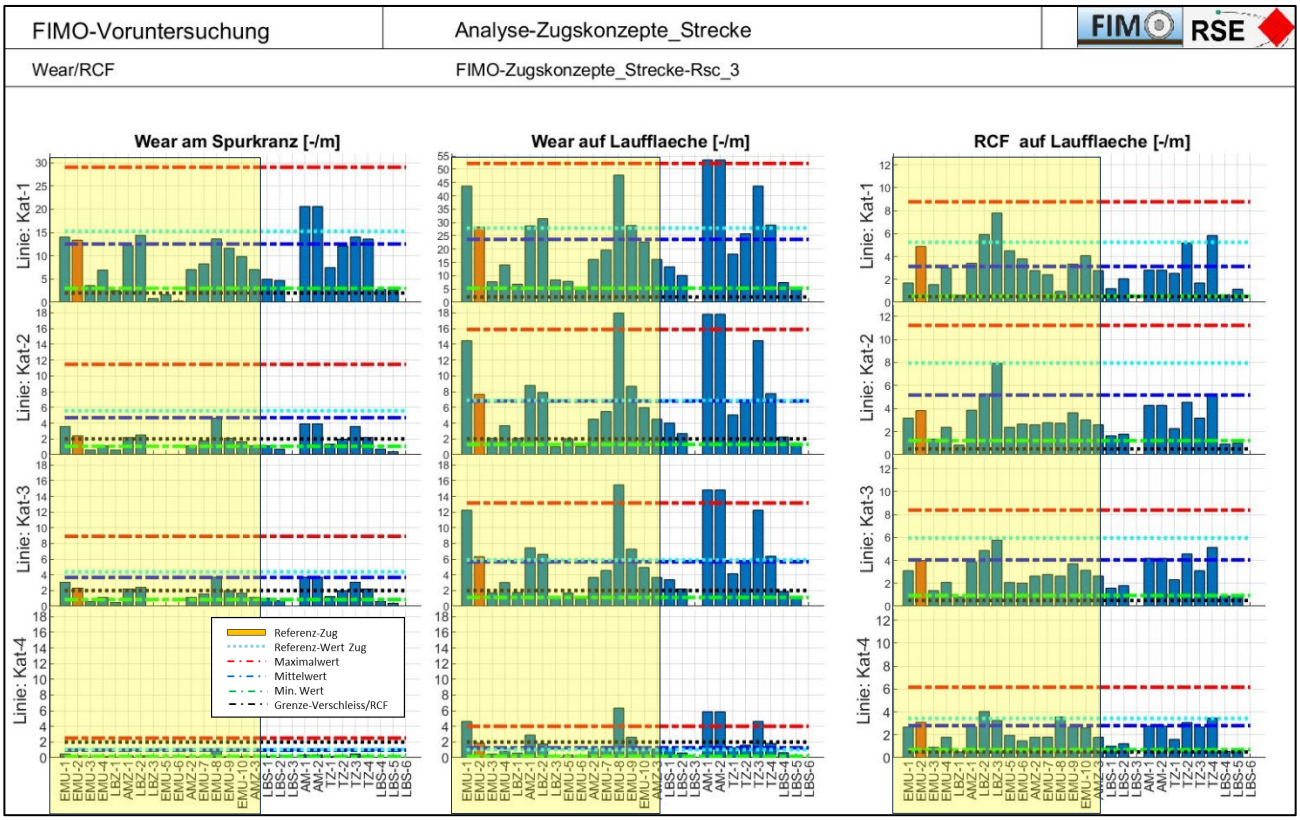


Abbildung 52: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 8 mm

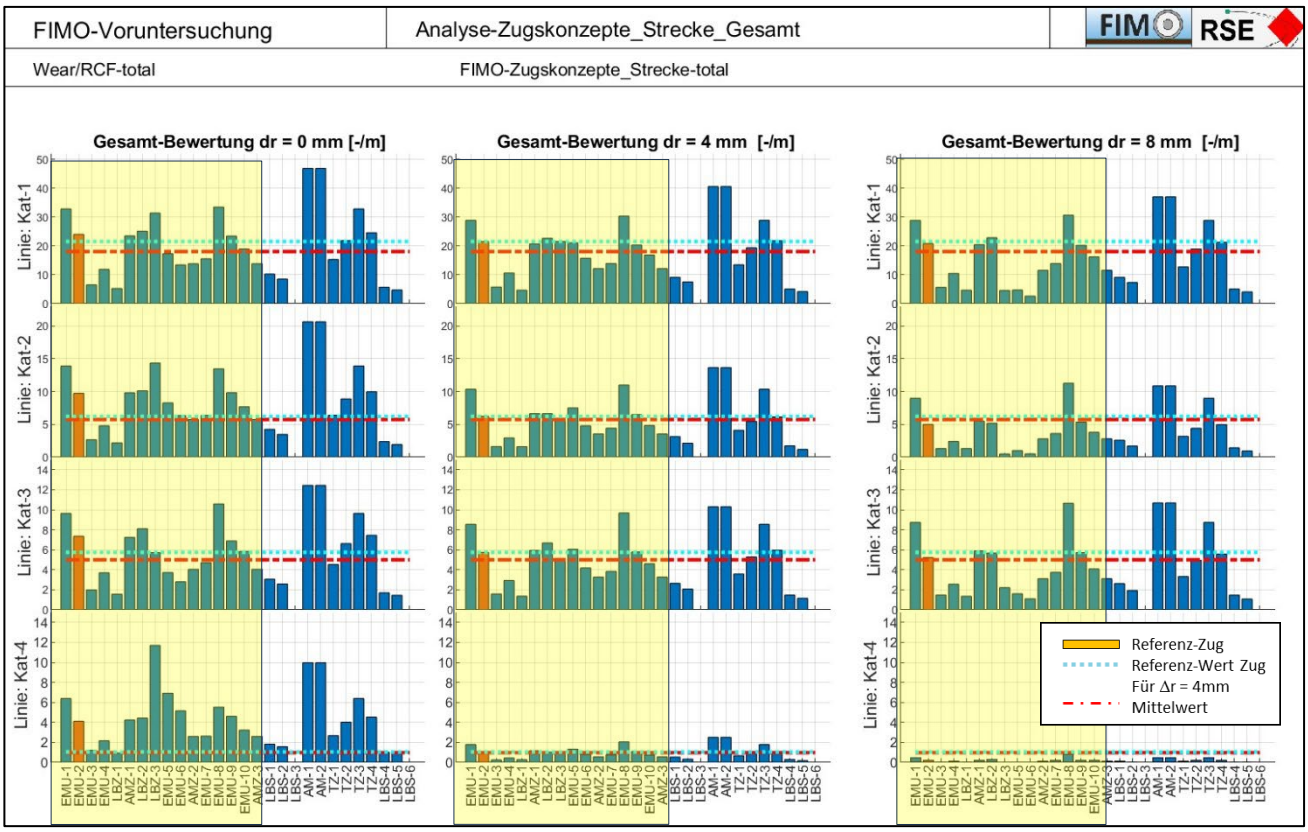


Abbildung 53: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0, 4 und 8 mm

Alle Zugskonzepte liegen mit den Verschleisswerten auf sehr hohem Niveau, am Spurkranz, der Lauffläche wie auch der Rissbildung (RCF). Die erwähnten Züge mit günstigerem Verhalten besitzen vorwiegend Fahrwerke mit kleineren Radsatzlasten und kürzeren Radständen.

Zur Beurteilung der Fahrzeugkonzepte (LBS-3 und LBS-6) mit Radsatz-Einzel-Fahrwerken (REF) muss der Vergleich mit allen Zugskonzepten, ausgerüstet mit aktiver Radsatzsteuerung erfolgen (*Abbildung 54*, *Abbildung 55* und *Abbildung 56*), da solche Fahrwerke zwingend aktiv gesteuert werden müssen.

Der LBS-3 schneidet in allen Linien-Kategorien bezüglich Wear und RCF oberhalb des Durchschnitts ab, der LBS-6 deutlich günstiger (orange Balken), dies jedoch nur wegen der Zugslänge von 120m. Deutlich schlechter schneiden diese Züge mit dem «nominal» Profil mit 0mm Δr ab. Berücksichtigt man die Komplexität derartiger Fahrwerke, sowie die zu erwartenden Kosten, rechtfertigt sich eine weitere vertieftere Betrachtung dieser Zugskonzepte nicht.

