

Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug / Fahrweg Meterspur

Projekt P2

Schienenkopfkonditionierung / Spurkranzschmierung

Finalbericht

Modul 1

Überblick über Systeme, Produkte und die Applikation

November 2022

Dokumentation

Version	Datum	Verifiziert von	Beschreibung
1.0	05.08.22		Berichtsstruktur
2.0	29.09.22		Vorläufiger Bericht
3.0	18.11.22		Finalbericht

Beitragende zum Bericht

Name	Organisation	Beitrag zum Bericht
Nikolaus Ritter	zb Zentralbahn AG	Berichtsstruktur, Berichtsabschluss
Nicole Dörr, Andreas Trausmuth	AC2T research GmbH	Berichtsstruktur, Abschnitte 1 bis 4 und 6, Zuarbeit zu den Abschnitten 5 und 7 bis 9
Gerald Trummer	Virtual Vehicle Research GmbH	Zuarbeit zu den Abschnitten 5, 7, 8 und 9
Prof. Roger Lewis, Ben White	University of Sheffield	Zuarbeit zu den Abschnitten 5 and 7

Danksagung

Teile dieser Arbeit entstanden an der Virtual Vehicle Research GmbH in Graz, Österreich. Die AutorInnen bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies durch das Österreichische Bundesministerium für Klimaschutz (BMK), das Österreichische Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (BMDW), das Land Steiermark (Abt. 12) sowie die Steirische Wirtschaftsförderung (SFG). Das Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) abgewickelt.

Freigaben

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Inhaltsverzeichnis

Excetutive Summary – Kurzfassung	1
Abkürzungen	3
Begriffsübersetzungen	4
1 Präambel.....	5
2 Allgemeiner Umfang und Ziele von Modul 1	7
3 Lieferobjekte	8
4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus P1.....	9
5 Überblick über Systeme (Modul 1.1).....	11
5.1 Zusammenfassung des heutigen Wissens in Modul 1.1 bzgl. SKK und SKS einschließlich der bekannten Regelwerke (Lieferobjekt 1.1.1).....	11
5.1.1 Vorhandene Kenntnisse über SKK- und SKS-Systeme in der wissenschaftlichen Literatur11	
5.1.1.1 Einleitung.....	11
5.1.1.2 Adhäsion und Reibung im Rad/Schiene-Kontakt	13
5.1.1.3 Reibungsmanagement	15
5.1.1.4 SKK-Produkte.....	18
5.1.1.5 Feldforschung zu SKK-Produkten.....	20
5.1.1.5.1 Auswirkungen auf die Schlupfwellenbildung	20
5.1.1.5.2 Auswirkungen auf die Kontaktkräfte	23
5.1.1.6 Laboruntersuchungen von SKK-Produkten – Auswirkung auf die Adhäsion	25
5.1.2 Bestehende Normen, Richtlinien und Regelungen	29
5.1.3 Mechanismen der Lärmerzeugung	30
5.1.3.1 Kurvenkreischen	30
5.1.4 Verschleiß- und Schadensmechanismen im Rad/Schiene-Kontakt.....	35
5.1.4.1 Statistischer Ansatz.....	35
5.1.4.2 Kontaktmechanischer Ansatz.....	36
5.1.4.3 Hybrider Ansatz	38
5.1.5 Modellierung und Simulation.....	41
5.1.5.1 Kraftschlusskräfte	41
5.1.5.2 SKK, Schicht des dritten Körpers und Kontamination.....	42
5.1.5.3 Oberflächenrauheit.....	46
5.1.5.4 Verschleiß	48
5.1.6 Reibungsmanagement der inneren und/oder äußeren Schiene.....	48
5.2 Lokalisierung des nicht vorhandenem Wissens in Modul 1.1 (Lieferobjekt 1.1.2). 48	
5.3 Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.1	49

6	Überblick über Produkte (Modul 1.2)	50
6.1	Auflistung und Bewertung (pro/contra) der heute in der Schweiz und im Ausland erhältlichen SKK- und SKS-Produkte (Lieferobjekt 1.2.1)	50
6.1.1	SKK- und SKS-Produkte	50
6.1.2	Leistung von SKK und SKS.....	51
6.1.3	Umweltverträglichkeit von SKK und SKS	51
6.1.4	Mögliche Wechselwirkungen bei der Vermischung von SKK und SKS.....	53
6.2	Lokalisierung des nicht vorhandenen Wissens in Modul 1.2.....	53
6.3	Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.2	54
7	Übersicht zur Applikation im Betrieb (Modul 1.3).....	55
7.1	Auflistung und Bewertung (pro/contra) von Onboard-Systemen im nationalen und internationalen Einsatz (Lieferobjekt 1.3.1).....	55
7.1.1	Fahrzeugseitige Applikationssysteme für SKK und SKS	55
7.1.2	Messmethoden für die Bewertung von SKK und SKS	56
7.1.3	Einflussfaktoren auf die Wirkung von SKK und SKS.....	62
7.1.4	Verschleppungsreichweite bzw. Reichweite von SKK-Produkten	62
7.1.4.1	Verschleppungsreichweite	62
7.1.4.2	Remanenz bzw. Rückhaltevermögen.....	63
7.1.4.3	Energieverbrauch	64
7.1.4.4	Verschleiß und Rollkontaktermüdung	65
7.1.4.5	Schlupfwellenbildung	67
7.1.4.6	Lärmreduktion.....	67
7.1.4.7	Anlaufwinkel.....	68
7.1.4.8	Schlupf.....	70
7.1.4.9	Umgebung.....	70
7.1.4.10	Produktvariation bzw. Skalierung.....	72
7.1.5	Anwendungsbeispiele für SKK und SKS.....	74
7.2	Lokalisierung des nicht vorhandenen Wissens in Modul 1.3.....	74
7.3	Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.3	75
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	77
9	Ausblick und Empfehlungen.....	81
	Abbildungsverzeichnis	82
	Tabellenverzeichnis.....	84
	Appendix	85

Executive Summary – Kurzfassung

„Modul 1 – Übersicht zu Systemen, Produkten und deren Applikation“ ist im Rahmen des Dachprojektes „Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug / Fahrweg Meterspur“ im Projekt „P2 – Schienenkopfkonditionierung / Spurkranzschmierung“ angesiedelt.

Modul 1 umfasst die Zusammenstellung des vorhandenen beziehungsweise des zugänglichen Wissens über Systeme, Schmierstoffe und Onboard-Systeme zur Schienenkopfkonditionierung (SKK) und Spurkranzschmierung (SKS) von Meterspurbahnen. Dazu wurden Veröffentlichungen zu wissenschaftlichen Arbeiten (Modelle/Simulationen, Experimente, Feldstudien), technische Berichte, Produkt- und Sicherheitsdatenblätter, Normen, Richtlinien, Gutachten, Erfahrungsberichte, etc. zusammengestellt, ausgewertet und auf ihre Anwendbarkeit für Meterspurbahnen untersucht.

Ziel von Modul 1 war es, die Grundlagen zur Definition der Arbeitsinhalte in den nachfolgenden Modulen und Projekten zu bereitzustellen:

- Zusammenstellung des Standes der Technik bzw. Kompendium des heutigen Wissens über SKK und SKS sowie Lokalisierung von nicht vorhandenem Wissen (Teilmodul „1.1 – Überblick über Systeme“)
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit von SKK- und SKS-Produkten auf der Grundlage des vorhandenen Wissens (Teilmodul „1.2 – Überblick über Produkte“)
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit von fahrzeugseitigen (Onboard) Applikationssystemen auf der Grundlage des vorhandenen Wissens und Anwendung der Erkenntnisse aus den Teilmodulen 1.1 und 1.2 auf die Meterspurumgebung (Teilmodul „1.3 – Überblick über Applikation im Betrieb“)

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist eine Bestandsaufnahme des vorhandenen (zugänglichen) und nicht vorhandenen (nicht zugänglichen) Wissens im Bereich der Meterspurbahnen:

- Rad/Schiene-Kontakte sind tribologische Systeme, die Reibung, Verschleiß und Ermüdung unterliegen.
- SKS werden hauptsächlich eingesetzt, um den Verschleiß von Rädern am Spurkranz und von Schienen an der Schienenkopfflanke zu verringern. SKK werden bisher hauptsächlich zur Lärmreduzierung eingesetzt. SKK können aber auch dazu beitragen, die Bildung des Kurzzeitverschleisses (Schlupfwellen, Polygone) und des Langzeitverschleisses zu verringern (Betriebserprobung bei MGBahn). Während bei SKS ein niedriger Reibungskoeffizient erwünscht ist, müssen bei SKK Reibungskoeffizienten ermittelt werden, um die gewünschte Lärm- bzw. Verschleissreduktion zu bewirken, jedoch immer die erforderlichen Bremswege sowie die Traktionsanforderungen zu gewährleisten. Normalerweise basieren SKS und SKK auf weichen Fetten.
- Hinsichtlich Normen, Richtlinien und Regelungen beziehen sich EN 15427 (Teile 1-1 und 2-1) und R RTE 49410 auf SKS-Produkte und die Anwendungssysteme für SKS-Produkte. Vergleichbare Normen für SKK existieren derzeit nur als technische Spezifikation (CEN/TS 15427, Teile 1-2 und 2-2). Eine R RTE zu SKK fehlt derzeit. Es gibt keine Norm, die sich spezifisch auf die Meterspur bezieht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das was für die Normalspur angewendet wird sinngemäss auch auf die Meterspur übertragbar ist.

- Der Traktions- oder Adhäsionskoeffizient ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig: Schlupf, Art und Menge von SKK und SKS, Temperatur, Wasser, Sand (zum Bremsen), Laub und andere Verschmutzungen, um nur die wichtigsten zu nennen. In der Literatur, insbesondere über Arbeiten an Modelltestständen, wird häufig der Begriff Reibungskoeffizient verwendet.
- Demgemäß sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von SKK und SKS u.a.: Strecken- und fahrzeugbedingte Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene (Geschwindigkeit, Anlaufwinkel, Schlupf), Umwelt (Temperatur, Feuchtigkeit, Oxidschichten, Verschmutzung) und Produktvariation.
- Die Parameter, die die Leistungsfähigkeit von SKK und SKS im praktischen Einsatz beschreiben, sind u.a.: Verschleppen entlang der Schiene bzw. Reichweite auf der Schiene (Pick-up/Carry-down), Aufrechterhaltung der Qualität und Wirkung, Energieverbrauch, Verschleiß, Rollkontaktermüdung, Schlupfwellenbildung, Lärmreduktion.
- Messmethoden für die tribologische Bewertung (zumeist Reibung) von SKK und SKS gibt es entlang der gesamten Prüfkette von Tribometern wie Zweischeibenprüfständen über Prüfstände in Originalgröße bis hin zu Feldversuchen. Dabei handelt es sich jedoch in der Regel um individuelle Methoden. Bemühungen zur Standardisierung der tribometrischen Charakterisierung sind im Gange und finden ihren Niederschlag in der EN 15427 (Teile 1-1 und 2-1) für SKS und CEN/TS 15427 (Teile 1-2 und 2-2) für SKK.
- Lärm, der durch den Kontakt zwischen Rad und Schiene entsteht, wird durch Rollen auf geraden Strecken sowie Quergleiten der Räder und Anlaufen des Spurkranzes in Kurven erzeugt. Das Kurvenkreischen wird durch die Schlupfgeschwindigkeit, die modalen Eigenschaften des Rades (einschließlich der Dämpfung), die vertikale Belastung, die (seitliche) Kontaktposition und die Reibung bestimmt. Letztere zeigt wie schon oben angeführt Abhängigkeit von vielen Parametern.
- Modelle, die Rad/Schiene-Kontakte simulieren, zielen hauptsächlich auf die Vorhersage von Kraftschlusskräften jedoch nur in geringerem Maße auf SKK als zusätzliche Schicht zwischen Rad und Schiene. Dies schließt den dritten Körper im Allgemeinen ein, der alle Bestandteile im Kontakt zwischen Rad und Schiene, also neben SKK auch der dem regulären Bahnbetrieb geschuldeten Verschmutzung wie z.B. Eisenoxide und saisonal wie lokal bedingte Verschmutzungen wie z.B. Laub, umfasst. Weitere Modelle konzentrieren sich auf die Auswirkungen von Oberflächenrauheit und Temperatur oder berücksichtigen den Materialverlust durch die Kombination von Verschleiß und Ermüdung.
- Die Marktrecherche hat etwa 170 Produkte aufgezeigt, die sich auf SKK und SKS beziehen, davon etwa 70 % für die Verwendung als SKK. Normen, Richtlinien und Datenblätter konzentrieren sich auf typische Schmierstoffeigenschaften wie Aussehen, Farbe, Konsistenz, Viskosität, Korrosionsschutz, Elastomerverträglichkeit, Flammpunkt und Brandverhalten. Bahnrelevante Informationen wie Verschleiß- und Geräuschminderung, Reibungskoeffizient, Reichweite und biologische Abbaubarkeit sind nur teilweise verfügbar.
- Die Marktrecherche hat 7 Hersteller von Onboard-Applikationssystemen ergeben.
- Die meisten gesichteten Berichte beziehen sich auf Eisenbahnen mit Normalspur. Der Grad der Übertragbarkeit von Normalspur auf Meterspur ist weitgehend unbekannt.
- Es gibt keine Normen, Richtlinien und Regelungen, die sich mit den Anforderungen an SKK und SKS spezifisch für die Meterspur befassen.

Abkürzungen im Rahmen der Systemführerschaft

AAR	Association of American Railroads
AOA	Angle of attack (Deutsch: Anlaufwinkel)
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
COF, CoF	Coefficient of friction (Deutsch: Reibungskoeffizient)
DIN	Deutsches Institut für Normung, DIN-Norm
DOF	Degree of freedom (Deutsch: Freiheitsgrad)
EN	Europäische Norm
FL	Flange lubrication / lubricant (Deutsch: SKS)
FM	Friction modifier (Deutsch: Kraftschlussmodifikator)
GDU	Grease distribution unit (Deutsch: Fettapplikationssystem)
HPF	High positive friction modifier
HPT	High pressure torsion test rig (Deutsch: Hochdruck-Torsionsprüfstand)
LCF	Low coefficient friction modifier
MBD	Multi-body dynamics (Deutsch: Mehrkörperdynamik)
MTM	Mini traction machine
μ	Reibungskoeffizient (Englisch: Coefficient of friction)
RAILplus	RAILplus – Die Meterspurigen (RAILplus AG)
RCF	Rolling contact fatigue (Deutsch: Rollkontaktermüdung)
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn
SKK	Schienenkopfkonditionierung bzw. Schienenkopfkonditioniermittel
SKS	Spurkranzschmierung bzw. Spurkranzschmierstoff
TOR-FM	Top of rail friction management (Deutsch: SKK)
UIC	International Union of Railways, Union International de Chemin de Fer
VHPF	Very high positive friction modifier (Deutsch: Traktionsverbesserer)

Begriffsübersetzungen im Rahmen der Systemführerschaft

Angle of attack	Anlaufwinkel
Base body	Grundkörper in einem Tribosystem (z.B. Schiene)
Coefficient of friction (COF)	Reibungskoeffizient, Reibungszahl
Corrugation	Schlupfwellen
Counter-acting body	Gegenkörper in einem Tribosystem (z.B. Rad)
Creep, creepage	Schlupf
Flange lubrication (FL)	Spurkranzschmierung (SKS)
Friction	Reibung
Friction modifier (FM)	Kraftschlussmodifikatoren
Lubricating medium	Schmierstoff
Onboard	Fahrzeugseitig, fahrzeuggebunden
Rail	Schiene
Rolling contact fatigue (RCF)	Rollkontaktermüdung
Slip	Schlupf
Third body, third layer	Dritter Körper, Schicht zwischen Rad und Schiene
Top of rail friction management	Schienenkopfkonditionierung (SKK)
Traction (force)	Traktion(skraft), Zug(kraft)
Wayside	Streckenseitig, schienenseitig, schienengebunden, ortsfest
Wear	Verschleiß
Wheel	Schienenrad

1 Präambel

RAILplus - Die Meterspurigen (RAILplus AG) ist die unternehmerische Kooperationsplattform der Schweizer Meterspurbahnen, der derzeit 20 Bahnbetreiber angehören. Unter diesem Dach werden gemeinsam Projekte mit dem Ziel vorangetrieben, Kosten bei den Bahnen zu senken und gemeinsam schnellere Fortschritte zu erzielen. Die „Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug/Fahrwerk Meterspur“ befasst sich in diesem Zusammenhang mit

- der Zusammenstellung der Herausforderungen und des vorhandenen Wissens, die Lokalisierung von Wissenslücken und der Erarbeitung des noch nicht vorhandenen Wissens
- Lösungsansätzen mit Empfehlungen für die Entwicklung des optimalen Fahrzeugs und der optimalen Infrastruktur unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzbedingungen
- der Ausarbeitung der entsprechenden Vorschriften des Regelwerks Technik Eisenbahn (RTE) und der Weiterentwicklung staatlicher Vorschriften

„Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug/Fahrwerk Meterspur“ gliedert sich in insgesamt sechs miteinander verknüpften Projekten:

- P1: Grundlagenscanning
- **P2: Schienenkopfconditionierung / Spurkranzschmierung**
- P3: Grundlagen Rad / Schiene
- P4: Fahrbahnsteifigkeit
- P5: Fahrzeuge
- P6: Gesamtwirtschaftlichkeit

Der Verschleiß von Rädern und Schienen sowie das Kreischen in Kurven haben durch den vermehrten Einsatz neuer Fahrzeuge mit höheren Achslasten und weniger kurvengängigen Drehgestellen und in Kombination mit Entwicklungen im Oberbau (z.B. Betonschwellen) erheblich zugenommen. Daher setzt das Projekt P2 den Schwerpunkt auf die Erfassung der zugrundeliegenden Mechanismen sowie auf die Ausarbeitung und Bewertung geeigneter Gegenmaßnahmen. Im Einzelnen werden die Grundlagen der meterspurigen Schienenkopfconditionierung (SKK) und der Spurkranzschmierung (SKS) erarbeitet, um den netzweiten, optimierten und kombinierten Einsatz der beiden Systeme zu bewerten. Im Rahmen des Projekts P2 werden nur fahrzeugseitige (Onboard) Systeme zur Applikation von Conditionierungsmitteln und Schmierstoffen im Rad/Schiene-Kontakt betrachtet.

Das Projekt P2 gliedert sich in die folgenden Module:

- **Modul 1: Übersicht zu Systemen, Produkten und deren Applikation**
- Modul 2: Rechtliche Grundlagen zu SKK und SKS
- Modul 3: Lärmreduktion durch SKK und SKS
- Modul 4: Verschleißreduktion durch SKK
- Modul 5: Wissenschaftliche Grundlagen zu SKK und SKS
- Modul 6: Zusammenfassung und Schlussfolgerung sowie Bereitstellung von Textbausteinen für eine RTE SKK und eine RTE SKS für die Meterspur
- Modul 7: Einsatz von SKK in sehr steilen Strecken (Option)

➤ Modul 8: Bedarfsgerechtes Konditionieren / Schmieren (Option)

Das vorliegende Dokument wurde in Kooperation zwischen der RAILplus AG, der Virtual Vehicle Research GmbH, der University of Sheffield und der AC2T research GmbH (AC²T) erarbeitet. Das in Modul 1 in P2 gemeinsam erarbeitete Wissen bildet die Grundlage für die weiteren Aktivitäten in den nachfolgenden Modulen von P2 und in den anderen Projekten der Systemführerschaft.

2 Allgemeiner Umfang und Ziele von Modul 1

Im Modul 1 wurde eine „Übersicht zu Systemen, Produkten und deren Applikation“ erstellt. Diese umfasst die Zusammenstellung des vorhandenen (zugänglichen) Wissens über Systeme, Schmierstoffprodukte und Onboard-Systeme für die Schienenkopfkonditionierung und Spurkranzschmierung von Meterspurbahnen. Zu diesem Zweck wurden Veröffentlichungen zu wissenschaftlichen Arbeiten (Modelle/Simulationen, Experimente, Feldstudien), technische Berichte, Produkt- und Sicherheitsdatenblätter, Normen, Richtlinien, Umfragen, Erfahrungsberichte usw. zusammengestellt, ausgewertet und auf ihre Anwendbarkeit für Meterspurbahnen untersucht. Das Ergebnis dieser Recherche ist eine Bestandsaufnahme des vorhandenen (zugänglichen) und nicht vorhandenen (nicht zugänglichen) Wissens im Bereich der Meterspurbahnen. Die Ergebnisse werden in einem Bericht zusammengefasst und bilden die Grundlage für die Definition der Arbeitsinhalte in den nachfolgenden Modulen im Projekt P2. In Modul 1 wurden keine analytischen oder experimentellen Arbeiten durchgeführt.

Ziel des Moduls 1 war es, Input für die nachfolgenden Module und Projekte der "Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug / Fahrwerk Meterspur" zu liefern. Im Einzelnen:

- Zusammenstellung des Standes der Technik bzw. Kompendium des heutigen Wissens über SKK und SKS sowie Lokalisierung von nicht vorhandenem Wissen
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit von SKK- und SKS-Produkten auf der Grundlage des vorhandenen Wissens
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit von fahrzeugseitigen (Onboard) Applikationssystemen auf der Grundlage des vorhandenen Wissens und Anwendung der Erkenntnisse aus den Teilmodulen 1.1 und 1.2 auf die Meterspurumgebung

Der Bericht zu Modul 1 besteht aus einer kompakten Zusammenfassung des relevanten Wissens und der Wissenslücken in einer vorläufigen Fassung und – wie im gegenständlichen Bericht – einer finalen Fassung.

3 Lieferobjekte

Darüber hinaus enthält der Bericht vier Lieferobjekte gemäss bewilligtem Projektantrag P2:

- Lieferobjekt 1.1.1 “Zusammenfassung des heutigen Wissens in Modul 1.1 bzgl. SKK und SKS einschließlich der bekannten Regelwerke”
Siehe Abschnitt 5.1
- Lieferobjekt 1.1.2 “Lokalisierung des nicht vorhandenen Wissens in Modul 1.1 bzgl. SKK und SKS”
Siehe Abschnitt 5.2
- Lieferobjekt 1.2.1 “Auflistung und Bewertung (pro/contra) der in der Schweiz und im Ausland erhältlichen SKK- und SKS-Produkte”
Siehe Abschnitt 6.1
- Lieferobjekt 1.3.1 “Auflistung und Bewertung (pro/contra) von Onboard-Systemen im nationalen und internationalen Einsatz”
Siehe Abschnitt 7.1

4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus P1

Das Lieferobjekt 1.2 des Projekts P1 „Grundlagen-scanning“ beinhaltet drei Ziele, um das aktuelle bei den Bahnen vorhandene Wissen zur Interaktion Fahrzeug – Fahrweg zu erfassen:

1. Mit der strukturierten Befragung der Bahnen zu Verschleiss und zu Schädigungen an Rad und Schiene sollen die Grundlagen für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Schädigungs- und Verschleissentwicklungen am Rad/Schiene-Kontakt und den Charakteristiken der eingebauten Fahrbahn, der verkehrenden Fahrzeuge und den Einsatzgebieten mit ihren charakteristischen Trassierungsgegebenheiten zusammengetragen werden.
2. Die zusammengetragenen Ergebnisse werden analysiert und hinsichtlich Ursachen und Auswirkungen grob bewertet. Bei Unklarheiten sind Interviews mit den betroffenen Bahnen geplant. Die Ergebnisse der Umfrage werden den Projekten P2 bis P6 als Grundlage für die weiteren Arbeiten zur Verfügung gestellt.
3. Die zusammengetragenen Ergebnisse werden an die Projekte P2 bis P6 übergeben und zusätzlich in geeigneter Form an die befragten Bahnen kommuniziert.

Die ursprüngliche beabsichtigte persönliche Befragung wurde aus Kapazitätsgründen durch die schriftliche Befragung ersetzt. Dabei stellte sich heraus, dass bei den meisten Bahnen mehrmals nachgehakt werden musste, um vollständige Antworten zu erhalten.

Die von 17 Mitgliederbahnen von RAILplus sowie von zwei Trambahnen und der Forchbahn beantwortete Umfrage ergab für die „Systemführerschaft – Interaktion Fahrzeug/Fahrwerk Meterspur“ wertvolle Informationen und Erkenntnisse:

- Radverschleiss am Spurkranz und an der Fahrfläche gehören mit einem Anteil von 50 % zu den häufigsten Schadensformen am Fahrzeug.
- Bei den Schadensformen an den Schienenaufläufen dominieren Schienenverschleiss und Schlupfwellen.
- Mehr als die Hälfte der Bahnen führen einen in den letzten Jahren festgestellten Kostenanstieg auf ein suboptimales Zusammenspiel zwischen Fahrzeug und Fahrweg zurück.
- Sowohl mit Spurkranzschmierung als auch mit Schienenkopfkonditionierung sollen Kurvenkreischen, Rad- und Schienenverschleiss sowie Schlupfwellenbildung reduziert werden.
- Das Wissen zum Rad- und Schienenprofile ist derart aufzubauen, damit die für die optimale Interaktion Fahrzeug - Fahrweg angepassten Profile bestimmt und angewendet werden können.
- Bei den meisten befragten Bahnen haben sich die mittleren täglichen Gleisbelastungen aufgrund von Taktverdichtungen und Zunahme der Achslasten deutlich erhöht.
- Die heute bei Betonschwellen eingesetzten weichen Schienenzwischenlagen leisten einen wirksamen Beitrag zur Reduktion der Schlupfwellenbildung, dies allerdings auf Kosten einer Lärmzunahme. Die Lösung dieses Zielkonfliktes Verschleissreduktion versus Lärmerhöhung mit einer optimierten Zwischenlage wird ein Schwerpunkt im Projekt P4 sein.
- Die Schulung und Ausbildung der Mitarbeitenden ist zu verstärken, damit eine gemeinsame technische Sprache in der „Meterspur“, insbesondere im Fachgebiet Interaktion Fahrzeug - Fahrweg entsteht.

- Die Kenntnisse der Bahnen über ihre Fahrzeuge sollte vertieft werden.
- Die Spezifikationen für die Beschaffung neuer Fahrzeuge sollten auch die Lauftechnik beinhalten.

Die detaillierten Ergebnisse der Umfrage wurden den Projekten P1 bis P5 übergeben und bilden eine wertvolle Grundlage für deren Arbeiten.

Zum Projekt „P2 – Schienenkopfkonditionierung / Spurkranzschmierung“ ergeben sich grob die folgenden Schlussfolgerungen:

Spurkranzschmierung (SKS)

Alle Bahnen verwenden fahrzeugseitig SKS. Damit soll Rad- und Schienenverschleiss, Kurvenkreischen und die Bildung von Schlupfwellen reduziert und die Entgleisungssicherheit erhöht werden.

Die aufgebrachten Mengen für den Schmierstoff sind für jede Bahn und jedes Fahrzeug unterschiedlich und müssen im Rahmen des Projektes P2 vertieft werden.

Bei keiner befragten Bahn wird die Abschaltung der Schmierung aus Umweltgründen gefordert. Die meisten Bahnen haben keine Fehlfunktionen der Gleisstromkreise festgestellt. Die Details anderer Fehlfunktionen werden in der fortführenden Arbeit in P2 analysiert.

Schienenkopfkonditionierung (SKK)

Viele Bahnen verwechseln SKK mit SKS. Onboard-Systeme zur SKK sind zurzeit bei sechs Bahnen im Einsatz. Zwei Bahnen verwenden eine ortsfest installierte Anlage. Mit SKK sollen wie bei SKS Kurvenkreischen, Rad- und Schienenverschleiss sowie Schlupfwellenbildung reduziert werden.

Die mit der Einführung von SKK festgestellten Verbesserungen sind von Bahn zu Bahn unterschiedlich, z.B. Verbesserung nur bei Lärm. Eine Bewertung der Verbesserungen sind Bestandteil der Detailauswertung im Projekt P2.

Es wurden keine Schäden an Rad und Schiene durch Konditionierung festgestellt oder aufgezeigt.

Einzelne Bahnen führten vor der Inbetriebnahme Brems- und Traktionsversuche durch, um die durch SKK bedingten Beeinträchtigungen der Leistungen zu ermitteln.

5 Überblick über Systeme (Modul 1.1)

5.1 Zusammenfassung des heutigen Wissens in Modul 1.1 bzgl. SKK und SKS einschließlich der bekannten Regelwerke (Lieferobjekt 1.1.1)

5.1.1 Vorhandene Kenntnisse über SKK- und SKS-Systeme in der wissenschaftlichen Literatur

5.1.1.1 Einleitung

Der Begriff „Tribologie“ leitet sich von zwei griechischen Begriffen ab, „*tribein*“ und „*logos*“. Der Begriff „*tribein*“ bedeutet reiben¹, der Begriff „*logos*“ wird für die Bezeichnung von Wissenschaften verwendet. Die Tribologie ist also die Lehre von Reibung, Verschleiß und Schmierung und kann als die Wissenschaft von interagierenden Oberflächen in relativer Bewegung zueinander betrachtet werden². Der Begriff „Tribologie“ wurde erstmals 1966 im Rahmen des „Jost-Berichts“ verwendet, der von einer Gruppe von Forschern und Industrievertretern im Vereinigten Königreich³ erstellt wurde. Die Tribologie gilt heute als multidisziplinäres Fach, das in verschiedenen Bereichen der Technik und der Naturwissenschaften von großer Bedeutung ist.

Ein Tribosystem oder tribologisches System besteht aus dem Grundkörper, z.B. einer Schiene, der mit Gegenkörper, z.B. einem Rad, in Kontakt steht, siehe Abbildung 1. Grund- und Gegenkörper werden gegeneinander belastet und weisen eine relative Bewegung zueinander auf, z.B. in einem reinen Gleit- oder Roll-Gleit-Kontakt. Die meisten Tribosysteme in der Technik sind geschmiert, d.h. es befindet sich ein Schmierstoff zwischen Grundkörper und Gegenkörper. Die Umgebung, in der Grundkörper, Gegenkörper und der Schmierstoff eingebettet sind, trägt wesentlich zu den Reibungs- und Verschleißigenschaften bei; typischerweise sind dies Temperatur und Feuchtigkeit, um die wichtigsten zu nennen.

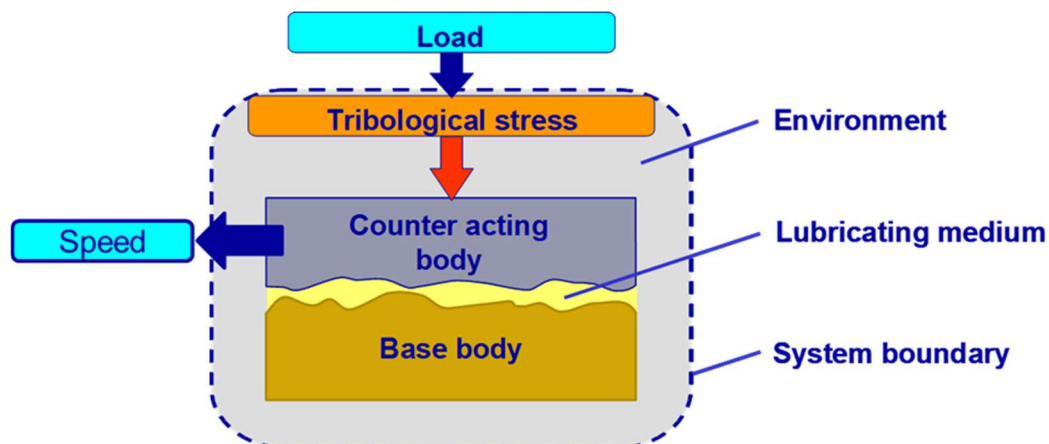


Abbildung 1: Schema eines Tribosystems⁴

¹ Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W. (2014) 'Engineering Tribology', Engineering Tribology: Fourth Edition, pp. 1–852. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>.

² Tabor, D. (1979) 'History of tribology: D. Dowson'. Elsevier.

³ Jost, H.P. (1966) Lubrication: Tribology; Education and Research; Report on the Present Position and Industry's Needs (submitted to the Department of Education and Science by the Lubrication Engineering and Research) Working Group. HM Stationery Office.

⁴ Dörr, N. (2022) 'Condition Monitoring – The lubricant as information carrier. Lecture at TU Wien.

Die Oberflächenrauheit ist definiert als die Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, die durch den Produktionsprozess und der Anwendung entstehen. In der Oberflächenmesstechnik wird die Rauheit üblicherweise als die hochfrequente, kurzweilige Komponente einer gemessenen Oberfläche betrachtet. In tribologischen Prozessen verschleifen raue Oberflächen in der Regel schneller und führen zu höheren Reibungskoeffizienten als glatte Oberflächen.

Abbildung 2 veranschaulicht die wichtigsten Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, wenn eine tribologische Fragestellung, unabhängig von der Industriebranche, betrachtet wird.

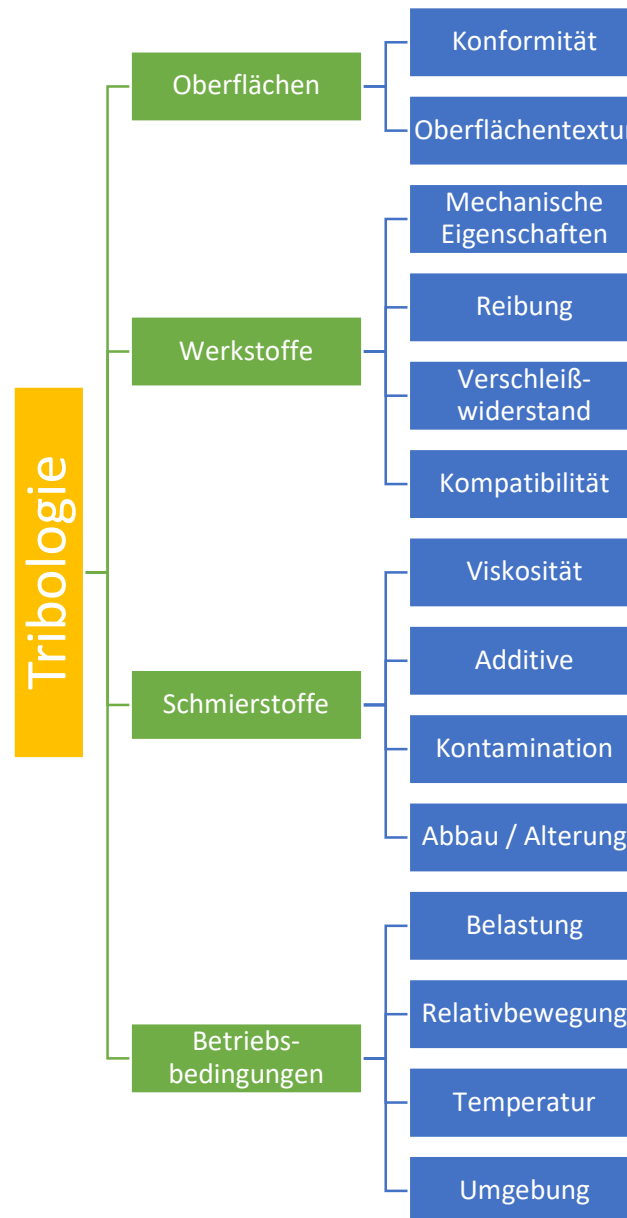


Abbildung 2: Wichtige tribologische Faktoren bei der Bearbeitung eines tribologischen Problems⁵

In diesem Abschnitt der Literaturübersicht werden Forschungsarbeiten und weitere Arbeiten zusammengefasst, die zum Verständnis des Reibungs- und Verschleißmanagements im

⁵ Nejadhamzeeigilani, M. (2021) The Effect of Gasoline as a Contaminant on the Tribology of Lubricants within the Valve Train System.