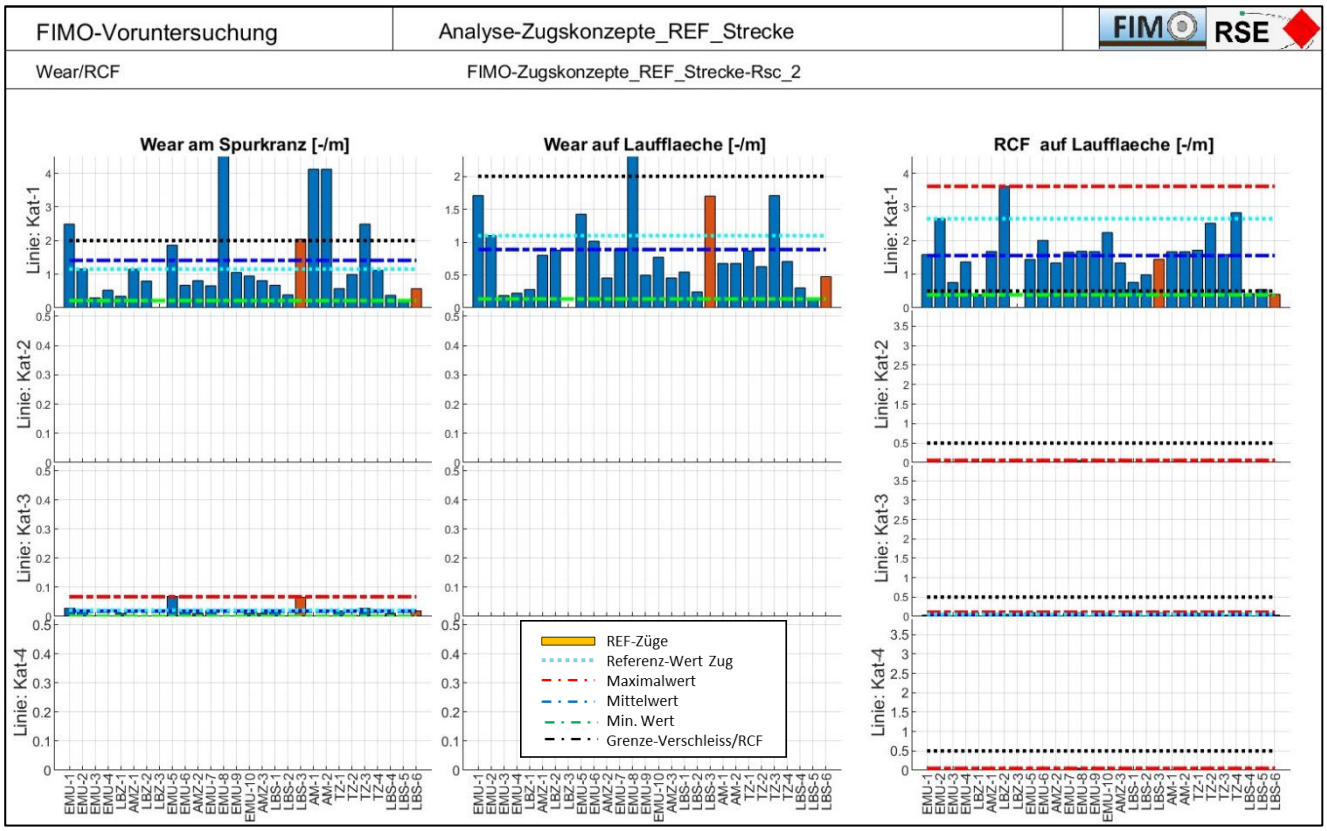


Abbildung 54: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 4 mm

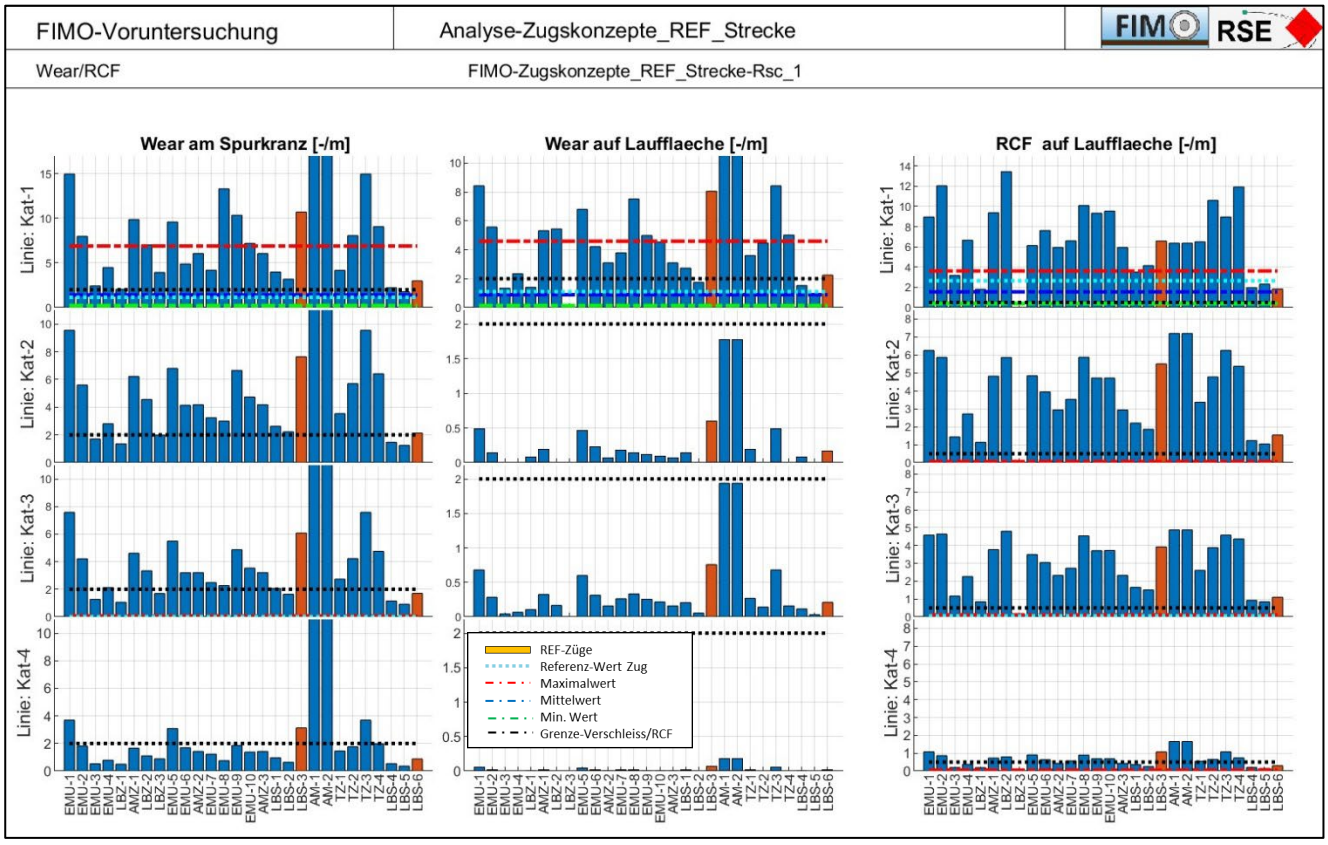


Abbildung 55: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0 mm

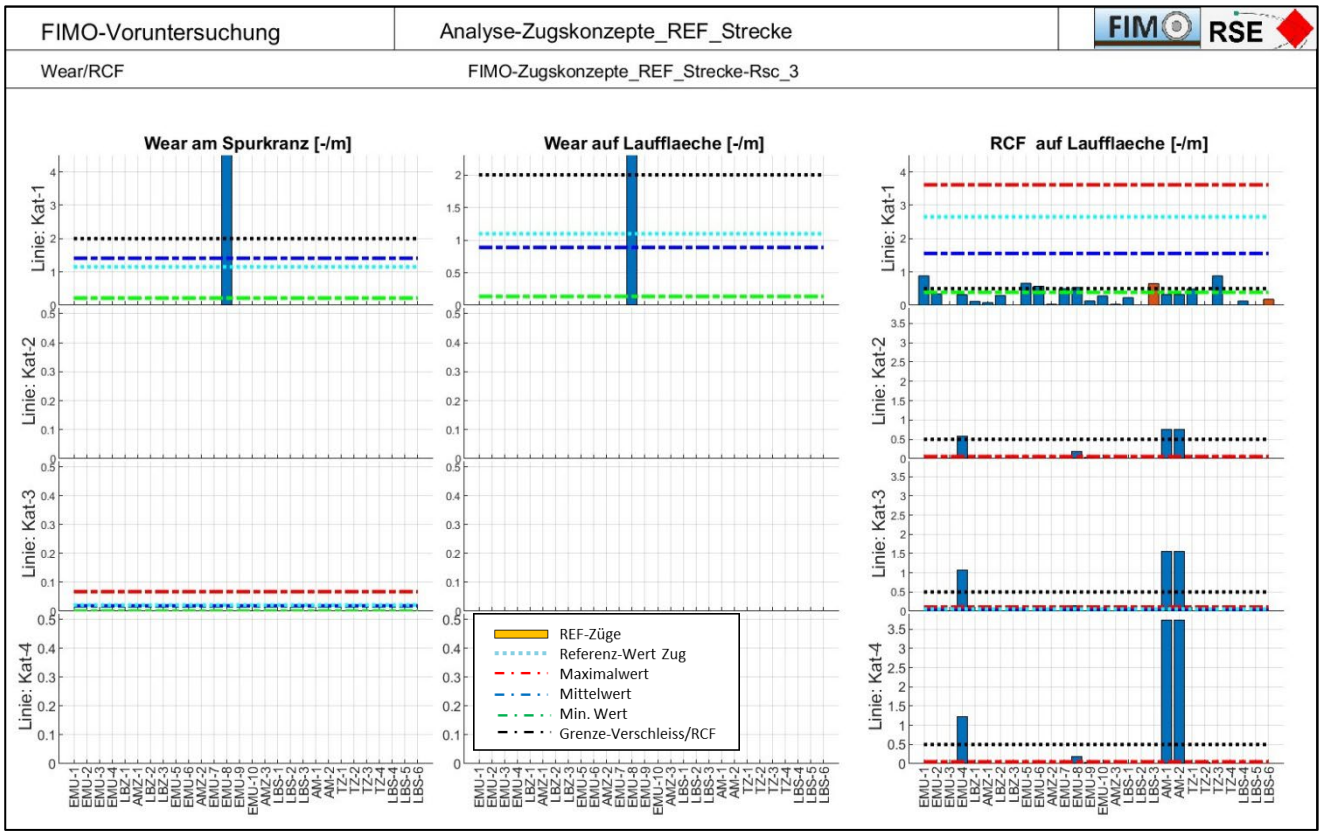


Abbildung 56: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 8 mm

An dieser Stelle interessiert die Frage, ob es spezielle Eigenschaften oder Parameter eines Zuges gibt, welche das Verschleissverhalten dominieren.

Ausser den beiden Parametern «Radstand und Radsatzlast» ergeben sich keine eindeutigen Abhängigkeiten, selbst bei Anwendung nur eines dieser Parameter. Eine eindeutige Abhängigkeit des Verschleisses zeigt sich bei einer Betrachtung über das Produkt aus Radsatzlast und Radstand des jeweiligen Fahrwerks.

Die Korrelation zwischen den Verschleisskoeffizienten und dem Produkt aus Radstand und 2Qo (Radsatzlast) ist für alle Fahrzeuge in *Abbildung 57* dargestellt. Damit kann eine gute, lineare Korrelation beim Verschleiss am Spurkranz sowie auf der Lauffläche gezeigt werden.

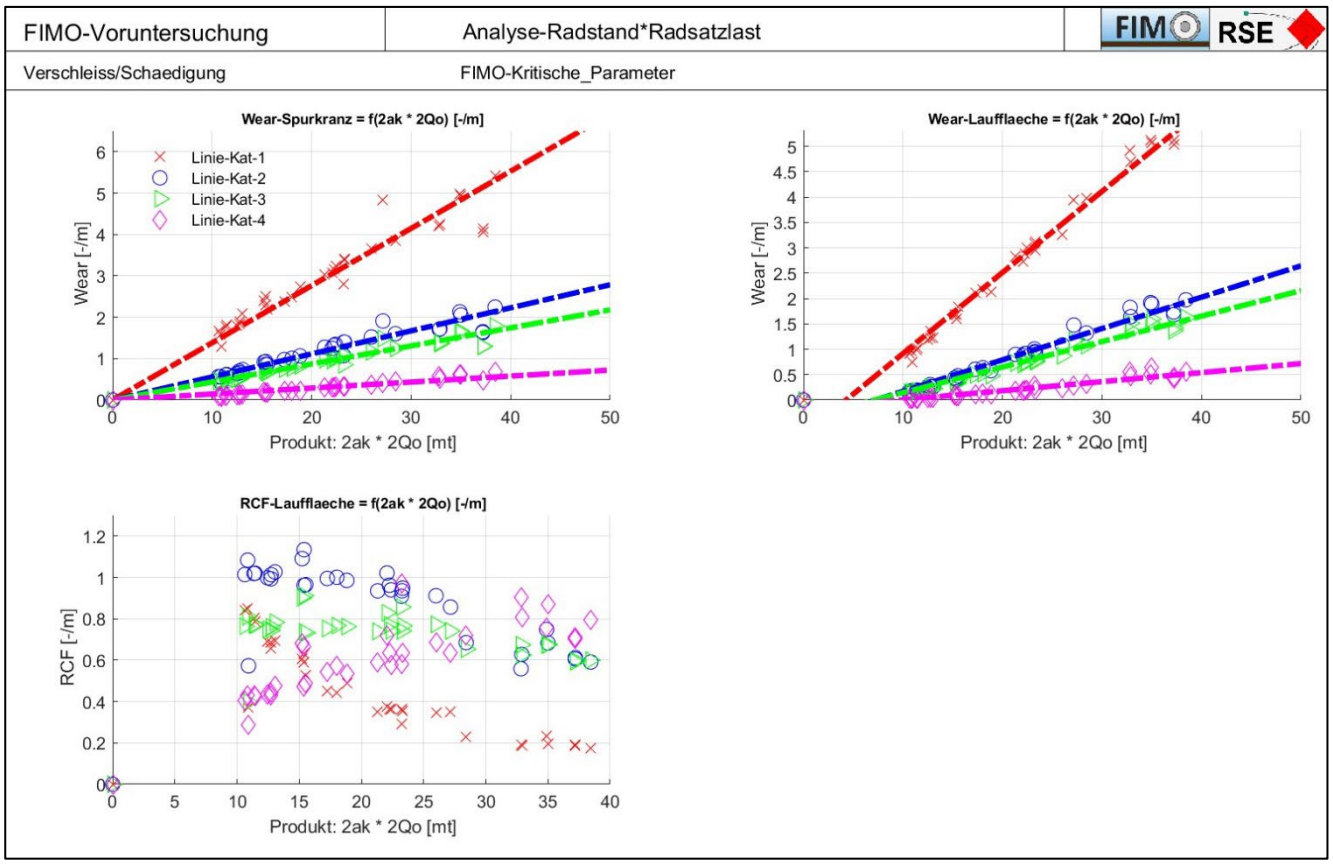


Abbildung 57: Verschleisskoeffizienten in Funktion von «Radstand x Radsatzlast» pro Fahrwerk

Der Rissfortschritt (RCF) nimmt mit steigendem Produkt «Radstand x Radsatzlast» auf der Linie Kategorie 4 eher zu, auf Linien der Kategorien 1 und 2 eher ab, bei der Kategorie 3 bleibt er praktisch konstant.

Das Produkt aus Radstand und Radsatzlast stellt also die beiden Hauptparameter dar, welche das Verschleissverhalten eines Fahrzeugs dominieren.

Der Einfluss der Häufigkeit der Bogenradien zeigt sich in *Abbildung 57* deutlich über die vier Linien-Kategorien, deren Radien-Anteile sich gemäss *Abbildung 29* wie folgt darstellen:

- Kategorie Radienbereich Anteile Linien Farbe
- Kat-1: 40-120: 54% rot
- Kat-2: 80-250: 47% blau
- Kat-3: 80-2000: 50% grün
- Kat-4: 250-2000: 48% pink

5.3 Empfindlichkeitsanalyse

Die erfolgversprechendsten Lösungsansätze sind nun bekannt. Jetzt muss deren Empfindlichkeit bezüglich der Berührgeometrie (Δr) und Traktionskräften bzw. Traktionsschlupf analysiert werden. Es sind Lösungen zu bevorzugen, welche möglichst unempfindlich auf diese beiden Einflussfaktoren reagieren.

5.3.1 Berührgeometrie-Δr

Voraussetzungen für ein verschleissarmes Befahren eines Gleisbogens sind:

- Die Profil-Kombination von Rad und Schiene, Berührgeometrie genannt, bietet eine ausreichende Rollradius Differenz-Δr zwischen dem bogenäusseren und bogeninneren Rad, und der Radialstellungs-Index (RSI) ist kleiner als 1.
- Die Radsatzführung ermöglicht die benötigten Längswege für die notwendige Radialeinstellung.

Die Einflüsse der Berührgeometrie wurden bereits in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 hervorgehoben. In Ergänzung dazu, werden die Ergebnisse aus Kapitel 5.2.2 an dieser Stelle über der Rollradius-Differenz Δr aufgezeichnet (*Abbildung 58*). Lösungsansätze und die Wahl der Linien Farben sind analog zu *Abbildung 49* festgelegt. Die dicke blaue Linie zeigt den aktiven Schlingerdämpfer, die gestrichelte schwarze, die steife Radsatzführung.

Die weiteren Linien zeigen die aktive Steuerung mit 100% Steuerungsfaktor (grün), ohne SKS, mit 75% ohne SKS (rot), mit 50% mit SKS (pink) sowie mit 25% mit SKS (pink gestrichelt).

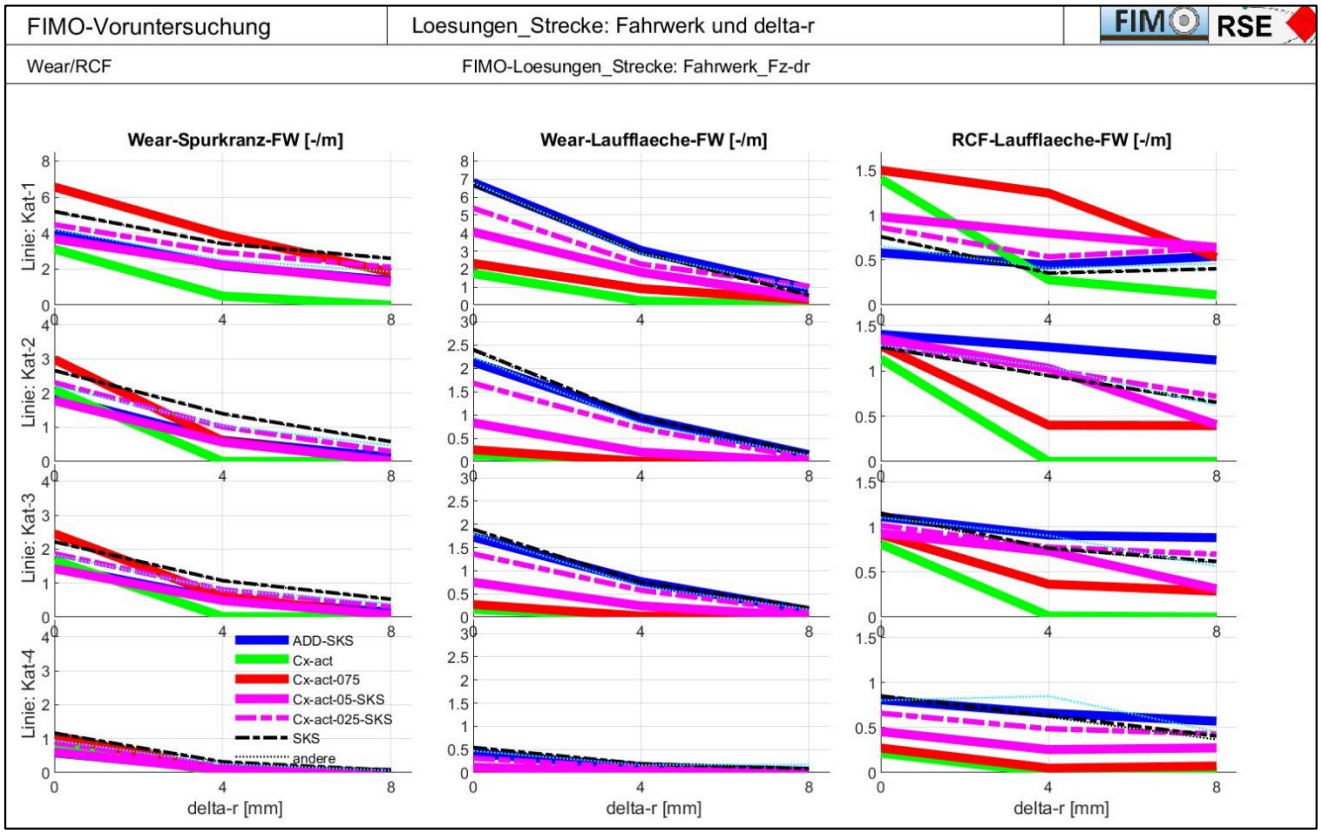


Abbildung 58: Wear & RCF in Funktion der Lösungsansätze und des Δr

Es zeigt sich, dass es praktisch keinen Lösungsansatz gibt, welcher sowohl beim Spurkranz- wie Laufflächenverschleiss und dem RCF gleichzeitig unempfindlich auf das Δr reagiert. Der ADD (blaue Linie) reagiert zwar weniger empfindlich beim Spurkranzverschleiss, dafür steigt die Empfindlichkeit beim Laufflächenverschleiss. Für den Verschleiss zeigt sich bei allen Lösungsansätzen eine deutliche Reduktion, welche sich bereits bei 4 mm Δr einstellt. Der Schritt von 4 mm auf 8 mm Δr liefert eine weitere Verbesserung, allerdings fällt diese etwas geringer aus. RCF bleibt bei allen Profilen und Lösungsansätzen, ausser den aktiven Steuerungen, auf einem relativ hohen Niveau. Ab 4 mm Δr liefert die aktive Radsatzsteuerung in allen Bereichen die besten Resultate, am besten für die Linien der Kategorien 1 und 2.