Rad/Schiene-Kontakt in der Meterspur beitragen. Der Schwerpunkt dieser Literaturübersicht liegt hierbei im Reibungsmanagement im Kontakt zwischen Schiene und Rad.

5.1.1.2 Adhäsion und Reibung im Rad/Schiene-Kontakt

In diesem Abschnitt wird eine kurze Einführung in die grundlegende Tribologie des Rad/Schiene-Kontakts gegeben, um ein besseres Verständnis von Adhäsion und Reibung in dieser Grenzfläche zu ermöglichen. Als Grenzfläche wird die Fläche zwischen zwei Phasen bezeichnet; in diesem Fall sind dies die beiden durch Rad und Schiene gebildeten Phasen.

Reibung wird als der Widerstand gegen die Bewegungsrichtung eines Körpers beschrieben, der auftritt, wenn dieser Körper tangential über einen anderen Körper ¹ bewegt wird. Das Verhältnis der im Kontakt wirkenden Reibungskraft und Normalkraft wird als Reibungskoeffizient bezeichnet, wie in Gleichung 1 dargestellt:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad \text{Gleichung 1}$$

Beim Rad/Schiene-Kontakt handelt es sich jedoch nicht um einen reinen Gleitkontakt, sondern um einen Roll-Gleit-Kontakt. Es müssen auch die Zug- und Bremskräfte berücksichtigt werden. In Abbildung 3 sind die Kräfte dargestellt, die beim Aufbringen einer Zugkraft in einem Rad/Schiene-Kontakt bzw. in der Grenzfläche zwischen Rad und Schiene wirken.

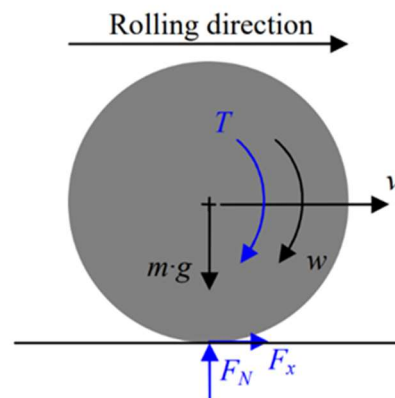


Abbildung 3: Kräfteschema des Rad/Schiene-Kontakts ⁶

Wie in Abbildung 3 dargestellt, bewegt sich das Rad mit einer Winkelgeschwindigkeit (w) und einer linearen Geschwindigkeit (v) über die Schiene, wenn das Zugmoment (T) auf den Mittelpunkt des Rades ausgeübt wird. Das aufgebrachte Zugmoment bewirkt eine tangentielle Längskraft, die als auf das Fahrzeug einwirkende Zugkraft (F_x) bezeichnet wird. Das Verhältnis zwischen der Zugkraft (F_x) und der Normalkraft (F_N) im Rad/Schiene-Kontakt wird als Traktions- oder Adhäsionskoeffizient (f) bezeichnet, wie in Gleichung 2 dargestellt:

$$f = \frac{F_x}{F_N} \quad \text{Gleichung 2}$$

In einem Rad/Schiene-Kontakt tritt in der Regel ein Roll- und Gleitkontakt auf, da sich das Rad schneller oder langsamer dreht als beim reinen Rollen. Wenn die Umfangsgeschwindigkeit des Rades von der linearen Geschwindigkeit v des Zuges abweicht, entsteht der sogenannte Schlupf. Der Schlupf wird in der Regel als Prozentsatz der Relativgeschwindigkeit im Vergleich zur mittleren Geschwindigkeit des Rades angegeben, wobei man bei einer Annäherung an 0 % von

⁶ Arias-Cuevas, O. "Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact Investigations towards a better understanding of the problem and its possible countermeasures," The University of Sheffield, 2010.

reinem Rollen und im Falle eines stillstehenden (blockierenden) Rades eines fahrenden Zuges von einem reinen Gleitkontakt spricht, siehe Abbildung 4⁷. Letzteres stellt jedoch einen Extremfall dar, da der Kontakt in einem Schlupfbereich arbeitet, der normalerweise unter 3 % liegt. Infolgedessen tritt im Kontakt sowohl eine Zone mit Gleiten („slip“) als auch eine Zone mit Haften („stick“) auf, was einem Roll-Gleit-Zustand entspricht⁸.

Abbildung 4 zeigt die Traktionskurve, die die Beziehung zwischen Adhäsionskoeffizienten und Schlupf verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Adhäsionskoeffizienten der Gleitanteil („slip“-Anteil) im hinteren Bereich der Kontaktfläche zunimmt und gleichzeitig der Haftanteil („stick“-Anteil) abnimmt. Der Punkt, an dem die Kurve beim Adhäsionskoeffizienten ein Plateau bildet, wird als Sättigungspunkt bezeichnet, und im Kontakt treten nur reine Gleitbedingungen auf.

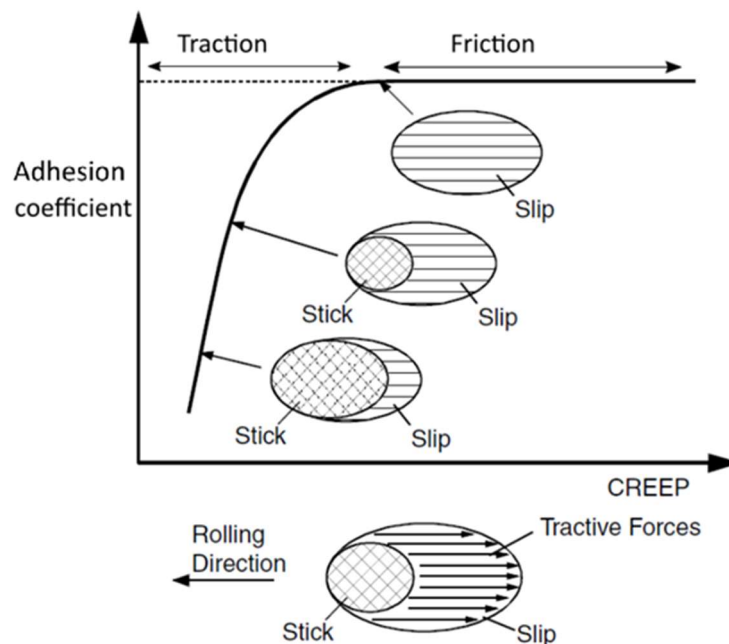


Abbildung 4: Darstellung der theoretischen Traktionskurve von Carter sowie der Gleit- („slip“) und Haftbereiche („stick“) in der Kontaktfläche⁷

In der Literatur wird teilweise der Begriff Traktionskoeffizient anstelle von Adhäsionskoeffizient verwendet, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Untersuchungen meist unter Traktionsbedingungen durchgeführt werden, d.h. das Rad/die Räder über die Schiene/die Schienen beschleunigt werden. Im Prinzip können sowohl der Adhäsions- als auch der Traktionskoeffizient gleichermaßen verwendet werden, ohne dass die Richtigkeit verloren geht. Wenngleich es befremdlich ist, die Bremsleistung eines Schienenfahrzeugs auf der Grundlage des Traktionskoeffizienten zu beschreiben, verwenden einige Autoren in ihren Bremsuntersuchungen den Begriff Adhäsionskoeffizient aus obigem Grund⁶. In der Zusammenstellung des Stands der Technik in der Literatur und des Einbezugs von Abbildungen aus anderen Arbeiten können die Begriffe Adhäsion und Traktion in diesem Bericht austauschbar verwendet werden, aber wo immer dies möglich ist, wird der Begriff Adhäsionskoeffizient verwendet, wenn dieser sich auf Traktions- oder Bremsvorgänge bezieht.

⁷ Olofsson, U. and Lewis, R. (2006) 'Tribology of the wheel-rail contact', Handbook of railway vehicle dynamics, pp. 121–141.

⁸ Galas, R. and Hartl, M. (2017) 'Friction Modification within Wheel-Rail Contact'.

In Tabelle 1 sind die niedrigsten Grenzwerte für den Adhäsionskoeffizienten angegeben, die von diverse Eisenbahnen in verschiedenen Ländern als zufriedenstellend erachtet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass der Grenzwert von den eingesetzten Fahrzeugen und den örtlichen Vorschriften abhängig ist. Im UIC-Merkblatt 544-1⁹ ist bei der Bremsauslegung beim Bremsen ein Grenzwert für die Kraftschlussausnutzung 0.15 festgelegt. Dieser Wert figuriert in verschiedenen Regelwerken ebenfalls im Bereich um 0.15. Für lokbespannte Tüge liegt der Grenzwert für die Traktion zum Teil deutlich höher.

Region	Adhäsionskoeffizient für das Bremsen	Adhäsionskoeffizient für die Traktion
Stockholm Public Transport	0,15	0,18
Vereinigtes Königreich	0,09	0,2
Niederlande	0,07	0,17
Amtrak (USA)	Not specified	0,25

Tabelle 1: Grenzwerte für den Adhäsionskoeffizienten zwischen Rad und Schiene verschiedener Bahnen¹⁰

5.1.1.3 Reibungsmanagement

Der Begriff Reibungsmanagement legt nahe, dass es sich um verschiedene Maßnahmen zur Kontrolle der Reibung zwischen Rad und Schiene handelt. Das Reibungsmanagement im Rad/Schiene-Kontakt wird mit dem Ziel eingesetzt, die Effizienz, die Sicherheit, die Lärm- und Vibrationsreduktion zu verbessern und langfristig den Verschleiß von Rad und Schiene und schließlich die Wartungskosten zu verringern.

Die in einer Übersichtspublikation von Harmon und Lewis¹¹ angeführten Substanzen dienen dazu, die Reibung und/oder der Verschleiß im Rad/Schiene-Kontakt zu kontrollieren. Produkte zur Schienenkopfkonditionierung, sogenannte Schienenkopfkonditioniermittel (SKK), sollen den Reibungskoeffizienten von einem hohen Niveau des trockenen Kontakts aus senken und auf einem optimalen „Zwischen“-Niveau halten. Ist der Reibungskoeffizient zu niedrig, wirkt er sich negativ auf die Traktion und das Bremsen aus, ist er jedoch zu hoch, kommt es zu übermäßiger Rollkontaktermüdung (RCF) und Verschleiß. SKK-Produkte können in drei Kategorien unterteilt werden:

- Fette/Schmierstoffe¹²
- Reibungsmodifikatoren (FM)
- Traktionsverbesserer

⁹ UIC-Merkblatt 544-1 – Bremse – Bremsleistung, 2014

¹⁰ Magel, E.E. (2017) ‘A Survey of Wheel/Rail Friction’. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.21949/1503647>.

¹¹ Harmon, M. and Lewis, R. (2016) ‘Review of top of rail friction modifier tribology’, Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces 10(3), pp. 150–162. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/17515831.2016.1216265>.

¹² Hinweis: In der Schmierstoffchemie werden Schmierstoffe in Abhängigkeit von ihrer Konsistenz in gasförmige, flüssige, halb feste und feste Schmierstoffe unterteilt. Öle und Fette sind demnach Arten von Schmierstoffen.

SKK-Produkte¹³ können hinsichtlich ihrer Beschaffenheit bzw. Zusammensetzung in folgende Kategorien eingeteilt werden¹⁴:

- „TOR lubricants“ (nicht trocknende, also öl- oder fetthaltige Produkte)
- „TOR-FM“ (trocknende Produkte, daher auf Wasserbasis)

Fette und Schmierstoffe¹² werden normalerweise in der Grenzfläche zwischen Rad und Spurkranz aufgetragen und werden manchmal als Reibungsmodifikatoren mit niedrigem Reibungskoeffizienten (Low Coefficient Friction Modifier, LCF) bezeichnet. In diesem Bereich werden sie als Spurkranzschmierstoffe (SKS) angewandt. Sie sorgen in der Regel für einen Reibungskoeffizienten von weniger als 0,1, was zu einer Reduktion von Verschleiß und Geräuschentwicklung führt⁸.

Einige SKK-Produkte wie HPF (High Positive Friction Modifier) sorgen dafür, dass der Reibungskoeffizient auf einem mittleren Niveau zwischen 0,2 und 0,4 gehalten wird. SKK-Produkte müssen überdies einen positiven Trend in der Traktionskurve aufweisen, wie in Abbildung 5¹⁵ dargestellt. Die Schienenkopfkonditionierung ist so konzipiert, dass sie eine positive Reibungscharakteristik („Positive Friction“) erzeugt, also einen positiven Verlauf der Traktion mit zunehmendem Schlupf aufweist, und auf diese Weise Stick-Slip-Schwingungen (Ruckgleichten) im Kontakt verhindert, welche zu übermäßigem Lärm und Schlupfwellenbildung führen.

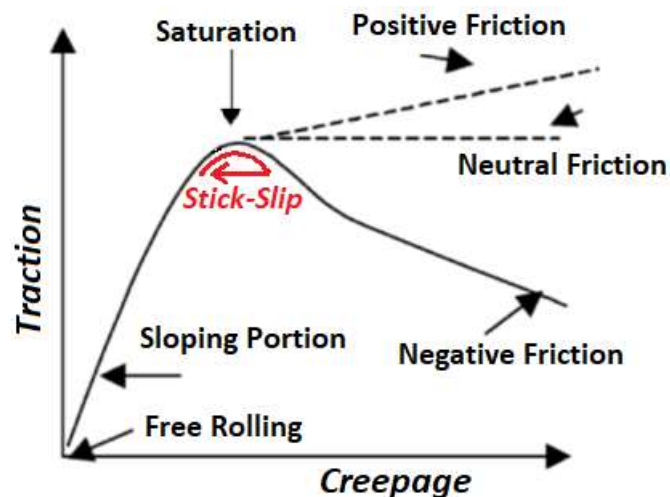


Abbildung 5: Schlupf-Traktions-Diagramm zur Darstellung des Unterschiedes zwischen positiver und negativer Reibungscharakteristik¹⁵

Traktionsverbesserer wie Sand erhöhen in der Regel die Adhäsion innerhalb des Kontakts, um unter bestimmten Bedingungen eine bessere Traktion und Bremswirkung zu erzielen. Dies führt zu einem Reibungskoeffizienten von mehr als 0,4; die Produkte werden als Very High Positive Friction Modifier (VHPF) bezeichnet⁸.

Abbildung 6 zeigt die typischen Bereiche im Rad/Schiene-Kontakt, in denen SKK und SKS aufgetragen werden. Zu beachten ist, dass bei einer Meterspurbahn die Spurkranzschmierung

¹³ Hinweis: SKK-Produkte (TOR-FM) wird in diesem Bericht als allgemeiner Begriff verwendet und gilt daher sowohl für trocknende als auch für nicht trocknende Produkte.

¹⁴ Stock, R. et al. (2016) 'Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application', *Wear*, 366–367, pp. 225–232. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.05.028>.

¹⁵ Eadie, D.T., Kalousek, J. and Chiddick, K.C. (2002) 'The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena', *Wear*, 253(1–2), pp. 185–192. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00098-4).

(grüne Linie) in diesem Schema zu weit in die Schienenlaufläche hineinreicht und stattdessen ausschließlich an der Schienenkopfflanke angebracht werden sollte. In der Abbildung 6 wird SKK nur an der bogeninneren Schienenoberfläche aufgebracht. In der Literatur wird zum Teil darauf hingewiesen, dass SKK an beiden Schienenlauflächen aufgebracht werden sollte (dieser Aspekt wird im Laufe der Forschungsarbeiten von P2 noch vertieft betrachtet.)

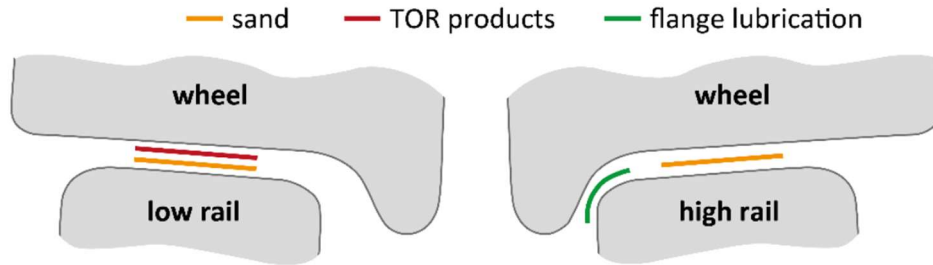


Abbildung 6: Schematische Darstellung typischer Bereiche bei der Anwendung von SKK und SKS zum Reibungsmanagement ⁸

Dieser Bericht befasst sich auch mit der Schmierung des Kontakts zwischen Spurkranz und der Schienenkopfflanke, wo der Verschleiß mit Hilfe eines Fetts oder Öls verringert werden kann (Abbildung 7). Die Kontaktbedingungen zwischen Spurkranz und Schienenkopfflanke sind herausfordernd, da dieser Kontakt schienenim Vergleich zum Kontakt zwischen Radlaufläche und Schienenkopf eine hohe Kontaktpressung und Schlupf aufweist.

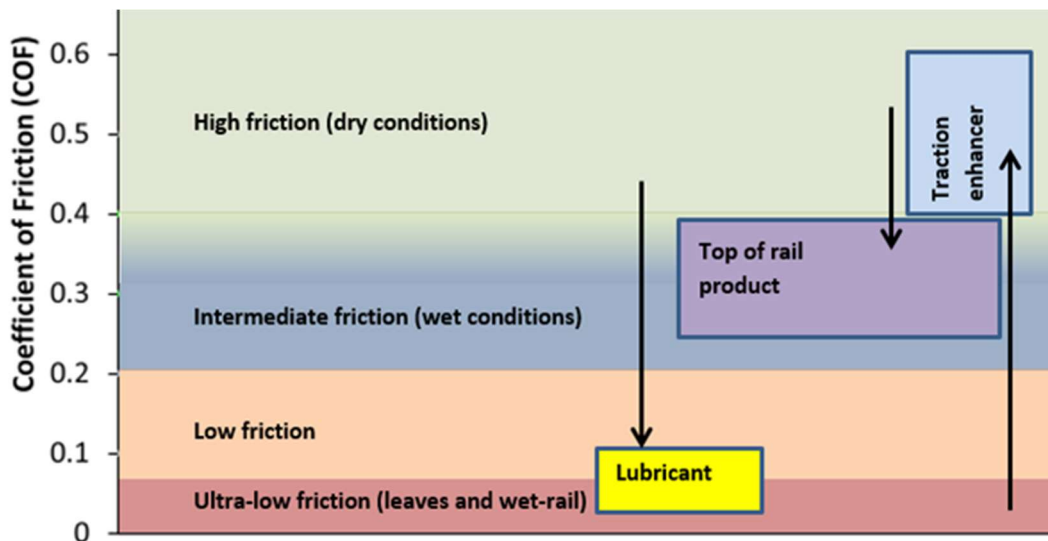


Abbildung 7: Bevorzugte Reibungskoeffizient-Bereiche verschiedener Produkte zum Reibungsmanagement ¹⁶

Schmierfett wird häufig eingesetzt, um den bogenäußeren Kontakt zwischen Spurkranz und Schienenkopfflanke zu schmieren, wenn ein Zug eine Kurve durchfährt. Das Schmierfett trägt somit zum Schutz von Rad und Schiene vor übermäßigem Verschleiß bei und kann zur Geräuschunterdrückung beitragen. Das Schmierfett wird bei ortsfesten Systemen in der Regel automatisch am Anfang einer Kurve von einer streckenseitigen Schmiervorrichtung (Fettapplikationssystem, Grease Distribution Unit, GDU, siehe Abbildung 8) auf die Schienenkopfflanke aufgetragen. Je nach Anzahl der Achsen des herannahenden Zuges wird eine unterschiedliche Menge Schmierfett aufgetragen. Das Schmierfett passiert die Öffnungen

¹⁶ White, B., Lee, Z. S. and Lewis, R. (2022) "Towards a Standard Approach for the Twin Disc Testing of Top-Of Rail Friction Management Products," Lubricants, 10(6), p. 124.

des Applikationssystems, das anstehende Fett wird dann von den vorbeifahrenden Spurkränzen des Zuges aufgenommen und schmiert dadurch die gesamte Länge der Kurve¹⁷. Dieser Bericht beschränkt sich jedoch auf fahrzeugseitig Vorrichtungen, so dass eher Öle und Fette mit geringerer Konsistenz verwendet werden.

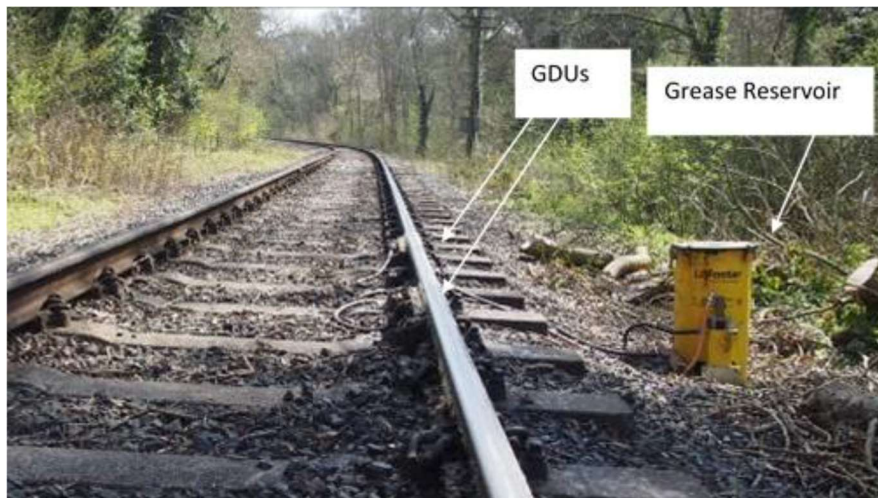


Abbildung 8: Typisches schienenseitiges Fettapplikationssystem¹⁸

5.1.1.4 SKK-Produkte

Wie in Abschnitt 5.1.1.3 angeführt, variieren SKK-Produkte in Form, Zusammensetzung und Einsatzzweck. Einige der früher verwendeten SKK-Produkte wurden in Form von festen Stiften (Festschmierstoffe) zur Verfügung gestellt. In einer 1992 veröffentlichten Studie wurde gezeigt, dass solche Produkte in der Lage sind, eine Traktionskurve in einem Rad/Schiene-Kontakt von einer negativen zu einer positiven Steigung zu verändern¹⁹. Die Hauptschwierigkeit bei SKK in Form fester Stifte besteht jedoch in der Kontrolle der Produktmenge, die auf den Kontakt aufgetragen wird. Heutzutage sind Produkte in fester und flüssiger Form als SKK erhältlich.

SKK werden in der Regel durch Vorrichtungen auf dem Fahrzeug auf die Lauffläche des Schienenkopfes in verschiedenen Abschnitten des Gleises aufgetragen. Einer der wichtigsten Aspekte bei der Betrachtung von Reibwertmodifikatoren ist ihre Zusammensetzung, da das Vorhandensein einer Zwischenschicht, des sogenannten dritten Körpers auf der Kontaktfläche, insbesondere der Schichten, die Effizienz des SKK-Produkts beeinträchtigen kann. Dem dritten Körper zuordenbar sind natürlich gebildete Schichten auf den Kontaktflächen, die in der Regel aus Verschleißrückständen, Oxiden und anderen Verunreinigungen bestehen, wie beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt. Daher ist es wichtig, dass SKK-Produkte in einem weiten Bereich von Umwelt- und Betriebsbedingungen wie gefordert funktionieren.

¹⁷ Lewis, S.R., Lewis, R., Evans, G. and Buckley-Johnstone, L. E. (2014) “Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester,” *Wear*, 314(1-2), pp. 205–212.

¹⁸ Temple, P.D., Harmon, M., Lewis, R., Burstow, M.C., Temple, B. and Jones, D. (2018) “Optimisation of grease application to railway tracks”. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 232(5). Verfügbar auf <https://doi.org/10.1177/0954409717734681>.

¹⁹ Kalousek, J. and Johnson, K.L. (1992) ‘An Investigation of Short Pitch Wheel and Rail Corrugations on the Vancouver Mass Transit System’, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 206(2), pp. 127–135. Verfügbar auf: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1992_206_226_02.

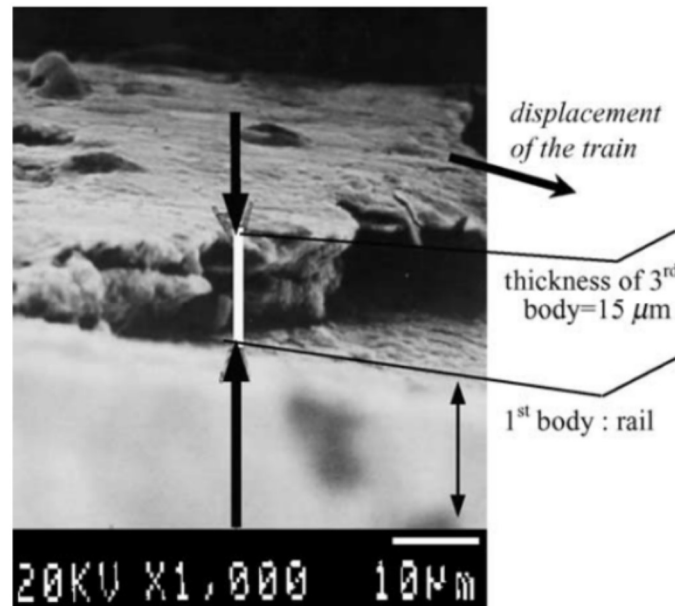


Abbildung 9: Metallographischer Querschnitt einer Schiene und einer dritten Körperschicht ²⁰

Tabelle 2 gibt einen kurzen Überblick über die Aufgaben der verschiedenen Komponenten des in einem SKK. Aus Abbildung 5 geht hervor, dass die negative Steigung der Traktionskurve zu Stick-Slip-Schwingungen führen kann, welche Kreischgeräusche und Schlupfwellenbildung verursachen. Daher ist es wichtig, dass SKK-Produkte positive Reibungseigenschaften im Sinne der Traktionskurve aufweisen, die das Ausbleiben von Stick-Slip-Schwingungen sicherstellen ^{15,21}.

²⁰ Descartes, S., Desrayaud, C., Niccolini, E. and Y. Berthier, Y. (2005) "Presence and role of the third body in a wheel/rail contact". *Wear*, 258(7-8), pp. 1081-1090. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.068>.

²¹ Eadie, D.T., Elvidge, D., Oldknow, K., Stock, R., Pointner, P., Kalousek, J. and Klauser, P. (2008) 'The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling', *Wear*, 265(9-10), pp. 1222-1230. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2008.02.029>.

Komponente	Aufgabe
Basisöl(e)	Transportieren und Verteilen des SKK-Produktes auf dem Rad und entlang der Schiene
Binder / Verdicker	Anhaften an der Kontaktfläche. Eindicken des Öles zur Kontrolle der Konsistenz und Fließeigenschaften
Partikel zur Reibungsmodifikation	Einstellen des Adhäsionsverhaltens und Herstellen einer positiven Reibungscharakteristik
Festschmierstoff	Reduzieren des Reibungskoeffizienten zwischen den Kontaktflächen
Benetzungsmittel	Reduzieren der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, zugleich Verbessern der Adhäsion bzw. der Haftung des SKK auf der Schienenoberfläche
Weitere Additive	Z.B. Antioxidans zum Vermeiden/Verzögern von Oxidation, Biozide zum Vermeiden zum mikrobiellem Wachstum, Retentionszusatz zum Verlängern der Lebensdauer

Tabelle 2: Überblick über die Aufgaben der in SKK-Produkten verwendeten Komponenten ⁸

5.1.1.5 Feldforschung zu SKK-Produkten

In diesem Abschnitt wird über Literatur und Studien berichtet, die sich vorwiegend auf Feldforschung beziehen als auf Laborforschung.

5.1.1.5.1 Auswirkungen auf die Schlupfwellenbildung

Die Anwendung von SKK-Produkten kann dazu beitragen, die Schlupfwellenbildung zu minimieren und abzuschwächen. In einer Studie wurde festgestellt, dass bis zu 85 % der Gleise des Vancouver Skytrain aufgrund einer schlechten Radsatzausrichtung, der Erzeugung von Stick-Slip-Schwingungen und einer unpassenden Konformität der Rad/Schiene-Kontakte Schlupfwellenbildung aufwiesen ¹⁹.

Schlupfwellen können sich an den Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene bilden und hinsichtlich Mechanismus, Ort und Wellenlänge variieren. So treten beispielsweise Schlupfwellen mit kurzer Wellenlänge normalerweise an der Innenschiene von Kurven aufgrund von Stick-Slip-Schwingungen auf. In einer Studie von Eadie et al. ¹⁵ wurde die Entstehung von Schlupfwellen mit kurzer Amplitude mit zwei Mechanismen erklärt. Ein Mechanismus beruht auf Unregelmäßigkeiten auf den Oberflächen von Rad und Schiene, der andere auf die Entwicklung der Traktionskurve nach dem Sättigungspunkt. Der letztgenannte Entstehungsmechanismus wird in der Regel durch Stick-Slip-Schwingungen verursacht, die auf eine negative Reibungscharakteristik nach dem Sättigungspunkt zurückgeführt werden können, was wiederum zur Bildung kleiner Flecken auf den Kontaktflächen führt. Wenn diese Flecken wachsen und sich im Laufe der Zeit anhäufen, entwickeln sich dieser zu Schlupfwellentälern, die typische Schlupfwellengeräusche, Verschleiß und Kreischen ¹⁵ verursachen können. Beispiele für die für Schlupfwellen typischen Flecken sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 abgebildet.

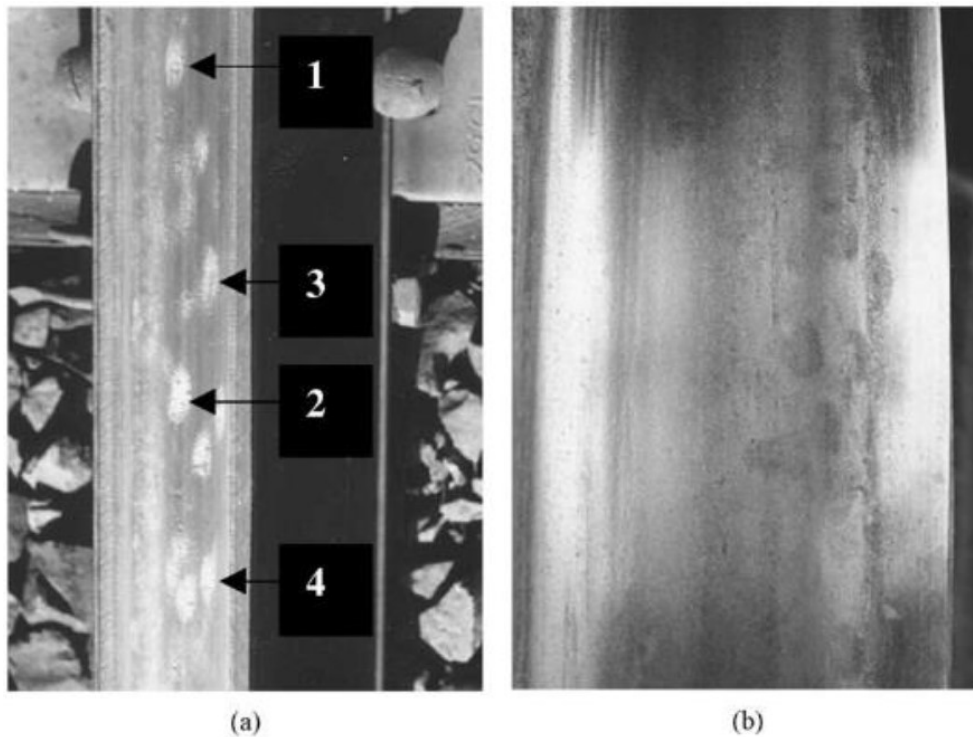


Abbildung 10: (a) Glänzende Flecken (1 bis 4) auf der Schiene und (b) dunkle Flecken auf dem Rad, die die Schlupfbereiche der Stick-Slip-Schwingungen darstellen ¹⁵.



Abbildung 11: Glänzende Flecken auf der Schiene und Flecken auf dem Rad, die die Gleitbereiche der Stick-Slip-Schwingungen darstellen (Quelle: zb Zentralbahn AG).

In zwei Fallstudien wurde versucht, die Hypothesen zur Schlupfwellenbildung durch Feldversuche zu untermauern. In einer der Studien, die in Asien durchgeführt wurde, wurde festgestellt, dass die Anwendung von SKK bei 25 % der Räder die Notwendigkeit des Schienenschleifens von 1 Woche auf 6 Monate reduzierte. In dieser Studie wurden jedoch auch andere Änderungen vorgenommen; daher war SKK nicht die einzige Ursache für dieses positive Ergebnis. Dennoch wurde daraus geschlossen, dass SKK eine wesentliche Rolle bei der

Verringerung der Schlupfwellenbildung spielt. In einer zweiten Studie, an der zwei Stadtbahnlinien in den USA beteiligt waren, wurde festgestellt, dass SKK die Schlupfwellenbildung deutlich reduzierte. Eine der Strecken wurde 4 Jahre ohne SKK betrieben und wies eine deutlich stärkere Schlupfwellenbildung auf als eine Strecke mit SKK-Einsatz, die 10 Jahre lang in Betrieb war ¹⁵.