Das erforderliche bzw. das zur Verfügung stehende Δr in Funktion des Bogenradius für Raddurchmesser von 660, 800 und 1100 mm sind in *Abbildung 59* dargestellt (orange, braune, pink-Linien). Die grüne Linie (max) zeigt das Δr des Radprofils mit 8mm Δr (RSI < 1 bei ca. 50m Bogen), die blaue Linie (nominal) diejenige des Radprofils W03 mit ca. 4mm Δr (RSI < 1 bei ca. 120m Bogen), die rote Linie zeigt das Δr des Profils mit 0 Δr (RSI < 1 bei ca. 750m Bogen). Es wird unter Umständen nicht möglich sein, ein Δr mit einem Radialstellungsindex kleiner als 1 bis zu einem Bogenradius von 45 m zu entwickeln. Da das maximal fahrbare Δr eines Radprofils auch bei grossen Bögen wirksam ist, führt ein hohes Δr zu einer Erhöhung der Wear und RCF Werte in grösseren Bögen, was grundsätzlich nicht erwünscht ist. Ein mittleres Δr, z.B. wie dieses des nominellen Profils besteht, scheint insgesamt besser geeignet zu sein.

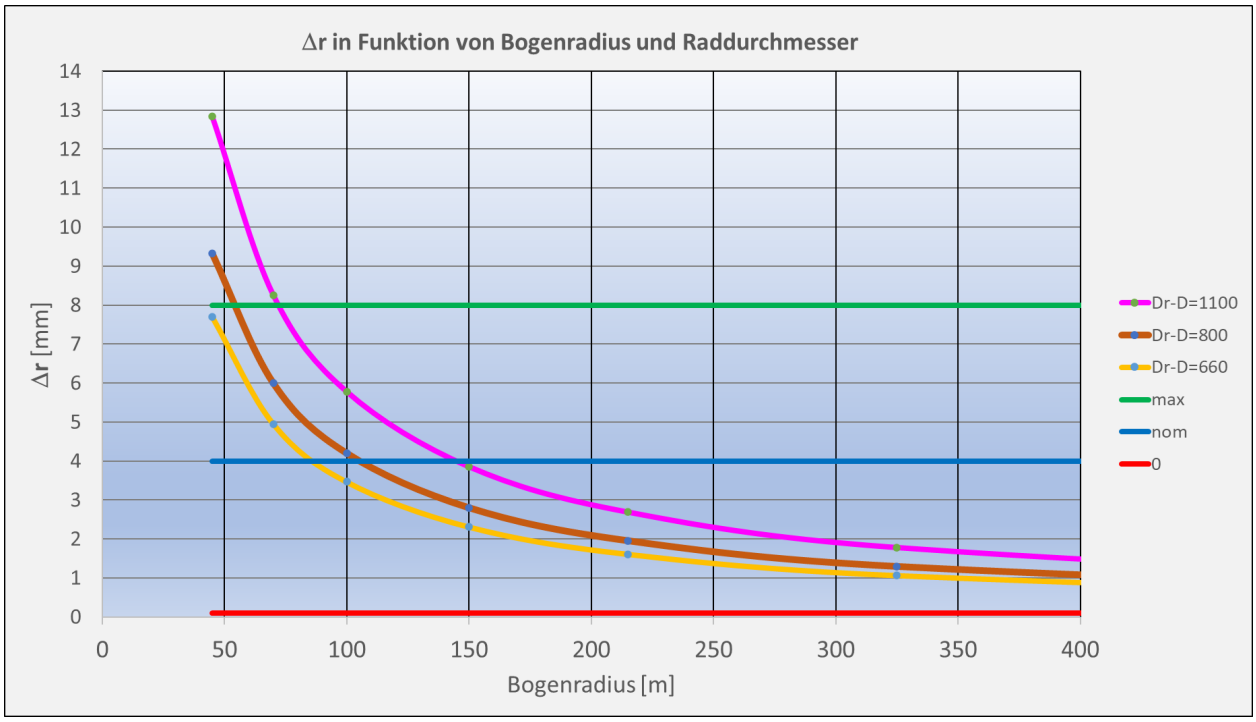


Abbildung 59: Erforderliches Δr (kinematisches Rollen) sowie vorhandenes Δr je nach Radprofil

Um ein besseres Verschleissverhalten und damit ein längeres Reprofilierung-Intervall ohne instabilen Laufs zum Ende des Reprofilierung-Intervalls zu erhalten, drängt sich die Entwicklung eins neuen Radprofils auf!

5.3.2 Traktion

Aus der Umfrage der Bahnen geht hervor, dass praktisch alle Bahnen Probleme mit Schleuderstellen und Materialausbrüchen an den Schienen haben. Diese Schäden sind ein Indiz für eine nicht optimale Traktionsregelungen der im Einsatz befindlichen Fahrzeuge. In diesem Bereich ist somit mit einem grossen Optimierungspotential zu rechnen bzw. kann es davon ausgegangen werden, dass diese Probleme zuverlässig durch eine verbesserte Traktionsregelung gelöst werden können.

Die Frage stellt sich, welchen Anteil am Rad-Verschleiss durch die Traktion hervorgerufen wird. Zu diesem Zweck führt die Systemführerschaft mit einem separaten Projekt Untersuchungen und Messungen an verschiedenen Fahrzeugen durch. Ohne Kenntnis der Eigenschaften der jeweiligen Traktionsregelungen lassen sich diese Resultate nur schwer einordnen. Der Beitrag, welchen das Projekt P5 in dieser Hinsicht zur Unterstützung leisten kann, ist in [7] beschrieben.

Die Parameter der Traktionsregelungen sind zwar noch nicht bekannt, aber aus früher durchgeführten Analysen von Traktionsregelungen im Rahmen von Torsionsschwingungsanalysen [3], muss davon ausgegangen werden, dass die Schlupf-Kennlinien mittlere bis hohe Schlupfgeschwindigkeiten erlauben. Zum besseren Verständnis wird kurz das Grundprinzip der Traktionsregelungen aufgezeigt.

5.3.2.1 Prinzip der Traktionsregelung

Das Verhalten von Traktionsregelungen [3] lässt sich mit einem klassischen PID-Regler nachbilden, dessen Prinzip in *Abbildung 60* erläutert wird. Der Proportional-Anteil (P, rote Linie) erzeugt eine Stellgrösse, welche proportional zur Regelabweichung steht. Damit kann die Zielgrösse jedoch nicht allein erreicht werden. Deshalb wird mit dem sog. Intergral-Anteil (I-grüne Linie) sichergestellt, dass der Zielwert erreicht wird. Das Erreichen des Zielwerts kann damit einige Zeit dauern, mit deutlichem Überschwingen. Damit der Zielwert schneller erreicht werden kann und ein geringeres Überschwingen stattfindet, wird ein Differential-Anteil (D-violette Linie) eingesetzt.

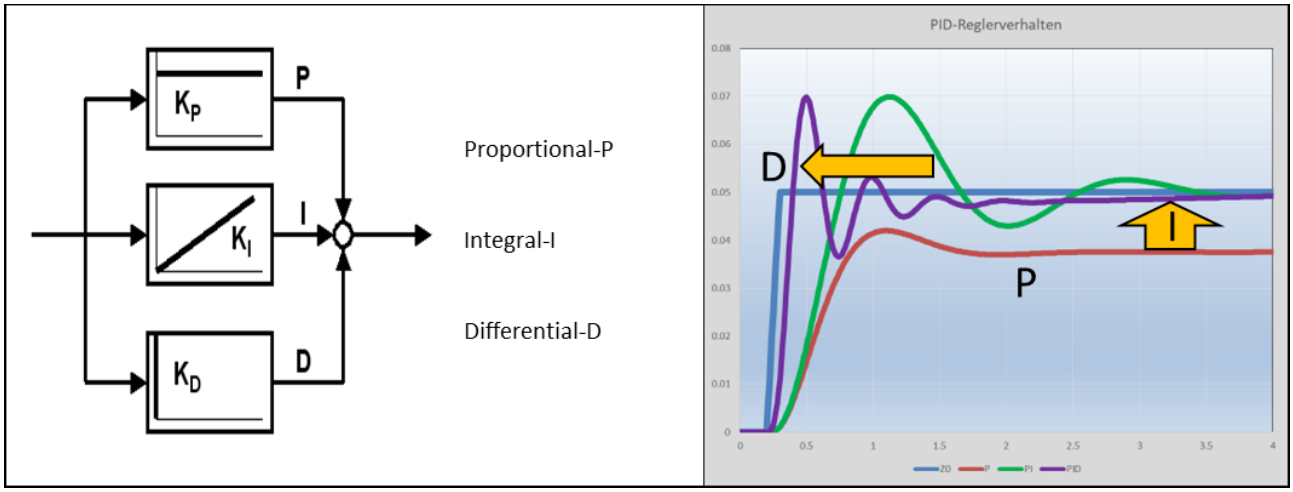


Abbildung 60: Prinzip eines PID-Reglers

Die Grundfunktion einer Traktionsregelungen ist ein reiner PI-Regler, welcher versucht, die vom Lokführer vorgegebene Geschwindigkeit oder Zugkraft zu erreichen. Die komplette Traktionsregelung ist schematisch in *Abbildung 61* dargestellt.

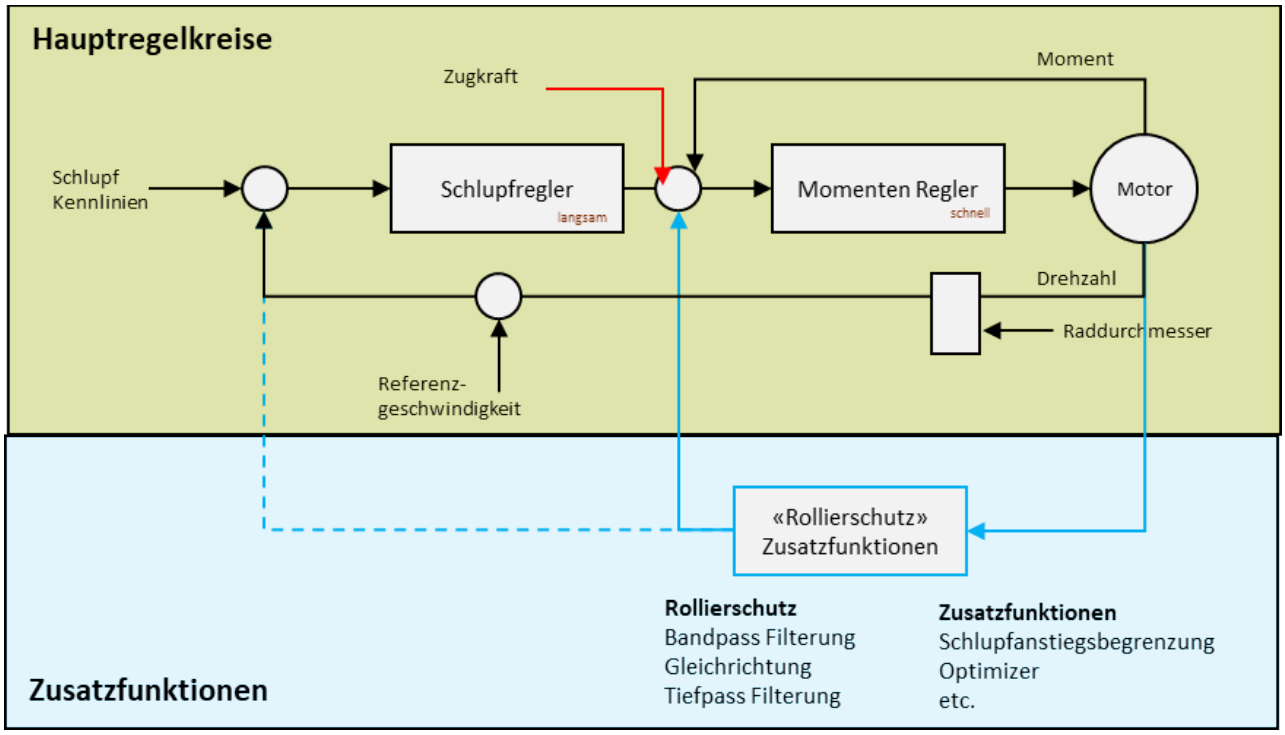


Abbildung 61: Prinzip einer Traktionsregelung

Übergeordnet ist ein Schlupf-Regler (*Abbildung 61*) eingebaut, welcher entsprechend der aktuellen Fahrgeschwindigkeit sowie der im Rechner hinterlegten Schlupf-Kennlinie (*Abbildung 62*, linkes Bild) Schlupf als Regelgrösse vorgibt. Vom Motor- bzw. Momenten-Regler wird die maximale Kraft aus dem ZV-Diagramm angenommen. Kann diese Kraft erreicht werden bevor der Sollschlupf erreicht ist, bleibt der Betriebspunkt im linken, steilen Bereich der Adhäsionskennlinie stehen (oranger Punkt). Ist die Zugkraft zu hoch oder die Adhäsion zu gering, erhöht sich der Schlupf bis zum Sollschlupf und der Betriebspunkt wandert auf die rechte, abfallende Seite der Adhäsionskennlinie.

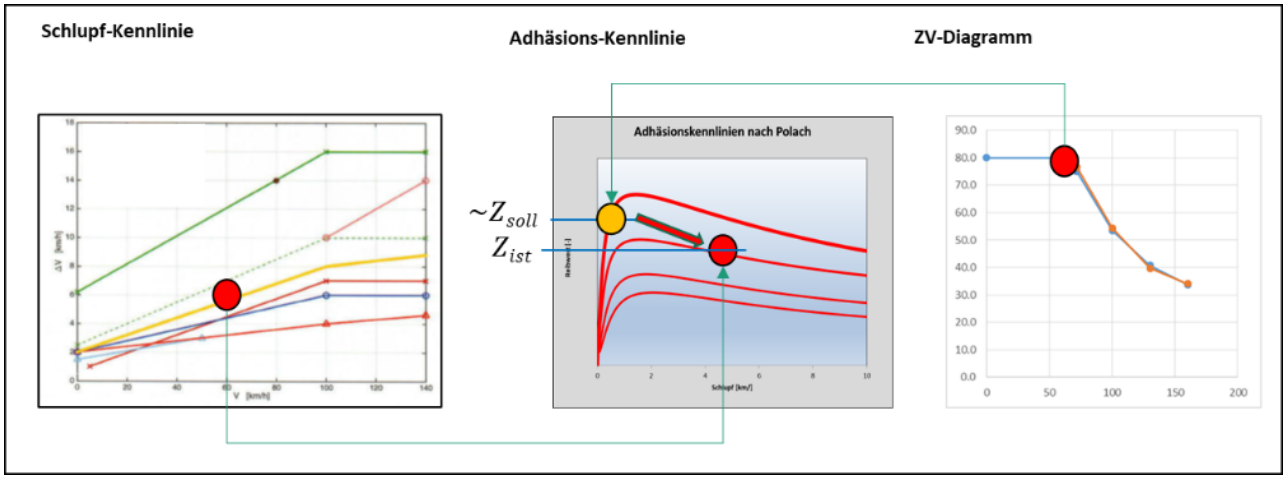


Abbildung 62: Prinzip einer Traktionsregelung

Auf Grund des sehr niedrigen Trägheitsmomentes des Radsatzes inkl. Rotor des Motors im Vergleich zum effektiven Moment aus der momentanen Zugkraft sowie dem Radradius, kommt es dabei immer zu einem starken Ausrutschen des Radsatzes und damit kurzzeitig zu sehr hohen Schlupfwerten. Dabei treten praktisch immer Torsionsschwingungen auf. Bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten können Schleuderstellen entstehen. Zur Vermeidung dieser Ausrutschvorgänge mit hohen Überschwingungen, werden unzählige Verfahren eingesetzt. An dieser Stelle werden diese einfach als sog. Schlupfanstiegs-Begrenzung oder Schleuderschutz bezeichnet (D-Anteil des Reglers). Zur

Verhinderung unerwünschter Konsequenzen muss der Sollschlupf bei einem Ausrutschvorgang innerhalb von 0.5 Sekunden erreicht werden!