Eine andere Studie in Spanien zeigte, dass die Verwendung von SKK die Schlupfwellentiefe 19 Monate lang auf einem konstanten Niveau hielt. Nach dieser Zeit wurde die SKK-Anwendung jedoch gestoppt, was zu einer Vergrößerung der Schlupfwellentiefe führte, wodurch die Annahme, dass SKK das Wachstum der Schlupfwellenbildung reduziert, weiter untermauert wurde. Diese Tests wurden auf einer 250 m langen Kurve durchgeführt, und die Messungen erfolgten alle 20 m ²².

In einer Studie aus dem Jahr 2008 wurden die Auswirkungen von Keltrack™, einem SKK-Produkt von LB Foster, auf 3 verschiedenen Systemen untersucht. Bei diesen Systemen handelte es sich um eine europäische U-Bahn, ein europäisches Nahverkehrssystem und ein japanisches U-Bahn-System, die jeweils als System A, System B und System C bezeichnet wurden. Jede dieser Fallstudien wies unterschiedliche Züge, Gleis- und Kurvencharakteristiken auf, wobei der Kurvenradius zwischen 40 und etwa 230 m, die Geschwindigkeit zwischen 30 und 50 km/h, das Verkehrsaufkommen zwischen 1500 und 6720 Achsen/Tag, die Achslasten zwischen 6 und 16 Tonnen und die Raddurchmesser zwischen 650 und 900 mm variierten. Wie aus Abbildung 12 hervorgeht, ist der Unterschied in der Schlupfwellenwachstumsrate zwischen den Tests mit und ohne SKK in jedem der drei Fälle signifikant. System A zeigte die größte Veränderung, wobei die SKK die Schlupfwellenwachstumsrate um den Faktor 11 reduzierte ²³.

²² Egana, J.I., Vinolas, J. and Gil-Negrete, N. (2005) 'Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation', *Tribology International*, 38(8), pp. 769–774. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2004.11.006>.

²³ Eadie, D.T., Santoro, M., Oldknow, K. and Oka, Y. (2008) "Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves". *Wear*, 265(9-10), pp.1212-1221. Verfügbar auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001427>.

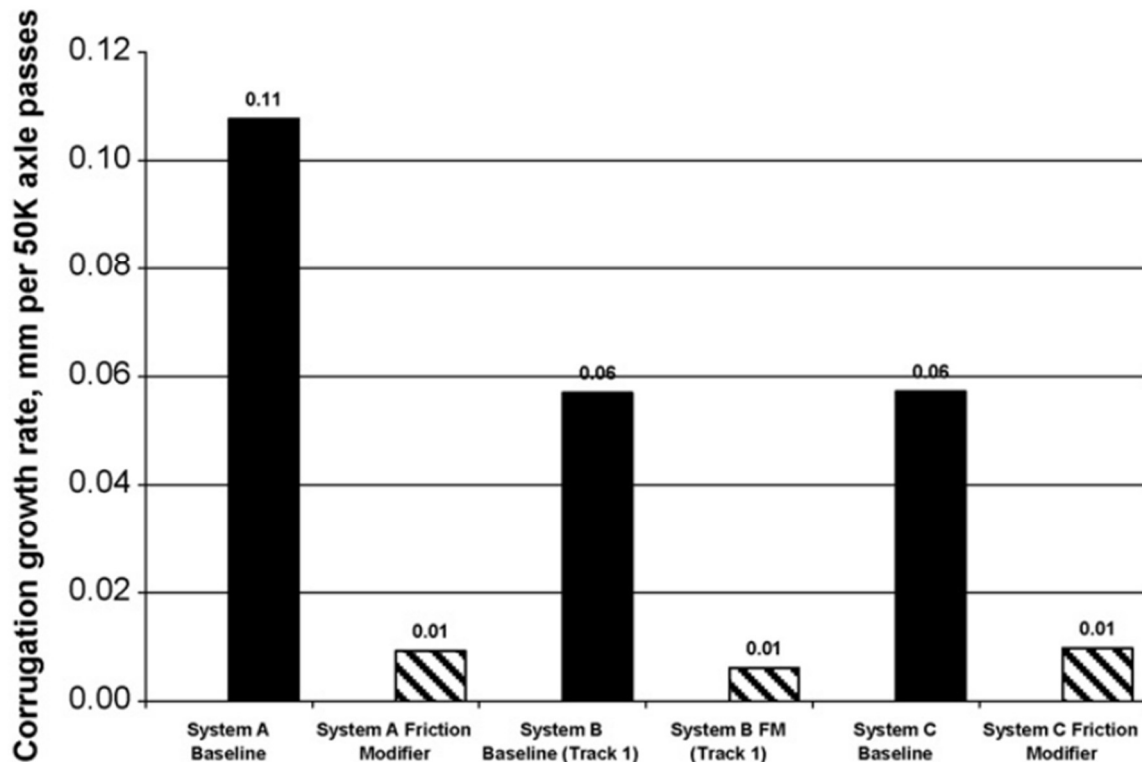


Abbildung 12: Vergleich der Schlupfwellenwachstumsraten bei drei Schienensystemen mit und ohne Einsatz von SKK ²³

5.1.1.5.2 Auswirkungen auf die Kontaktkräfte

In einer Studie von Tomeoka et al. ²⁴ wurde der Reibungskoeffizient in zwei Kurven bei trockenen und bei mit SKK konditionierten Bedingungen untersucht. Es wurde festgestellt, dass das verwendete SKK den Reibungskoeffizienten in den beiden Kurven um 58 % bzw. 70 % reduzierte. Dies wurde erreicht, indem das SKK-Mittel durch den vorauslaufenden Zug aufgesprüht wurde, so dass eine ausreichende SKK-Schicht auf der Schiene vorhanden war, die der nächste Zug verbrauchen konnte.

In der Studie von Eadie et al. ²³, die bereits in Abschnitt 5.1.1.5.1 angeführt wurde, wurden die Veränderungen des Reibungskoeffizienten über eine bestimmte Anzahl von Überfahrten untersucht, um die Leistung von SKK und weiteren üblicherweise verwendeten Schmierstoffen zu vergleichen. Wie aus Abbildung 13 hervorgeht, führte die Verwendung von SKK sowohl für die äußere als auch für die innere Schiene zu einer Abnahme des Reibungskoeffizienten, der sich bei etwa 0,35 stabilisierte. Im Vergleich dazu wurde mit dem Experiment mit ausschließlicher Schmierstoffanwendung an der bogeninneren Schiene eine deutliche Verringerung der Reibung nur in der inneren Schiene festgestellt. Allerdings wurde in der Studie auch festgestellt, dass die Reibungswerte der inneren Schiene während des gesamten Versuchszeitraums nicht stabil waren ¹⁵. Der stabilisierte Reibungskoeffizient von 0,35 liegt jedoch in dem Bereich, den einige Forscher als optimalen Reibungskoeffizienten für den Rad/Schiene-Kontakt beschrieben haben ^{11,14}.

²⁴ Tomeoka, M., Kabe, N., Tanimoto, M., Miyauchi, E. and Nakata, M. (2002) 'Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication', *Wear*, 253(1-2), pp. 124-129. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00091-1).

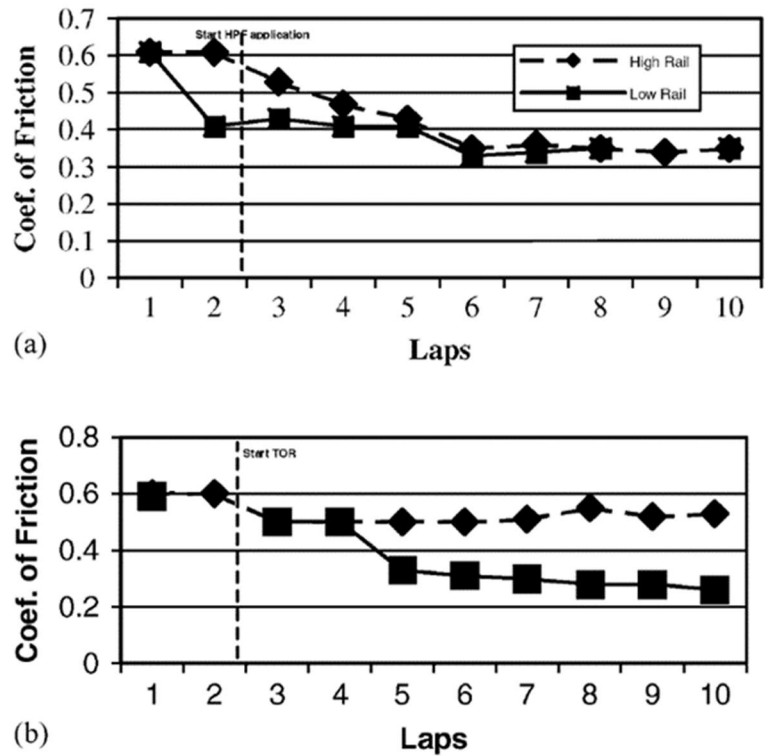


Abbildung 13: Auswirkung von a) SKK und b) Schmierstoff auf den Reibungskoeffizienten auf der äußeren und inneren Schiene über 10 Überfahrten¹⁵

Eine weitere Studie mit einem handbetriebenen Tribometer im Feld ergab, dass zwei verwendete SKK-Mittel (ein kommerzielles Produkt als Friction Modifier 1 bezeichnet und ein speziell angefertigtes SKK als Friction Modifier 2 bezeichnet) den Reibungskoeffizienten von 0,55 bis 0,42 auf einen Bereich von 0,13 bis 0,22 reduzierten, siehe dazu Abbildung 14²⁵.

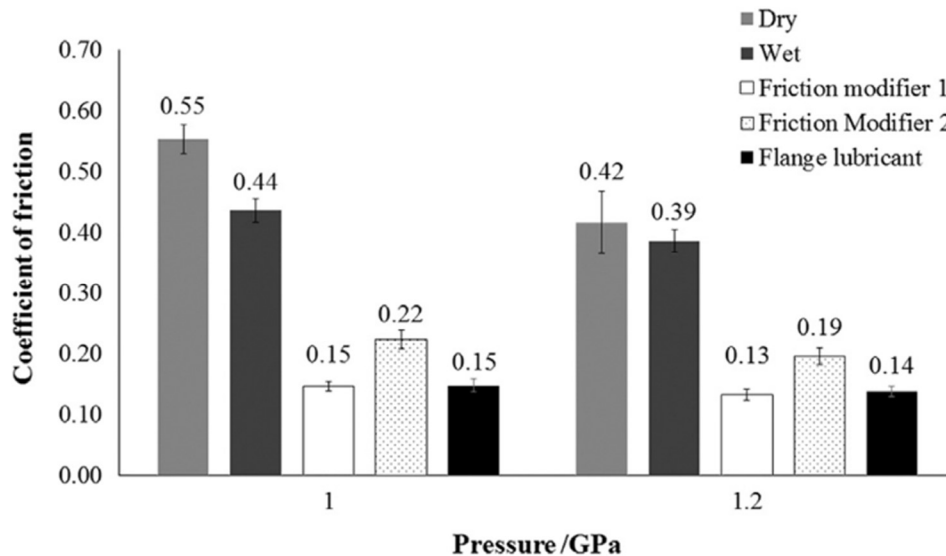


Abbildung 14: Darstellung des durchschnittlichen Reibungskoeffizienten in verschiedenen Szenarien des Rad/Schiene-Kontakts²⁵

²⁵ Areiza, Y.A., Garcés, S.I., Santa, J.F., Vargas, G. and Toro, A. (2015) 'Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer', Tribology International, 82 Part B, pp. 274–279. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2014.08.009>.

5.1.1.6 Laboruntersuchungen von SKK-Produkten – Auswirkung auf die Adhäsion

Dieser Abschnitt befasst sich überwiegend mit Forschungsarbeiten, die in einer Laborumgebung durchgeführt wurden.

In einer Studie von Matsumoto et al.²⁶ wurde ein Zwei-Walzen-Gerät verwendet, um die Wirkung von SKK (Keltrack™ HPF-Spray von LB Foster) auf die Adhäsion bzw. Haftung im Laufe der Zeit zu untersuchen. Diese Tests wurden auch durchgeführt, um den Verbrauch von SKK bei unterschiedlichen Auftragsraten und damit die Menge des aufgetragenen SKK zu verstehen. Abbildung 15 stellt die in dieser Untersuchung verwendete Aufbringungsrate und ihre Auswirkung auf den Traktionskoeffizienten dar.

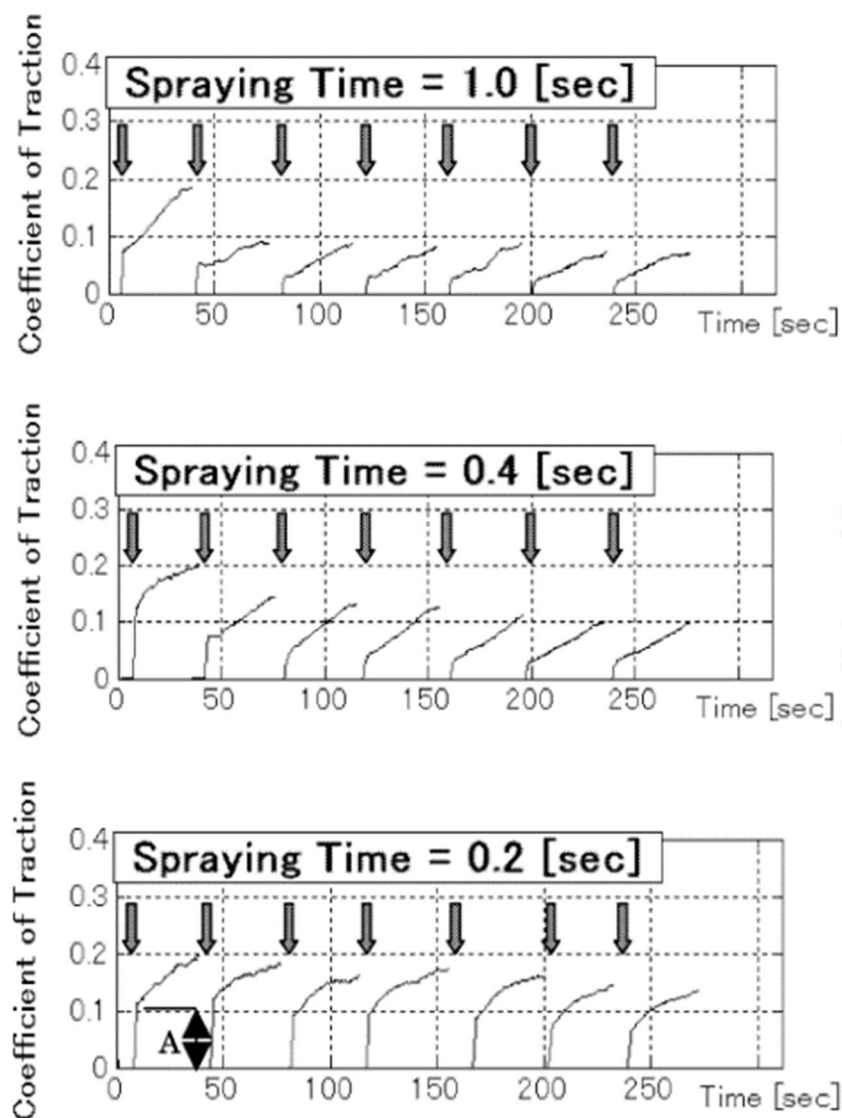


Abbildung 15: Traktionskoeffizient bei Aufbringung von SKK über verschiedene Sprühzeiten²⁶

²⁶ Matsumoto, K., Suda, Y., Iwasa, T., Fujii, T., Tomeoka, M., Tanimoto, M., Kishimoto, Y. and Nakai, T. (2004) 'A method to apply friction modifier in railway system', JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 47(2), pp. 482–487.

Aus Abbildung 16 geht hervor, dass die Menge an SKK (zwischen 0,2 und 0,4 Sekunden Sprühzeit) eine signifikante Auswirkung auf den Traktionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Schlupf hat. Es gibt jedoch einen Gleichgewichtspunkt, ab dem mehr aufgetragenes SKK keine signifikante Auswirkung auf den Traktionskoeffizienten mehr hat, was zwischen den Anwendungen mit 0,4 und 1 Sekunde Sprühzeit aufgetreten ist²⁶. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Kontakt mit SKK gesättigt war.

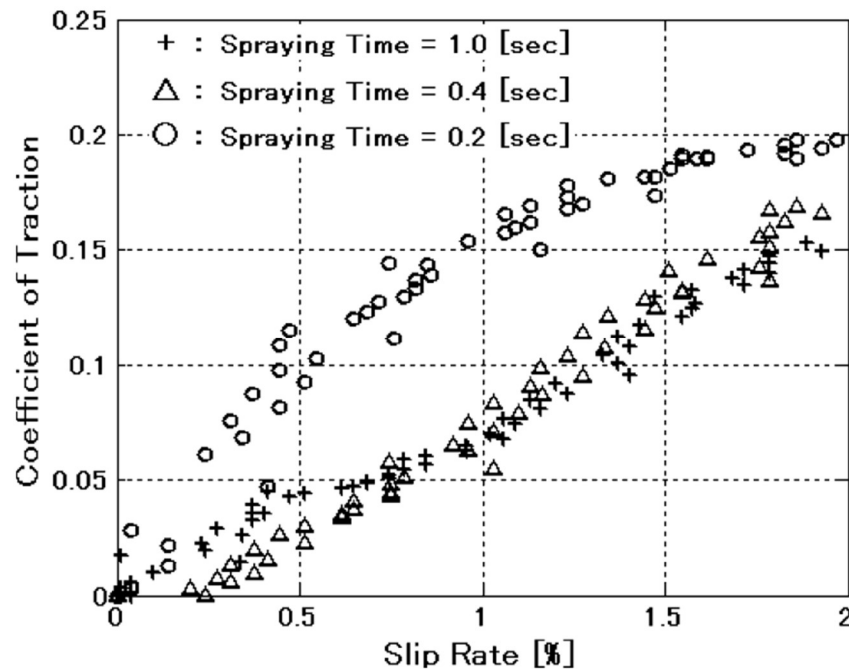


Abbildung 16: Traktionskurve für unterschiedliche Sprühzeiten bzw. Aufbringmengen²⁶

Die Untersuchung ergab überdies, dass die Größe des Schlupfes den Verbrauch des eingesetzten SKK beeinflusst. Je größer der Schlupf ist, desto kürzer ist die Zeit bis zum Erreichen des maximalen Traktionskoeffizienten. Daraus wurde geschlossen, dass verschiedene Faktoren im Zusammenhang mit der Größe des Schlupfes, wie der Kurvenradius und die Geschwindigkeit des Zuges, bei der Entscheidung über die für die Anwendung benötigte Menge an SKK berücksichtigt werden müssen²⁵.

Eine andere Studie, die die Wechselwirkung von SKK mit Oxiden und SKK mit Fett untersuchte, ergab, dass SKK trotz des breiten Bereichs an Eisenoxiden zwischen 0 % und 80 % Eisenoxidanteil im SKK zur Kontrolle der Reibung im Rad/Schiene-Kontakt verwendet werden kann. Die Untersuchung ergab auch, dass trotz der höheren Eisenoxidkonzentration die Wirkung der SKK-Partikel größer war als die Wirkung der Eisenoxidpartikel²⁷. Hierzu wurde angenommen, dass der Adhäsionskoeffizient in erster Linie von den verschleißfesteren Partikeln beeinflusst wird.

Die Ergebnisse dieser Studie, in der die Auswirkung des Fettanteils im SKK auf die Adhäsion analysiert wurde, sind in Abbildung 17 dargestellt. Hierbei kann eine geringe Erhöhung der Fettkonzentration bei der Wechselwirkung mit SKK zu einer verlängerten Steady-State-Periode führen, bevor ein schneller Anstieg der Adhäsion auftritt. Höhere Fettanteile würden jedoch das Adhäsionsniveau zu niedrig halten. 60 mg Fett zeigten sogar ähnliche Ergebnisse wie bei Experimenten nur mit Fett²⁷. Die Auswirkung von Fett auf die tribologischen Eigenschaften

²⁷ Lu, X., Cotter, J. and Eadie, D.T. (2005) 'Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface', *Wear*, 259(7–12), pp. 1262–1269. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2005.01.018>.

von SKK bzw. der daraus resultierenden Tribofilme kann daher mit den Schmiereigenschaften von Fett und seinen negativen Auswirkungen auf die Adhäsion zwischen SKK und Stahloberflächen in Verbindung gebracht werden.

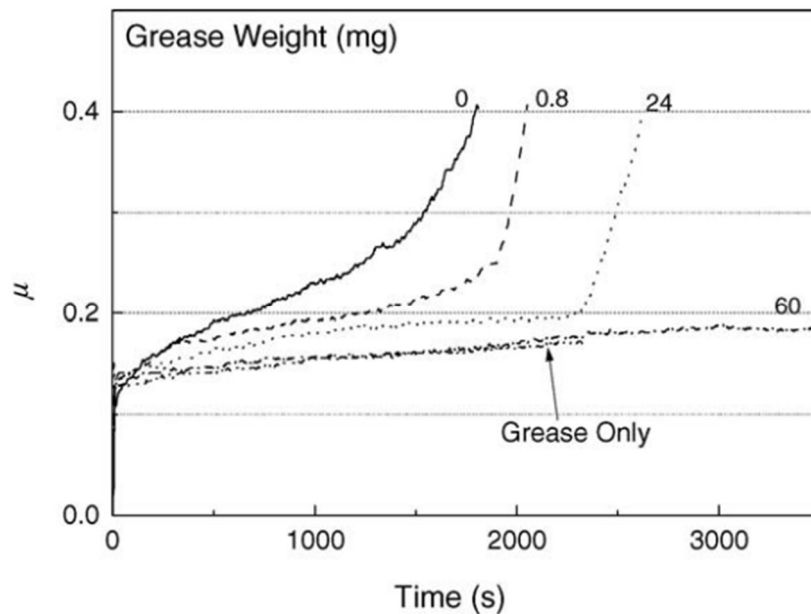


Abbildung 17: Einfluss des Fettanteils (0 bis 60 mg) auf die Reibung von SKK in Abhängigkeit von der Versuchsdauer²⁷

In einer Studie von Liu und Meehan aus dem Jahr 2016²⁸, bei der eine Zweiseibenanordnung verwendet wurde, wurden Umdrehungsgeschwindigkeit und Anlaufwinkel variiert. Die Ergebnisse zeigten, dass der Adhäsionskoeffizient bei trockenen Versuchsbedingungen bei einer Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit von 100 U/min auf 800 U/min abnahm, während der Adhäsionskoeffizient für ölbasierte SKK-Mittel, in Abbildung 18 als OFM1 und OFM2 bezeichnet, leicht anstieg.

²⁸ Liu, X. and Meehan, P.A. (2016) 'Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers', Journal of Sound and Vibration, 371, pp. 393–405. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2016.02.028>.

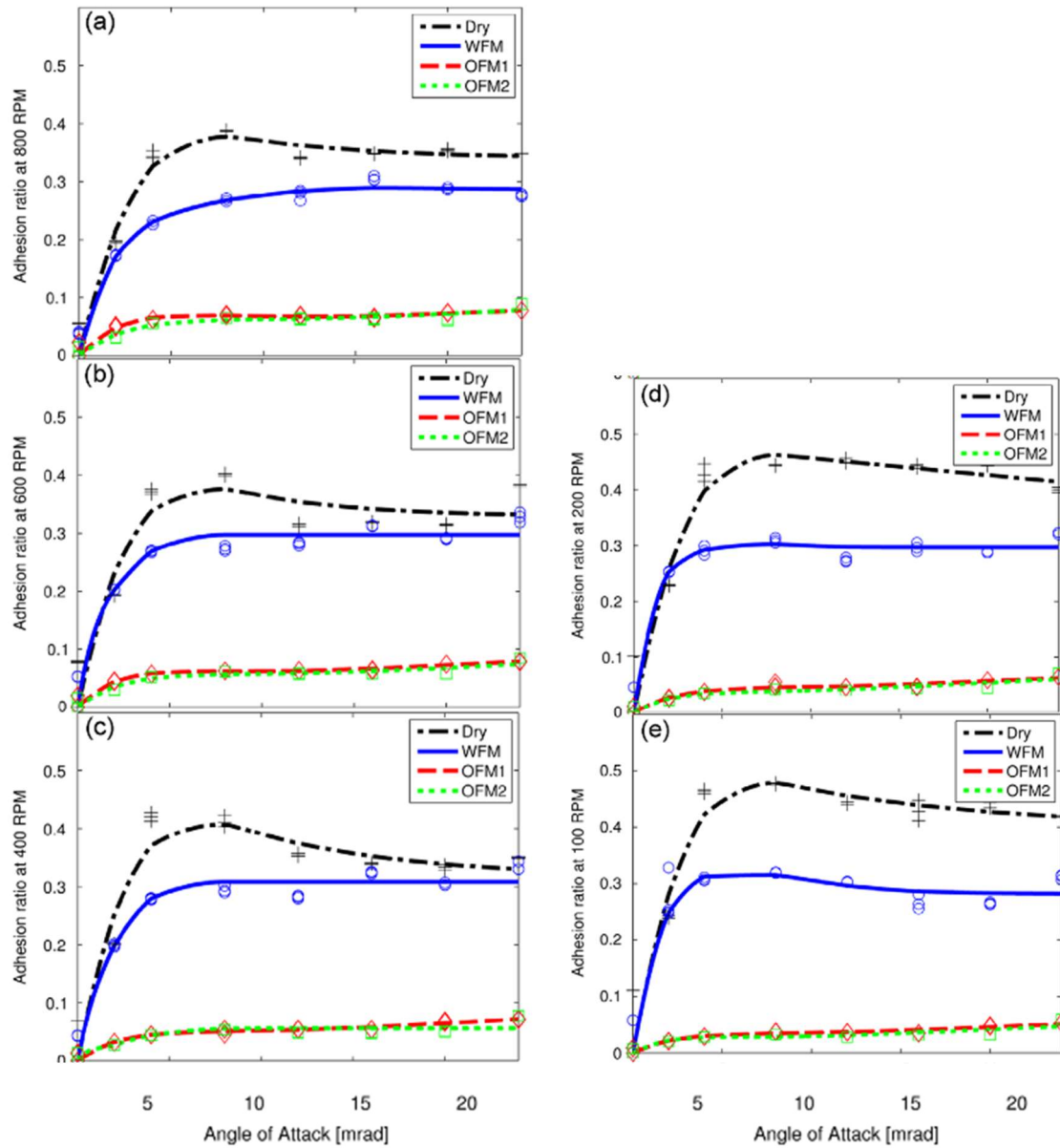


Abbildung 18: Traktionskurve (hier: Adhäsion als Funktion des Anlaufwinkels) bei verschiedenen Kontaktbedingungen (trocken, SKK auf Wasserbasis und SKK auf Ölbasis) bei verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten

(a) 800 U/min, (b) 600 U/min, (c) 400 U/min, (d) 200 U/min, (e) 100 U/min²⁸

5.1.2 Bestehende Normen, Richtlinien und Regelungen

EN 15427 und CEN/TS 15427 umfasst eine Reihe von Normen und technischen Spezifikationen, die sich mit dem Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene befassen (Verweise für DIN angegeben):

- EN 15427-1-1, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-1: Vorrichtungen und Anwendung – Spurkranzschmierstoffe²⁹
- CEN/TS 15427-1-2, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-2: Vorrichtungen und Anwendung – Kraftschlussmodifikatoren³⁰
- CEN/TS 15427-1-3, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 1-3: Vorrichtungen und Anwendung — Kraftschluss erhöhende Materialien³¹
- EN 15427-2-1, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene — Teil 2-1: Eigenschaften und Merkmale — Spurkranzschmierstoffe³²
- CEN/TS 15427-2-2, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 2-2: Eigenschaften und Merkmale — Kraftschlussmodifikatoren³³
- CEN/TS 15427-2-3, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 2-3: Eigenschaften und Merkmale — Kraftschluss erhöhende Materialien³⁴

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es derzeit keinen verbindlichen genormten Labortest für SKS und Kraftschlussmodifikatoren (= SKK) gibt, obwohl das Europäische Komitee für Normung (CEN) derzeit eine Norm entwickelt, die alle Reibungsmanagementprodukte umfasst, siehe oben. In den Anhängen zu EN 15427-2-1 und EN 15427-2-2 werden zwar Testmethoden mit dem Doppelscheibenprüfstand und der Mini-Traction Machine beschrieben, die Durchführung wird jedoch nur als Option angegeben.

BS EN 15427³⁵ ist eine britische Norm, die sich auf die Anwendung von SKS bezieht, aber es gibt keine Entsprechung für die Anwendung von Reibungsmodifikatoren wie bereits oben für die deutsche Fassung angeführt. BS EN 16028³⁶ ist eine britische Norm für Schmierstoffe zur fahrzeugseitigen und schienenengebundenen Applikation. Die entsprechende deutsche Fassung DIN EN 16028:2012-10 bezieht sich auf die Spurkranzschmierung und wurde mittlerweile zurückgezogen und durch DIN EN 15427-2-1 ersetzt.

²⁹ EN 15427-1-1, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-1: Vorrichtungen und Anwendung – Spurkranzschmierstoffe

³⁰ CEN/TS 15427-1-2, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-2: Vorrichtungen und Anwendung – Kraftschlussmodifikatoren

³¹ CEN/TS 15427-1-3, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 1-3: Vorrichtungen und Anwendung — Kraftschluss erhöhende Materialien

³² EN 15427-2-1, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene — Teil 2-1: Eigenschaften und Merkmale — Spurkranzschmierstoffe

³³ CEN/TS 15427-2-2, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 2-2: Eigenschaften und Merkmale — Kraftschlussmodifikatoren

³⁴ CEN/TS 15427-2-3, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene —Teil 2-3: Eigenschaften und Merkmale — Kraftschluss erhöhende Materialien

³⁵ BSI, “EN 15427- Railway applications — Wheel / rail friction management — Flange lubrication.” 2010.

³⁶ BSI, “EN 16028 Railway applications — Wheel / rail friction management — Lubricants for trainborne and trackside applications.” 2012.

AS641³⁷ ist eine australische Norm, die die Applikation von Schmierstoffen auf die Schienenfahrkante regelt.

R RTE 49410³⁸ ist eine Schweizer Regelung, die die Produktspezifikationen für SKS und die Schmiermengen sowie die Instandhaltung auf dem normalspurigen Schienennetz der Schweizer Infrastruktur definiert. Zur Meterbahn gibt es weder für SKK noch SKS eine entsprechende R RTE.

Es gibt eine britische Richtlinie von Network Rail, in der die Mindestanforderungen für Gleisbogenschmierstoffe festgelegt sind³⁹. In der Norm werden die Eigenschaften des Schmierstoffs detailliert beschrieben und zwei Labortests zur Analyse der Pumpfähigkeit und der Verschleiß-/Retentivitätseigenschaften des Schmierstoffs vorgeschrieben. Obwohl diese Tests und die Mindestanforderungen für Kurvenschmierstoffe gelten, könnten ein ähnliches Verfahren auch auf SKK angewendet werden.

Richtlinien für die Umsetzung und Messung des Reibungsmanagements an der Schienenlauffläche finden sich in⁴⁰ und⁴¹.

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass die Bahnbetreiber, z.B. ÖBB, über mehr oder weniger umfangreiche Richtlinien zu SKK und/oder verfügen bzw. an solchen Richtlinien arbeiten, siehe dazu Abschnitt 7.1.4.9.

5.1.3 Mechanismen der Lärmerzeugung

5.1.3.1 Kurvenkreischen

Das Kurvenkreischen tritt zusätzlich zum Roll- und Anlaufgeräusch auf, wenn ein Zug einen Gleisbogen mit einem Radius $R < 100 b$ durchfährt (b ist der Radstand des Drehgestells). Es tritt im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 5 kHz auf, wobei die Luftschallpegel bei der Durchfahrt eines Zuges in 10 m Entfernung von einer engen Kurve bis zu 110 dB(A) betragen können. Im Allgemeinen ist das Kurvenkreischen aufgrund seiner Tonalität störender als ein Breitbandgeräusch desselben Pegels. Die Ursache für das Kurvenkreischen ist, dass die Rollrichtung der beiden Achsen eines Wagens oder Drehgestells beim Durchfahren einer Kurve nicht mit der Richtung des Gleises übereinstimmt. Dadurch kommt es zum Schlupf an der Rad/Schiene-Kontaktfläche und – aufgrund der Stick-Slip-Anregung – auch zu Schwingungen des Rades. Diese führen letztlich zur Schallabstrahlung, wobei eine dominante Schwingungsmode des Rades zu hohen tonalen Anteilen führt. Die Axialmoden der Räder sind am bedeutendsten. Die Schiene wird zwar durch die gleiche Kraft angeregt, aber aufgrund ihrer viel geringeren Beweglichkeit fällt auch die Antwort geringer aus. Daher ist das Rad für das Geräusch maßgeblich^{42,43,44}.

³⁷ Daly, P. (2017) "Rail Gauge Corner Lubrication Management – for friction levels and measurement," RISSB Rail Industry Safety And Standards Board.

³⁸ R RTE 49410 (2018) Spurkranzschmierung – Eisenbahnfahrzeuge – Normalspur,

³⁹ "NR/L3/TRK/3530/A01- Curve Lubricants." Network Rail, 2012.

⁴⁰ Reiff, R. "Best Practices Update for Friction Control Including Implementing Top-of-Rail Friction Control."

⁴¹ Tournay, H. "Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues," Int. heavy Haul Assoc., p. 484, 2001.

⁴² Müller, G., and Möser, M. (Eds.) (2017) „Luftschall aus dem Schienenverkehr“. Springer Berlin Heidelberg.

⁴³ Thompson, D. (2008) "Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control". Elsevier.

⁴⁴ Rudd, M.J. (1976) "Wheel/rail noise – Part II: Wheel squeal". Journal of Sound and Vibration, 46, pp. 381–394.

Rudd⁴⁴ identifizierte mögliche Erregungseffekte, die durch den Stick-Slip-Effekt im Rad/Schiene-Kontakt verursacht werden:

- Seitlicher Schlupf am Kontakt zwischen der Radlaufläche und dem Schienenlaufläche
- Reibung des Spurkranzes an der Schienenkopfflanke
- Längsschlupf am Kontakt auf der Radlaufläche durch einen Differenzschlupf

Diese Instabilität verursacht eine abfallende bzw. negative Reibungscharakteristik, die zum Kurvenkreischen führt, siehe Abbildung 5. Außerdem kann

- Modenkopplung zu Instabilität und Kurvenkreischen führen,
- und wie Ding et al.⁴⁵ gezeigt haben, können auch die Masse und das dämpfungsähnliche Verhalten der Schiene Instabilität und Kurvenkreischen verursachen⁴⁶.

Eine Radmode, die konstanter seitlicher Schlupfgeschwindigkeit V_0 und einer (gleitenden) Reibungskraft, die durch einen statischen/dynamischen Coulomb-Reibungskoeffizienten gekennzeichnet ist, ausgesetzt ist, wird stabile Schwingungen in der Nähe seiner Eigenfrequenz aufweisen, solange die Dämpfung im Rad unter einem kritischen Wert liegt. Ein realistischeres Reibungsmodell mit abnehmender Reibungscharakteristik beim Gleiten wird instabil und erzeugt exponentiell wachsende Schwingungen für Raddämpfungswerte unterhalb eines bestimmten kritischen Wertes. Die Schlupfgeschwindigkeit hängt vom Anlaufwinkel (Verhältnis Radius/Radstand = R/b) ab und wird bei $R/b < 100-150$ kritisch. Für $b = 2$ m bedeutet dies, dass bei Kurven mit $R < 200-300$ m Kreischen wahrscheinlich ist. Das Kurvenkreischen tritt vor allem am vorderen Innenrad auf. Beim vorlaufenden bogenäusseren Rad läuft der Spurkranz an. Kurvenkreischen und Anlaufen können auch gleichzeitig auftreten. Die maßgeblichen Parameter sind: Schlupfgeschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit, normiert durch die Geschwindigkeit des Zuges), modale Eigenschaften des Rades (einschließlich Dämpfung), vertikale Belastung, (seitliche) Kontaktposition und Reibung (SKK). Letzteres hängt von ebenfalls von zahlreichen Parametern ab: Temperatur, Feuchtigkeit und Oberflächenbeschaffenheit. Dies führt dazu, dass das Kurvenkreischen ein chaotisch auftretendes Phänomen ist, bei dem die Wahrscheinlichkeit des Auftretens an verschiedenen Tagen oder sogar zu verschiedenen Tageszeiten sehr unterschiedlich ist⁴⁴. Siehe dazu Tabelle 3.

⁴⁵ Ding, B., Squicciarini, G. and Thompson, D.J. (Sept. 2016) "Effects of rail dynamics and friction characteristics on curve squeal". *Journal of Physics: Conference Series*, 744(1), p. 012146, IOP Publishing.

⁴⁶ Ding, B., Squicciarini, G., and Thompson, D. (2019) "Effect of rail dynamics on curve squeal under constant friction conditions". *Journal of Sound and Vibration*, 442, pp. 183-199.

Parameter	Vincent et al. (2006)	Stefanelli et al. (2006)	Jiang et al. (2012)	Fourie (2011)
Curve radius	60 m & 75 m	199 m	284 m	1000 m
Sound pressure	X	X	X	X
Squeal frequency	X	X	X	X
Train speed	X	X	X	X
Wheelset angle-of-attack	X	X	X	
Wheelset lateral position	X	X	X	
Wheel modes	X	X		
Modal damping of wheel modes	X	X		
Air temperature		X	X	
Rail temperature		X		
Air humidity		X	X	
Moisture on rails		X		
Vertical and lateral track forces			X	X

Tabelle 3: Wichtige bei Feldversuchen berücksichtigte Parameter ⁴⁷

Ein zweiter Mechanismus (Modenkopplung) wurde gesucht, um das (wesentlich seltenere) Kreischen zu erklären, das unter Bedingungen auftritt, die mit der herkömmlichen Theorie der „fallenden Reibungscharakteristik“ nicht erklärt werden können (siehe auch Abschnitt 5.1.1.3). Die seitliche Anregung durch die Kraftschlusskräfte führt nicht nur zu einer seitlichen Bewegung, sondern bezieht auch einen vertikalen Freiheitsgrad mit ein, der seinerseits die Kraftschlusskräfte variiert. Dieses System kann instabil werden und zu Kreischen führen, selbst wenn die Reibungskräfte konstant sind (also nicht fallen). Die Anregung dieses Mechanismus ist ebenfalls von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängig: Kontaktstelle/dem Kontaktwinkel, der Schlupfgeschwindigkeit, den modalen Eigenschaften des Rades und der Reibung. Der Einfluss der Dämpfung ist nicht eindeutig, eine erhöhte Raddämpfung kann entweder eine positive oder negative Wirkung haben.

Es wurden zwei Arten von Modellen entwickelt, um potenziell instabile Radmoden zu ermitteln:

- Linearisierte Modelle im Frequenzbereich (positive Realteile der Eigenwerte zeigen instabile Bedingungen an)
- Direkte Lösung im Zeitbereich

Die Modellierung umfasst die Dynamik des Rades und ein fortschrittliches Kontaktmodell mit Quer-, Längs- und Spinschlupf (instabil) mit fallender Reibungscharakteristik. Die Dynamik des Gleises wird im Allgemeinen nicht berücksichtigt. Laufende Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit verschiedenen Kontaktmodellen und verschiedenen Ausgangsbedingungen führen zu unterschiedlichen Kreischergebnissen. So bestätigten z.B. in ⁴⁵ durchgeführte parametrische Studien mit Simulationsmodellen, dass der Kurvenradius der dominierende Parameter ist, und zeigten, dass das vorlaufende Innenrad zu einer niedrigeren dominanten Kreischfrequenz neigt als das vorlaufende Außenrad. Bei diesen Untersuchungen traten bei den nachlaufenden Rädern keine gesättigten Seitenkräfte auf und verursachten daher keine Kreischgeräusche.

Messungen des Kurvenkreischens können im Labor mit einem Doppelscheibenprüfstand durchgeführt werden. In den letzten 30 Jahren wurden viele Messkampagnen im Labor

⁴⁷ Fourie, D.J. (2018) “Railway wheel squeal as a result of unsteady longitudinal and spin creepage”. Doctoral thesis, University of Pretoria.

(Walzenprüfstand) durchgeführt, darunter fallende Reibungskurven (nass, trocken, Öl, usw.) mit und ohne Traktion. Es gibt jedoch viele widersprüchliche Ergebnisse gefunden. Im Allgemeinen wurde das Kreischen in Verbindung mit fallender Reibungscharakteristik gemessen. So beschreiben z.B. Hsu et al.⁴⁸ diese Methode und vergleichen sie mit Berechnungsmodellen.

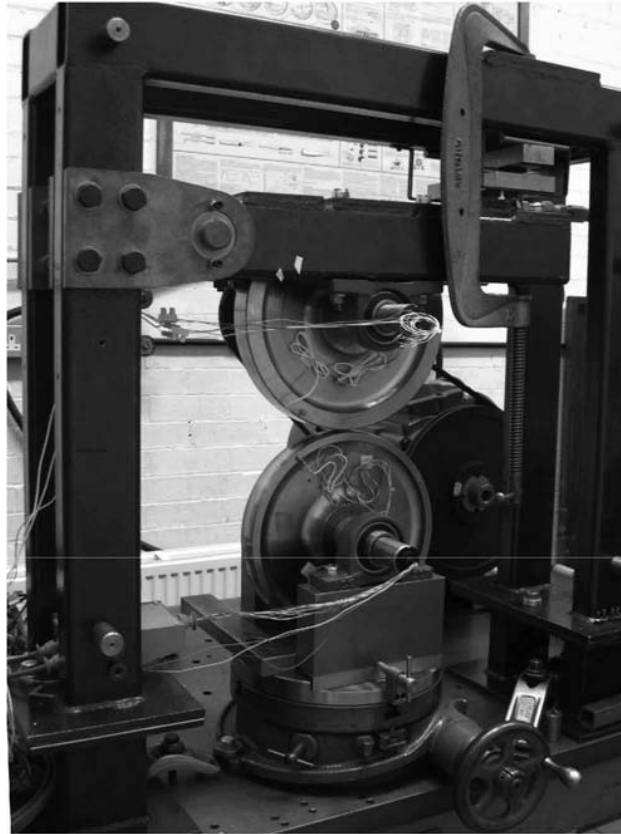


Abbildung 19: Gesamtansicht eines Doppelscheibenprüfstands⁴⁸

Zur Verringerung des Kurvenkreischens kann die Dämpfung des Rades die Schallabstrahlung reduzieren. Im Handel sind abgestimmte Absorber, Schallabsorber, welche aus Schichtung von Metallzungen und elastischem Material bestehen, Ringdämpfer und elastische Räder erhältlich, die jedoch bei der Modenkopplung möglicherweise nicht funktionieren. Der Stick-Slip-Effekt kann durch Konditionierung der Schienenauflflächen (SKK) reduziert werden, aber es bleiben Ausnahmen wegen auftretender Modenkopplung oder unkontrolliertem Reibungsverhalten. Lärm kann auch durch eine geeignete Fahrzeug- und Gleiskonstruktion vermieden werden^{49,50}. So können große Kurvenradien oder ein reduzierter Radstand ausgelegt werden. Auch eine radiale Radsatzsteuerung im Drehgestell ist eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung des Kurvenkreischens. Wahrscheinlich ist die Kombination von mehreren Maßnahmen am effektivsten.

Um die Wirkung einer Lärm-minderungsmaßnahme zu bestimmen, muss berücksichtigt werden, dass Kurvenkreischen stochastisch auftritt und dass das Auftreten durch eine

⁴⁸ Hsu, S.S., Huang, Z., Iwnicki, S.D., Thompson, D.J., Jones, C.J., Xie, G. and Allen, P.D. (2007) "Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221(1), pp. 59-73.

⁴⁹ DB Netz AG (2012) „Innovative Maßnahmen zum Lärm und Erschütterungsschutz am Fahrweg“, Schlussbericht vom 15.06.2012. Bericht im Rahmen des Konjunkturprogramm II für das Vorhaben „Einzelmaßnahmen zur Lärm- und Erschütterungsminderung am Fahrweg“.

⁵⁰ Thompson, D. (2008) "Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control". Elsevier.

Minderungsmaßnahme auch nur räumlich verschoben werden kann. Kurvenkreischen kann zu bestimmten Zeiten und unter bestimmten Bedingungen auftreten, die Amplitude kann variieren und die dominante Frequenz kann sich ändern. Während der Messungen dürfen die Schienen nicht nass sein. Derartige Messungen werden in Anlehnung an DIN EN 3095⁵¹ durchgeführt. Wegen des stochastischen Auftretens des Kurvenkreischen müssen die Ergebnisse über einen längeren Zeitraum gemittelt werden. Die Ergebnisse können als kumulative Pegel-Häufigkeits-Verteilung vor und nach dem Einbau einer Maßnahme zur Reduzierung des Kurvenkreischen dargestellt werden. Die folgende Abbildung 20 zeigt die ermittelten Maximalpegel (bandgefiltert im Bereich 2 kHz bis 10 kHz) auf der Berliner Ringbahn vor und nach dem Einbau einer Schienenkopfkonditionieranlage^{42,50,51}.

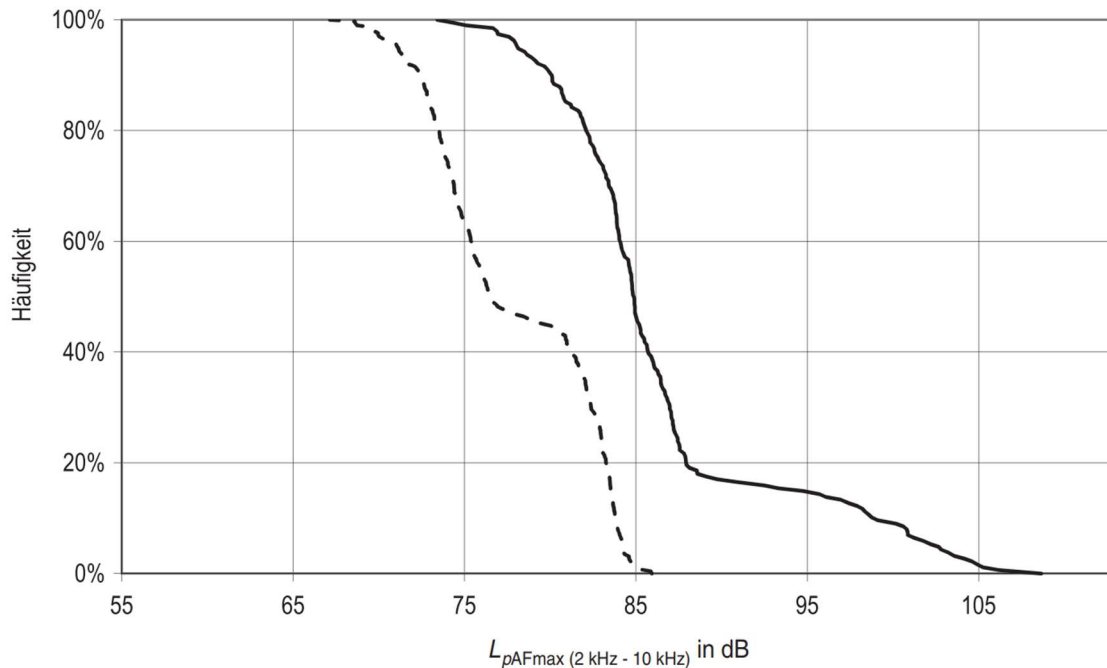


Abbildung 20: Kumulierte Pegelhäufigkeitsverteilung der im Frequenzbereich von 2 kHz bis 10 kHz gefilterten Pegel L_{pAFmax} , gemessen auf der Berliner Ringbahn für Geschwindigkeiten größer oder gleich 80 km/h: vor Einbau von Maßnahmen gegen Kurvenkreischen (volle Linie), nach Einbau von Maßnahmen gegen Kurvenkreischen (strichlierte Linie)^{42,49}

⁵¹ EN ISO 3095:2013 – Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen.

5.1.4 Verschleiß- und Schadensmechanismen im Rad/Schiene-Kontakt

Für die Vorhersage von verschlissenen Rad- und Schienenprofilen werden hauptsächlich zwei Ansätze verwendet: statistische und kontaktmechanische Verfahren. Beim statistischen Ansatz werden die Profilmessdaten eines bestimmten Fahrzeugtyps bei bestimmten Betriebsbedingungen verwendet, um die verschlissene Rad- oder Schienenprofilform vorherzusagen. Dies ermöglicht eine schnelle und genaue Vorhersage der Profilform. Sobald sich jedoch die Betriebsbedingungen ändern, werden die Profilverhersagen ungenau oder sogar unmöglich. Zur Vorhersage eines verschlissenen Profils mit der auf Kontaktmechanik basierenden Methode werden dynamische Mehrkörpersimulationen verwendet. Diese Methode ist rechenintensiv und erfordert mehrere, teilweise unbekannte Eingangsparameter. Der Vorteil dieser Methode ist jedoch, dass andere Fahrzeugtypen oder sich ändernde Betriebsbedingungen leicht berücksichtigt werden können. Durch die Kombination der beiden Ansätze können deren Vorteile genutzt werden, so dass eine schnelle, genaue und flexible Vorhersage der Profile möglich ist. Ein solcher Ansatz wird als "hybrider Ansatz" bezeichnet.

5.1.4.1 Statistischer Ansatz

Han und Zhang⁵² erstellten ein statistisch basiertes Modell zur Vorhersage von abgenutzten Radprofilformen. Die sogenannten Verschleißkurven wurden als vertikaler Abstand zwischen einem gemessenen verschlissenen Profil und einem neuen unverschlissenen Profil (Referenzprofil) berechnet, siehe Abbildung 21.

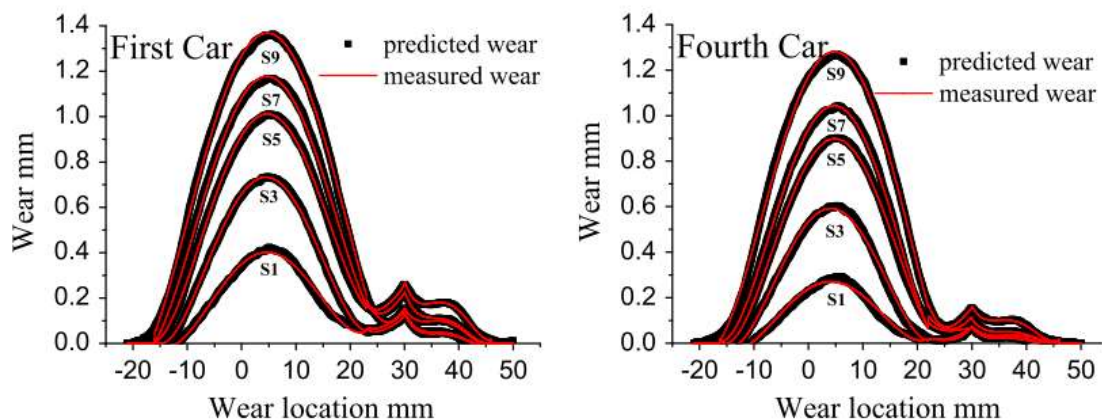


Abbildung 21: Gemessene Verschleißkurven und prognostizierte Verschleißkurven berechnet von Han und Zhang⁶²

Um eine neue Radprofilform zu prognostizieren, wurden zunächst Polynome an die gemessenen Verschleißkurven angepasst. Dann wurden die Koeffizienten der angepassten Polynome in Abhängigkeit von der Laufleistung der gemessenen Radprofile berechnet. Um eine neue Verschleißkurve zu berechnen, müssen dann die Koeffizienten des Polynoms bei einer bestimmten Laufleistung berechnet werden. Um eine neue Radprofilform zu erhalten, wird die berechnete Verschleißkurve zum Referenzprofil addiert. Die Validierungsergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt.

⁵² Han, P. and Zhang, W.H. (2015) "A new binary wheel wear prediction model based on statistical method and the demonstration," *Wear*, 324–325, pp. 90–99. Verfügbar auf doi: 10.1016/j.wear.2014.11.022.

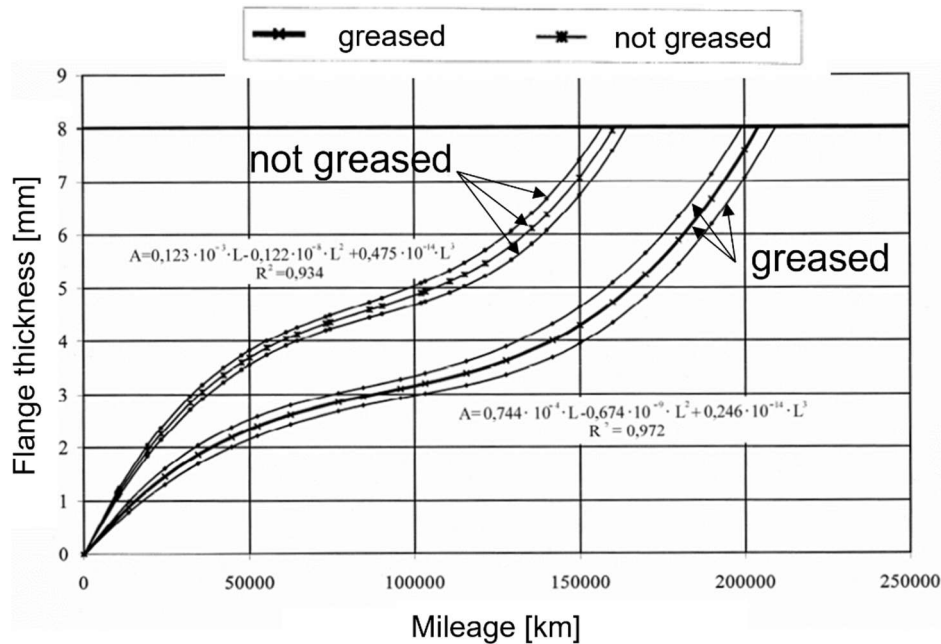


Abbildung 22: Validierungsergebnisse für die Spurkranzdicke ⁵³

Lingaitis et.al. ⁵³ untersuchten den Einfluss von Fett auf das Verschleißverhalten am Spurkranz. Ähnlich wie bei der Methode von Han und Zhang ⁵² wurden mathematische Funktionen durch den gemessenen Verschleiß am Spurkranz bis zu einer bestimmten Laufleistung gefittet. Die Validierungsergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt.

Beide Beispiele zeigen eine sehr gute Korrelation mit der Messung. Der Ansatz, mathematische Funktionen in die gemessenen Verschleiß über die Laufleistung, als Verschleißkurve, oder den an einer bestimmten Stelle des Rades gemessenen Verschleiß einzufügen, ermöglicht eine sehr schnelle Anwendung des Modells. Allerdings sind die Ergebnisse der Modelle nur für das Szenario anwendbar, in dem die Messungen durchgeführt wurden.

5.1.4.2 Kontaktmechanischer Ansatz

Der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz nutzt die dynamische Mehrkörpersimulation (MBD) und die lokale Rad/Schiene-Kontaktanalyse zur Berechnung der Kontaktparameter (Kontaktfläche, Schlupf, Kräfte) zwischen Rad und Schiene. Unter Verwendung der Kontaktparameter als Input für ein bestimmtes Verschleißmodell wird das Material an der Kontaktfläche abgetragen. Die aktualisierte Profilform wird als Eingabe für die MBD-Simulation der nächsten Schleife verwendet. Auf diese Weise wird die Entwicklung des Radprofils durch den auf der Kontaktmechanik basierenden Ansatz ermittelt, siehe Abbildung 23.

⁵³ Lingaitis, L.P., Mikalunas, S. and Podvezko, V. (2005) "Statisticheskije imitazionije prognoznije modeli ozenok iznosa bandazhej kolesnich par lokomotivof," Transp. Telecommun., 6(3), pp. 391–396.

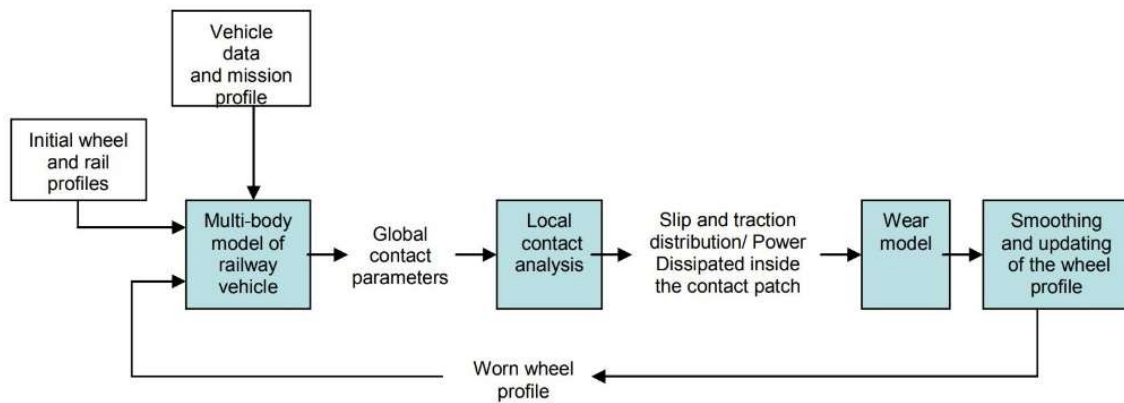


Abbildung 23: Kontaktmechanischer Ansatz – schleifenbasierte Methode ⁵⁴

Es gibt zwei häufig verwendete Verschleißmodelle, das Archard-Modell ^{55,56} und den $T\gamma$ -Ansatz ^{57,58}. Das Archard-Modell verwendet Last, Gleitweg, Härte und einen materialabhängigen Verschleißkoeffizienten zur Berechnung des Verschleißvolumens. Der $T\gamma$ -Ansatz basiert auf dem Schlupf γ und der Kraftschlusskraft T . Vor kurzem wurde von Al-Maliki et al. ⁵⁹ ein neues Verschleißmodell auf der Grundlage der maximalen Kontaktschubspannung τ_{max} entwickelt. Das von Al-Maliki et al. erstellte Modell zeigt eine bessere Übereinstimmung mit dem gemessenen Verschleiß bei Verwendung der maximalen Kontaktschubspannung τ_{max} als mit der Verschleißzahl $T\gamma$.

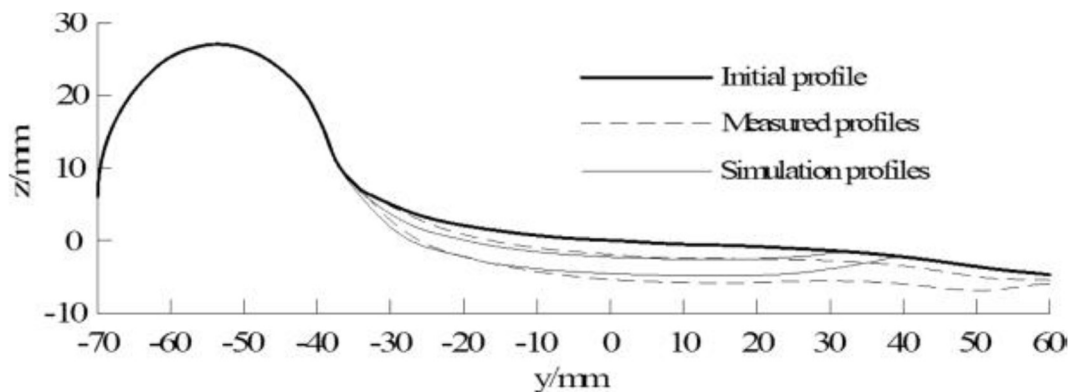


Abbildung 24: Validierungsergebnisse bei Verwendung eines kontaktmechanischen Ansatzes von Ding et al. ⁶⁰

⁵⁴ Braghin, F., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S. and Bruni, S. (2006) “A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear,” *Wear*, 261(11–12), pp. 1253–1264. Verfügbar auf doi: 10.1016/j.wear.2006.03.025.

⁵⁵ H. K. Jun, D. H. Lee, and D. S. Kim, “Calculation of minimum crack size for growth under rolling contact between wheel and rail,” *Wear*, vol. 344–345, pp. 46–57, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.wear.2015.10.013.

⁵⁶ R. Lewis et al., “Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 231, no. 7, pp. 760–774, Aug. 2017, doi: 10.1177/0954409717700531.

⁵⁷ R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce, “Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 218, no. 6, pp. 467–478, Jun. 2004, doi: 10.1243/1350650042794815.

⁵⁸ G. Pearce and N. D. Sherratt, “Prediction of wheel profile wear,” *Wear*, vol. 144, no. 1–2, pp. 343–351, Apr. 1991, doi: 10.1016/0043-1648(91)90025-P.

⁵⁹ H. Al-Maliki, A. Meierhofer, G. Trummer, R. Lewis, and K. Six, “A new approach for modelling mild and severe wear in wheel-rail contacts,” *Wear*, pp. 1–23, 2021.

⁶⁰ J. Ding, F. Li, Y. Huang, S. Sun, and L. Zhang, “Application of the semi-Hertzian method to the prediction of wheel wear in heavy haul freight car,” *Wear*, vol. 314, no. 1–2, pp. 104–110, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2013.11.052.

Ding et al. ⁶⁰ verwendeten eine auf der Kontaktmechanik basierende Methode zur Vorhersage der Form des abgenutzten Radprofils. Die in Abbildung 24 dargestellten Validierungsergebnisse stimmen im Allgemeinen gut mit dem gemessenen Profil überein, außer im äußeren Bereich des Rades $y > 27$ mm. In diesem Bereich weist das gemessene Radprofil noch Verschleiß auf, während das Simulationsergebnis dies nicht anzeigt. Die Autoren erklären diese Abweichung damit, dass die Weichen und die plastische Verformung im Modell nicht berücksichtigt wurden.

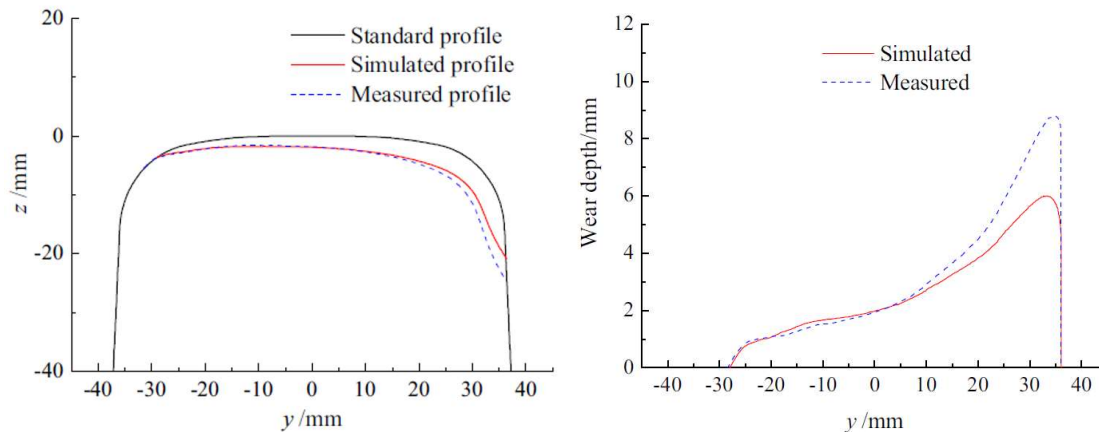


Abbildung 25: Validierungsergebnisse unter Anwendung der Kontaktmechanik nach Li et al. ⁶¹

Die auf der Kontaktmechanik basierende Methode wurde auch von Li et al. ⁶¹ für die Vorhersage von verschlissenen Schienenprofilen verwendet, siehe Abbildung 25. Die Validierungsergebnisse sind vergleichbar mit den dargestellten Ergebnissen. Das simulierte Profil korreliert gut mit dem gemessenen mit Ausnahme des äußeren Bereichs des Profils $y > 15$ mm. Die Autoren erklären diese Abweichung mit der Nichtberücksichtigung des Einflusses verschiedener Faktoren wie der plastischen Verformung.

Beide Studien zeigen, dass die Ergebnisse des auf der Kontaktmechanik basierenden Ansatzes teilweise gut mit den Messungen korrelieren. Die Autoren erklären die Abweichungen durch die Nichtberücksichtigung verschiedener globaler Kontaktparameter.

5.1.4.3 Hybrider Ansatz

Der hybride Ansatz zur Vorhersage verschlissener Profilformen kombiniert den statistischen und kontaktmechanischen Ansatz.

⁶¹ X. Li, T. Yang, J. Zhang, Y. Cao, Z. Wen, and X. Jin, "Rail wear on the curve of a heavy haul line—Numerical simulations and comparison with field measurements," *Wear*, vol. 366–367, pp. 131–138, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.06.024.

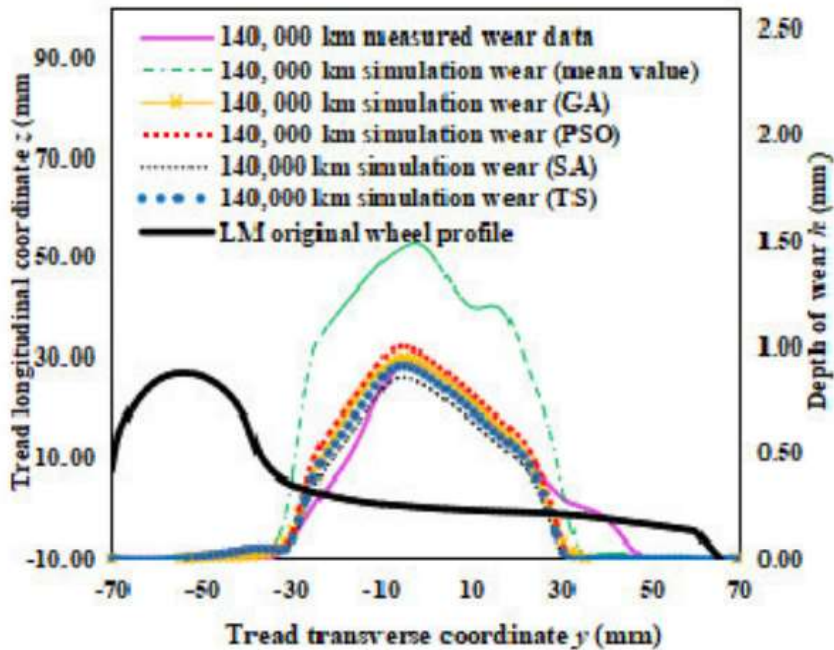


Abbildung 26: Validierungsergebnisse von Zhu et al. unter Verwendung eines hybriden Ansatzes⁶²

Die Validierungsergebnisse unter Verwendung des Hybridansatzes von Zhu et al.⁶² sind in Abbildung 26 dargestellt. Die Validierungsergebnisse ähneln den Ergebnissen von Ding et al.⁶⁰ und Li et al.⁶¹, bei denen die vorhergesagten Profile gut mit den gemessenen Profilen übereinstimmen, außer in den äußeren Bereichen des Rades.

Hartwich et al.⁶³ verwendeten ebenfalls den hybriden Ansatz zur Vorhersage von verschlissenen Radprofilformen. Die Autoren berechneten Durchschnittskurven der Verschleißkurven ähnlicher Verschleißstufen, die so genannten Verschleißzustände, siehe Abbildung 27. Eine neue Verschleißkurve wird durch Interpolation einer Kurve zwischen den Verschleißzuständen berechnet, wobei die Verschleißfläche als Eingabeparameter dient.

⁶² Zhu, A. et al., “Research on Prediction of Metro Wheel Wear Based on Integrated Data-Model-Driven Approach,” IEEE Access, vol. 7, pp. 178153–178166, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950391.

⁶³ D. Hartwich et al., “A new hybrid approach to predict worn wheel profile shapes,” Vch. Syst. Dyn., 2021.