Eine nicht ausreichende Adhäsion kann einerseits durch einen tiefen Reibwert zwischen Rad und Schiene erfolgen oder andererseits bei Bogenfahrt, wo in engen Bögen zeitweise die gesamte Traktionskraft über das bogeninnere Rad übertragen werden muss (*Abbildung 63*).

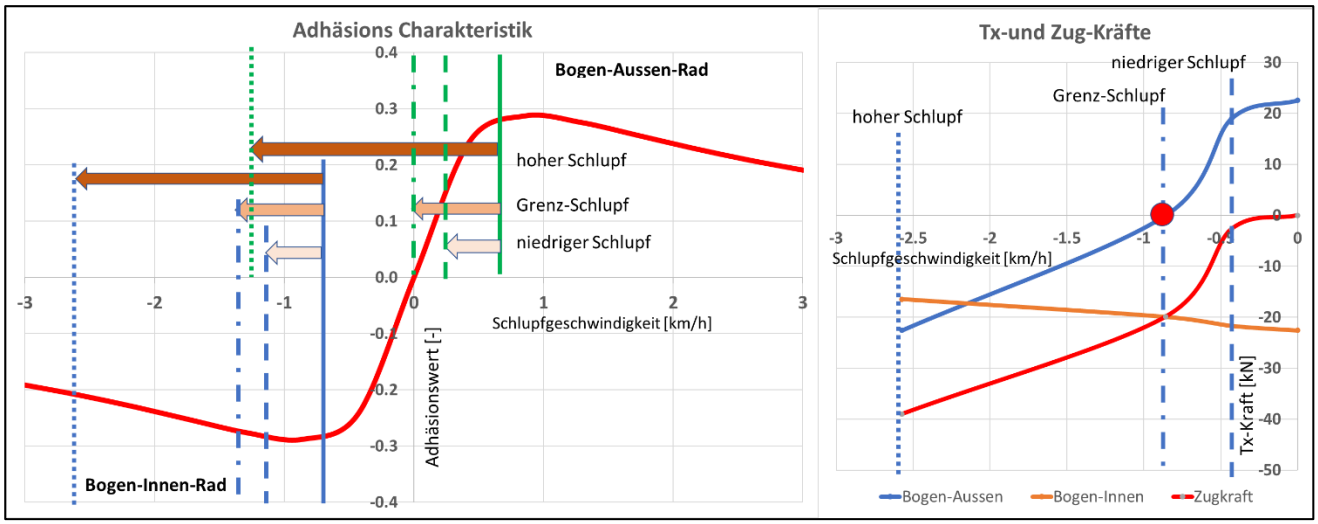


Abbildung 63: Tx-Kraftverlauf und Zugkraft bei Bogenfahrt

In sehr engen Bögen, mit nicht ausreichendem Δr, treten Tx Kräfte an den beiden Rädern auf, welche entgegengesetzt sind. Am Bogen-Aussen Rad tritt eine Schlupfgeschwindigkeit in Fahrtrichtung auf, am Bogen-Inneren Rad entgegen der Fahrtrichtung. Wird Traktionsschlupf aufgebracht, wird die Traktionskraft so lange vom Bogen-Inneren Rad übernommen, bis die Traktionsschlupfgeschwindigkeit grösser wird als diejenige am Bogen-Aussen Rad (roter Punkt). Erst bei höheren Schlupfgeschwindigkeiten verteilt sich die Zugkraft auf beide Räder. Dieser Effekt führt am Bogen-Inneren Rad zeitweise zu einer doppelten Haftwertausnutzung. D.h. ein Fahrzeug mit einer Haftwertausnutzung von z.B. 0.3 wird am Bogen-Inneren Rad eine Haftwertausnutzung von 0.6 erreichen, was vor allem beim Anfahren in Bögen oder Übergangsbögen meist zu einem Ausrutschen des Radsatzes führen kann.

Da die Parameter der Traktionsregelungen noch nicht bekannt sind, können zum jetzigen Zeitpunkt keine zuverlässigeren Aussagen über den Umfang, die Intensität und die Dauer dieser Zustände gemacht werden. Diese Datenerhebung wird zurzeit in einem anderen Projekt bearbeitet.

5.3.2.2 Einfluss-Analyse Traktion

Für die Untersuchung in FIMO werden Schlupfgeschwindigkeiten von 1.5 und 4.0 km/h konstant aufgebracht, was nach [3] eher niedrige bis moderate Schlupfwerte darstellen. Die Resultate für die ausgewählten Lösungsansätze sind in *Abbildung 64* und *Abbildung 65* dargestellt. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind in *Abbildung 64* die Bogenradien von 45 – 150 m dargestellt, in *Abbildung 65*, die Bogenradien von 215 – 1000 m.

Wie zu erwarten, steigt der Verschleiss auf der Lauffläche mit zunehmendem Schlupf bei allen Lösungsansätzen stark an, also unabhängig vom Lösungsansatz. Am Spurkranz hingegen verschwindet der Verschleiss bereits ab niedrigen Schlupfgeschwindigkeiten. Ebenso verschwindet der Rissfortschritt RCF bereits ab niedrigen Schlupfgeschwindigkeiten, dies wegen des hohen Verschleisses.

Bei der aktiven Radsatzsteuerung steigt der Verschleiss in der Lauffläche deutlich stärker an. Dies ist einerseits in der Tatsache begründet, dass keine Spurkranzschmierung im Einsatz ist und andererseits eine über doppelt so hohe Zugkraft erreicht werden kann. Dieser Effekt ist auf die sehr niedrigen Anlaufwinkel zurückzuführen, bei denen praktisch keine Kraftschlusskräfte in Querrichtung auftreten.

Bei passiven Lösungen (z.B. GGA, Cx-HALL (elastisch), etc.) ist aus der Praxis bekannt, dass diese unter Einfluss von Traktionskräften nicht mehr zuverlässig arbeiten, d.h. dass sich Fehlstellungen der Radsätze einstellen. Da sich diese Fehlsteuerungseffekte vorwiegend im Bereich des Fahrens mit hohen Zugkräften bei niedrigen Schlupfgeschwindigkeiten auftreten, zeigen sich diese bei dieser Analyse mit konstanten, quasistatischen Bedingungen und ohne Gleislagestörung kaum.

Die vorliegende Analyse zeigt, dass der spez. Verschleiss proportional zum Traktionsschlupf ansteigt und recht hohe Werte annehmen kann. Zusätzlich muss davon ausgegangen werden, dass bei Ausrutsch- bzw. Schleudervorgängen kurzzeitig ein Mehrfaches an spez. Verschleiss auftritt, als dies bei den 4km/h Schlupf der Fall ist. Dass dabei Schleuderstellen sowie thermische Schäden entstehen können, versteht sich von selbst.

Unabhängig vom Fahrzeug bzw. Lösungsansatz sollten in Zukunft Traktionsregelungen mit möglichst niedrigen Schlupf-Kennlinien [3] und wirksamen Schleuderschutz Funktionen ausgeführt werden. Damit können sogar höhere Zugkräfte realisiert werden als mit den klassischen Hochschlupf-Strategien!

Der effektive Radverschleiss infolge Traktion richtet sich auch nach der Häufigkeit und Dauer der Fahrzustände mit hohen Schlupfgeschwindigkeiten. Als Indiz für einen massgebenden Einfluss kann gemäss der Analyse die Entwicklung eines sog. Hohllaufs der Lauffläche angesehen werden.

Der Einsatz von Traktionsregelungen mit niedrigen Schlupf-Kennlinien kann dementsprechend auch die Entstehung eines Hohllaufs stark abmindern.

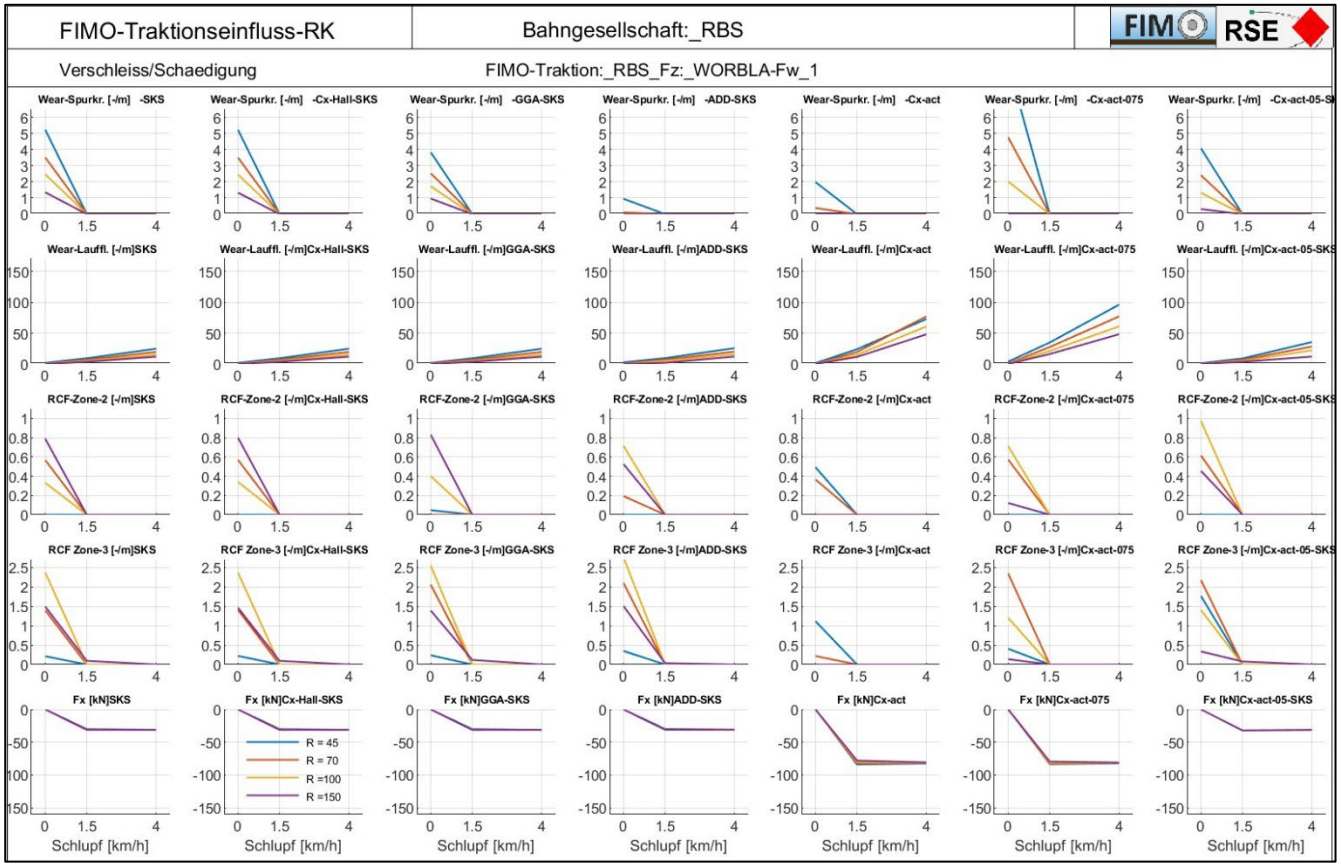


Abbildung 64: Wear, RCF, Zonenabhängig und Zugkraft in Funktion der Lösungsansätze und des Traktions-Schlupfs für Bögen von 45 m bis 150 m Radius

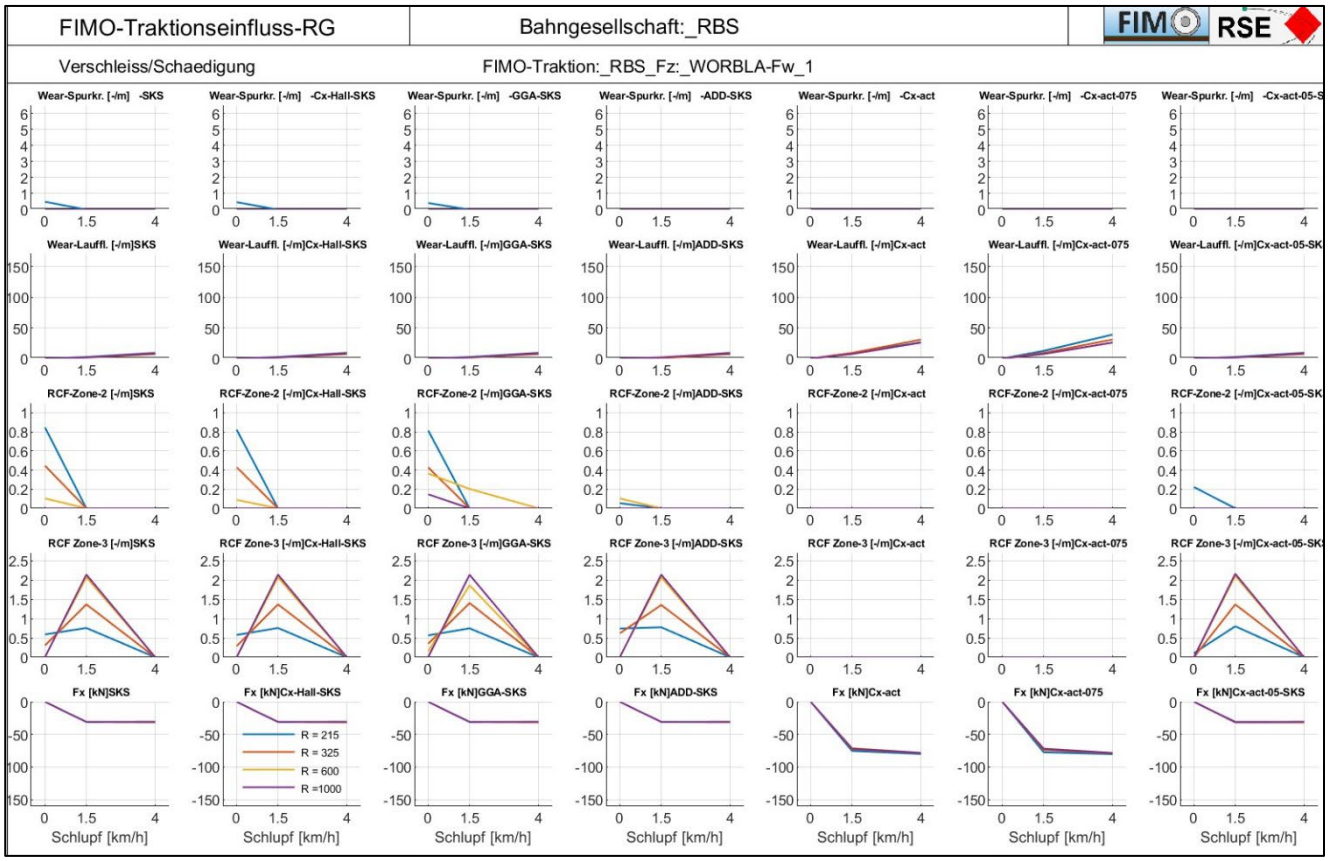


Abbildung 65: Wear, RCF, Zonenabhängig und Zugkraft in Funktion der Lösungsansätze und des Traktions-Schlupfs für Bögen von 215 m bis 1000 m Radius

5.3.3 Verschiedene Parameter wie Radsatzlast, Radstand, Raddurchmesser & Losrad

Zur Vervollständigung der Analyse wurde auch die Empfindlichkeit des Verschleissverhaltens auf einige wichtige Fahrzeug-Parameter wie den Radstand, die Radsatzlast, das Losrad und den Raddurchmesser untersucht.

Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 10 aufgelistet und die Resultate sind in *Abbildung 66* (Radsatzlast & Radstand) und *Abbildung 67* (Raddurchmesser & Losrad) dargestellt.

Parameter	Einheit	nominal	Variation-1	Variation-2
Radstand	m	2	1.6	1
Raddurchmesser	m	0.77	0.616	0.385
Radsatzlast	t	11.7	9.36	5.85
Losrad (Ct)	%	100	0	

Tabelle 10: Parameter-Variation

Als Referenz gilt die steife Radsatzführung ohne Spurkranzschmierung (schwarz, strichpunktierte Linie mit kreisförmigen Markern). Zur Orientierung ist zusätzlich die spez. Reibarbeit für die steife Radsatzführung ohne Spurkranzschmierung eingezeichnet (schwarz punktierte Linie).

Es zeigt sich, dass keiner der obigen Parameter, im Rahmen realistischer Variationen, einen signifikanten Einfluss auf das Verschleissverhalten hat und sich alle Variationen in einer engen Bandbreite um die schwarze Linie bewegen.

Losrad-Lösungen bieten nur minimalen Nutzen im Spurkranzverschleiss und müssten mindestens mit Spurkranzschmierung ausgerüstet werden, richtigerweise müssten diese jedoch mit einer aktiven

Radsatzsteuerung ausgeführt werden. Damit werden Losrad- Lösungen sehr teuer und somit uninteressant, sie sind auf jeden Fall zu vermeiden!

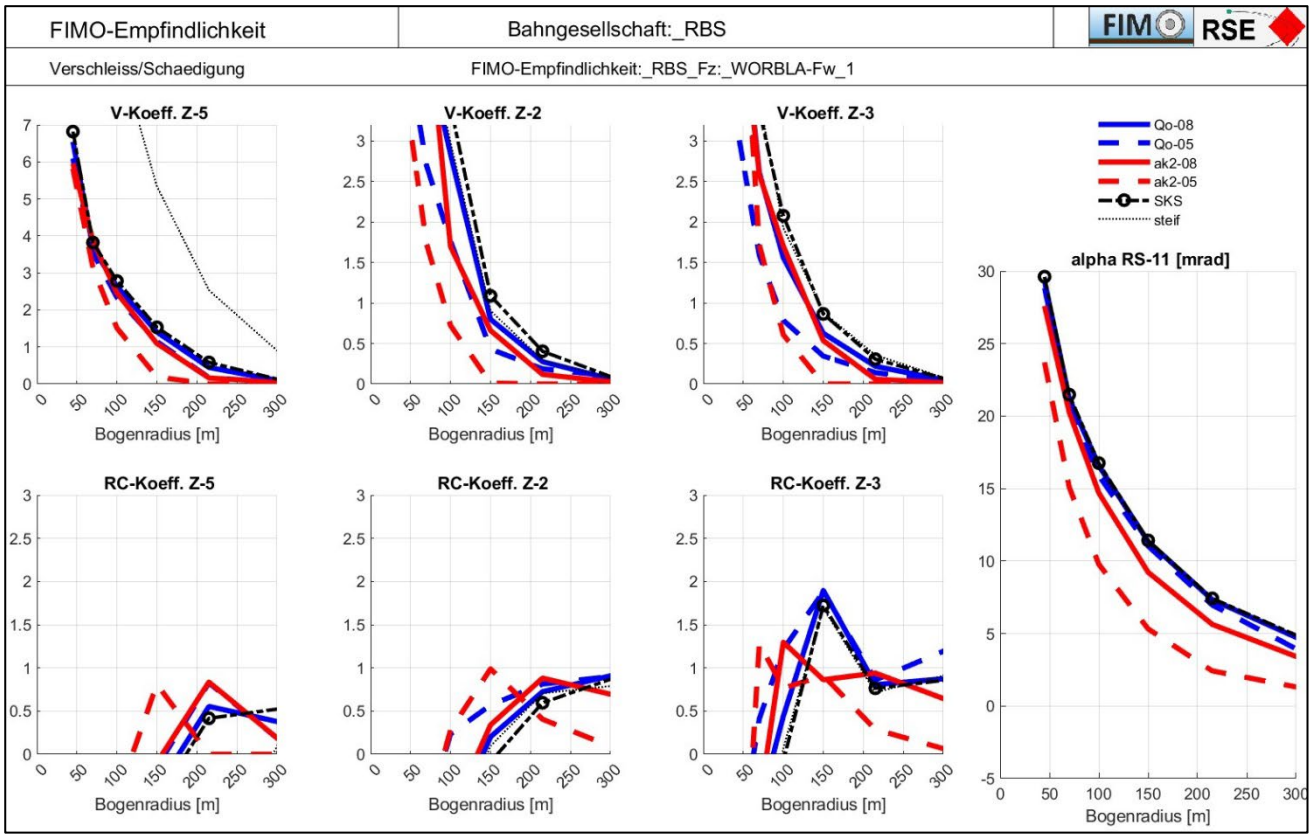


Abbildung 66: spez. Verschleisswerte über dem Bogenradius für Radsatzlast & Radstand

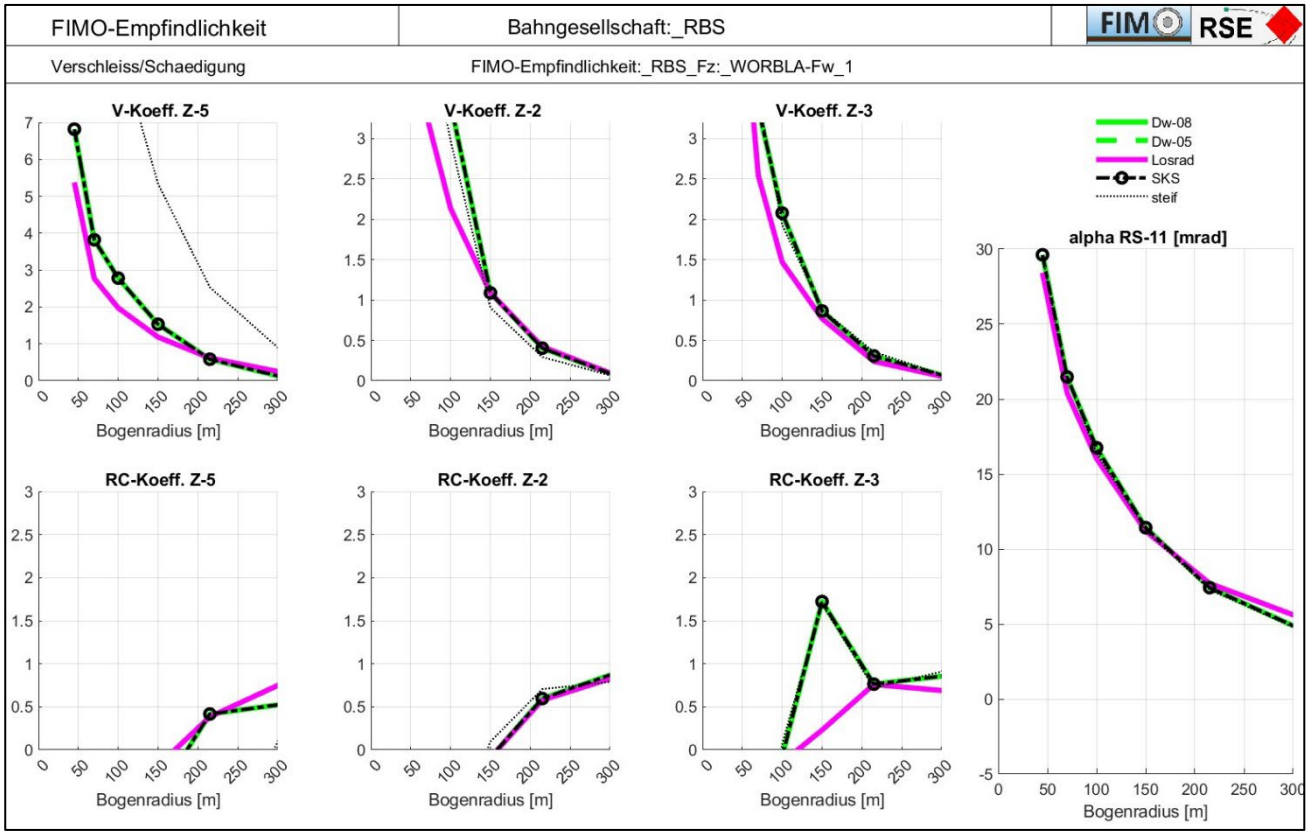


Abbildung 67: spez. Verschleisswerte über dem Bogenradius für Raddurchmesser & Losrad

5.4 Bewertung von Zahnrad-Fahrzeugen bzw. -Betrieb

Eine umfassende Untersuchung der Situation auf Linien mit Zahnstangenabschnitten ist in dieser Phase nicht geplant. Stattdessen sollen die Unterschiede der beiden Betriebsarten identifiziert werden sowie eine Strategie erarbeitet werden, wie dieser Betrieb in den weiteren Phasen behandelt werden könnte.

Ein Inventar der Züge sowie eine Beschreibung der Unterschiede zwischen Adhäsions- und Zahnrad-Betrieb sind in [10] ersichtlich. Da die Zahnrad-Kraft keinen Einfluss auf das Verschleissverhalten der Räder ausübt, verbleiben die Betriebsbedingungen wie Fahrgeschwindigkeit und Querbeschleunigung als einzig relevante Unterschiede.

Der Vergleich des Verschleiss- und Schädigungsverhaltens zwischen Adhäsions- und Zahnrad-Betrieb für den «SURF» der MVR mit Radprofil mit 4 mm Δr ist in *Abbildung 68* gezeigt.

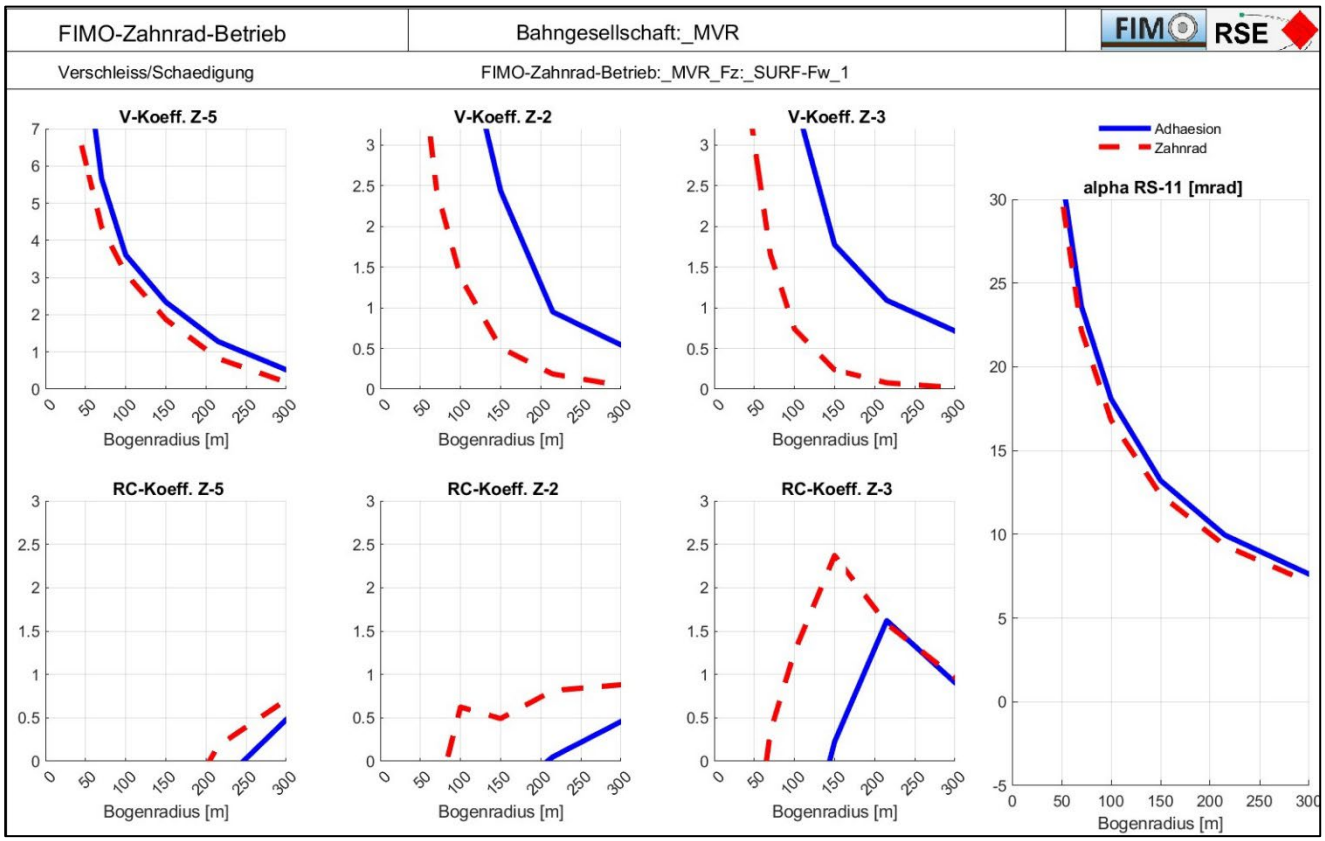


Abbildung 68: Vergleich von Verschleiss, Schädigung und Anlaufwinkel für Adhäsion/Zahnrad

Es zeigt sich, dass beim Zahnradbetrieb infolge der niedrigeren Geschwindigkeit sowie niedrigeren Querbeschleunigung ein etwas geringerer Verschleiss am Spurkranz entsteht. Der Verschleiss auf der Lauffläche wird dadurch deutlich stärker reduziert. Das Risko für Rollkontaktermüdung (RCF) steigt gegenüber dem Adhäsionsbetrieb eher an.

Bei reinem Zahnradantrieb treten keine traktionsbedingten Längsschlüpfe auf. Bei Mischantrieben sind ebenfalls nur kleine Schlupfwerte zu erwarten, da mit geringerer Haftwertausnutzung gefahren wird. Als Schädigungen im Gleis sind zumindest Schlupfwellen vorhanden. Damit dürfte grundsätzlich eine geringere Intensität der Schädigungen zu erwarten sein.

Für eine detailliertere Bewertung sind folgende Informationen bereitzustellen:

- Bezug der Schädigungselemente aus der Umfrage P1 auf die Zahnstangen-Abschnitte
- Die Bogenverteilung der Linien-Abschnitte mit Zahnstangen

Bei Fahrwerken mit Zahnradantrieb wird es als schwierig erachtet, konstruktive Anpassungen zu realisieren, welche eine radiale Einstellung der Radsätze ermöglichen. Es wird jedoch erwartet, dass sich eine radiale Einstellung möglicherweise positiv auf die Interaktion Zahnrad/Zahnstange auswirken könnte.