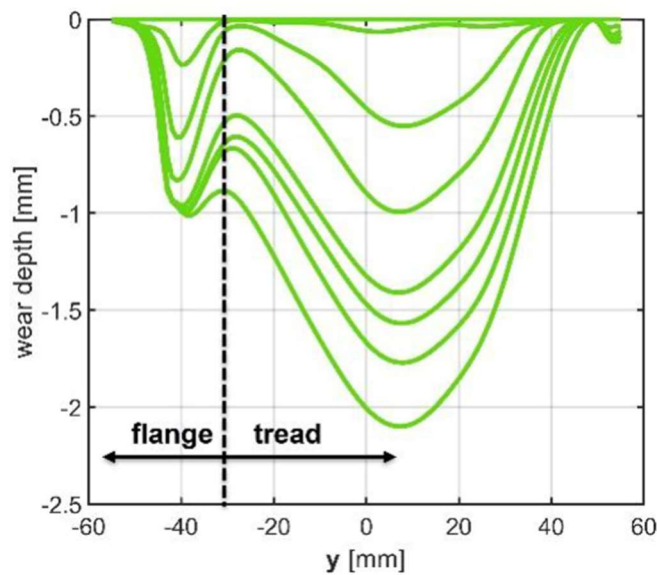


Abbildung 27: Verschleißzustände ⁶³

Aufgrund des gemessenen linearen Verschleißverhaltens (Verschleißfläche über die Laufleistung) kann die Verschleißfläche bei einer bestimmten Laufleistung für das Szenario, in dem die Messungen durchgeführt wurden, leicht berechnet werden. Zur Bestimmung der Verschleißrate für ein neues Betriebsszenario muss die gemessene Verschleißrate mit dem Verhältnis der Verschleißmaße ($T\gamma$, τ_{max}) für das neue Szenario und das Szenario, in dem die Messungen durchgeführt wurden, multipliziert werden, siehe Gleichung 3.

$$k_s = k_m \frac{P_s}{P_m} \quad \text{Gleichung 3}$$

k_s : Verschleißrate neues Szenario
 k_m : Gemessene Verschleißrate
 P_s : Verschleißmaße für neues Szenario
 P_m : Verschleißmaße für gemessenes Szenario

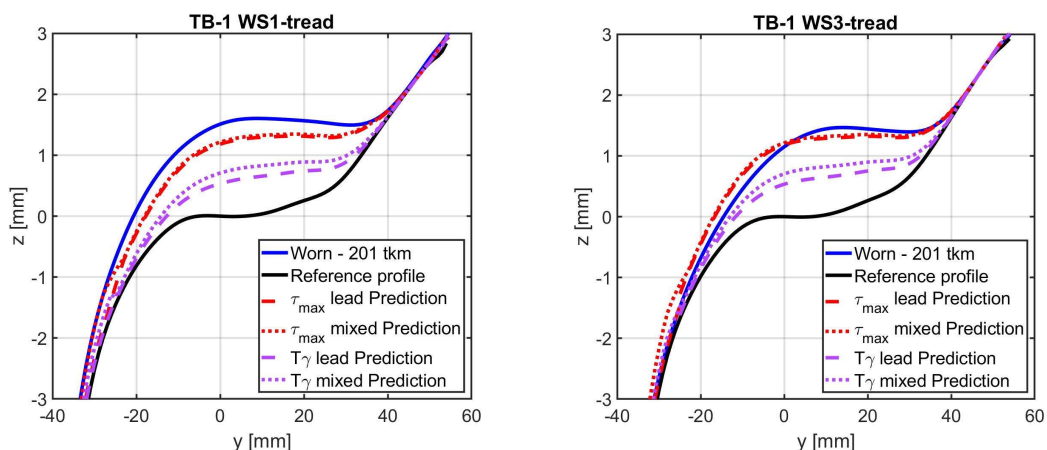


Abbildung 28: Validierungsergebnisse von Hartwich et al. ⁶³ mit Hilfe des Hybridansatzes

Die von Hartwich et al. ⁶³ prognostizierten Radprofilformen sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Ergebnisse korrelieren besser mit den Messungen, wenn der τ_{max} -basierte Ansatz verwendet wird als der $T\gamma$ -Ansatz. Dies bestätigt, dass das Verschleißverhalten bei Verwendung von τ_{max}

besser vorhergesagt werden kann als bei Verwendung des $T\gamma$ -basierten Modells, wie in der Arbeit von Al-Maliki et al.⁵⁹ dargestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der statistisch basierte Ansatz die abgenutzten Profilformen gut vorhersagt, aber nicht auf neue Szenarien angewendet werden kann. Der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz lässt sich auf verschiedene Szenarien anwenden, liefert aber keine sehr genauen Ergebnisse entlang der gesamten Profilform. Der hybride Ansatz ist weniger genau als der statistische Ansatz, aber andererseits genauer als der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz. Darüber hinaus liegt der Vorteil des hybriden Ansatzes in seiner Anwendbarkeit auf alle Szenarien und in seiner Berechnungseffizienz.

5.1.5 Modellierung und Simulation

5.1.5.1 Kraftschlusskräfte

Modelle beruhend auf Kraftschlusskräften sind äußerst nützlich für die Vorhersage und Simulation des Verhaltens der Eisenbahn und werden daher ständig verbessert und erweitert. Die erweiterten Modelle „Extended Creep Force“ (ECF) und „CONTACT“ sind in der Lage, die Auswirkungen von SKK-Mitteln zu modellieren. Es gibt auch das Popovici-Modell⁶⁴, das Schmierstoffe im Mischreibungsbereich modellieren kann. Es müssten jedoch Anpassungen vorgenommen werden, um feste Grenzflächenprodukte wie sie mit SKK gebildet werden können zu berücksichtigen.

Das CONTACT-Modell⁶⁵ beispielsweise war ursprünglich ein einfaches Halbraummodell, das jedoch erweitert und verbessert wurde, um auch Zwischenschichten (Schichten des dritten Körpers) einzubeziehen^{11,66}. In der Literatur werden Schlupfmodelle hauptsächlich auf der Grundlage von Grenzflächen- oder hydrodynamischen Schmierungstheorien entwickelt. Zu den Modellen, die hauptsächlich unter die Theorie der Grenzflächenschmierung fallen, gehören das CONTACT-Modell^{65,67}, das FASTSIM-Modell^{68,69} und das Polach-Modell^{70,71}. In jüngerer

⁶⁴ Popovici, R.I. (2010) “Friction in Wheel-Rail Contacts”. PhD thesis. Verfügbar auf <https://research.utwente.nl/en/publications/friction-in-wheel-rail-contacts>.

⁶⁵ Vollebregt, E.A.H. (2013) ‘Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT’, *Wear*, 314(1–2), pp. 87–95. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.030>.

⁶⁶ Six, K., Meierhofer, A., Müller, G. and Dietmaier, P. (2014) ‘Physical processes in wheel–rail contact and its implications on vehicle–track interaction’, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 53(5), pp. 635–650. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.983675>.

⁶⁷ Kalker, J.J. (1967) ‘On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction’.

⁶⁸ Kalker, J.J. (1982) ‘A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact’, <http://dx.doi.org/10.1080/00423118208968684>, 11(1), pp. 1–13. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423118208968684>.

⁶⁹ Spiriyagin, M., Polach, O. and Cole, C. (2013) ‘Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm’, <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>, 51(11), pp. 1765–1783. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>.

⁷⁰ Polach, O. (1999) ‘A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code’, <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063125>, 33(SUPPL.), pp. 728–739. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063125>.

⁷¹ Polach, O. (2005) ‘Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit’, *Wear*, 258(7–8), pp. 992–1000. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2004.03.046>.

Zeit wurde das ECF-Modell^{66,72,73,74} als Erweiterung des Tomberger-Modells⁷⁵ und des FASTSIM-Modells entwickelt, um die Auswirkungen von großem Schlupf und festen Grenzflächenschichten auf das Traktionsverhalten zu untersuchen^{76,77}. Dies ist jedoch nicht vollständig veröffentlicht, wurde aber mit Hilfe des Eisenbahnbetriebs validiert. Es integriert auch Eingaben von Hochdruck-Torsionstests (HPT), um das Verhalten der Schicht des dritten Körpers⁷⁸ zu charakterisieren. Es hat sich gezeigt, dass die Vorhersagequalität im Vergleich zu anderen Kraftschlusskraftmodellen verbessert wird^{11,66}.

Weitere Kraftschlusskraftmodellen, die die hydrodynamische Schmierungstheorie verwenden, sind das Chen-Modell^{79,80} sowie das bereits erwähnte Tomberger-Modell⁷⁵ und das Zhu-Modell⁸¹.

5.1.5.2 SKK, Schicht des dritten Körpers und Kontamination

Es gibt nur wenige Studien, die sich mit SKK-Produkten und Kontaminationsmodellen befassen haben. Die bemerkenswertesten Modelle werden in diesem Abschnitt zusammen mit einigen Forschungsarbeiten erörtert, die sich mit der Schicht des dritten Körpers beschäftigen.

In einer Studie von Meierhofer et al.⁸² wurden experimentelle Ergebnisse vom Doppelscheibenprüfstand verwendet, um ein Modell zu parametrisieren, das eine Schicht des dritten Körpers einschließt. Für eine maximale Hertzsche Pressung von 1500 MPa und einen Schlupf von 5 % bei 0,5 m/s wurde eine maximale Schichtdicke des dritten Körpers von 50 µm ermittelt. Diese Schicht war dünner und zeigte viele Risse, als die Pressung auf 900 MPa gesenkt wurde. Auf dieser Grundlage wurde ein analytisches Modell mit zwei Integralgleichungen vorgeschlagen. Ähnlich wie bei früheren Arbeiten von Hou et al. wird die Drittkörperschicht durch eine bilineare Charakteristik charakterisiert^{82,83}. Das Modell, das die Eigenschaften des dritten Körpers berücksichtigt, zeigte eine höhere Genauigkeit im Vergleich

⁷² R. A. Allen and R. P. Reiff, "Track Lubrication: Its Application and Potential for Reducing Fuel Consumption.," *Transp. Res. Rec.*, pp. 48–58, 1985.

⁷³ R. Reiff and D. Creggor, "Systems Approach to Best Practice for Wheel and Rail Friction Control", *Int. Heavy Haul Conf.*, 1999.

⁷⁴ Meierhofer, A. (2015) 'A new wheel-rail creep force model based on elasto-plastic third body layers'.

⁷⁵ Tomberger, C. et al. (2011) 'Friction in wheel-rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature', *Wear*, 271(1–2), pp. 2–12. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2010.10.025>.

⁷⁶ Buckley-Johnstone, L., Lewis, R., Six, K., and Trummer, G. (2015) 'T1077: Modelling & quantifying the influence of water on wheel/rail adhesion levels', London, UK.

⁷⁷ L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick, and R. Stock, "Assessment of Friction modifiers performance using Two Different Laboratory Test-Rigs," in *The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016, pp. 1–16.

⁷⁸ M. D. Evans, R. Lewis, C. Hardwick, A. Meierhofer, and K. Six, "High Pressure Torsion testing of the Wheel/Rail Interface," in *Proceedings of 10th international conference on contact mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 2015.

⁷⁹ Chen, H. et al. (2002) 'Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact', *Wear*, 253(1–2), pp. 75–81. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00085-6).

⁸⁰ Chen, H., Ishida, M. and Nakahara, T. (2005) 'Analysis of adhesion under wet conditions for three-dimensional contact considering surface roughness', *Wear*, 258(7–8), pp. 1209–1216. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2004.03.031>.

⁸¹ Zhu, Y., Olofsson, U. and Söderberg, A. (2013) 'Adhesion modeling in the wheel-rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces', *Tribology International*, 61, pp. 1–10. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2012.11.022>.

⁸² Meierhofer, A. et al. (2014) 'Third body layer-experimental results and a model describing its influence on the traction coefficient', *Wear*, 314(1–2), pp. 148–154. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.040>.

⁸³ Hou, K., Kalousek, J. and Magel, E. (1997) 'Rheological model of solid layer in rolling contact', *Wear*, 211(1), pp. 134–140. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00097-5).

zu Modellen ohne diese Schicht, wie z. B. die exakte Theorie von Kalker für Linienkontakt. Abbildung 29 zeigt die Genauigkeit des Modells zusammen mit dem experimentellen und dem Modell ohne dritten Körper in vier verschiedenen Szenarien.

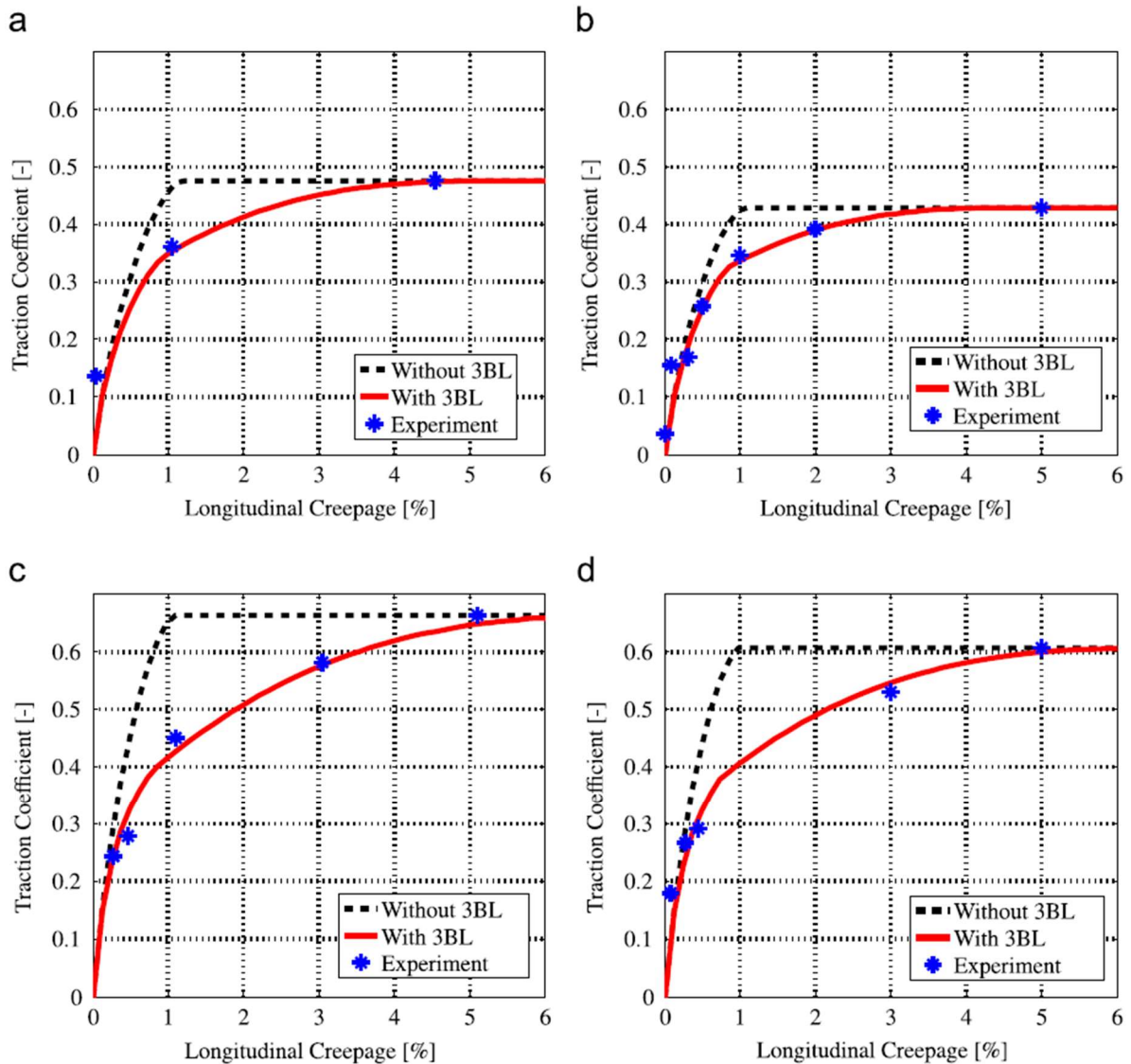


Abbildung 29: Vergleich zwischen dem Modell mit und ohne die Eigenschaften der Schicht des dritten Körpers (3BL) und den Versuchsergebnissen für vier Szenarien.

- a) $p_0 = 1500 \text{ MPa}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, b) $p_0 = 1500 \text{ MPa}$, $v = 1 \text{ m/s}$, c) $p_0 = 900 \text{ MPa}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$,
d) $p_0 = 900 \text{ MPa}$, $v = 1 \text{ m/s}$ ⁸²

Wie im vorangegangenen Abschnitt 5.1.5.1 erwähnt, verwenden einige Modelle die hydrodynamische Theorie, die auf SKK-Produkte und dem Vorhandensein von Verunreinigungen wie Wasser anwendbar ist. Wenn man davon ausgeht, dass der hydrodynamische Effekt die Reibung im System beeinflusst, ist zu berücksichtigen, dass dieser Effekt mit zunehmender Relativgeschwindigkeit an Bedeutung gewinnt.

In einigen Studien, die sich auf die Wasserverschmutzung von Schienen konzentrierten, entwickelten Chen et al. ein Modell, bei dem davon ausgegangen wird, dass ein Teil der normalen Belastung durch die Rauheitsspitzen im Kontakt und ein Teil durch den hydrodynamischen Film getragen wird. Aufgrund dieser Annahme wird der Oberflächenkontakt dem Grenzschmierbereich zugeordnet, während der hydrodynamische Filmkontakt dem hydrodynamischen Bereich zugeordnet wird. In ihrem Modell wurde der

Reibungskoeffizient für den hydrodynamischen Film mit Hilfe von Gleichungen zur Vorhersage der Filmdicke und dem Newtonschen Viskositätsgesetz berechnet^{79,80,84,85}.

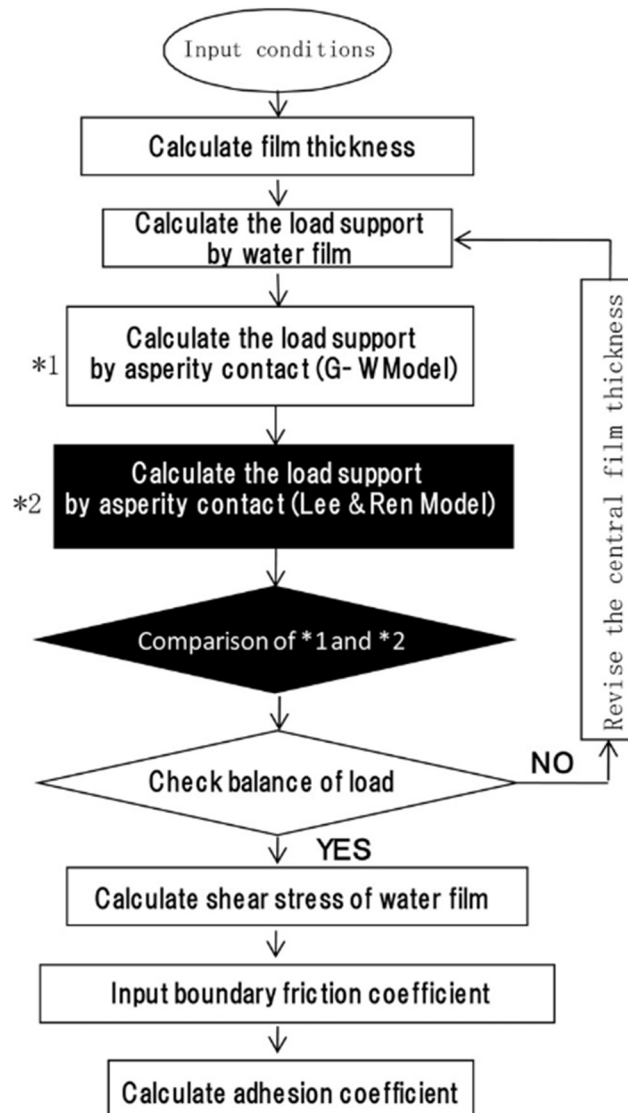


Abbildung 30: Flussdiagramm für die Berechnung des Adhäsionskoeffizienten⁸⁶

Abbildung 30 zeigt das Flussdiagramm für die Berechnung des Adhäsionskoeffizienten, das im Modell von Chen et al. verwendet wurde. Es sei angemerkt, dass das Modell von Greenwood und Williamson⁸⁷ für den Kontakt mit der Oberfläche bei niedriger Kontaktpressung verwendet wurde, während das Modell von Lee und Ren für die Berechnungen bei hoher

⁸⁴ Chen, H. et al. (2008) 'Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions', *Wear*, 265(9–10), pp. 1504–1511. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2008.02.034>.

⁸⁵ Chen, H. et al. (2016) 'Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness', *Wear*, 366–367, pp. 303–309. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.05.012>.

⁸⁶ Chen, H. et al. (2011) 'Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area', *Wear*, 271(1–2), pp. 32–39. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2010.10.022>.

⁸⁷ Greenwood, J.A. and Tripp, J.H. (1970) 'The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces', http://dx.doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02, pp. 625–633. Verfügbar auf: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02.

Kontaktpressung verwendet wurde, da das Modell von Lee und Ren bei niedrigem Anpressdruck nicht so genau ist ⁸⁶.

In derselben Studie wurde gezeigt, dass eine genaue Berechnung des Grenzreibungskoeffizienten wichtig ist, wie in Abbildung 31 dargestellt.

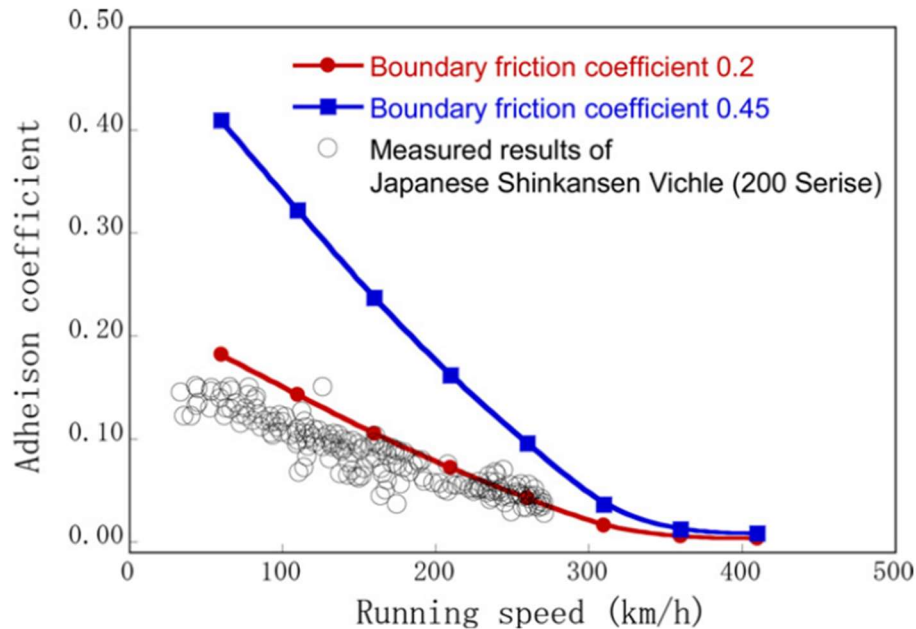


Abbildung 31: Vergleich von Grenzreibungskoeffizienten aus Ergebnissen mit Modellen und Experimenten ⁸⁶

In einer Studie von Allotta et al. ⁸⁸, wurde ein Modell auf der Grundlage des Polach-Modells entwickelt, bei dem der Schwerpunkt auf der Verschlechterung der Adhäsion und der Wiederherstellung der Adhäsion im Rad/Schiene-Kontakt lag. Eine andere Studie befasste sich mit der Auswirkung unterschiedlicher Längsschlupfe auf das Adhäsionsniveau bei ölverschmutzten Bedingungen an einem Straßenbahnrad ⁸⁹. In der Untersuchung von Voltr und Lata wurde der Übergang vom ölverschmutzten zum trockenen Zustand in Abhängigkeit von der spezifischen dissipierten Arbeit über ein Zeitintervall modelliert, während die Änderung des Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von der zeitlichen Ableitung der Schlupfgeschwindigkeit modelliert wurde.

In einer anderen Studie, die wasser- und ölverschmutzte Bedingungen untersuchte, wurde die Reynolds-Gleichung verwendet, um die Filmdicke abzuschätzen. Der Oberflächenkontakt wurde mit Hilfe des Modells von Greenwood und Tripp berechnet ^{87,90}. Dies wurde dann weiter verbessert, indem das von Zhao et al. vorgeschlagene ZMC-Modell für den fortgeschrittenen Kontakt bezüglich Unebenheiten verwendet und auch die Finite-Elemente-Analyse eingesetzt

⁸⁸ Allotta, B. et al. (2014) 'Development of an innovative wheel-rail contact model for the analysis of degraded adhesion in railway systems', *Tribology International*, 69, pp. 128–140. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2013.09.013>.

⁸⁹ Voltr, P. and Lata, M. (2014) 'Transient wheel-rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding', *Wear*, 314(5), pp. 605–618. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.961488>.

⁹⁰ Wu, B. et al. (2014) 'Numerical analysis on wheel/rail adhesion under mixed contamination of oil and water with surface roughness', *Wear*, 314(1–2), pp. 140–147. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.041>.

wurde, um die plastische Verformung der Rauheitsspitzen an der Oberfläche zu berücksichtigen^{90,91,92}.

Im Jahr 2021 haben Vollebregt et al.⁹³ die Herausforderungen und Fortschritte bei der Modellierung der Rad/Schiene-Interaktion untersucht und das transiente Verhalten des Reibungskoeffizienten festgestellt.

In einer weiteren aktuellen Studie konnten Trummer et al.⁹⁴ ein Modell zur Vorhersage der Entwicklung des Reibungskoeffizienten im Eisenbahnbetrieb für SKK-Produkte vorstellen. Das Modell basierte auf den Mechanismen, wie sich das SKK-Produkt, in diesem Fall auf Wasserbasis, auf einer Schienenoberfläche ausbreitet wie sich dies auf den Reibungskoeffizienten auswirkt. Die Mechanismen, die hierbei im Mittelpunkt standen die Übertragung des SKK-Produkts von der Schiene zum Rad und umgekehrt entlang der Schiene und das Produktverbrauchsverhalten.

Ebenfalls im Jahr 2021 stellten Kvarda et al.⁹⁵ ein Modell mit einem anderen Ansatz zur Vorhersage der Reibung im Rad/Schiene-Kontakt vor. Die Verwendung des FASTSIM-Modells ermöglichte eine Lösung ohne die Verwendung von festen Werten für die Reibung zwischen Rauheitsspitzen, die als wichtiger Faktor im Rad/Schiene-Kontakt angesehen wurde, da die tatsächliche Reibung im Kontakt nur schwer mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen ist. In der Studie zeigte sich, dass das Modell trotz steigender Geschwindigkeit eine angemessene Genauigkeit im Vergleich zu den gemessenen Daten aufwies. Es ist jedoch anzumerken, dass es in dieser Studie eine Reihe von Einschränkungen gab, über die berichtet wurde und die weitere Arbeit erfordern.

5.1.5.3 Oberflächenrauheit

Im Jahr 2002 stellten Ertz und Bucher⁹⁶ ein Modell vor, das die Auswirkungen der Oberflächenrauheit und der Temperatur auf der Basis des nichtlinearen Kraftschlusskraftgesetzes von Shen-Hedrick-Elkins berücksichtigt^{96,97}. Wie Abbildung 32 entnommen werden kann, liefert das Modell von Ertz und Bucher eine genauere Lösung, die eine allmähliche Zunahme des Adhäsionskoeffizienten im ersten Teil der Traktionskurve und

⁹¹ Zhao, Y., Maietta, D.M. and Chang, L. (2000) 'An Asperity Microcontact Model Incorporating the Transition From Elastic Deformation to Fully Plastic Flow'. Verfügbar auf: http://asmedigitalcollection.asme.org/tribology/article-pdf/122/1/86/5822840/86_1.pdf (Accessed: 7 September 2022).

⁹² Wu, B. et al. (2016) 'Analysis on thermal effect on high-speed wheel/rail adhesion under interfacial contamination using a three-dimensional model with surface roughness', *Wear*, 366–367, pp. 95–104. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.06.002>.

⁹³ Vollebregt, E., Six, K. and Polach, O. (2021) 'Challenges and progress in the understanding and modelling of the wheel–rail creep forces', *Vehicle System Dynamics*, 59(7), pp. 1026–1068. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1912367/FORMAT/EPUB>.

⁹⁴ Trummer, G. et al. (2021) 'Modelling of Frictional Conditions in the Wheel–Rail Interface Due to Application of Top-of-Rail Products', *Lubricants* 2021, Vol. 9, Page 100, 9(10), p. 100. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS9100100>.

⁹⁵ Kvarda, D. et al. (2021) 'Asperity-based model for prediction of traction in water-contaminated wheel-rail contact', *Tribology International*, 157. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.106900>.

⁹⁶ Ertz, M. and Bucher, F. (2002) 'Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Improved Creep Force Model for Wheel/Rail Contact Considering Roughness and Temperature Improved Creep Force Model for Wheel/Rail Contact Considering Roughness and Temperature', *Vehicle System Dynamics Supplement*, 37, pp. 314–325. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666242>.

⁹⁷ Shen, Z.Y., Hedrick, J.K. and Elkins, J.A. (1983) 'A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis', <http://dx.doi.org/10.1080/00423118308968725>, 12(1–3), pp. 79–83. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423118308968725>.

eine Abnahme nach der Sättigung zeigt. Der Haupteinfluss der Rauheit ist das Verhältnis zwischen der realen Kontaktfläche bedingt durch die Rauheitsspitzen und der nominalen Kontaktfläche; das Verhältnis der realen und nominalen Kontaktfläche wird auch als Parameter in die anfängliche Berechnung der Reibungskräfte einbezogen.

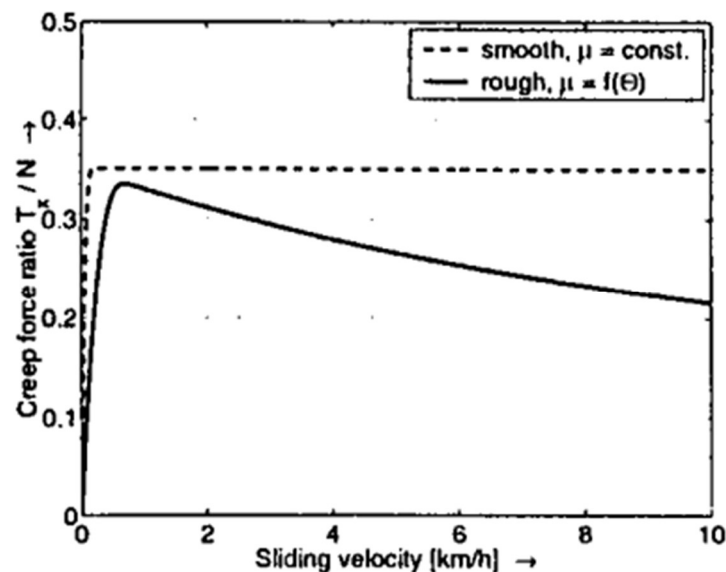


Abbildung 32: Vergleich zwischen glattem und rauem Oberflächenmodell bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v = 30 \text{ km/h}$ ⁹⁶

Abbildung 33 zeigt zum Vergleich das Modell ⁹⁶ für verschiedene Rauheiten, wobei der Anstieg des Adäsionskoeffizienten bei geringem Schlupf weniger steil ist. Der Rückgang des Adhäsionskoeffizienten bei hohem Schlupf kann mit dem Anstieg der Kontakttemperatur aufgrund der erzeugten Reibungswärme in Verbindung gebracht werden. Aus diesem Grund wurde ein temperaturabhängiger Reibungskoeffizient in die Berechnung aufgenommen, indem eine analytische Schätzung der durchschnittlichen Kontakttemperatur verwendet wurde. Dieses Modell ist für Längs- und Querschleif anwendbar und basiert auf dem physikalischen Phänomen von Rauheit und Temperatur.

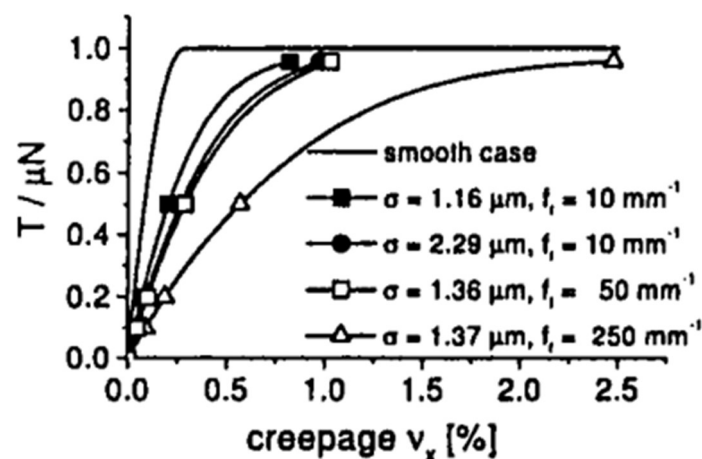


Abbildung 33: Vergleich der Traktionskurve für verschiedene Rauheiten ⁹⁶

5.1.5.4 Verschleiß

Eine der einfachsten Möglichkeiten zur Modellierung der Verschleißeffekte wäre die Verwendung des $T\gamma$ -Ansatzes⁹⁸. Bei dieser Methode werden Verschleiß und Ermüdung in einem einzigen Parameter kombiniert, der als Schädigung bezeichnet wird. Die Methode stützt sich auch auf Korrelationen zwischen bestimmten $T\gamma$ -Zahlen und dem Verschleiß-/Ermüdungsverhalten im Gleis, was z. B. bei der Einführung neuer Schienenstähle oft ein Problem darstellen kann. Die Verschleißzahl ist repräsentativ für die in der Kontaktfläche verbrauchte Energie, unterscheidet aber nicht zwischen verschiedenen Energieformen (Verschleiß, Wärme, Lärm, usw.). Die Verschleißkoeffizienten beruhen auf experimentellen Daten aus Roll-/Gleitversuchen, die für trockene Kontakte gut erforscht sind, aber es gibt inzwischen auch einige Versuche mit nassen, kontaminierten Kontakten⁹⁹. Für den Einfluss von SKK-Produkten auf den Verschleiß gibt es jedoch nur wenige experimentelle Daten. Eine Arbeit, die Daten über den Einfluss von SKK aus erstellt hat⁷⁷, hat Daten sowohl für kleine Doppelscheibentests als auch für Full-Scale-Tests veröffentlicht¹¹.

5.1.6 Reibungsmanagement der inneren und/oder äußeren Schiene

Es ist keine Literatur zum Thema unterschiedliches Reibungsmanagement auf der inneren und äusseren Schiene verfügbar. In den bisherigen Kapiteln bezieht sich das Reibungsmanagement immer zu gleichen Teilen auf die innere und äussere Schiene.

5.2 Lokalisierung des nicht vorhandenem Wissens in Modul 1.1 (Lieferobjekt 1.1.2)

Die meisten Erkenntnisse über die Wechselwirkung von SKK und SKS zwischen Rad und Schiene beziehen sich auf die Normalspur. Der Grad der Übertragbarkeit der Erkenntnisse von der Normalspur auf die Meterspur muss daher noch erarbeitet werden.

Es gibt Hypothesen über die Wirkungsmechanismen von SKK und SKS. Es besteht jedoch ein Bedarf an validierten Wirkungsmechanismen. Dies betrifft sowohl Normalspur als auch Meterspur. Diese Validierung wird erschwert durch die zahlreichen Einflussfaktoren, die Adhäsions- und Reibungsbedingungen im Rad/Schiene-Kontakt bestimmen.

Außerdem gibt es allgemeine bzw. qualitative, aber keine quantitativen Beschreibungen der Faktoren, die die Leistung von SKK und SKS beeinflussen, z. B. Temperatur und Wasser. Dies betrifft sowohl Normalspur als auch Meterspur.

Es gibt keine Normen und Richtlinien, die sich eindeutig mit den Anforderungen an SKK und SKS für die Anwendung in der Meterspur befassen.

Messmethoden für die tribologische Bewertung (Reibung) von SKK und SKS existieren entlang der gesamten Prüfkette. Allerdings handelt es sich dabei in der Regel um Einzelmethoden, die eine globale Leistungsdarstellung von SKK und SKS erschweren. Darüber hinaus fehlt die Übertragbarkeit von Prüfmethoden und -ergebnissen von der Normalspur auf die Meterspur.

⁹⁸ C. Hardwick, R. Lewis, and D. T. Eadie, "Wheel and rail wear—Understanding the effects of water and grease," *Wear*, vol. 314, no. 1–2, pp. 198–204, Jun. 2014.

⁹⁹ C. Hardwick, R. Lewis, and D. T. Eadie, "Wheel and rail wear-Understanding the effects of water and grease," *Wear*, vol. 313, no. 5–6, pp. 19–24, 2013.

Der hybride Ansatz zur Abschätzung des Verschleißes von Rad und Schiene hat Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit auf verschiedene Szenarien und der Berechnungseffizienz. Für die Anwendung auf der Meterspurbahn muss eine Analyse des Verschleißes in engen Kurven durchgeführt werden, um das Modell auf diese Betriebsbedingungen zu übertragen. Auch die Interaktion mit SKK und SKS muss untersucht und in das Modell oder andere geeignete Modelle implementiert werden.

Eine genaue Bestimmung und Modellierung des Bereichs der fallenden Reibungscharakteristik des Adhäsionskoeffizienten ist zwingend erforderlich, um das Kurvenkreischen gut zu beschreiben. Messungen der fallenden Reibungscharakteristik bei realen Bedingungen sind schwierig. In der Literatur finden sich zahlreiche Annäherungen an die Traktionskurve. Der Ansatz von Kalker ist für den stationären Zustand gültig, aber es gibt keine Theorien für den dynamischen Schlupf. Die Literatur befasst sich hauptsächlich mit der Normalspur oder Straßenbahnen. Ein Zeitbereichsmodell zum Kurvenkreischen, das für Anwendungen mit 1 m Spurweite ausreichend repräsentativ ist, ist erforderlich. Dieses Modell ist zwingend erforderlich, um anschließend Maßnahmen zur Schadensbegrenzung zu entwickeln.

5.3 Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.1

Generell sind für ein gemeinsames Verständnis klare Definitionen erforderlich: Dies gilt z.B. für die Begriffe Adhäsion, Traktion und Reibung, die in Veröffentlichungen scheinbar ohne Differenzierung verwendet werden. Ein Dokument zur Erklärung der Begriffe und deren Unterschiede wird empfohlen, um das Wissen von Personen im Eisenbahnbetrieb und Forschung auf den gleichen Stand zu heben.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Kurvenkreischen hängt hauptsächlich vom Verhältnis zwischen dem Radius des Gleisbogens und dem Radstand des Drehgestells ab. Der Schlupf in der Rad/Schiene-Kontaktfläche verursacht einen Stick-Slip-Effekt, der zu einer Instabilität des Adhäsionskoeffizienten führt. Diese Instabilität führt zu einer Anregung der Schwingungsmoden des Rades. Auch die Modenkopplung zwischen den Moden des Rades spielt eine geringere aber nicht zu vernachlässigende Rolle. In der Folge gibt das Rad Kreisschgeräusche ab, wobei die Schallabgabe der Schiene vernachlässigbar ist. Das Auftreten von Kurvenkreischen ist eher chaotisch als deterministisch, es kann bei demselben Fahrzeug an demselben Ort zu verschiedenen Tageszeiten auftreten oder auch nicht. Typische Abhilfemaßnahmen sind das Hinzufügen von Dämpfungselementen an den Rädern oder die Anwendung einer optimierten Schmierung im Rad/Schiene-Kontakt. Für die Entwicklung solcher Abhilfemaßnahmen können Messungen auf Doppelscheibenprüfständen verwendet werden.

Der statistische Ansatz sagt die verschlissenen Profilformen gut voraus, kann aber nicht auf neue Szenarien angewendet werden. Der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz ist auf verschiedene Szenarien anwendbar, liefert aber keine sehr genauen Ergebnisse über die gesamte Profilform. Der hybride Ansatz ist weniger genau als der statistische Ansatz, aber andererseits genauer als der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz. Darüber hinaus liegt der Vorteil des hybriden Ansatzes in der Anwendbarkeit auf alle Szenarien und in der Berechnungseffizienz.

6 Überblick über Produkte (Modul 1.2)

6.1 Auflistung und Bewertung (pro/contra) der heute in der Schweiz und im Ausland erhältlichen SKK- und SKS-Produkte (Lieferobjekt 1.2.1)

6.1.1 SKK- und SKS-Produkte

Die Zusammenstellung der SKK- und SKS-Produkte erfolgte auf der Grundlage einer Marktrecherche im Internet. Sie ergab insgesamt 175 Produkte von 50 Herstellern. Die vollständige Produktliste ist als Excel-Liste in Appendix 1 verfügbar.

TOR-FM and FL products	Number	Mode of use	Number
Igralub	16	Top-of-railfriction modifier	43
Fuchs Lubritech	14	Flange lubricant	127
LB Foster	13	Both	10
Whitmore	12	?	7
Lubcon	11	Mode of application	Number
RS Clare	10	on-board	40
Bechem	9	wayside	51
Loram	6	Hi-Rail & wayside	3
Shell	6	on-board & wayside	15
Cico	6	on-board/Hi-Rail & wayside	2
Kompressol	6	?	64
LubeSense	4	Benefits	Number
Elpa	4	Noise reduction	56
Elm	4	Wear reduction	136
Brugarolas	4	Environmental	Number
Rhenus Lub	4	Biological degradability	107
Klüber	3	Any kind of ecolabel	19
Railmark	3	EU ecolabel	8
Others	40		

Tabelle 4: Übersicht über die SKK- und SKS-Produkte hinsichtlich Hersteller, Verwendungsart und Anwendungen, Vorteile und Umwelteigenschaften in Datenblättern

Die Auswertung von Datenblättern und anderen Informationen, die über SKK und SKS zur Verfügung stehen, ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Die meisten Hersteller, die über eine breitere Produktpalette verfügen, sind in Europa ansässig (Igralub, Fuchs Lubritech, Lubcon). LB Foster und Whitmore haben ihren Hauptsitz in den USA. Die meisten Produkte werden für die Spurkranzschmierung angeboten. Die Art der Anwendung – fahrzeugseitig (on-board) oder am schienenseitig – ist ausgewogen, sofern eindeutige Informationen darüber verfügbar sind. Bei etwa einem Drittel der Produkte bleibt der genaue Anwendungsbereich jedoch unklar.

Während die Verschleißminderung bei etwa 80 % der Produkte als Hauptvorteil angegeben wird, sind Informationen zur Geräuschkinderung weniger verfügbar (etwa 30 % der Produkte). Hinsichtlich der Reibungswerte, die mit einem SKK oder SKS erreicht werden können, werden nur für etwa 5 % der Produkte Werte angegeben. Die Werte für die Reibung von Produkten, die eindeutig als SKK definiert sind, reichen von 0,18 bis 0,42, angegeben für 7 Produkte. Reibungskoeffizienten werden nur für 3 SKS angegeben, die von 0,065 bis 0,33 reichen. In allen Fällen gibt es keine Informationen über das Messverfahren und die Messparameter.

Die Reichweite der eindeutig als SKK bezeichneten Produkte beträgt 100 bis 200 m (Igralub) im Falle der On-Board-Anwendung, während für die schienenseitige Applikation Werte bis zu 8 Meilen (LB Foster) angegeben werden. Alle Angaben zu SKS beziehen sich sowohl auf streckenseitige als auch auf Hi-Rail- und streckenseitige Anwendungen und reichen von 3000 m (Igralub) bis 8 Meilen (Whitmore). Über die Bestimmungsmethode liegen keine Informationen vor.

Die biologische Abbaubarkeit wird für etwa 60 % der Produkte angegeben, aber nur etwa 10 % sind nach einer Art von Umweltzeichen zertifiziert, nur 5 % verfügen über das EU-Umweltzeichen¹⁰⁰. Obwohl die Umweltzeichen eine Vielzahl von Tests umfassen, die bestanden werden müssen, wie z.B. toxikologische Tests, beschränken sich die Produktinformationen auf die biologische Abbaubarkeit.

6.1.2 Leistung von SKK und SKS

Siehe Kapitel 7.1.4.

6.1.3 Umweltverträglichkeit von SKK und SKS

Es gibt eine Reihe von Gesetzen, die den Umgang mit Chemikalien regeln, z.B. die Lagerung und die Entsorgung betreffend. Die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung¹⁰¹ (ChemRRV) enthält umfassende Bestimmungen für

- bestimmte Stoffe und
- Gruppen von Zubereitungen und Gegenständen.

Im Allgemeinen sind SKK und SKS nicht negativ von den Vorschriften betroffen, mit Ausnahme von Produkten, die Alkylphenole und Biozide enthalten können. Eine Auflistung und Bewertung der Anhänge der ChemRRV im Hinblick auf die möglichen Komponenten in SKK und SKS ist als Excel-Liste verfügbar in Appendix 2.

Die biologische Abbaubarkeit (Bioabbaubarkeit) ist der wichtigste Parameter, der sich auf die Umweltverträglichkeit bezieht und für etwa 60 % der Produkte vorliegt (siehe Excel-Liste in Appendix 1 und Zusammenfassung in Tabelle 4). Da es verschiedene Methoden zur Bestimmung der biologischen Verträglichkeit gibt, wird in der Regel eine der in OECD 301¹⁰²

¹⁰⁰ EU Ecolabel, https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home_en, accessed on 31.10.2022

¹⁰¹ Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) vom 18. Mai 2005 (Stand am 23. Juni 2020)

¹⁰² OECD (1992), Test No. 301: Ready Biodegradability, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070349-en>.

beschriebenen Methoden verwendet. Trotzdem ist ein direkter Vergleich zwischen den Produkten schwierig.

Umweltzeichen bzw. Ökolabel wie das EU-Umweltzeichen¹⁰⁰ und der „Blaue Engel“¹⁰³ in Deutschland verlangen eine Reihe von Parametern zur Bestätigung der Umweltverträglichkeit. Die wichtigsten Parameter für biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikschmierstoffe¹⁰⁴ nach dem "Blauen Engel" sind:

- Keine Metalle und Metallverbindungen
 - außer Na/K/Mg/Ca & Li/Al in Verdickern
- Akute und/oder chronische Toxizität
 - Algentest (akut) OECD 201¹⁰⁵
 - Daphnientest (akut) OECD 202¹⁰⁶
 - Fischtest (akut) OECD 203¹⁰⁷, Fischembryotest¹⁰⁸
- Leichte oder inhärente biologische Abbaubarkeit
 - OECD 301¹⁰², OECD 302^{109,110,111}
- Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient
 - OECD 107¹¹²
- Biokonzentrationsfaktor
 - OECD 305¹¹³

Für den „Blauen Engel“ und das EU-Umweltzeichen gibt es eine Liste von Stoffen und Produkten, die die Kriterien des jeweiligen Umweltzeichens erfüllen. Für das EU-Umweltzeichen ist dies die LuSC-Liste (Lubricant Substance Classification List)¹¹⁴, die sowohl Stoffe als auch Grundöle und Additive enthält, die unter Markennamen vertrieben werden.

¹⁰³ Blauer Engel, <https://www.blauer-engel.de/de>, accessed on 31.10.2022.

¹⁰⁴ Blauer Engel, DE-UZ 178 „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“, <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/schmierstoffe-hydraulikfluessigkeiten-bis-12-2022>, accessed on 31.10.2022.

¹⁰⁵ OECD (2011) Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069923-en>.

¹⁰⁶ OECD (2004), Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>.

¹⁰⁷ OECD (2019), Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069961-en>.

¹⁰⁸ OECD (2013), Test No. 236: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264203709-en>.

¹⁰⁹ OECD (1981), Test No. 302A: Inherent Biodegradability: Modified SCAS Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070363-en>.

¹¹⁰ OECD (1992), Test No. 302B: Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/ EVPA Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070387-en>.

¹¹¹ OECD (2009), Test No. 302C: Inherent Biodegradability: Modified MITI Test (II), OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070400-en>.

¹¹² OECD (1995), Test No. 107: Partition Coefficient (n-octanol/water): Shake Flask Method, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 1, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069626-en>.

¹¹³ OECD (2012), Test No. 305: Bioaccumulation in Fish: Aqueous and Dietary Exposure, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264185296-en>.

¹¹⁴ Lubricant Substance Classification List (2022) <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/LuSC-list%20vs%2010012022.pdf>, accessed on 31.10.2022

EN 15427 und CEN/TS 15427, siehe ²⁹ bis ³⁴, enthalten Prüfungen zur Umweltverträglichkeit, haben aber nur informativen Wert. Die RTE 49410 ³⁸ hat eine Auswahl aus den im „Blauen Engel“ vorgeschriebenen Prüfungen getroffen, die die Verwendung bestimmter Schmierstoffchemien, Metalle und Metallverbindungen, Toxizität (Algen, Daphnien und Fische), biologische Abbaubarkeit, Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient und Biokonzentrationsfaktor umfassen. Informationen über Nanomaterialien werden nicht vom „Blauen Engel“, sondern von der R RTE 49410 gefordert. Es wird darauf hingewiesen, dass die in der R RTE 49410 angegebenen Schwellenwerte strenger sind als die im „Blauen Engel“. Der Vergleich zwischen „Blauem Engel“ und R RTE 49410 ist als Excel-Liste im Appendix 3 verfügbar.

6.1.4 Mögliche Wechselwirkungen bei der Vermischung von SKK und SKS

Die Vermischung von SKK und SKS kann auf der Grundlage der in Abbildung 6 dargestellten typischen Positionen auf zwei Arten erfolgen:

- SKS wird von der Schienenkopfflanke zur Schienenlaufläche getragen
- SKK wird von der Schienenlaufläche auf die Schienenkopfflanke verlagert

In der zugänglichen Literatur gibt es kaum qualitative oder quantitative Informationen über Vermischungseffekte von SKK und SKS, siehe in Abbildung 17 ²⁷. Es kann jedoch vermutet werden, dass die Verschleppung von SKS von der Schienenkopfflanke zur Schienenlaufläche kritischer ist als die Verschleppung von SKK in umgekehrter Richtung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für einen optimalen Einsatz von SKK ein bestimmter Bereich von Reibungskoeffizienten eingehalten werden muss, der ungefähr im Bereich von 0,2 bis 0,4 liegt, siehe Abbildung 8. Auf diese Weise lassen sich Geräusche und Verschleiß verringern, während die Bremswege eingehalten werden können. Schon geringe Mengen SKS auf der Schienenlaufläche können die Sicherheit durch verlängerte Bremswege beeinträchtigen. Andererseits würde die Zugabe von SKK auf der Schienenkopfflanke den Rad/Schiene-Kontakt verbessern, was insgesamt die Verwendung von SKS (Reibungskoeffizient deutlich unter 0,2) unterstützt, da zusätzlicher Schmierstoff (hier SKK) den Reibungskoeffizienten voraussichtlich weiter reduzieren wird.

6.2 Lokalisierung des nicht vorhandenen Wissens in Modul 1.2

Wenngleich eine große Anzahl von SKK- und SKS-Produkten verfügbar ist, ist kein direkter Leistungsvergleich auf Basis verfügbarer Datenblätter möglich, da Angaben zu den verwendeten Messmethoden und Messparametern fehlen.

Was die Umweltverträglichkeit betrifft, so beziehen sich die Normen und Prüfverfahren auf Stoffe, nicht aber auf Produkte, die in der Regel Gemische sind, wie z.B. SKK und SKS. Die Normen und technischen Spezifikationen der Reihe EN 15427 beziehen sich nur auf die biologische Abbaubarkeit, vernachlässigen aber andere wichtige Parameter, die die Umweltverträglichkeit beschreiben, wie etwa die Toxizität. Es gibt keine Norm oder Richtlinie, die sich speziell auf Schmierstoffe für Meterspurbahnen bezieht. Für die Erstellung einer R RTE für SKK und SKS in der Meterspur könnte auf R RTE 49410 aufgebaut werden. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass auch die R RTE 49410 keine Methoden oder Schwellenwerte für die Leistungsfähigkeit im Feld auf Basis von Labortests vorgibt.

Die genauen Mechanismen und Auswirkungen der Vermischung von SKK und SKS sind nicht bekannt.

6.3 Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.2

Die Marktrecherche zu SKK- und SKS-Produkten ergab etwa 170 Produkte von etwa 50 Herstellern. Die Art der Anwendung von On-Board- und streckenseitigen Systemen ist ausgewogen, jedoch bleibt die Art der Anwendung bei etwa einem Drittel der Produkte unklar.

Während die Verschleißminderung bei etwa 80 % der Produkte als Hauptvorteil angegeben wird, sind Informationen über die Geräuschminderung weniger verfügbar (etwa 30 % der Produkte). Die Reibungswerte, die eindeutig SKK- oder SKS-Produkten zugeordnet werden können (insgesamt 10), reichen von 0,18 bis 0,42 bzw. von 0,065 bis 0,33. Die Reichweite der eindeutig als SKK bezeichneten Produkte beträgt 100 bis 200 m (an Bord) bis zu 8 Meilen (am Straßenrand), während SKS von 3000 m bis zu 8 Meilen reichen kann. In allen Fällen werden keine Informationen über das Messverfahren und die Messparameter in Bezug auf Verschleiß, Reibung, Lärm und Reichweite gegeben. Dies macht einen Vergleich oder eine Auswahl nur auf der Grundlage der verfügbaren Informationen schwierig bis unmöglich. Diese Wissenslücke kann durch genau definierte Methoden sowohl im Labor als auch im Feld geschlossen werden.

Die biologische Abbaubarkeit ist für etwa 60 % der Produkte gegeben, aber nur etwa 10 % sind nach einer Art von Umweltzeichen zertifiziert, nur 5 % haben das EU-Umweltzeichen. Die Anforderung an die Umweltverträglichkeit lässt sich bei Produkten mit einem Umweltzeichen wie dem EU-Umweltzeichen und dem „Blauen Engel“ leichter erfüllen, wobei letzteres eng mit dem EU-Umweltzeichen verwandt ist. Bei Produkten mit unzureichenden Informationen, z.B. nur zur biologischen Abbaubarkeit, müssen weitere Nachweise als Entscheidungsgrundlage (Produktauswahl) erbracht werden.

Hinsichtlich der Vermischung von SKK und SKS ist kaum Wissen aus der Literatur verfügbar. Ergebnisse haben eine längere Wirkung von SKK gezeigt, wenn Fett beigemischt wurde.

7 Übersicht zur Applikation im Betrieb (Modul 1.3)

7.1 Auflistung und Bewertung (pro/contra) von Onboard-Systemen im nationalen und internationalen Einsatz (Lieferobjekt 1.3.1)

7.1.1 Fahrzeugseitige Applikationssysteme für SKK und SKS

Zur Entscheidung zwischen streckenseitiger und fahrzeugseitiger Anwendung stellt Reiff⁴⁰ fest: *"Die gewählte Einsatzmethode (stationär oder mobil) hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Aus Platzgründen können in diesem Bericht nicht alle Methoden im Detail erörtert werden, aber wenn bei einer Strecke die Kurvenbereiche gleichmäßig verteilt sind und sich diese nicht so sehr auf bestimmte Streckenbereiche konzentrieren, ist der Einsatz mobiler Systeme attraktiver. Wenn sich die Kurvenbereiche in bestimmten Streckenabschnitten konzentrieren und eng sind, wird der Einsatz von stationären Applikatoren attraktiver. Weitere zu untersuchenden Aspekte sind der Zugang zu streckenseitigen Applikatoren, Temperaturschwankungen, die Kapazität der Solarenergie [Ergänzung: zur autarken Energieversorgung], die Betriebsumgebung, der Verwendung von unterschiedlichen Lokomotiven, die Arbeitsvorschriften und die bisherigen Erfahrungen."*⁴⁰

Die Kompatibilität zwischen den unterschiedlichen Applikationsgeräten ist kompliziert und erfolgt oft auf der Basis von Versuchen. Daher sind Applikationsgeräte zumeist an eine eingeschränkte Anzahl von SKK oder SKS gebunden. Wenn ein SKK- oder SKS-Produkt ausgetauscht werden soll, sollte das Applikationsgerät gründlich gereinigt werden, um eine Produktvermischung zu vermeiden. SKK- und SKS-Produkte auf Ölbasis, die keine festen Partikel enthalten, können problemlos bei den Applikationsgeräten ausgetauscht werden. SKK- und SKS-Produkte, die jedoch feste Partikel enthalten, neigen zum Absetzen und zur Verstopfung des Applikationsgeräts. Die meisten Applikationsgeräte tragen die SKK-Produkte auf die Schiene auf, das REBS-System kann beispielsweise die SKS-Produkte auf den Spurkranz sprühen.

Die folgenden fahrzeugseitigen Anwendungssysteme sind verfügbar:

- Elpa (Slowenien)¹¹⁵
- Groeneveld-Beka (Deutschland)¹¹⁶
- Bijur Delimont International (USA)¹¹⁷
- LB Foster (USA)¹¹⁸
- REBS Zentralschmiertechnik (Germany)¹¹⁹
- SKF (and Lincoln automatic lubrication systems)¹²⁰

¹¹⁵ <https://elpa.si/on-board-devices/>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁶ <https://www.groeneveld-beka.com/us/systems/automatic-lubrication-systems/spray-lubrication/fluilub/>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁷ <https://www.bijurdelimon.com/automatic-lubrication/railway-lubrication.html>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁸ <https://www.lbfoster.com/en/market-segments/rail-technologies/friction-management/products-and-solutions/freight-solutions/on-board-top-of-rail-friction-management-for-freight>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁹ <https://www.rebs.de/en/solutions/railway-technology/wheel-flange-lubrication-wfl/>, accessed on 31.10.2022

¹²⁰ <https://www.skf.com/uk/industries/railways/products-and-services/lubrication-systems>, accessed on 31.10.2022

- TriboTec (Tschechische Republik) ¹²¹

7.1.2 Messmethoden für die Bewertung von SKK und SKS

Labortests werden häufig zur Bestimmung der SKK- SKS-Produktwirksamkeit eingesetzt. Zu den gewünschten Eigenschaften, die im folgenden Bericht näher erläutert werden, gehören:

- Reibungskoeffizient
- Verschleißverhalten durch SKK- und SKS-Produkte
- Verschleppen entlang der Schiene,
- Rückhaltevermögen

Einmal ermittelt, können diese Vergleichstests helfen, das am besten geeignete Produkt und die beste Anwendungsmethode für eine Rad/Schiene-Situation zu finden.

Unter „Versuch“ bzw. „Prüfkette“ wird im Rahmen der ÖNORM 8121-1 ¹²², ÖNORM 8121-3 ¹²³ und ÖNORM 8122 ¹²⁴ bei bestimmten Zielsetzungen ein experimenteller Versuch verstanden. Die Prüfkette umfasst mechanisch-dynamische Untersuchungen (Messungen, Experimente, usw.) mit Hilfe von Prüf- oder Messmitteln, insbesondere Tribometern, unterschiedlichen Abstraktionsgrades, den sogenannten Kategorien. Die Aussagekraft der Ergebnisse solcher Untersuchungen kann stark vom Abstraktionsgrad (Vereinfachungen und den Abweichungen von den Bedingungen einer praktischen Anwendung) abhängen. Im Sinne einer Orientierung an der „Brauchbarkeit“ tribologischer Lösungen (im wesentlichen definiert durch Konstruktion, Technologie, Materialauswahl tribologisch beanspruchter Bauteile) werden solche Untersuchungen in der Regel, aber nicht nur, aus wirtschaftlichen Gründen zunächst unter mehr oder weniger abstrahierenden Bedingungen durchgeführt. Anhand der sich daraus ergebenden „Ergebnisse“ wird eine Vorauswahl bzw. Abgrenzung von Varianten getroffen, die unter weniger abstrakten Bedingungen weiter untersucht werden. Hinsichtlich des Abstraktionsgrades werden grob sechs Kategorien (Kat. I bis VI) von tribometrologischen Untersuchungen unterschieden, wie in Abbildung 34 ¹²⁵ dargestellt:

Kat. I – Betriebliche Prüfung (Feldtest, Praxistest): Der komplette Versuch läuft unter (realen) Betriebsbedingungen. Systematische Untersuchungen des Betriebsverhaltens sind nur sehr schwer durchführbar, da sich u.a. das Belastungsspektrum und sich damit das Belastungsspektrum der Tribosystemkomponenten während der Testdauer verändern kann.

Kat. II – Prüfstandsversuch: Der originale Rad-Schienenkontakt mit originalen Aufbauten (Drehgestell, usw.) läuft im Testbetrieb unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen (z.B. Prüfstand, Testsystem). Innerhalb einer begrenzten Variationsbreite des Last-/Beanspruchungskollektiv können spezifische Parameterstudien durchgeführt werden.

Kat. III – Baugruppen- oder Komponentenprüfung: Baugruppen oder Komponenten aus dem Originalsystem werden definierten Belastungen unterworfen. Die Beanspruchungsbedingungen, die Messmöglichkeiten und die Praxisrelevanz gehen teilweise verloren, weil einige Elemente des Belastungsspektrums wegfallen bzw. sich verändern (z.B.

¹²¹ <https://railwaytechnology.tribotec.eu/>, accessed on 31.10.2022

¹²² ÖNORM 8121-1:1987 05 01 – Tribotechnik – tribologische Prüfung – Kategorien

¹²³ ÖNORM 8121-3:1994 03 01 – Tribotechnik – tribologische Prüfung – Verschleiß-Meßgrößen

¹²⁴ ÖNORM 8122:2017 08 01 – Tribotechnik – Prüfung von tribologischen Kontakten – Prüfprinzipien und Übersicht

¹²⁵ AC2T research GmbH (2022) Tribological test chain related to wheel-rail contacts

Schwingungsübertragungen, Wärmeleitverhältnisse, Feder-Masse-Relationen) oder als Ersatz für das Originalsystem angegeben werden. Die Erfassung oder Definition aus den Bedingungen des Originalsystems sind daher nur schwer oder gar nicht möglich ist. Dadurch sind absolute Lebensdaueruntersuchungen unter diesen Bedingungen kaum möglich, wohl aber ein relativer Vergleich mit einem bekannten Verhalten einer Originaleinheit.

Kat. IV – Modellversuch an maßstabsgetreu modifizierten Baugruppen oder Komponenten: Um die Handhabung zu vereinfachen, werden nicht Bauteile in Originalgröße verwendet, sondern maßstabsgetreue, funktionsgerechte Teile. Im Maschinenbau ist hier meist eine Verkleinerung sinnvoll. Das Belastungsspektrum wird natürlich dadurch verändert. Unterschiede zum Originalsystem liegen in der Wärmeabfuhr, der Schwingungsneigung und im Energieeintrag, ferner im „Abdeckungsgrad“ oder „Kontaktverhältnis“ der Kontaktflächen, im Verschleißabtrag sowie in den Fertigungsbedingungen der Probekörper. Aus diesem Grund können nur spezifische Parameterstudien durchgeführt werden, die die Einflüsse auf die Gesamtfunktion der übergeordneten Einheit aufzeigen.

Kat. V – Modellversuch mit vereinfachten Bauteilen (bauteilähnliche oder belastungsähnliche Probekörper): Für Modellversuche werden nur einzelne Bauteile aus dem Aggregat entnommen und in der Regel vereinfacht (z.B. Zahn oder Zahnsegment aus einem Zahnrad). Die Kontaktfläche oder die Eingriffsverhältnisse entsprechen nicht mehr dem Originalsystem. Parameterstudien sind zwar möglich, aber das Belastungsspektrum ist bereits relativ stark verändert.

Kat. VI – Modellversuch mit einfachsten Probekörpern: Bei solchen Untersuchungen werden die meist komplizierten Praxisanforderungen in elementare Grundvorgänge (z.B. Bewegungsform, Kraftverlauf) für Grundlagenstudien heruntergebrochen, um die Vorgänge im aktuellen Kontaktbereich realer Bauteile simulieren zu können. Bei der Prüfung mit einfachen Probekörpern sind die Parameter überschaubar und können leicht konstant gehalten, also kontrolliert, werden.


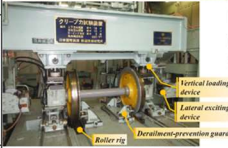



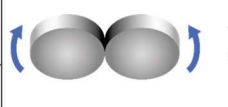

Category	Measuring and testing technology	Test parameters	Results	System, Assembly, Model
I	Operational test and tests similar to operational tests	Operational test	<ul style="list-style-type: none"> • Real axis load • Real acceleration and braking processes • Real dynamic driving loads • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Static or dynamic strength tests • Running tests • Coefficient of friction • Efficiency measurement • ...  <p>Mechanical measuring group @ ÖBB</p>
II		Test bench experiment	<ul style="list-style-type: none"> • Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • Real wheels and rail • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Wheel, rail wear • Coefficient of friction • ...  <p>Full scale test rig, wheel set @ RTRI Tokio</p>
III	Original system structure with simplified loads	Aggregate experiment	<ul style="list-style-type: none"> • Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • Small modification of the samples 	<ul style="list-style-type: none"> • Rad-, Schienenverschleiß • Coefficient of friction • ...  <p>Full scale test rig, one wheel @ Uni Sheffield</p>
IV		Component experiment	<ul style="list-style-type: none"> • Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • Samples taken from real parts • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...  <p>Wheel rail test rig @ TU Wien</p>
V	Model structure and simple loads	Sample experiment	<ul style="list-style-type: none"> • Normal force • Speed • Defined slip • Samples taken from real parts • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...  <p>Sample, component, model test rig, rail, wheel piece @ AC2T</p>
VI		Model experiment	<ul style="list-style-type: none"> • Normal force • Speed • Defined slip • Sample from real part, counter sample from harder materials • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...  <p>Two disc test rig @ AC2T</p>  <p>Pin on disc test rig @ AC2T</p>

Abbildung 34: Tribologische Prüfkette für den Rad/Schiene-Kontakt ¹²⁵

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steigt mit zunehmender Kategorie, da Fertigungstoleranzen und Montagefehler minimiert werden können. Die Kontaktflächenverhältnisse können sehr unterschiedlich zum Originalsystem sein. Ungünstige Wärmeabfuhrbedingungen, unterschiedliche Flächenpressungsverteilungen und veränderte Verschleißverhältnisse können zu deutlich abweichenden tribomechanischen oder tribochemischen Reaktionen führen und erhebliche Verfälschungen bei der Interpretation der Ergebnisse zur Folge haben. Der Aufwand zur Überprüfung der Übertragbarkeit auf den Betriebsfall steigt mit zunehmender Kategorie erheblich an, da zusätzliche Untersuchungsmethoden und Analysen angewendet werden müssen.

Die Wahl der geeigneten Prüfmethodik (= Kategorie) ist eine Abwägung zwischen vielen Faktoren wie Kosten, Komplexität und Kontrolle. In der Regel sind die einfachen Prüfstände in der Lage, im Vergleich zu komplexeren Methoden relativ kostengünstig und schnell Ergebnisse von vielen Proben als auch umfassenden Parametervariationen zu liefern, was trotzdem auf Kosten der genauen Abbildung des zu untersuchenden Systems geht.

Eine Erhöhung der Komplexität der Prüfmethodik auf repräsentative Prüfbedingungen führt nicht nur zu einem Anstieg der Kosten und des Zeitaufwands, sondern es geht auch die Kontrolle über die einzelnen untersuchten Parameter zunehmend verloren, wodurch auch hier eine Fehlerquelle in die Untersuchung eingebracht werden kann.

Bei der Prüfung von SKK- und SKS-Produkten werden regelmäßig verschiedene Arten von Laborprüfständen eingesetzt, die jeweils ihre spezifische Vorteile als auch Einschränkungen haben, siehe Tabelle 5. Am komplexesten sind Prüfstände in Originalgröße, die rotierende bzw.

unidirektionale oder lineare bzw. oszillierende Kontaktbedingungen abbilden können^{21,126,127}. Beide haben repräsentative Kontaktgrößen und sind nützlich für Skalierungsarbeiten und die Generierung von Daten für die Modellierung. Diese Prüfstände sind jedoch teuer und zeitaufwändig, und es stehen nur wenige Einrichtungen zur Verfügung, so dass sie sich nicht für ein standardisiertes Prüfprotokoll eignen. Bei der Bewertung von mehreren bzw. unterschiedlichen SKK- und SKS-Produkten kann es auch schwierig sein, den Prüfstand bei einem Wechsel zwischen den Versuchen komplett zu reinigen, was zu Problemen bei der Wiederholbarkeit führt.

Hochdruck-Torsionsprüfstände (HPT) haben ebenfalls eine realistische Kontaktgröße. Der HPT-Kontakt besteht aus Bereichen mit teilweisem Gleiten bei zunehmender Umdrehung, wodurch eine Traktionskurve erstellt werden kann. Der Vorteil des HPT-Aufbaus besteht darin, dass die Proben flach sind, was eine Anwendung von zusätzlichen dritten Körpern im Kontakt ermöglicht¹²⁸. Allerdings sind nur sehr wenige dieser Prüfeinrichtungen verfügbar.

Der Stift-Scheibe-Teststand ist auf Grund des sehr kleinen Gleitkontakts weitgehend ungeeignet, da das Produkt aus dem Kontakt herausgedrückt werden kann und es schwierig ist, die „richtige“ Produktmenge aufzutragen. Einige Arbeiten wurden erfolgreich durchgeführt, bei denen der Stift einen größeren Kontakt hatte und das "Gleiten" so eingestellt wurde, dass die Schlupfkomponente bei teilweise gleitenden Kontaktbedingungen¹²⁹ nachgestellt wurde. Für einen Standardtest wäre jedoch eine rollende Komponente vorzuziehen.