Das weitere Vorgehen der Behandlung des Zahnstangen-Betriebs ist wie folgt vorgesehen:

- Klärung der spezifischen Schadensbilder im Zahnstangenbereich
- Analyse der Möglichkeiten zur Realisierung radialer Einstellungen der Radsätze

5.5 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Analysen erlauben eine umfassende Bewertung aller Fahrzeuge der Meterspurbahnen, Lösungsansätze, Kombinationen mit verschiedenen Parametern. Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen werden im Folgenden stichwortartig zusammengefasst:

- Das Simulations-Modell ist sehr gut geeignet
  - Das Modell entspricht dem Stand der Technik
  - Der Rad-Schienen Kontakt ist sehr detailliert und kann als gleichwertig mit dem «*Equivalent Elastic Contact*» in Simpack angesehen werden.
  - Das Modell liefert qualitativ wie quantitativ zuverlässige Ergebnisse
- Das Standardradprofil W98 (RTE29500) ist nicht geeignet für verschleissarmes Fahren. Es muss zwingend ein neues Profil entwickelt werden, welches folgende Eigenschaften aufweist:
  - Gleichmässiger Verschleiss über die Lauffläche
  - Mindestens ein Δr von 4 mm, wenn möglich höher, unter Ausnutzung einer zulässigen Spurkranzschwächung, was weitere, detailliertere Untersuchungen erfordert
  - längere Laufzeit bzw. längeres Reprofilierung-Intervall
  - konstant niedrige Konizität, damit stabiler und ruhiger Lauf über das gesamte Reprofilierung-Intervall
- Die Analysen wurden mit dem Schienenprofil 46E1 mit einer Schienenneigung von 1/20 durchgeführt. Dieses scheint auch die Voraussetzungen zu bieten, um mit Radprofilen mit grösseren Δr fahren zu können.
- Die 32 Linien der 8 Bahnen können entsprechend der Bogenhäufigkeiten in 4 Kategorien eingeteilt werden, anhand derer systematische Analysen durchgeführt werden können
  - Katerorie-1: sehr kleine Bogenradien
  - Kategorie-2: kleine Bogenradien
  - Kategorie-3: mittlere Bogenradien
  - Kategorie-4: grössere Bogenradien
- Die aus der Umfrage P1 erhaltenen Aussagen zu den Verschleiss- und Schädigungsangaben an Rad und Schiene korrelieren gut mit den Ergebnissen der Simulationen. Dies bedeutet:
  - Die Umfrage wurde seriös beantwortet und die Ergebnisse sind nützlich
  - Die Berechnungen widerspiegeln die zu erwartenden Verschleisswerte recht gut
- Verschleissarmes Fahren ist nur mit kleinen Anlaufwinkeln möglich, ca. < 5 mrad (ca. 1.5 mm Längsverschiebung des Radsatzes = 1 mrad Anlaufwinkel).
- Das Risiko des Rissfortschritts beginnt bereits bei kleinen Anlaufwinkeln.
- Eine steife Radsatzführung ohne Spurkranzschmierung ist für Bogenradien kleiner als 300m nicht geeignet, auch nicht mit dem nominalen Profil mit 4 mm Δr.

- Mit einer elastischen oder steifen Radsatzführung zusammen mit SKS, kann, bis Bogenradien von ca. 200m verschleissarm gefahren werden, mit dem nominalen Profil mit 4 mm Δr.
- Bei Bogenradien kleiner ca. 200 m stossen passive Radsatzführungssysteme an ihre physikalischen Grenzen.
- Beim Zahnradbetrieb entsteht infolge der niedrigeren Geschwindigkeit sowie niedrigeren Querbeschleunigung ein geringerer Verschleiss am Spurkranz sowie an der Lauffläche
- Die elastische Radsatzführung wird hier stellvertretend für alle passiven Lösungen aufgezeigt, da sich alle passiven Lösungen grundsätzlich ähnlich verhalten.
- Bei dominanten Bogenanteilen von Bogenradien kleiner 200m kann nur noch mit aktiven Radsatzsteuerungen verschleissarm gefahren werden, da die passiven Lösungen die hohen Stellwege nicht mehr zulassen. Dies ist allerdings auch nur möglich, wenn die Berührgeometrie, bzw. das Δr dies unterstützen. In engsten Bogenradien unter ca. 70m Radius ist dies mit nominalem Profil auch nicht mehr der Fall.
- Mit nur teilweiser, aktiver Steuerung und zusätzlicher Spurkranzschmierung können bereits deutliche Reduktionen des Verschleissverhalten erreicht werden. Dies dürfte vor allem für Nachrüst-Lösungen interessant werden.
- Bei einem Zugskonzept mit Losrädern müssten diese grundsätzlich, unabhängig vom Bogenradius, aktiv gesteuert werden, weshalb diese Konzepte nicht zielführend sind.
- Zugskonzepte mit REF (Radsatz-Einzel-Fahrwerken) sind nicht zielführend, dies wegen zu hoher Radsatzlasten, notwendiger, aktiver Radsatzsteuerung und den hohen, zu erwartenden Kosten.
- Es kann kein einzelner Fahrzeug-Parameter als «allein massgebend» für hohe Verschleisswerte identifiziert werden.
- Die beiden wichtigsten verschleissbestimmenden Parameter sind (mit steifer Radsatzführung):
    - Radstand: verändert proportional den Anlaufwinkel; Einfluss auf Verschleiss siehe Kapitel 5.1.1
    - Radsatzlast: verändert proportional den Verschleiss
- Das Produkt aus «Radsatzlast x Radstand» der Fahrwerke eines Zuges bestimmen bei steif geführten Radsätzen das Niveau des Verschleisses.
- Kleinere Raddurchmesser benötigen ein kleineres Δr und sind daher zu bevorzugen. Bei günstiger Kontaktgeometrie sollte damit der Verschleiss trotz der häufigeren Überrollungen nicht höher ausfallen.
- Verschleissarmes Fahren bzw. Fahren mit kleinen Anlaufwinkeln liefert zusätzlichen Nutzen in folgenden Bereichen (in P6 mit zu berücksichtigen):
    - Lärmabstrahlung (Kurven-Kreischen)
    - Schlupfwellen
    - gewisse Formen der Rundheitsabweichungen der Räder
    - ggf. Entfall der Radschallabsorber
    - Verbesserung der Zugkraft (Kraftschlussausnutzung)
- Erkenntnisse aus den ersten Workshops mit den Bahnen:
    - Der Kurzzeit-Verschleiss der Schienen stellt sich nicht als Problem dar.
    - Die Schienen werden vorwiegend wegen Schlupfwellen geschliffen.
    - Die Qualität des Schienenschleifens ist sehr unterschiedlich. Schlechte Qualität kann den Radverschleiss massiv erhöhen.
    - Die Reprofilierung der Räder erfolgt nicht nur infolge Verschleisses, sondern auch auf Grund von Durchmesserdifferenzen oder Flachstellen.

- Die Bahnen können Radprofil-Daten aus dem Betrieb zur Verfügung stellen, mit denen eine Prognose für die Reprofilierung-Intervalle der Lösungsansätze erstellt werden kann.

Die wichtigsten und entscheidenden Erkenntnisse daraus können mit den folgenden 8 Punkten zusammengefasst werden:

1. Für einen verschleissarmen Betrieb ist ein neues, verschleissangepasstes Radprofil erforderlich.
2. Da die Radsatzlast schwierig zu reduzieren ist, ist bei neuen Fahrzeugen unabhängig vom Zugskonzept, auf möglichst kurze Radstände in den Fahrwerken zu achten.
3. In engsten und engen Bögen kann ausschliesslich mit einer aktiven Radsatzsteuerung verschleissarm gefahren werden.
4. In grösseren Bögen können auch passive Lösungen in Kombination mit Spurkranzschmierung eingesetzt werden.
5. Bei Nachrüstungen kann eine aktive Radsatzsteuerung mit reduzierten Steuerungswinkeln in Kombination mit einer Spurkranzschmierung den Verschleiss bereits deutlich reduzieren.
6. Eine gute Radialeinstellung der Radsätze mindert zusätzlich das Kurven-Kreischen sowie die Bildung von Schlupfwellen und Rundheitsabweichungen an den Rädern. Diese Themen werden in den Projekten P3/P4 vertieft behandelt.
7. Defizite in den Bereichen Berührgeometrie, Radialsteuerung und Traktionsregelung können mit keinem Zugskonzept kompensiert werden.
8. Im Zahnradbetrieb besteht gegenüber dem Adhäsionsbetrieb ein geringerer Verschleiss am Spurkranz und der Lauffläche, das Risiko der Rissbildung steigt jedoch an.

Die vorliegenden Ergebnisse, Werkzeuge und Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur individuellen Unterstützung der Bahnen. Die wesentlichen Potentiale sind in Kapitel 7 beschrieben.

6 Zuordnung zum Projektplan

Die Zuordnung des Berichts zum Projektplan P5 ist in folgender Roadmap mittels einer grünen Fläche markiert. Der vorliegende Bericht repräsentiert im Wesentlichen die Ergebnisse der Phase 1 und ist dementsprechend vorwiegend allgemein und nicht bahnspezifisch (FIMO-Bewertung 1) gehalten.

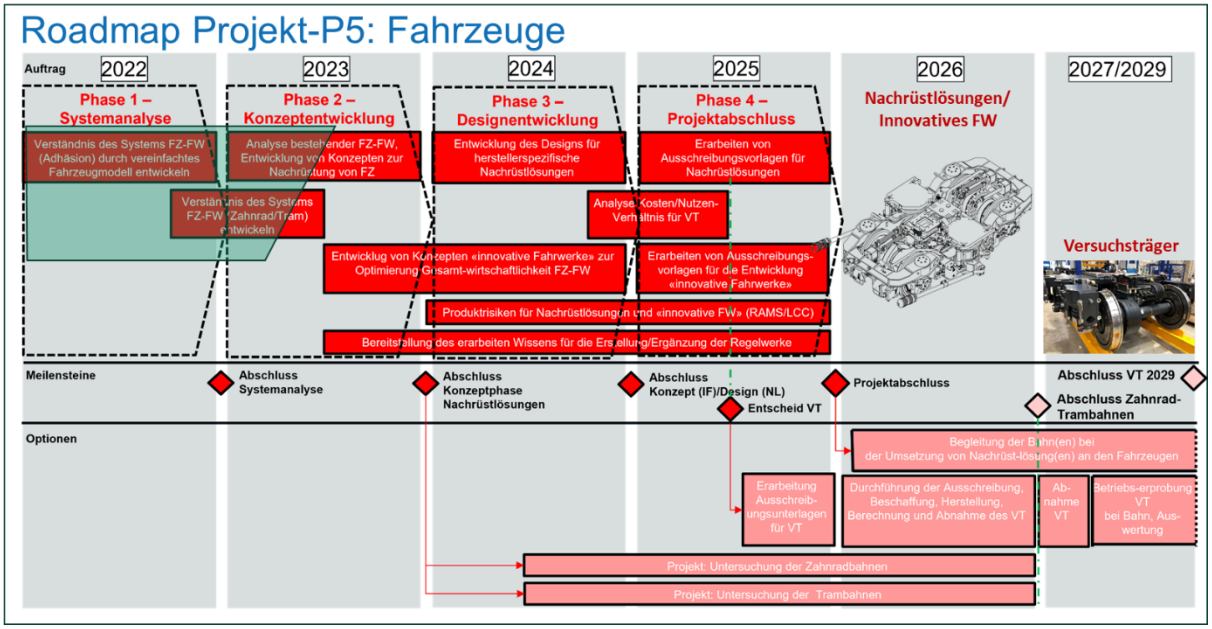


Abbildung 69: Projektplan P5

In der Phase 2 kann eine bahnspezifische Bewertung (FIMO-Bewertung 2) auf Grundlage der Analysen aus Phase 1 sowie der Machbarkeit Studie der Nachrüstlösungen erfolgen.

Damit können die erfolgversprechenden und realisierbaren Lösungen für einzelne Bahnen ermittelt und definiert werden.

7 Ausblick

Nachdem diese Analyse vorwiegend mit einem Referenzfahrzeug sowie den vier Referenzstrecken durchgeführt wurde und damit allgemeinen Charakter aufweist, können nun Bahn- bzw. Fahrzeug-spezifisch und falls notwendig auch fahrwerkspezifische Analysen folgen.

Das Hauptziel dieser Analysen ist die Bestimmung von bahnspezifischen, erfolgversprechenden Konzepten bzw. Lösungsmöglichkeiten. Zudem sollen mit diesen Analysen auch Informationen für das Fahrzeuge, den Fahrzeug- und den Gleisunterhalt bereitgestellt werden und im Projekt P6 (Wirtschaftlichkeit) monetär bewertet werden.

Diese Analysen sollen Antworten zu den folgenden fünf Fragen liefern:

1. Welche Zugskonzepte mit welchen Lösungsansätzen und Antriebsverteilung eignen sich am besten für einen spezifischen Einsatz bzw. den Ersatz eines bestehenden Zuges?
2. Welche Lösungsansätze eigen sich am besten, um das Verschleissverhalten bestehender Züge zu verbessern?
3. Welche Reprofilierung-Intervalle bzw. Radstandzeiten können mit den Varianten im Vergleich zum heutigen Einsatz erreicht werden (Reduktion Radsatzunterhalt P6)?
4. Welche Schleifintervalle bzw. Schienenstandzeiten können mit den Varianten im Vergleich zu heute erwartet werden (Reduktion Gleisunterhalt P6)
5. Welcher zusätzliche Nutzen in Bezug auf Lärm (Kurven-Kreischen), Zugkraft, etc. kann mit den Varianten erwartet werden und welche Risiken sind damit verbunden?

Die wesentlichen, zukünftigen Analysen und Bewertungen konzentrieren sich auf folgende Bereiche:

1. Bewertung der Konzepte für die Nachrüstung
    a. Machbarkeitsstudie Nachrüstlösungen
    b. Bewertung der Lösungsansätze
2. Bewertung der Konzepte für die Neubeschaffung
    a. Zugskonzepte
    b. Lösungsansätze
    c. Konzeptionelle Grundlagen zum Innovativen Fahrwerk
3. Input für P6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
    a. Fahrzeug- bzw. Radsatzunterhalt
    b. Gleisunterhalt
    c. Zusätzlicher Nutzen bez. Lärm und Erschütterungen
4. Unterstützung für P2 und P3
    a. Analysen zur Ermittlung der Verschleiss- und Schädigungsgesetze [8]
    b. Analysen zur Entwicklung eines geeigneten Radprofils
    c. Analysen zur Entwicklung und Reprofilierung von Schienenprofilen
5. Diverse Analyse
    a. Individuelle Analysen für einzelne Bahnen nach Bedarf
    b. Untersuchungen von Torsionsschwingungen von Radsatzwellen

Die Bereiche 1 und 2 liegen in der Verantwortung von P5. Diese werden bevorzugt bahnspezifisch behandelt und können auf Grundlage der bestehenden Datenbasis von FIMO nach Bedarf abgearbeitet werden. Der Bereich 3 richtet sich nach den Bedürfnissen von P6. Die Informationen können dementsprechend nur in Absprache mit P6 sowie, je nach Thema, nur in Zusammenarbeit mit P2 und P3 behandelt werden. Der Bereich 4 zeigt das Potenzial an Analysen auf, welche sich aus dem FIMO-Werkzeug (Modell) für das Gesamtprojekt sowie die Bahnen eröffnen. Vor allem für P3 könnten diese Möglichkeiten von Interesse und Nutzen sein. Analysen in diesem Bereich bedingen eine separate Beauftragung. Der Bereich 5 kann im Auftrag durch P5 entweder behandelt oder vermittelt werden.