Mit Mini-Traktionsmaschinen (MTM)¹³⁰ können bei hohen Geschwindigkeiten Versuche mit einem über einen weiten Bereich variierenden Roll- bzw. Gleitkontakt durchgeführt werden. Die Kugel-auf-Scheibe-Geometrie führt jedoch noch immer dazu, dass SKK- und SKS-Produkte aus dem Kontakt herausgedrückt werden, was es schwierig macht, die wahre Produktmenge zu bestimmen. Dieser Teststand kann zur Untersuchung von ölbasierten homogenen Schmierstoffen wie bei SKS verwendet werden, wobei jedoch feste Partikel, sofern vorhanden, aus dem Kontakt gedrückt werden können.

Der Zweiseiben-Prüfstand wird regelmäßig eingesetzt, um das Verhalten von SKK-Produkten^{24,131} und SKS-Produkten^{17,98} zu beurteilen. Die beiden zylindrischen Scheiben sorgen für einen Linienkontakt. Zwar kann es bei großen Auftragsmengen immer noch zum Abschleudern des Produkts kommen, aber durch den breiteren Linienkontakt und die Rollbewegung des Doppelscheiben-Prüfstands ist es wahrscheinlicher, dass das Produkt während des Tests im Kontakt bleibt. Dies ist wichtig für die Beurteilung des Produktverbrauchs.

¹²⁶ L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick, and R. Stock (2019) "A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 233, no. 2, pp. 201–210.

¹²⁷ P. Boyacioglu, A. Bevan, P. Allen, B. Bryce, and S. Foulkes (2021) "Wheel wear performance assessment and model validation using Harold full scale test rig," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, pp. 1–12.

¹²⁸ M. Evans, W. A. Skipper, L. Buckley-Johnstone, A. Meierhofer, K. Six, and R. Lewis (2021) "The development of a high pressure torsion test methodology for simulating wheel/rail contacts," Tribol. Int., vol. 156, no. November 2020, p. 106842.

¹²⁹ S. R. Lewis, R. Lewis, U. Olofsson, D. T. Eadie, J. Cotter, and X. Lu (2012) "Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 227, no. 2, pp. 115–127.

¹³⁰ R. Galas, D. Kvarda, M. Omasta, I. Krupka, and M. Hartl (2018) "The role of constituents contained in water – based friction modifiers for top – of – rail application," Tribol. Int., vol. 117, no. April 2017, pp. 87–97.

¹³¹ D. V. Gutsulyak, L. J. E. Stanlake, and H. Qi, "Twin disc evaluation of third body materials in the wheel/rail interface," Tribol. - Mater. Surfaces Interfaces, vol. 15, no. 2, pp. 115–126, 2021.

Type of tests	Capabilities	Pros	Cons
Pin-on-disc ¹³²	Friction measurements	Higher speed than twin disc	Very small (circular) contact
	Load, speed		Solid particles pushed aside rather than entrained
Mini-Traction-machine ^{130,133}	Traction measurements	Higher speed than twin disc	Very small (circular) contact
	Load, speed, creep	Creep curves can be produced	Solid particles pushed aside rather than entrained
High pressure torsion ^{128,134}	Traction measurements	Realistic contact size and 3 rd body application	Very few facilities available
Twin disc ^{128,135}	Traction measurements	Better particle entrainment	Small contact (larger with larger test rigs)
	Load, speed, creep	Larger contact than pin-on disc/MTM Specimens often made from wheel/rail steel	Slow speed
Scaled wheel ¹³⁶	Visual	Realistic contact shape	Smaller contact than real wheel-rail
			No way of measuring friction
			Unrealistic load/speed
	Simple test methods	No creep control	
Full scale ^{17,135}	Traction measurements	Realistic contact shape	Slow
	Load, speed, creep	Realistic contact load	

Tabelle 5: Labortestmethoden

¹³² J. Sundh, U. Olofsson, and K. Sundvall, "Seizure and wear rate testing of wheel–rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology," *Wear*, vol. 265, no. 9–10, pp. 1425–1430, Oct. 2008.

¹³³ R. Galas, M. Omasta, M. Klapka, S. Kaewunruen, I. Krupka, and M. Hartl, "Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise," *Tribol. Ind.*, vol. 39, no. 2, pp. 198–206, 2017.

¹³⁴ M. Evans et al., "Top-of-Rail Friction Modifier Performance Assessment: High Pressure Torsion Testing; Creep Force Modelling and Field Validation," to be submitted.

¹³⁵ Trausmuth, A., Lebel, A., Ronai, B., Dörr, N. (November 2022) „SafeRail – Beurteilungsverfahren Schienenkopfkonditioniermittel, Ergebnisbericht“

¹³⁶ M. Harmon and R. Lewis, "New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 235, no. 2, pp. 191–200, 2021.

In Studien wurden die Unterschiede, d.h. der Maßstäbe bzw. Skalierungsgrad, zwischen den verschiedenen Prüfständen zur Übertragbarkeit untersucht, die bei der Bewertung von Rad/Schiene-Kontaktbedingungen verwendet werden. In einer kleinen Studie wurde gezeigt, dass es eine vernünftige Korrelation zwischen den Ergebnissen von Modellteststand wie Doppelscheiben-Prüfstand mit dem Full-Scale-Prüfstand gibt ^{137,138}.

Der Hochdruck-Torsionsprüfstand wurde zur Parametrisierung des ECF-Modells verwendet, das für genaue Vorhersagen im großen Maßstab genutzt wurde ¹²⁸.

Abbildung 35 stammt aus einer Arbeit, in der zwei verschiedene Prüfstände (Doppelscheiben- und Full-Scale-Prüfstand) verglichen wurden. ⁷⁷. Die Arbeit veranschaulicht, dass ein $T\gamma$ -Ansatz für den Vergleich verschiedener Prüfstände verwendet werden kann.

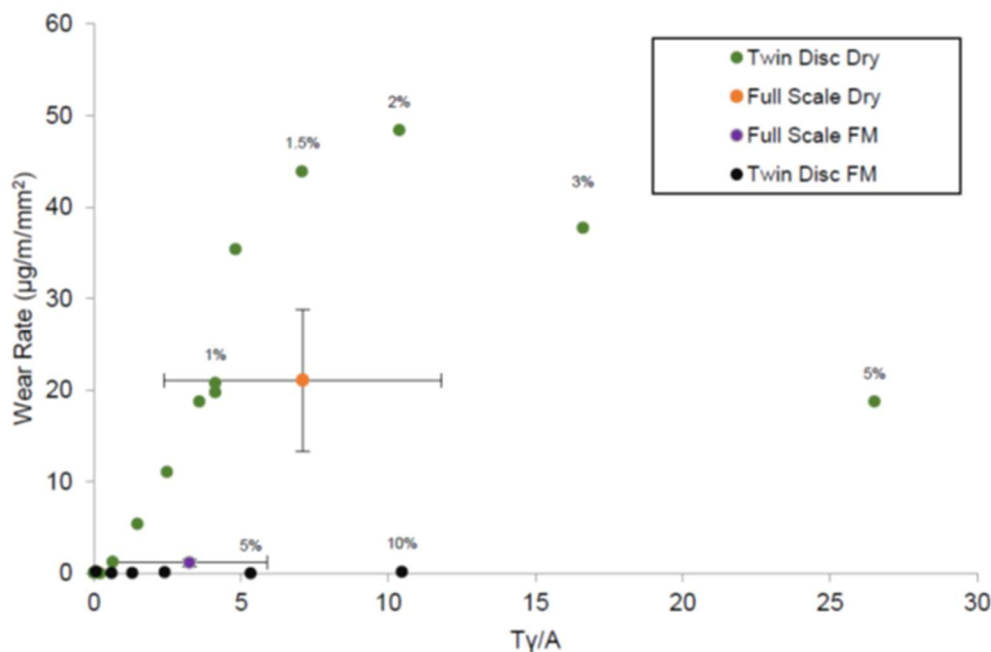


Abbildung 35: Vergleich der $T\gamma/A$ -Verschleißraten von Versuchen am Doppelscheiben- und Full-Scale-Prüfstand bei trockenen Bedingungen und mit SKK ⁷⁷

Es konnte gezeigt werden, dass Full-Scale-Versuche und Doppelscheiben-Versuche das selbe tribologische Verhalten bei verschiedenen Fette aufweisen. Dies zeigt, wenn auch die exakten Werte unterschiedlich sind, die Versuche am Doppelscheiben-Prüfstand verwertbare qualitative Daten liefern. In anderen Studien wurde ebenfalls festgestellt, dass zwar dieselben Tendenzen zu beobachten sind, die exakten Werte jedoch stark zwischen den Versuchen auf dem Full-Scale-Prüfstand und den tatsächlichen Feldversuchen ¹³⁹ abweichen können; dies könnte vor allem auf die mangelnde Kontrolle darüber zurückzuführen sein, wie z.B. die Schienenoberfläche bei Feldversuchen beschaffen ist. In einer Studie ²¹ wurde festgestellt, dass sich das verwendete SKS auf der Testschiene ablagert, was bei Feldbeobachtungen nicht festgestellt wurde. Dies verdeutlicht den Unterschied zwischen der Durchführung eines

¹³⁷ R. Lewis and U. Olofsson, "Mapping rail wear regimes and transitions," *Wear*, vol. 257, no. 7–8, pp. 721–729, 2004.

¹³⁸ M. Chestney, N. Dadkah, and D. T. Eadie, "The effect of top of rail friction control on a european passenger system: the Heathrow express experience," *Proc. 8th Int. Contact Mech. wear rail/wheel Syst. Conf.*, 2009.

¹³⁹ R. Stock, D. Eadie, and K. Oldknow, "Rail grade selection and friction management: a combined approach for optimising rail–wheel contact," *Ironmak. Steelmak.*, vol. 40, no. 2, pp. 108–114, Feb. 2013.

Versuches am Full-Scale-Prüfstand bei ähnlichen Kontakt- und Umgebungsbedingungen im Vergleich zu Feldversuchen.

7.1.3 Einflussfaktoren auf die Wirkung von SKK und SKS

Die Wirkung von Schmierstoffen im Allgemeinen und von SKK und SKS im Speziellen ist von einer Reihe von Faktoren abhängig, die im praktischen Einsatz die Wahl des SKK bzw. SKS, die aufzubringende Menge und die Aufbringungshäufigkeit beeinflussen. Aus heutiger Sicht ist eine bedarfsgerechte Anwendung von SKK und SKS anzustreben, da von einer dauerhaften gleichbleibenden Schmierwirkung von SKK bzw. SKS nicht ausgegangen werden kann.

Einige dieser Einflussfaktoren sind Bestandteil von Untersuchungen, z.B. Wasser/Feuchte, Temperatur. Siehe dazu Ausführungen im folgenden Abschnitt 7.1.4.

7.1.4 Verschleppungsreichweite bzw. Reichweite von SKK-Produkten

7.1.4.1 Verschleppungsreichweite

Die Verschleppungsreichweite ist definiert als die Entfernung von der Auftragseinheit bis zu dem Punkt, an dem die tribologischen Vorteile des SKK-Produktes nicht mehr nachweisbar sind ¹⁴⁰.

In einer Studie wurde auf einer schwedischen Güterbahnlinie ein stationärer Applikator für SKK eingesetzt ¹⁴¹. An mehreren Stellen bei einer Teststrecke wurden mit in ein Lösungsmittel getauchte Wattestäbchen Proben entnommen und eine EDX-Elementanalyse durchgeführt, um das Vorhandensein des SKK-Produkts zu überprüfen und die Verschleppungsreichweite zu bestimmen (siehe Tabelle 6) ¹⁴², wobei die beiden getesteten Produkte zwischen 70 m und 450 m im Kontaktbereich lagen. Das Produkt wurde bis zu 3 km weiter getragen, indem es am Rad außerhalb des Kontaktbandes haften blieb. Jedoch trat es auf dieser Teststrecke nicht wieder in den Kontakt ein, so dass keine Produktvorteile aufgezeigt werden konnten. Ein Wiedereintritt des Produkts in den Kontakt kann bei kurvenreicheren Strecken vorkommen.

In einer anderen Arbeit wurde ein laserinduzierter Fluoreszenzfarbstoff in das SKK-Produkt gemischt ¹⁴⁰. Dabei wurde festgestellt, dass das Produkt auf geraden Gleisen bis zu 200 m vom streckenseitigen Applikator entfernt auf der Schiene nachgewiesen wurde. Bei gebogenen Gleisen konnte das Produkt bis zu 2 km entlang der Strecke gefunden werden.

Nahezu alle Arbeiten wurden mit streckenseitigen Applikatoren und nicht fahrzeugseitig durchgeführt. Viele Studien befassen sich mit dem Produkt, das direkt auf die Schiene aufgetragen wurde. Aber auch Produkte die auf das Rad aufgetragen werden, können wichtig sein, da es beim Passieren einer Kurve wieder in den Kontakt kommen kann ¹⁴³.

¹⁴⁰ H. Rahmani, D. Gutsulyak, L. Stanlake, B. Stoeber, and S. Green, "Carrydown of liquid friction modifier," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, p. 095440972210762, 2022.

¹⁴¹ S. A. Khan, J. Lundberg, and C. Stenström, "Carry distance of top-of-rail friction modifiers," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 232, no. 10, pp. 2418–2430, 2018.

¹⁴² J. Lundberg, "Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions," Wear, vol. 324–325, pp. 109–117, 2014.

¹⁴³ Z. S. Lee, M. Harmon, B. White, G. Trummer, K. Six, and R. Lewis, "Studying the Transfer Mechanisms of Top-of-Rail Products in a Wheel/Rail Interaction," To be Submitt., 2022.

Source	Position of sample collection	Carry distance (m)	
		FM-A	FM-B
Manufacturer's claim		3200–6400	5000
When supplied continuously by the stationary equipment	Top of rail	70	450
When applied once manually	Top of rail	65	320
	Wheel's running surface	>3000	>3000
	Wheel's contact band	100	340

Tabelle 6: Verschleppungs-Eigenschaften von zwei Arten von SKK-Produkten

7.1.4.2 Remanenz bzw. Rückhaltevermögen

Die Remanenz bzw. Rückhaltevermögen ist ein Maß für die Zeit (oder die Anzahl der Raddurchgänge oder mgt), in der der Schmierstoff seine Schmierfähigkeit beibehalten kann. Ein Schmierfett beispielsweise, das unter Grenzschmierungsbedingungen arbeitet, kann die Oberflächen von Rad und Schiene nur teilweise voneinander trennen. Die einzelnen mikroskopisch kleinen Erhebungen auf jeder Oberfläche – die so genannten Rauheitsspitzen – sind miteinander verbunden. Die dabei auftretende Reibungswärme kann zu einer „Abbrandtemperatur“ führen (mehrere Hundert °C). Blitztemperaturen von 600 bis 800 °C sind typisch für Rad/Schienen-Kontakte. Der Schmierstoff wird an diesen mikroskopisch kleinen heißen Stellen verbraucht, er wird buchstäblich „verbrannt“. Sobald der gesamte Schmierstoff verbraucht ist, steigt der Reibungskoeffizient schnell von einem „Schmierfähigkeits“-Reibungskoeffizienten von 0,05-0,1 auf einen „Trockenschmierungs“-Reibungskoeffizienten von etwa 0,6.

Die Remanenz ist eine Funktion von Last und Schlupf. Labortests zeigen, dass das Rückhaltevermögen mit zunehmender Last und zunehmendem seitlichen Schlupf (Anlaufwinkel) abnimmt. In der Praxis bedeutet dies, dass beladene Züge viel schneller Schmierstoff verbrauchen („verbrennen“) als leere Züge, und dass enge Kurven deutlich schneller Schmierstoff verbrauchen als weite Kurven¹⁴⁴. Dies legt die Vermutung dazu, dass die Meterspur aufgrund der extremeren Kontaktbedingungen den Schmierstoff schneller verbraucht bzw. „verbrennt“ als die Normalspur und zeigt auf, wo künftige Forschungsarbeiten durchgeführt werden sollten.

Das Rückhaltevermögen eines SKS mit zwei verschiedenen Mengen und zwei verschiedenen Rauheitswerten (glatt und rau) wurde mit einem Doppelscheiben-Prüfstand bewertet Abbildung 36¹⁷, wobei die rauere Oberfläche das SKS-Produkt mit einer höheren Rate verbraucht. Dies kann auf die Mitnahme von SKS-Produkt in die Oberflächenrauigkeiten zurückgeführt werden und ist ein Schlüsselfaktor bei der Skalierung zwischen Labor- und Feldversuchen.

¹⁴⁴ H. Tournay, „Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues,” Int. heavy Haul Assoc., p. 484, 2001.

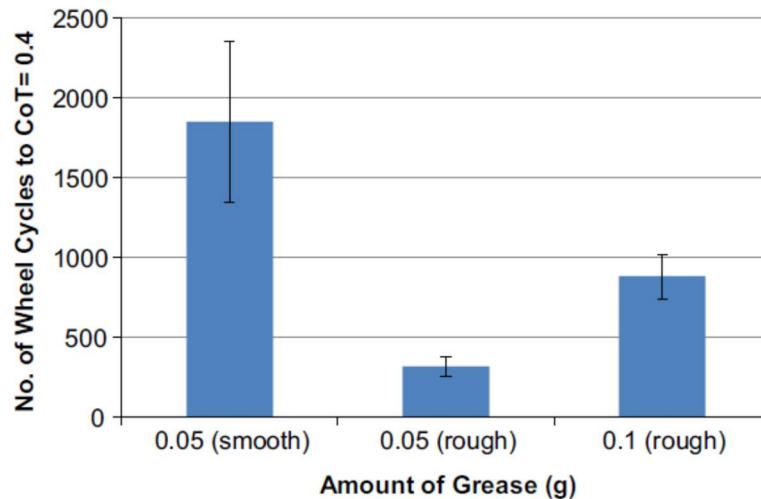


Abbildung 36: Rückhaltevermögen in Abhängigkeit von der Fett-Menge ¹⁷

7.1.4.3 Energieverbrauch

Studien zum Energieverbrauch beim Einsatz von SKK Produkten haben sich weitgehend auf den nordamerikanischen Güterverkehr konzentriert, wo bei schweren Zügen und bei großen Entfernungen diese zu großen Einsparungen an Kraftstoff führen können.

Tournay et al. berichten in den „Guidelines to best practices to heavy haul railway operations, 2001“ über Energieeinsparungen nach dem Einsatz der streckenseitigen Schienenschmierung, obwohl die Originalzitate von älteren Konferenzen stammen und daher schwer zu finden sind.

DeKoker ¹⁴⁵ berichtet über Tests in Spoornet in Südafrika, bei denen nachgewiesen wurde, dass 51 % weniger Energie benötigt wird, um eine Kurve mit einem Radius von 8,7 Grad (200 m) zu durchfahren. Des Weiteren verbrauchen Züge auf der Richards Bay Coal Line 28 % weniger Energie und die Lebensdauer konnte um den Faktor 6 verlängert werden.

Reiff ⁷³ berichtete über die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs um 30 % bei großzügiger Schmierung im Vergleich zu trockenen (nichtgeschmierten) Bedingungen. Die Association of American Railroads (AAR) entwickelte eine Methode zur Messung des Zugwiderstands eines Autozugs auf einem kurvenreichen Testgelände. Allen und Reiff berichteten überdies über erhebliche Kraftstoffeinsparungen auf kurvenreichen Strecken ⁷² (Tabelle 7 und Tabelle 8).

Rucinski ¹⁴⁶ von Queensland Rail berichtete über Energieeinsparungen auf Schmalspur-Kohlebahnen von 4,3 % bei beladenen Zügen und 1,4 % bei leeren Zügen.

FAST Section	Energy Savings due to Lubrication (%)
Tangent	30
Curved	
Three degrees	36
Four degrees	39
Five degrees	51

¹⁴⁵ J.DeKoker, “Rail and Wheel Flange Lubrication,” South African Perm. W. Inst., 1993.

¹⁴⁶ J.Rucinski and J.Powell, “Assessment of Wheel and Rail Lubrication Strategies at Queensland Rail.”

Tabelle 7: Energieeinsparungen bei Kurven⁷²

System	Fuel Efficiency (gal/MGT ^a)	Savings over Dry (%)
Dry track	6,000	–
Lubricated by wayside lubricator	4,100	32
Lubricator car (simulated for one train in four equipped); graphite grease	4,800	20
Hyrailer System (operated once every 30 to 35 trains)	5,500	8
On-board locomotive system (two locomotives equipped, modified for American use)	5,140	14

Note: Data for 80-car train, 45 mph, four locomotives on 4.8-mi loop, 56 percent curved track of 5, 4, and 3-degree curves. Baseline data: overlubricated by wayside systems; one trackside lubricator every 2.5 mi.

^aMillion gross tons.

Tabelle 8: Energieeinsparungen bei verschiedenen Schmierungsstrategien⁷²

7.1.4.4 Verschleiß und Rollkontaktermüdung

Der Verschleiß eines Werkstoffs hängt vom Tribosystem als Ganzes ab. Zu diesem System gehören nicht nur die Materialeigenschaften und die Belastungen, denen der Kontakt ausgesetzt ist, sondern auch andere Faktoren wie die Umgebungsbedingungen und die Verschmutzung des Kontakts. Verschleiß kann durch eine Reihe verschiedener Mechanismen entstehen, wobei die Hauptmechanismen, die zu Verschleiß im Rad-Schiene-Kontakt führen können, folgende sind:

Der Kontakt bei einem offenes System bedeutet, dass reichlich Sauerstoff vorhanden ist, der oxidativen Verschleiß verursacht. Die Verschmutzung durch harte, feste Partikel wie Sand kann zu abrasivem Verschleiß führen. Thermischer Verschleiß entsteht durch den Temperaturanstieg, der durch die Reibung im Kontakt verursacht wird. Dadurch kann der Verschleiß von anderen Mechanismen erhöht werden, da es zu einer Verringerung der Härte kommt.

Es können Verschleißkarten für einen Werkstoff erstellt werden, die bei der Analyse von Verschleißdaten helfen. Die Kennfelder werden in der Regel anhand von Schlupf oder Kontaktpressung definiert. Sie werden hauptsächlich dazu verwendet, weitere Testbereiche zu definieren, da die zur Erstellung verwendeten Daten in der Regel begrenzt sind. Abbildung 37 zeigt eine Verschleißkarte mit überlagerten typischen Kontaktbedingungen. Ebenfalls zeigt Abbildung 37, dass der Kontakt zwischen Schienenkopfflanke und Spurkranz zu einem stärkeren Verschleiß führt, was mit den Beobachtungen vor Ort übereinstimmt.

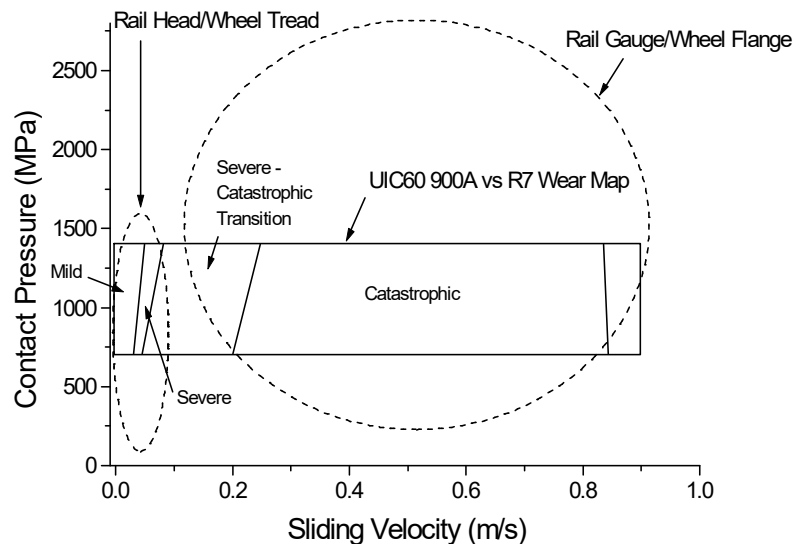


Abbildung 37: Verschleißdiagramm mit Anzeige der Rad-Schiene-Kontaktverhältnisse ⁷¹

Unter Rollkontaktermüdung (Rolling Contact Fatigue, RCF) versteht man die Anhäufung von Ermüdungsschäden, die durch zahlreiche Überfahrten von Rädern verursacht werden und zu Rissen an Rädern und Schienen führen. Jedes Rad, das einen bestimmten Punkt auf dem Gleis überfährt, übt einen Belastungszyklus aus. RCF führt zu Wartungsanforderungen (Schienenschleifen, regelmäßige zerstörungsfreie Prüfungen), die kostspielig sind, aber Sicherheitsprobleme verhindern, da übersehene Risse schnell wachsen und zu Schienenbrüchen führen können.

SKK-Produkte zielen in erster Linie darauf ab, die Reibung und den Verschleiß zu verringern und damit den Wartungsbedarf zu senken und die Sicherheit zu erhöhen. SKK-Produkte erreichen diese Verringerung, indem sie die Lenkung in Kurven verbessern und somit die Seitenkräfte reduzieren. Eine Studie mit einer maßstabsgetreuen Schienen-Rad-Anlage hat aufgezeigt, dass Schienen, die mit einem SKK-Produkt präpariert wurden, nach einem geringen anfänglichen Anstieg des Verschleißes keinen weiteren Verschleiß aufweisen, verglichen mit Trockentests, bei denen der Verschleißvorgang während des gesamten Tests anhielt ²¹. In der gleichen Studie wurde festgestellt, dass die mit SKK-Produkten konditionierten Schienen nach der Durchführung der Tests keine Risse aufwiesen, während die trockenen Schienen nach der Hälfte der Teststrecke mit bloßem Auge sichtbare Risse aufwiesen. Die gleichen Schlussfolgerungen wurden bei Feldversuchen auf einer Schwerlaststrecke in China ¹⁴⁷ und in Amerika ¹⁴⁸ gezogen.

Versuche am Doppelscheiben-Prüfstand haben gezeigt, dass mit zunehmender Oberflächenrauigkeit die Remanenz abnimmt und mit abnehmender Remanenz der Verschleiß zunimmt ¹⁷. Man geht davon aus, dass diese Zusammenhänge durch die Druckbeaufschlagung des flüssigen Schmierstoffs durch Risse bedingt sind, so dass SKK-Produkte nach dem „Trocknen“ nicht mehr die gleichen Zusammenhänge aufweisen sollten, obwohl es derzeit keine Literatur gibt, die sich mit diesem Gesichtspunkt bei SKK befasst.

¹⁴⁷ X. Lu et al., “Friction management on a Chinese heavy haul coal line,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 226, no. 0, pp. 630–640, 2012.

¹⁴⁸ D. Elvidge, R. Stock, C. Hardwick, and K. Oldknow “The Effect of Freight Train Mounted TOR-FM on Wheel Life and Defects,” in Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 2016, pp. 8–12.

In einer Studie wurde aufgezeigt, dass RCF und Verschleiß bei Verwendung einer Premium-Schiene^{39,147} und der Verwendung eines SKK RCF und Verschleiß noch weiter reduzieren. Die Optimierung dieser beiden Parameter kann sehr niedrige Verschleißraten und eine sehr geringe RCF ergeben.

7.1.4.5 Schlupfwellenbildung

Die Schlupfwellenbildung kann eine Vielzahl von Ursachen haben, hängt aber sowohl von den dynamischen Bedingungen des Gleises und des Fahrzeugs als auch von den Verkehrsbedingungen ab. Hohe tangentielle Kräfte und Schlüpfen werden im Allgemeinen als wichtige Faktoren angesehen, zusammen mit lokalen Resonanzfrequenzen²³.

Ein Werkzeug zur Messung der Schienengeometrie vor Ort besteht aus einer Schablone, das den Schienenkopf in vertikaler und seitlicher Richtung mit zwei Sensoren misst, die sich im Gehäuse befinden und von einem Schrittmotor angetrieben werden. Das Längsprofil wird bestimmt, und die diskrete Fourier-Transformation (FFT) des Signals wurde berechnet, um die entsprechende Schlupfwellen-Spektraldichte für jede Messung zu erhalten. Ein Vergleich der Schlupfwellenwachstumsrate zwischen Systemen mit und ohne SKK Produkt ist in Abbildung 38 dargestellt.

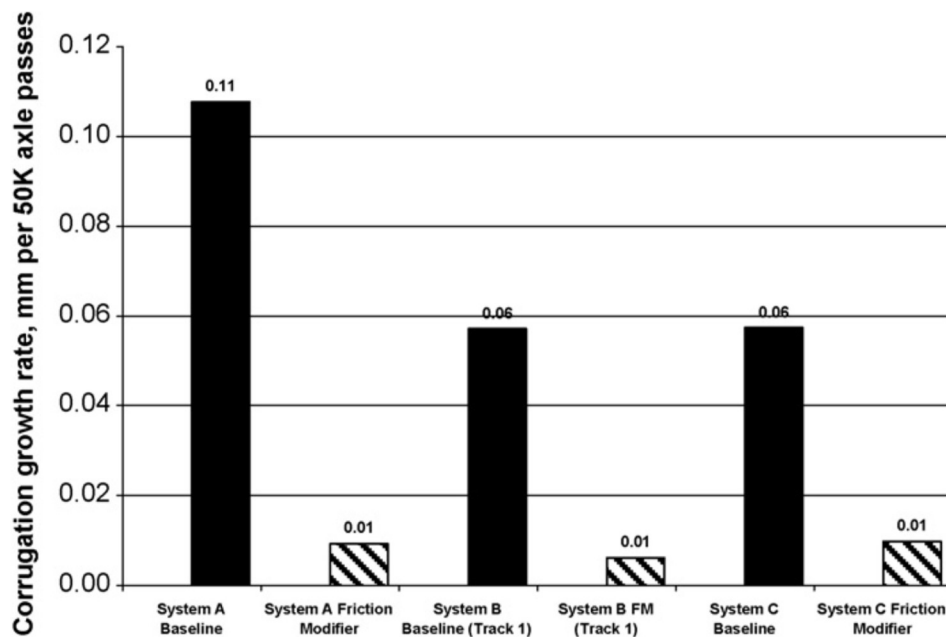


Abbildung 38: Vergleich der Schlupfwachstumsraten zwischen verschiedenen Systemen im konditionierten und nicht konditioniertem Zustand²³

7.1.4.6 Lärmreduktion

Vibrationen und Lärm, die von Rad-Schiene-Schlupfwellen ausgehen, verkürzen die Lebensdauer von Fahrzeug- und Gleiskomponenten und verursachen große Unannehmlichkeiten für Fahrgäste und Anwohner, die in unmittelbarer Nähe der Gleise leben. Roll-Gleit-Schwingungen (Stick-Slip-Schwingungen) verursachen Lärm und sind an einer Reihe von Mechanismen der Schlupfwellenentstehung und -bildung beteiligt, insbesondere bei Systemen, die ein hohes Maß an Reibung und dadurch eine negative Reibungscharakteristik aufweisen.

Eine hohe positive Reibungscharakteristik (HPF) durch Verwendung von SKK-Produkten hat bewiesen, die negative Reibungscharakteristik der Rad-Schiene-Grenzschicht in eine positive zu wandeln und die Reibung auf ein Niveau zu reduzieren und zu kontrollieren, das mit den Brems- und Traktionsanforderungen des Systems übereinstimmt. Je nach den Gegebenheiten des betreffenden Systems kann HPF das Schienenoberflächengeräusch immer um mindestens 3 – 4 dB und in einigen Fällen um bis zu 25 dB reduzieren^{23,143}.

Eine Bewertung der Lärminderung durch ein ölbasierendes Produkt in einem Straßenbahnnetz ist in Abbildung 39 dargestellt. Weitere Studien zur Lärminderung finden sich in^{149,150}.

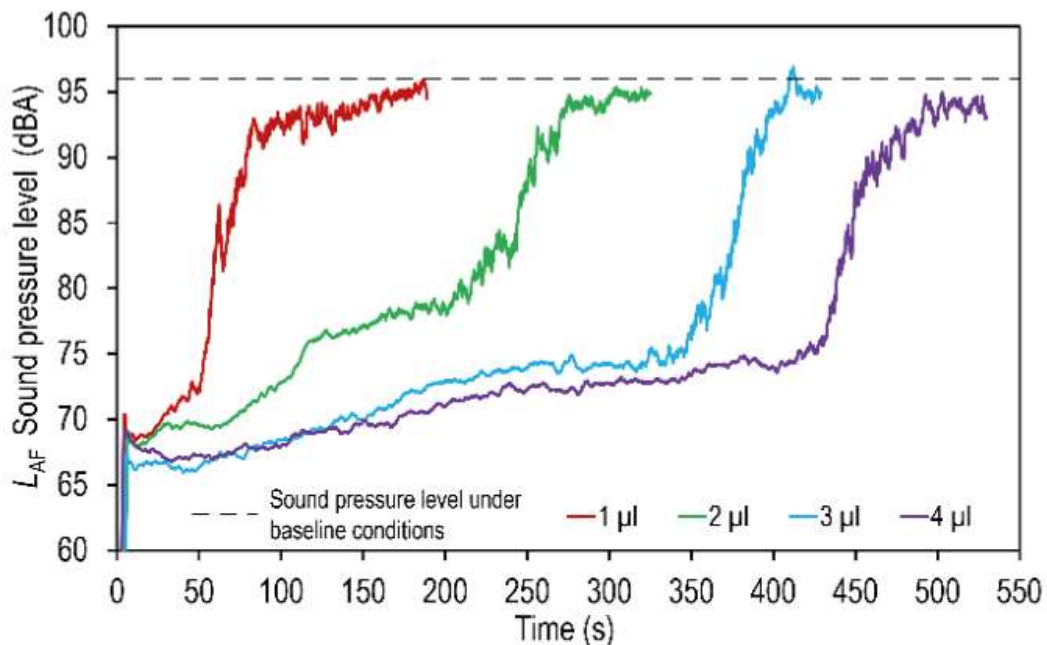


Abbildung 39: Veränderung des Geräuschpegels bei Verwendung unterschiedlicher SKK-Produktmengen¹³³

7.1.4.7 Anlaufwinkel

Der Anlaufwinkel (angle of attack, AOA), siehe Abbildung 40¹⁵¹, ist ein wichtiger Parameter, der die Reibung und den Verschleiß in der Praxis beeinflusst, insbesondere in trockenen Umgebungen^{134,152}. Die Ergebnisse von Doppelscheiben-Versuche nach¹⁵² zeigen, dass eine Erhöhung des AOA die Reibungskraft und den Schmiermittelverbrauch erhöht, siehe Abbildung 41. Der Grund dafür ist, dass bei einem höheren AOA höhere Reibungskräfte in seitlicher Richtung auftreten und sich die Scherrate des Schmiermittels erhöht, wodurch das Schmiermittel schneller verbraucht wird als bei kleineren Winkeln.