7.1 Bereich-1: Bewertung der Konzepte bzw. Lösungsansätze für die Nachrüstung

Bei einer Nachrüstung für bestehende Fahrzeuge stellt sich die Frage der Wirkung einer Nachrüstlösung für einen bestimmten Einsatz eines Fahrzeugs. *Abbildung 70* zeigt beispielhaft die Wirkung für die verschiedenen Lösungsansätze auf.

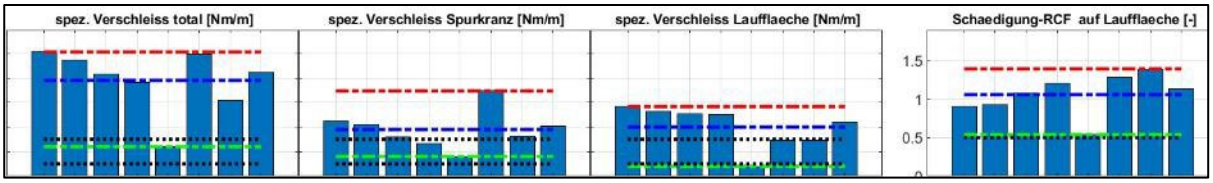


Abbildung 70: Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten für bestimmten Einsatz

Mit Hilfe der Machbarkeitsstudie können geeignete Lösungen ermittelt und deren Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

7.2 Bereich-2: Bewertung der Konzepte für die Neubeschaffung

Diese Untersuchungen müssen Bahn- bzw. Fahrzeug spezifisch für deren Einsatzbereich erstellt werden.

Ein mögliches Beispiel einer derartigen Auswertung ist in *Abbildung 71* gezeigt. Wird z.B. beabsichtigt, ein Ersatzfahrzeug für ein bestehendes Fahrzeug zu beschaffen, orange markiertes Fahrzeug, durch eines der beiden mit rotem Strich markierten Fahrzeuge zu ersetzen. Damit könnte aufgezeigt werden, wie sich die vorgesehenen Fahrzeuge bezüglich Verschleisses verhalten würden (im dargestellten Fall wäre das schlechter). Die Situation kann also vertiefter analysiert werden, auch unter Einbezug aller weiteren relevanten Kriterien.

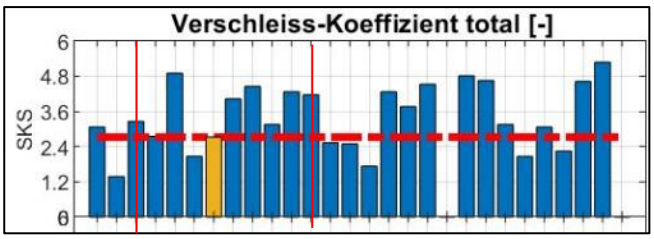


Abbildung 71: Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten: Vergleich der Fahrzeuge

7.3 Bereich-3: Input für P6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

7.3.1 Radsatzunterhalt

Die entscheidende Information zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Lösungsansatzes in Bezug auf den Radverschleiss ist das Reprofilierung-Intervall sowie die Radstandzeit. Diese hängen von vielen verschiedenen Faktoren ab und sind theoretisch schwer zu ermitteln. Zudem sind die Berechnungen zeit- und arbeitsintensiv und damit sehr teuer. Bei der Vielfalt an Varianten im Meterspurumfeld, drängt sich die Entwicklung einer einfachen und flexiblen Näherungslösung auf.

Es ist vorstellbar, ein Näherungsverfahren zu entwickeln, welches mit Hilfe einer Kalibrierung der Verschleissberechnungen des FIMO-Modells mit gemessenen Verschleissdaten von Zügen bzw. Fahrwerken, eine Prognose ermöglicht, welche die komplexen Einflüsse elegant einbeziehen würde. Die Idee dieses Prozesses ist in *Abbildung 72* schematisch dargestellt.

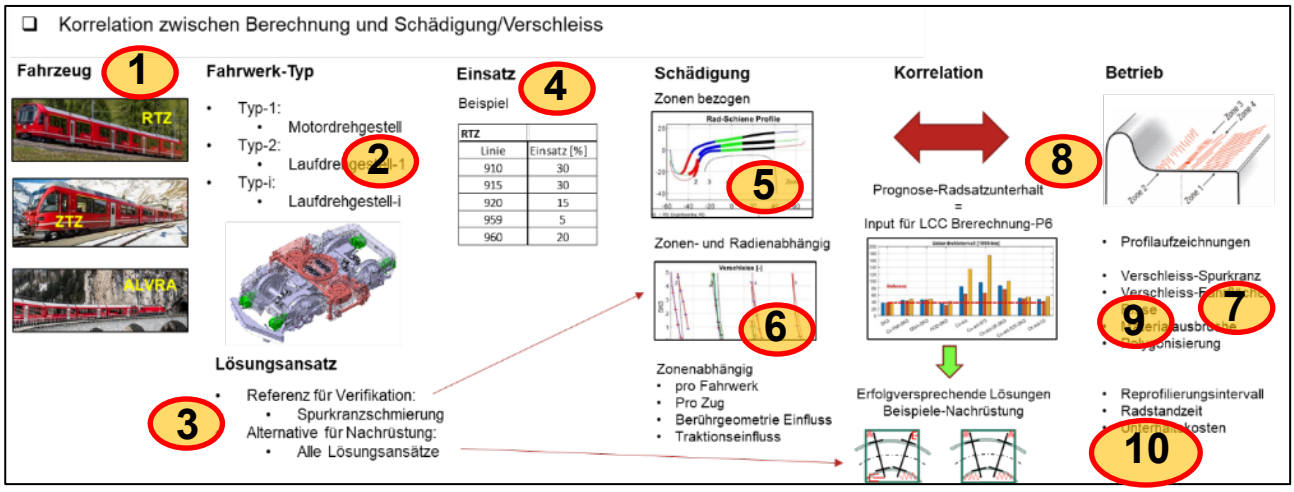


Abbildung 72: Prozess der Ermittlung der Reprofilierung-Intervalle

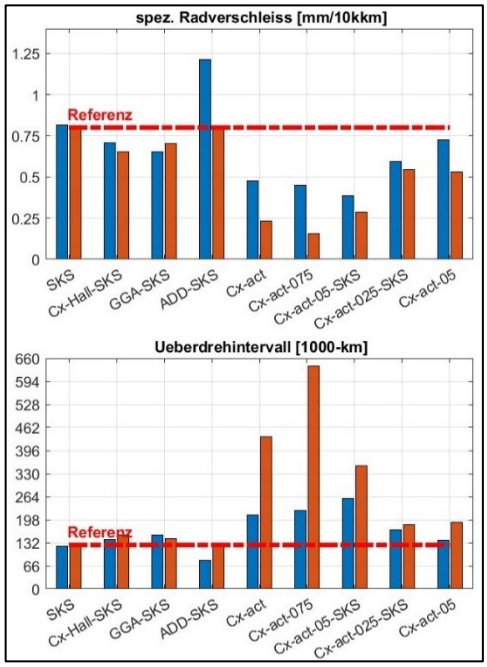


Abbildung 73: Reprofilierung-Intervalle verschiedener Lösungsansätze für den RTZ, Fahrwerk Nr. 3

Ein Beispiel einer solchen Prognose ist detailliert in *Abbildung 73* aufgezeigt. Im oberen Bild ist der spezifische Verschleiss angegeben, im unteren Bild das zu erwartende Reprofilierung-Intervall.

Die blauen Balken weisen die Werte für das Profil mit «0» Δr aus, die roten Balken diejenigen mit dem «nominal» Profil mit 4 mm Δr. In der Praxis findet ein kontinuierlicher Übergang vom blauen Balken zum roten hin statt, so dass in etwa mit einem mittleren Wert zwischen den zwei Balken gerechnet werden dürfte.

Da die Kosten für die Reprofilierungen sowie den Radsatztausch bei den Bahnen bekannt sind, kann mittels dieser Informationen im Projekt P6 oder auch bei den Bahnen direkt, eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden.

7.3.2 Informationen für den Gleisunterhalt

Ein ähnliches Verfahren wäre grundsätzlich wünschenswert auch zur Bewertung des Verschleisses sowie der Schädigungen am Gleis. Dies gestaltet sich aus verschiedenen Gründen jedoch deutlich schwieriger als beim Rad. So sind z.B. weitere Züge, welche nicht im FIMO-Tool analysiert werden, auf diesen Linien im Einsatz. Zudem sind Schädigungselemente vorhanden, welche nicht direkt durch die FIMO-Berechnungen repräsentiert werden, ggf. jedoch über indirekte Eigenschaften bewertet werden können.

Generell kann jedoch festgehalten werden, dass der Verschleiss und die Schädigungen an den Schienenfahrflächen eine Abhängigkeit zum Bogenradius aufweisen.

Deshalb werden an dieser Stelle die Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten auf der Schiene für die beiden Zonen Fahrfläche und Kante und für alle Bogenradien aufgezeigt (Beispiel: *Abbildung 74*).

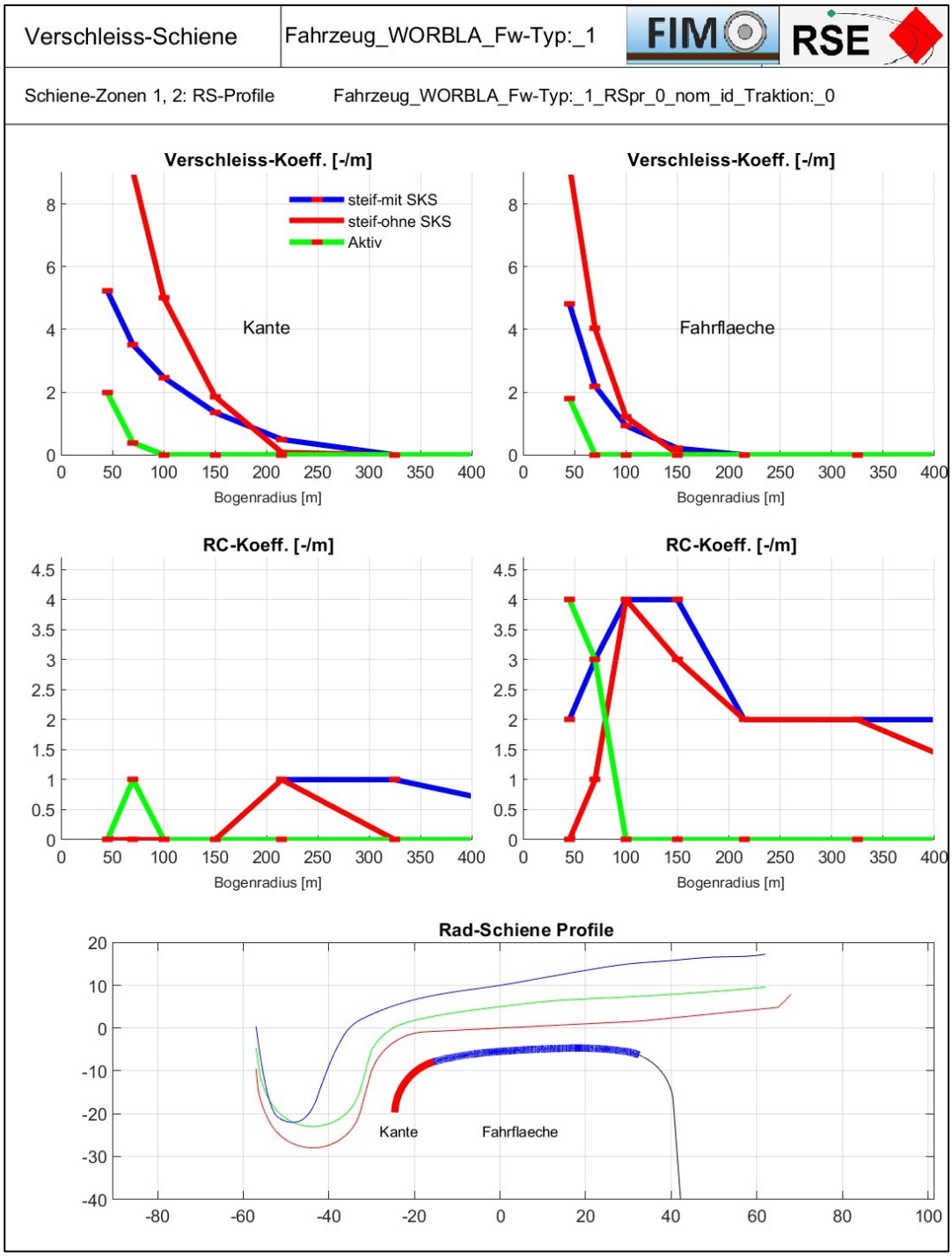


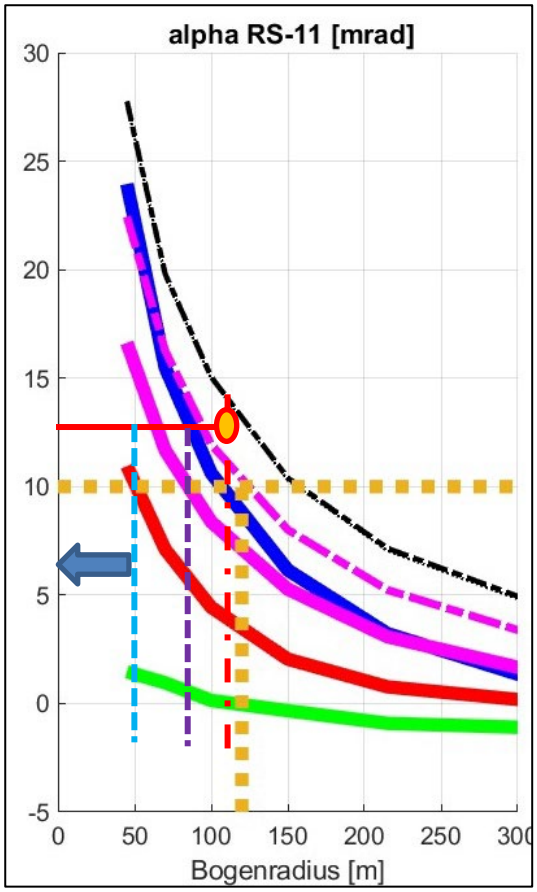
Abbildung 74: spez. Reibarbeit für die Schiene

Im Beispiel sind die Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten des Worbla Fahrwerks (MDG) für beide Zonen, Kante und Fahrfläche, über den Bogenradien aufgetragen. Es werden die Referenz Konfiguration, steife Radsatzführung mit SKS (blau) sowie die aktive Radsatzsteuerung ohne SKS (Cx-act, grüne Linie) gezeigt. Zum Vergleich wird in allen Bildern die schlechteste Konfiguration, steife Radsatzführung ohne SKS, als rote Linie gezeigt.

Das Projekt P6 oder die entsprechenden Bahnen können damit versuchen, eine Korrelation mit dem realen Verschleiss bzw. den realen Schädigungen herzustellen.

Diese Daten sind für alle Fahrzeuge, Fahrwerke und Systeme (Lösungsansätze) in der FIMO-Datenbank verfügbar und können den anderen Teilprojekten bei Bedarf geliefert werden.

7.3.3 Zusätzlicher Nutzen bezüglich Lärm und Erschütterungen



Für die Beurteilung der Entwicklung von Schlupfwellen, wird der Anlaufwinkel in Funktion des Bogenradius sowie des Fahrwerks und der Lösungsansätze aufgezeigt. Die Schlupfwellen sind ausschliesslich einer Folge von hohem Querschlupf, welcher wiederum direkt proportional zum Anlaufwinkel ist (*Abbildung 75*).

Grenzbogenradius für Schlupfwellen: 120 m (Annahme)
Veränderung des Bogenradius für:

- Elastische Radsatzführung: auf ca. 100 m
- Aktive Radsatzsteuerung mit SKS: auf ca. 60 m
- Aktive Radsatzsteuerung mit über 75% Steuerung ohne SKS: auf < 50 m

Abbildung 75: Anlaufwinkel verschiedener Lösungsansätze

Mit diesen Informationen kann im Projekt P6 eine Bewertung erfolgen, welcher Nutzen bezüglich Schlupfwellen mit einer bestimmten Lösung erreicht werden könnte.

Analog kann mit dem Auftreten des Kurven-Kreischen verfahren werden, welches ebenfalls Bogenabhängig entsteht.

7.4 Bereich-4: Unterstützung für P2 und P3

Für die Analyse sowie die Berechnung von Verschleissentwicklungen am Rad werden sogenannte Verschleissgesetze benötigt. Es wird vermutet, dass diese, je nach Rad- bzw. Schienenmaterial sowie Oberflächenzustand unterschiedlich sein könnten.

Mit Hilfe der Berechnungen der spez. Reibarbeiten in den verschiedenen Zonen am Rad für verschiedene Radprofile sowie den Vergleich der Verschleissentwicklung über Profilaufzeichnungen, sowie Hochrechnung auf die Einsatz-Linien (Bogenanteile), können die massgebenden Faktoren des Verschleissgesetzes ermittelt werden. Ein theoretisch ermitteltes Verschleissgesetz auf Grundlage der effektive berechneten Reibarbeiten und rein pragmatisch angenommenen Verschleisswerten aus dem Betrieb, ist in im rechten oberen Bild von *Abbildung 76* gezeigt.

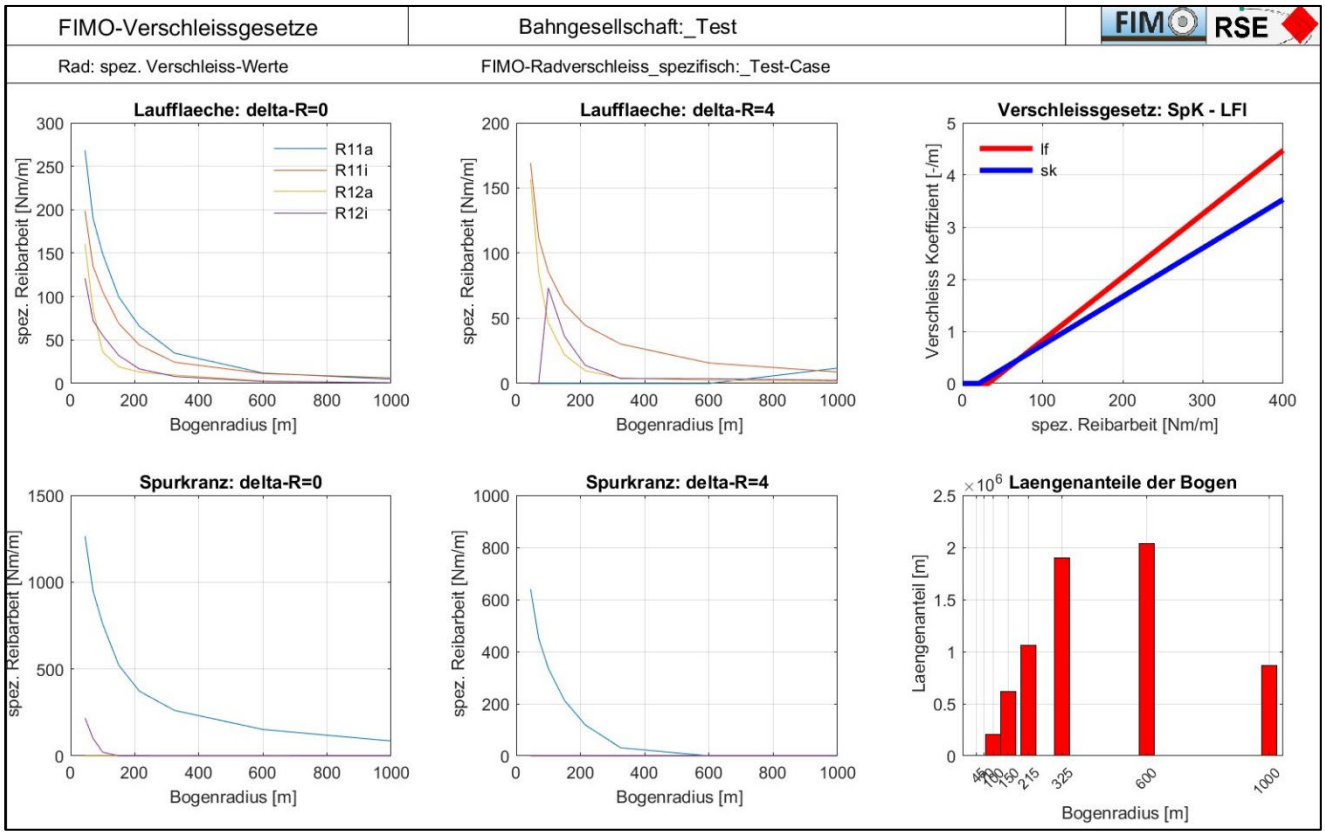


Abbildung 76: Beispiel einer Ermittlung eines Verschleissgesetzes

8 Verzeichnisse

8.1 Referenzen

Referenz	Autor	Dokument
[1]	RSE: R. Schneider	Modellbeschreibung-Simulationsmodell: RSE 2022-002 MS-Modellierung_V04
[2]	RSE: R. Schneider	Programbeschreibung RSE-Simulationspaket; RSE 2019-011: RSESim_02_Program Description
[3]	Bombardier: R. Schneider	• ZEVrail 141 (2017) 11-12: ZEVrail_Torsionsschwingungen von Radsatzwellen - Systemanalyse Teil 1 • ZEVrail 142 (2018) 1-2: ZEVrail_Torsionsschwingungen von Radsatzwellen - Systemanalyse Teil 2 • ZEVrail 142 (2018) 6-7: ZEVrail_Torsionsschwingungen von Radsatzwellen - Systemanalyse Teil 3 • 13. Rad-Schiene Tagung Dresden 2014: «Rollierschwingungen» Integrierter & systematischer Ansatz • 14. Rad-Schiene Tagung Dresden 2015: «Rollierschwingungen» Integrierter & systematischer Ansatz « Systemanalyse»
[4]	BAV/SBB	Schweizer Trassenpreis Modell (TAC): 2016-09-21_NZV-BAV_TP2017_Anleitung_DE_Verschleissfaktor_Fahrbahn
[5]	RSE: R. Schneider	RSESim_FIMO_Bewertung_2023a_V17.xlsm
[6]	Wikipedia	QFD-Methodik: Quality Function Deployment – Wikipedia
[7]	RSE: R. Schneider	RSE-Traktion-RAILplus-P5 Beitrag_V01
[8]	RSE: R. Schneider	RSE_2023-004 FIMO: Wear & RCF Analyse-Konzept_V02
[9]	PJM: L. Pietsch	TB_R8_755_RSE_Begutachtung_MKS_Modell_SI_1a_2023-11-02_PI
[10]	MOB: Charles Runge, Gaël Vuillème	Zahnstangen- und FIMO-System (LO-2.6)

8.2 Abbildungen

Abbildung 1: Prozess der FIMO-Analyse und Bewertung 11
Abbildung 2: FIMO-Analyse: Varianten, Kombinationen und Empfindlichkeiten 12
Abbildung 3: FIMO-Analyse: Datenbanken, Software, Resultate 13
Abbildung 4: FIMO-Analyse-Tool zur Visualisierung und individuellen Bewertung 14
Abbildung 5: Aufbau des MKS-Modells 15
Abbildung 6: Aufbau des Rad-Schienen Kontaktes als 2-Punkt Berührung 15
Abbildung 7: Charakteristiken des Rad-Schienen Kontaktes 16
Abbildung 8: Profilkombination mit ca. 0 mm Δr (RTE 29500-A) 17
Abbildung 9: Profilkombination mit ca. 4mm Δr (W03) 18
Abbildung 10: Profilkombination mit hohem Δr (ca. 8mm) (synthetisches Profil) 19
Abbildung 11: Schädigungsgesetze an Rad und Schiene nach Burstow 21
Abbildung 12: Zonen der Schädigungen an Rad und Schiene 21
Abbildung 13: Schadensbilder des Rades 22
Abbildung 14: Schadensbilder der Schiene 23
Abbildung 15: QFD-Bewertungsmethodik 24
Abbildung 16: Vergleich Querbeschleunigung Wagenkasten (SP-RSESim) 26
Abbildung 17: Verlauf Kontaktpunkt am Rad quer (y) und vertikal (z), SP vs. RSESim 26
Abbildung 18: Verlauf Führungskraft äußeres Rad RS1 (Ya) über Bogenradius 27
Abbildung 19: Verlauf Wb äußeres Rad RS1 über Bogenradius (Kontaktpunkt 1 links, 2 rechts) 27
Abbildung 20: Verlauf Wb äußeres Rad RS1 über Bogenradius (Kontaktpunkt 1 oben, 2 unten) 27
Abbildung 21: Korrelation der Berechnungsergebnisse mit den Umfragewerten der Bahnen 28
Abbildung 22: Übersicht der Bestandsfahrzeuge 29

Abbildung 23: Typenbilder der Bestandsfahrzeuge Teil-1 31
Abbildung 24: Typenbilder der Bestandsfahrzeuge Teil-2 32
Abbildung 25: Übersicht der generischen Zugskonzepte....32
Abbildung 26: Prozess der Berechnung von Radsatzlast und Wagenlänge 33
Abbildung 27: Übersicht der Lösungsansätze und Empfindlichkeiten....34
Abbildung 28: Bogenverteilung aller Linien 36
Abbildung 29: Bogenverteilung der 4 Linien-Kategorien....36
Abbildung 30: spez. Reibarbeit für Δr = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast....41
Abbildung 31: Wear-Werte für Δr = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast 41
Abbildung 32: RCF-Werte für Δr = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast....42
Abbildung 33: Wear, RCF & Querversatz Werte für Δr = 0 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast 42
Abbildung 34: Wear, RCF & Querversatz Werte für Δr = 4 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast 43
Abbildung 35: Wear, RCF & Querversatz Werte für Δr = 8 mm und Worbla MDG mit 11.7 t Radsatzlast 43
Abbildung 36: Wear-Gradienten & RCF-Bereiche für alle Radprofile und Radsatzlasten 44
Abbildung 37: Querwege der Radsätze für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz 11 46
Abbildung 38: Querwege der Radsätze für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz ij 47
Abbildung 39: Tx-Kräfte für alle Radprofile und Radsatzlasten über α von Radsatz ij 48
Abbildung 40: Tx- und Rad-Schienen Kräfte mit und ohne Spurkranzschmierung....49
Abbildung 41: Berechnung der Schlupfgeschwindigkeiten 50
Abbildung 42: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei Δr = 4 mm (nominal Profil)....51
Abbildung 43: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei Δr = 0 mm....52
Abbildung 44: Wear- & RCF-Werte in Funktion des Bogenradius bei Δr = 8 mm....53
Abbildung 45: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit Δr = 4 mm....54
Abbildung 46: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit Δr = 0 mm....55
Abbildung 47: Wear & RCF der Lösungsansätze auf Referenzstrecken mit Δr = 8 mm....55
Abbildung 48: Gesamt-Bewertung der Lösungsansätze auf Referenzstrecken allen Profilen....56
Abbildung 49: Anlaufwinkel für verschiedene Lösungen (Profil Δr = 4 mm) 57
Abbildung 50: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 4 mm 59
Abbildung 51: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0 mm 59
Abbildung 52: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 8 mm 60
Abbildung 53: Verschleiss und Schädigung der Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0, 4 und 8 mm....60
Abbildung 54: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 4 mm 61
Abbildung 55: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 0 mm 62
Abbildung 56: Wear & RCF der REF-Zugskonzepte für die Referenzstrecken mit Δr = 8 mm 62
Abbildung 57: Verschleisskoeffizienten in Funktion von «Radstand x Radsatzlast» pro Fahrwerk 63
Abbildung 58: Wear & RCF in Funktion der Lösungsansätze und des Δr....64
Abbildung 59: Erforderliches Δr (kinematisches Rollen) sowie vorhandenes Δr je nach Radprofil....65
Abbildung 60: Prinzip eines PID-Reglers 66
Abbildung 61: Prinzip einer Traktionsregelung....67
Abbildung 62: Prinzip einer Traktionsregelung....67
Abbildung 63: Tx-Kraftverlauf und Zugkraft bei Bogenfahrt....68
Abbildung 64: Wear, RCF, Zonenabhängig und Zugkraft in Funktion der Lösungsansätze und des Traktions-Schlupfs für Bögen von 45 m bis 150 m Radius 69
Abbildung 65: Wear, RCF, Zonenabhängig und Zugkraft in Funktion der Lösungsansätze und des Traktions-Schlupfs für Bögen von 215 m bis 1000 m Radius 70
Abbildung 66: spez. Verschleisswerte über dem Bogenradius für Radsatzlast & Radstand 71
Abbildung 67: spez. Verschleisswerte über dem Bogenradius für Raddurchmesser & Losrad....71

Abbildung 68: Vergleich von Verschleiss, Schädigung und Anlaufwinkel für Adhäsion/Zahnrad 72
Abbildung 69: Projektplan P5 76
Abbildung 70: Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten für bestimmten Einsatz 78
Abbildung 71: Verschleiss- und Schädigungskoeffizienten: Vergleich der Fahrzeuge 78
Abbildung 72: Prozess der Ermittlung der Reprofilierung-Intervalle 79
*Abbildung 73: Reprofilierung-Intervalle verschiedener Lösungsansätze für den RTZ, Fahrwerk Nr. 3*79
Abbildung 74: spez. Reibarbeit für die Schiene 80
Abbildung 75: Anlaufwinkel verschiedener Lösungsansätze 81
Abbildung 76: Beispiel einer Ermittlung eines Verschleissgesetzes 82

8.3 Tabellen

Tabelle 1: Schadenselemente mit Angabe des Bezugs zu FIMO 20
Tabelle 2: Wichtigste Parameter der Bestandsfahrzeuge Teil-1 30
Tabelle 3: Wichtigste Parameter der Bestandsfahrzeuge Teil-2 30
Tabelle 4: Wichtigste Parameter der generischen Zugskonzepte 33
Tabelle 5: Wesentliche Parameter der Lösungsansätze und Empfindlichkeitsanalyse 35
Tabelle 6: Bogenradien-Klassen 36
Tabelle 7: Übersicht der verfügbaren Linien sowie deren Zuordnung zu den Kategorien 37
Tabelle 8: Zusammenfassung der Linien, Kategorien und zugehörigen Bahnen 37
Tabelle 9: Gewichtung der Wear- & RCF-Werte 38
Tabelle 10: Parameter-Variation 70