¹⁴⁹ D. T. Eadie, M. Santoro, and W. Powell, "Local control of noise and vibration with KELTRACK™ friction modifier and Protector® trackside application: an integrated solution," *J. Sound Vib.*, vol. 267, no. 3, pp. 761–772, Oct. 2003.

¹⁵⁰ D. T. Eadie, M. Santoro, and J. Kalousek, "Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves," *Wear*, vol. 258, no. 7–8, pp. 1148–1155, Mar. 2005.

¹⁵¹ K. Oldknow, D. T. Eadie, and R. Stock, "The influence of precipitation and friction control agents on forces at the wheel/rail interface in heavy haul railways," *J. Rail Rapid Transit*, vol. 227, no. 1, pp. 86–93, 2012.

¹⁵² "USDOE TOP-OF-RAIL LUBRICANT PROJECT Final Report to U.S. Department of Energy Office of Transportation Technology Office of Heavy Vehicles Technologies Argonne National Laboratory Mohumad F. Alzoubi, George R. Fenske, Robert A. Erck Energy Technol.," 2000.

Andere Studien, die eine Änderung des Anlaufwinkels beinhalten, wurden durchgeführt in ^{6,153}.

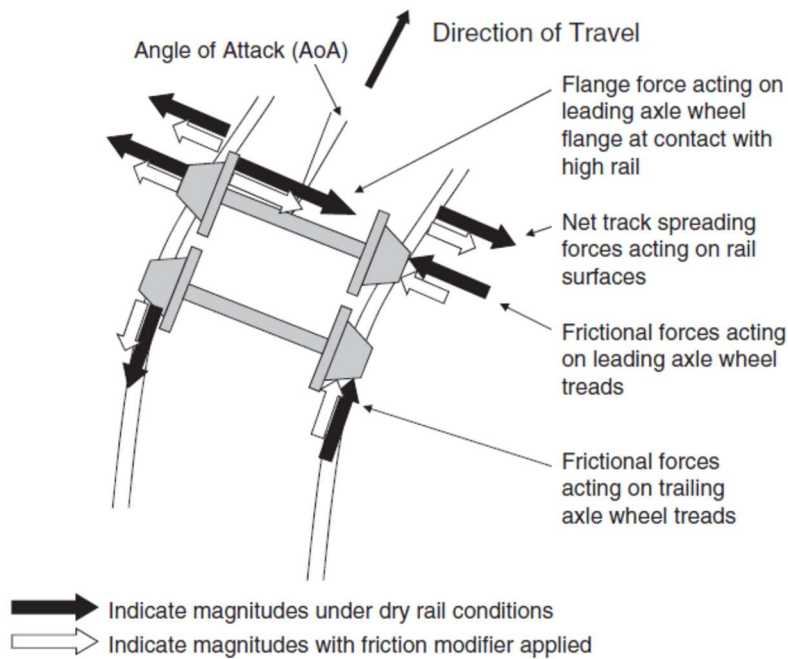


Abbildung 40: Schematischer Einfluss der SKK-Reibungswerte auf die Seitenkräfte in Kurven ¹⁵¹

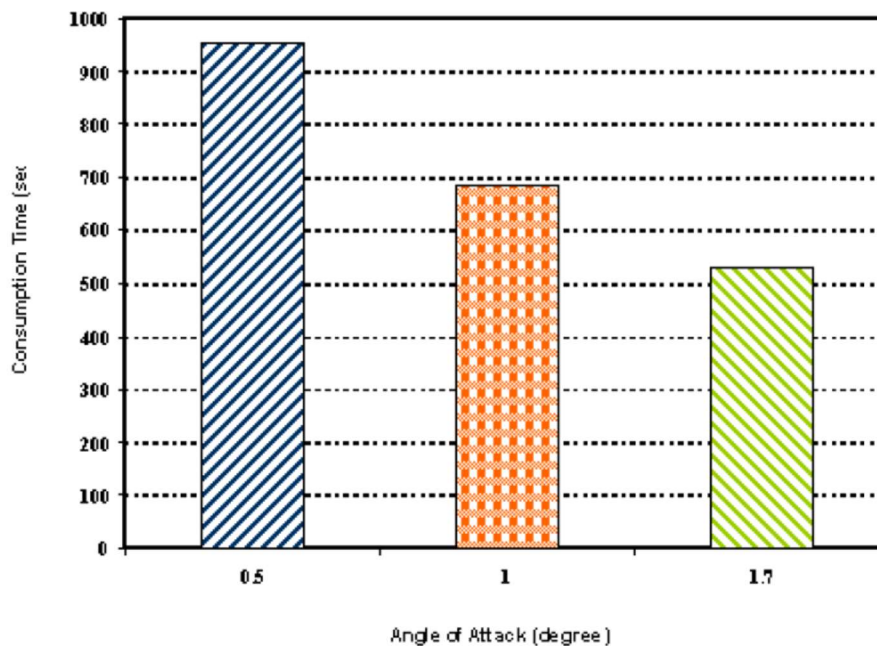


Abbildung 41: Auswirkung des Anlaufwinkels auf die Verbrauchszeit des SKK bei einer Menge von 5 µL SKK am Doppelscheiben-Prüfstand ¹⁵²

¹⁵³ S. Kumar, M. F. Alzoubi, and N. a. Allsayyed, "Wheel/rail adhesion wear investigation using a quarter scale laboratory testing facility," Proc. 1996 ASME/IEEE Jt. Railr. Conf., pp. 247–254.

7.1.4.8 Schlupf

Die Auswirkungen unterschiedlicher Schlupfwerte wurden sowohl für SKK-Produkte ¹³¹ als auch für SKS-Produkte ¹⁷ auf einem Doppelscheiben-Prüfstand untersucht. In allen Fällen wurde das Produkt mit zunehmendem Schlupfwerten schneller verbraucht. Die positive Reibungscharakteristik zur Verringerung von Schlupfwellen und Geräuschen bei der Verwendung einiger SKK-Produkte an der Schienenlauffläche führen dazu, dass der Traktionskoeffizient bei höheren Schlupfwerten ansteigt, andere weisen eine neutrale Reibungscharakteristik auf, siehe Abbildung 42.

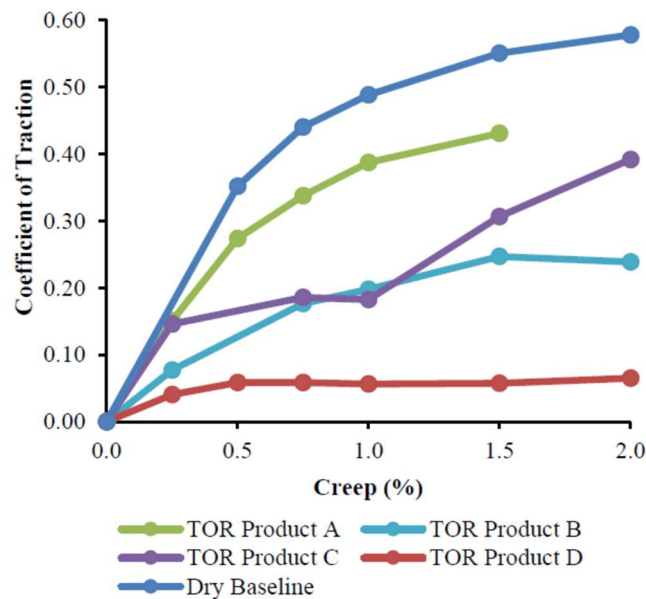


Abbildung 42: Traktionskurven verschiedener SKK-Produkte und der trockenen Basislinie mittels Doppelscheiben-Prüfstand ¹³¹

7.1.4.9 Umgebung

Das Verständnis der Auswirkungen der Abrasion durch den dritten Körper auf die Leistungsfähigkeit von SKK ist wichtig, da die Schiene im Feld nur sehr selten sauber sein wird. Eine Studie über die Auswirkung einer künstlich erzeugten Oxidschicht unter Verwendung eines Stift-Scheibe- und eines Doppelscheiben-Prüfstandes kam zum Schluss, dass ein SKK-Produkt selbst bei einer Vielzahl von Oxidverunreinigungen auf dem Schienenkopf noch wirksam ist ²⁷. In derselben Studie wurde auch der Einfluss von Fett auf die Leistung von SKK untersucht. Es wurde festgestellt, dass Fett das SKK beeinträchtigt, indem es die Filmhaftung an der Oberfläche stört und den Reibungskoeffizienten senkt. Es zeigte sich jedoch, dass der Reibungskoeffizient bei Vorhandensein eines SKK immer noch ansteigt, was zeigt, dass das SKK mit leichter Fettverschmutzung zurechtkommt. Diese Studie war die einzige Arbeit, die sich mit der Interaktion von SKK mit anderen Substanzen befasste.

In einer anderen Studie, bei der ein Stift-Scheibe-Teststand verwendet wurde, wurden die Auswirkungen von Temperatur, Feuchtigkeit und Oxidverschmutzung auf die Leistungsfähigkeit von SKK-Produkten untersucht ¹²⁹. Es zeigte sich, dass die Luftfeuchtigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Remanenz und den Reibungskoeffizienten des Produkts hatte. Es zeigte sich auch, dass der Oxidanteil im SKK ebenfalls einen Unterschied bewirkte.

Wie in Abschnitt 7.1.2 hervorgehoben wird, ist der Stift-Scheibe-Teststand aufgrund der unterschiedlichen Kontaktgeometrie nicht ideal für die Untersuchung von SKK-Produkten. Weitere Studien zu den Umwelteinflüssen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vermischung und einschließlich Abrasion durch den dritten Körper wären empfehlenswert, wobei eine geeignetere Testmethode verwendet werden sollte.

In einer kürzlich abgeschlossenen Studie wurde von Trausmuth et al. ¹³⁵ ein mehrstufiges Bewertungsverfahren für SKK-Produkte entwickelt, bei dem die Umweltverträglichkeit, die Nichtüberbrückung von Isolierstößen und der Reibungskoeffizient als Maßstab für die Einhaltung von Bremswegen als wesentliche Leistungsparameter berücksichtigt wurden. Die Reibungskoeffizientenkurven ausgewählter SKK-Produkte wurden u.a. mit einem Doppelscheiben-Prüfstand bei verschiedenen Umweltbedingungen ermittelt:

- SKK-Menge
- Pressung
- Schlupf
- Temperatur
- Wasser

Die Ergebnisse zeigten klare Trends im Labor, siehe Abbildung 43:

- Je höher die Menge an SKK, desto niedriger der anfängliche Reibungskoeffizient und desto länger die Wirkung von SKK.
- Je höher der Schlupf ist, desto kürzer ist die Wirkung von SKK.
- Je niedriger die Temperatur, desto niedriger der Reibungskoeffizient und desto länger die Wirkung von SKK aufgrund der Veränderung der rheologischen Eigenschaften (SKK wird viskoser).
- Nasse Bedingungen führen zu sehr niedrigen Reibungskoeffizienten, die lange Zeit beibehalten werden.
- Eine höhere Pressung führt zu einem schnelleren Verbrauch von SKK, daher schnelleren Anstieg des Reibungskoeffizienten

Die Labormethoden mittels Doppelscheiben-Versuchen (Kategorie V) wurden zunächst mit ausgewählten Full-Scale-Prüfstand (Kategorie III) verifiziert und abschließend im Rahmen von Feldversuchen (Kategorie I) im Sommer und Winter korreliert. Die am Doppelscheiben-Prüfstand erarbeiteten Trends wurden durch Ergebnisse am Full-Scale-Prüfstand und in den Feldversuchen bestätigt.

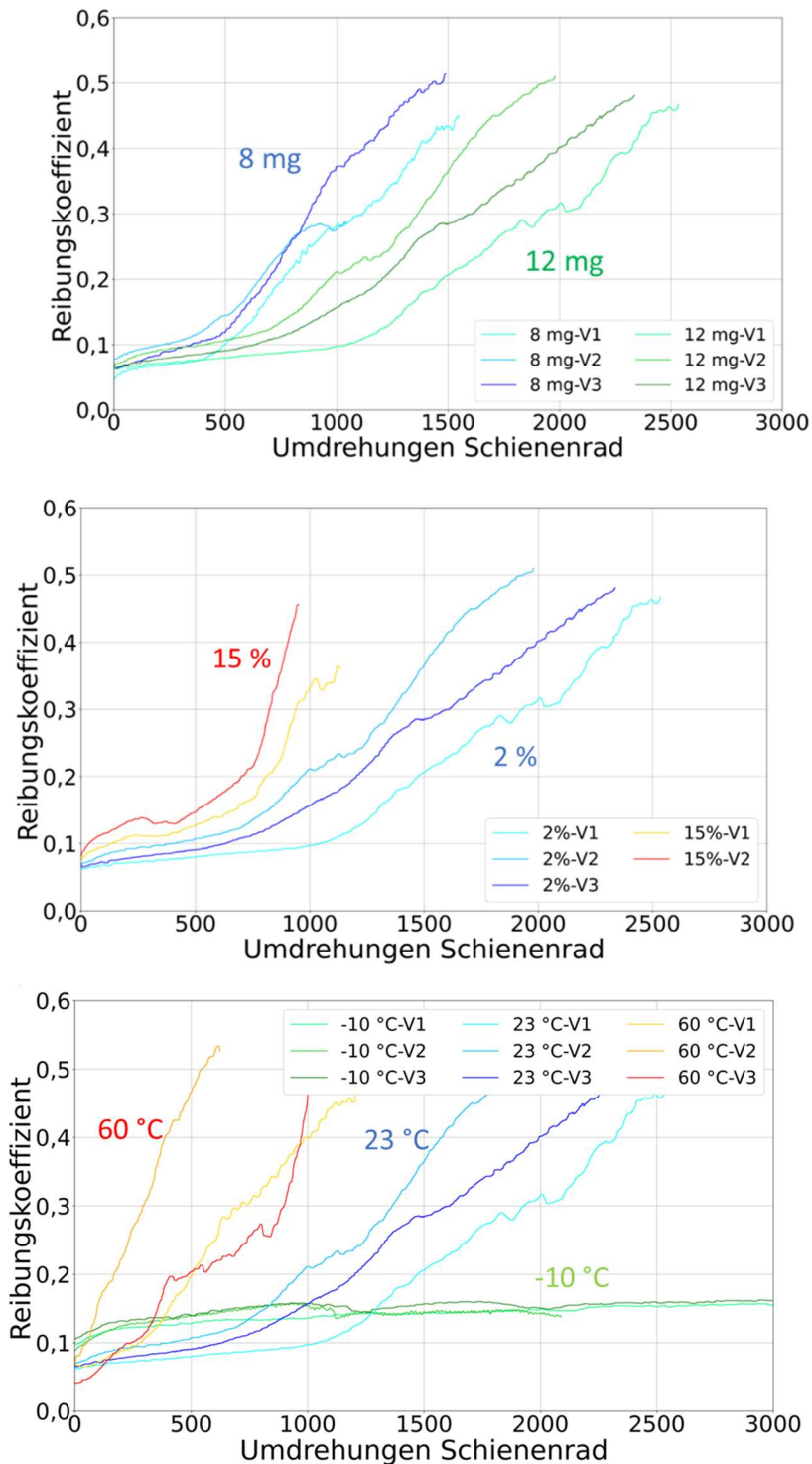


Abbildung 43: Reibungskoeffizientenkurve eines SKK in Abhängigkeit von der Menge an SKK (oben), Schlupf (2. von oben), Temperatur (2. von unten) und Wasser (unten) ¹³⁵

7.1.4.10 Produktvariation bzw. Skalierung

Die optimale Aufbringungsmenge und der Ort der Applikation können von Produkt zu Produkt variieren und beeinflussen den Reibungskoeffizienten. Probleme entstehen bei der Skalierung der Produktanwendung von Feld- auf Labortests, bei denen die Produkte häufig in aufgetragen werden ¹⁶.

Eine groß angelegte Doppelscheiben-Versuchsstudie wurde mit einem wasserbasierten SKK durchgeführt, wobei die Menge des verwendeten Produkts verändert wurde¹⁵⁴, siehe Abbildung 44. Erwartungsgemäß blieb der Traktionskoeffizient im stark geschmierten Kontakt länger niedrig. Ähnliche Ergebnisse wurden mit einem MTM-Teststand und einem ölbasierten SKK erzielt¹⁵⁵, siehe Abbildung 45. Weitere Feldmessungen mit unterschiedlichen Auftragsmengen wurden von Harmon et al.¹⁵⁶ durchgeführt.

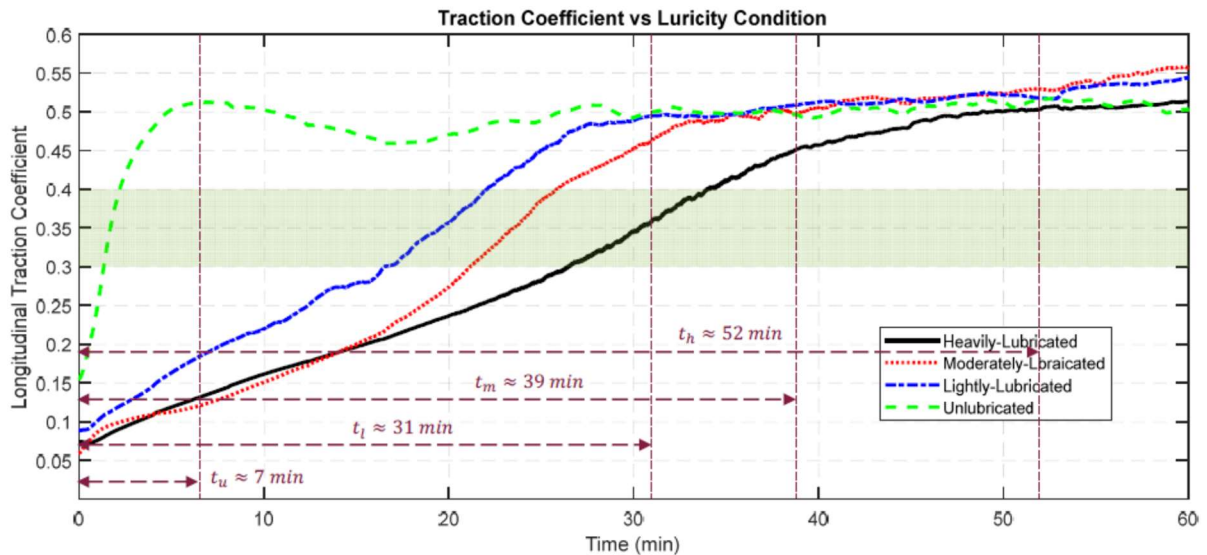


Abbildung 44: Traktionskoeffizient in Längsrichtung mit unterschiedlichen Mengen an wasserbasierten SKK¹⁵⁴

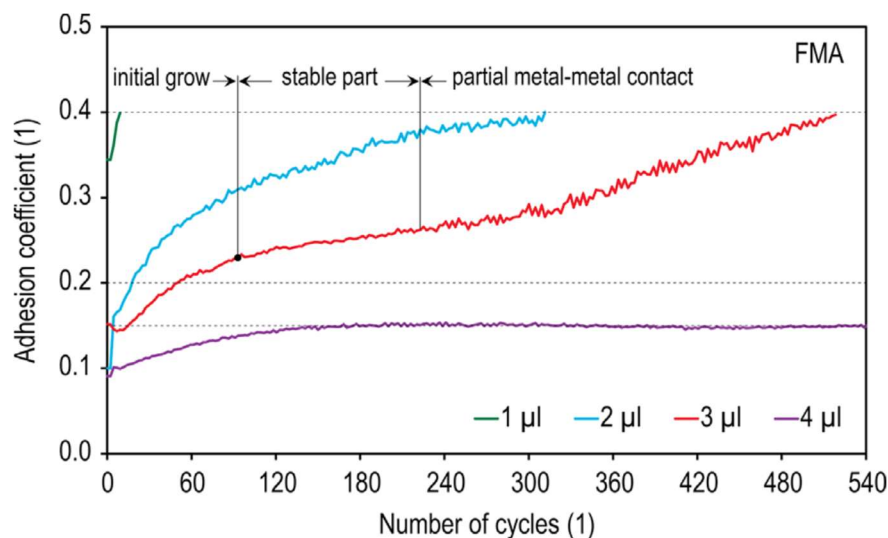


Abbildung 45: Einfluss der Menge des ölbasierten SKK auf den Adhäsionskoeffizienten¹⁵⁵

¹⁵⁴ Y. Pan, A. Radmehr, A. Tajaddini, and M. Ahmadian, "AN EXPERIMENTAL STUDY of the INFLUENCE of the AMOUNT of TOP-OF-RAIL FRICTION MODIFIERS on TRACTION," Proc. 2021 Jt. Rail Conf. JRC 2021, pp. 1–6, 2021.

¹⁵⁵ R. Galas, M. Omasta, I. Krupka, and M. Hartl, "Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface," Wear, vol. 368–369, pp. 230–238, 2016.

¹⁵⁶ M. Harmon, J. F. Santa, J. A. Jaramillo, A. Toro, A. Beagles, and R. Lewis, "Evaluation of the coefficient of friction of rail in the field and laboratory using several devices," Tribol. - Mater. Surfaces Interfaces, vol. 14, no. 2, pp. 119–129, 2020.

7.1.5 Anwendungsbeispiele für SKK und SKS

Beispiele für die Umsetzung sind in Tabelle 9 aufgeführt. Viele dieser Berichte sind nicht öffentlich zugänglich, aber die wichtigsten Kriterien in jedem Bericht sind aufgeführt.

Reference	Product	Application	Performance criteria	Location
THE EFFECT OF TOP OF RAIL FRICTION CONTROL ON A EUROPEAN PASSENGER SYSTEM: THE HEATHROW EXPRESS EXPERIENCE, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Corrugation Wear RCF	Heathrow, UK
Top of Rail Friction Control: Reductions in Fuel and Greenhouse Gas Emissions, Kelsan Technologies Corp report	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Onboard	Energy/fuel reduction	BC, Canada
Evaluation of Two TOR Products on River Grade Track, The Indiana Rail Road Company	TOR drying and TOR non-drying	Wayside	Lateral force reduction, braking	Indiana
KELTRACK® TRACKSIDE FREIGHT HEAVY GRADE CASE STUDIES	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Braking tests, wear reduction, lateral force reduction, RCF	Union Pacific, Canada
Carry distance of top-of-rail friction modifiers, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Carry distance	Swedish Iron Ore Line

Tabelle 9: Anwendungsbeispiele

7.2 Lokalisierung des nicht vorhandenen Wissens in Modul 1.3

Einige der wichtigsten Wissenslücken im Stand der Technik werden im Folgenden beschrieben:

Im Vergleich zur Normalspur sind die Kontaktbedingungen bei der Meterspur höher, insbesondere höhere Achslast, größerer Abstand der seitlichen Radbewegung über den Schienenkopf und größerer Anlaufwinkel, was zu hohen Schlüpfen führt. In der Literatur gibt es nur sehr wenige Beispiele über Produkte, die unter diesen Bedingungen getestet wurden.

Künftige Arbeiten sollten bei hoher Last und hohem Schlupf durchgeführt werden, um das Leistungsverhalten von SKK wie Remanenz und etwaige Auswirkungen auf das Auftragsvolumen zu bewerten.

Es gibt große Unterschiede im Verhalten von Produkten auf Öl- und Wasserbasis. Für Produkte auf Wasserbasis gibt es umfangreiche Literatur, aber nicht alle Leistungskriterien wurden für

Produkte auf Ölbasis behandelt. Es gibt kaum Literatur, die sich mit den Auswirkungen der Produktvermischung befasst.

Die Auswirkungen von Umweltfaktoren wurden nicht gründlich erforscht. Einflussfaktoren ausgewählter SKK und SKS sind zumeist nur lückenhaft verfügbar. Es werden mehr Informationen über Temperaturschwankungen (Schienenoberfläche und Umgebung), Feuchtigkeit und die Auswirkungen von Niederschlägen benötigt. Weitere kaum bei Laboruntersuchungen berücksichtigte Parameter sind Sonneneinstrahlung (Temperatur, UV) sowie Seitenwinde, die die Aufbringung beeinflussen.

In der Literatur finden sich in erster Linie Studien zur streckenseitigen jedoch nicht fahrzeugseitig Applikation. Produktmengen, Applikationsmethoden und -intervalle müssen berücksichtigt werden, wenn künftige Studien die Anwendung bei fahrzeugseitiger Aufbringung untersuchen oder simulieren. Die Verschleppung von Produkten bei fahrzeugseitiger Aufbringung ist nicht untersucht.

Bei den Testmethoden muss unterschieden werden, ob sie Teil einer Spezifikation sind oder zur Verifizierung von Modellen dienen. Im ersten Fall werden einfache, schnelle und kostengünstige Methoden bevorzugt, im letzteren Fall werden teilweise komplexe Tests mit Messtechnik eingesetzt.

7.3 Wichtigste Ergebnisse von Modul 1.3

Hinsichtlich Applikationssystemen sind deutlich mehr Ergebnisse zu stationären Anlagen als mobilen Anlagen verfügbar.

Da die Wirkung von SKK und SKS neben vielen Einflussparametern auch von der Zusammensetzung und Menge abhängig ist, sind Applikationsanlagen als Einheit mit den Schmierstoffen zu sehen. Der Umstieg auf alternative Schmierstoffe erfordert Versuche, um Anlage und Schmierstoff aufeinander abzustimmen.

Zur Bewertung von SKK und SKS hinsichtlich des Verhalten im Rad/Schiene-Kontakt sind zahlreiche Vorrichtungen verfügbar, die alle sechs Kategorien der Prüfkette abdecken. Grundsätzlich erlauben einfache Modellversuche wie beispielsweise am Doppelscheiben-Tribometer ein rasches „Abtasten“ eines SKK oder SKS bei einer Vielzahl an Parameter, wohingegen mit stetiger Annäherung an das Realsystem Schienenfahrzeug-Schiene der Versuchsaufwand zunimmt bei gleichzeitig sinkender Anzahl von Versuchsvariationen. Der Feldversuch ist erfahrungsgemäß die genaueste aber auch die aufwendigste Abbildung eines System wie z.B. des Rad/Schiene-Kontakts. Häufig wird in der Literatur von vergleichbaren Trends der Eigenschaften von SKK und SKS bei Modellversuchsständen und Full-Scale-Prüfständen berichtet

Es gibt zahlreiche Einflussfaktoren auf die Wirkung von SKK und SKS, insbesondere:

- SKK-/SKS-Menge
- Temperatur
- Feuchte/Wasser
- Schlupf
- Pressung
- Anlaufwinkel

- Umgebung
- Produktvariation bzw. Skalierung

Die Leistungsfähigkeit von SKK und SKS kann mittels zahlreicher praxisnaher Eigenschaften beschrieben werden, insbesondere:

- Remanenz bzw. Rückhaltevermögen
- Energieverbrauch
- Verschleiß und Rollkontaktermüdung
- Schlupfwellenbildung
- Lärmreduktion

Beispiele für die Applikation sind zwar verfügbar, die gegenständlichen Berichte sind jedoch zumeist nicht öffentlich zugänglich.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Tribologie gilt heute als ein multidisziplinäres Thema von großer Bedeutung für verschiedene Aspekte der Technik und Wissenschaft. Ein Tribosystem oder tribologisches System besteht aus einem Grundkörper, z.B. einer Schiene, der mit einem Gegenkörper, z.B. einem Rad, in Kontakt und in Relativbewegung zum Grundkörper steht. Die Relativbewegung zueinander kann daher von einem reinen Gleit- zu einem reinen Roll-Kontakt reichen. Die meisten Tribosysteme sind geschmiert, d.h. es befindet sich ein Schmiermittel zwischen dem Grundkörper und dem Gegenkörper, z.B. SKK und SKS. Zum tribologischen System gehört auch die Umgebung, die wesentlich zu den Reibungs- und Verschleißseigenschaften beiträgt, typischerweise aber nicht ausschließlich Temperatur und Feuchtigkeit.

Reibung kann als der Widerstand beschrieben werden, der entsteht, wenn sich ein Körper tangential über einen anderen Körper bewegt. Die Schnittstelle zwischen Rad und Schiene ist jedoch kein reiner Gleitkontakt, sondern ein Roll-Gleit-Kontakt. Folglich muss auch die Zugkraft berücksichtigt werden. In der Literatur wird manchmal der Begriff Traktionskoeffizient anstelle von Adhäsionskoeffizient verwendet, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass die Untersuchungen meist unter Traktionsbedingungen durchgeführt werden, d.h. wenn das Rad/die Räder über die Schiene/die Schienen beschleunigt werden. Im Prinzip können sowohl der Adhäsionskoeffizient als auch der Traktionskoeffizient gleichermaßen verwendet werden, ohne dass die Korrektheit verloren geht.

Unter Reibungsmanagement versteht man den Prozess der Steuerung der Reibung zwischen Rad und Schiene durch verschiedene Maßnahmen. Das Reibungsmanagement im Rad/Schiene-Kontakt wird eingesetzt, um die Effizienz, die Sicherheit, die Wartungskosten, die Lärm- und Vibrationsreduzierung zu verbessern und langfristig den Verschleiß von Rad und Schiene zu verringern.

SKK-Produkte wurden entwickelt, um den Reibungskoeffizienten von einem hohen Niveau zu senken und ihn auf einem optimalen „Zwischen“-Niveau zu halten; ist der Reibungskoeffizient zu niedrig, wirkt er sich negativ auf die Traktion und das Bremsen aus, ist er zu hoch, kommt es zu übermäßigem RCF und Verschleiß. Die Anwendung von SKK-Produkten kann dazu beitragen, die Bildung von Schlupfwellen zu minimieren und abzuschwächen. Schlupfwellen können sich an den Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene bilden und können in Bezug auf Mechanismus, Lage und Länge der Schlupfwellen variieren.

Neben der eigentlichen Funktionalität von SKK und SKS, nämlich der Reibungsmodifikation, spielen auch weitere Eigenschaften hinsichtlich Anwendung, Umweltverträglichkeit und Sicherheit eine wichtige Rolle. Dies umfasst zum einen typische Schmierstoffeigenschaften wie Konsistenz, Viskosität und Flammpunkt. Hinsichtlich Umweltverträglichkeit ist ein zunehmendes Angebot von umweltverträglichen SKK und SKS festzustellen, wenngleich der transparente Nachweis der Umweltverträglichkeit oft fehlt und sich im wesentlichen auf die biologische Abbaubarkeit beschränkt. Für eine Auswahl von SKK und SKS auch nach Maßstäben der Umweltverträglichkeit stehen mittlerweile Produkte mit Umweltzeichen zur Verfügung, insbesondere das EU-Ecolabel und der deutsche „Blaue Engel“. Die Schweizer Regelung R RTE 49410 hat die Vorgaben nach Maßgabe integriert und ist bei gewissen Parametern strenger als der „Blaue Engel“.

Die im Zuge einer Marktrecherche erhobenen Daten zu etwa 170 SKK- und SKS-Produkten hat ergeben, dass viele Angaben, z.B. das Rückhaltevermögen und die Reichweite des Produkts und reibungsmodifizierende Wirkung, nicht objektiv nachvollzogen werden können, da keine Angabe zu den eingesetzten Methoden gemacht werden. Eine objektivierende Beurteilung von

SKK und SKS im Labor und im Feld ist naheliegend. Die im Umbruch befindliche Serie zu EN 15427 beschreibt Labormethoden, z.B. aufbauend auf dem Doppelscheiben-Tribometer. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Untersuchungsmethoden hinsichtlich des Reibungs- und Verschleißverhaltens von SKK und SKS. Die Methoden überdecken die gesamte Prüfkette, die von Modellversuchen über Full-Scale-Prüfständen bis hin zur Felderprobung reicht. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen auf andere Glieder der Prüfkette, vereinfacht zwar die Übertragung von Laborergebnissen in das Feld, bleibt trotzdem weiterhin eine Herausforderung.

Im Allgemeinen ist das Kurvenkreischen aufgrund seiner Tonalität störender als Breitbandgeräusche desselben Pegels. Die Ursache für das Kurvenkreischen ist, dass die Abrollrichtung der beiden Achsen eines Wagens oder Drehgestells beim Durchfahren einer Kurve nicht mit der Richtung des Gleises übereinstimmt. Dies führt zu Schlupf an der Rad-Schiene-Kontaktfläche und auch zu Biegeschwingungen des Rades. Diese führen letztlich zu einer Schallabstrahlung in Form von Stick-Slip-Schwingungen, wobei ein dominanter Schwingungsmodus des Rades zu hohen tonalen Anteilen führt. Die axialen Schwingungsformen der Räder sind die wichtigsten. Die Schiene wird durch dieselbe Kraft angeregt, aber aufgrund ihrer viel geringeren Beweglichkeit ist auch die Antwort hinsichtlich Schwingungen viel kleiner. Daher ist das Rad entscheidend für das Kurvenkreischen. Diese Instabilität bewirkt eine abnehmende Reibungscharakteristik, die zum Kurvenkreischen führt. Zusätzlich kann eine Modenkopplung zu Instabilität und Kurvenkreischen führen. Die Masse und das dämpfungähnliche Verhalten der Schiene können ebenfalls Instabilität und Kurvenkreischen verursachen. Das Kurvenkreischen tritt hauptsächlich am vorderen Innenrad auf. Das vordere Außenrad läuft an der Schiene an. Kurvenkreischen und Anlaufen (Flanging) können auch gleichzeitig auftreten. Die relevanten Einflussfaktoren sind:

- die Schlupfgeschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit normiert auf die Geschwindigkeit des Zuges),
- die modalen Eigenschaften des Rades (einschließlich Dämpfung),
- die vertikale Belastung, die (seitliche) Kontaktposition und die Reibung (Wirkung von SKK und SKS).

Letzteres hängt wiederum von zahlreichen Parametern ab, u.a.:

- Temperatur,
- Feuchtigkeit und
- Rauheit

Infolgedessen ist das Kurvenkreischen ein chaotischer Mechanismus, bei dem die Wahrscheinlichkeit des Auftretens an verschiedenen Tagen oder sogar zu verschiedenen Tageszeiten stark variieren kann. Ein zweiter Mechanismus (Modenkopplung) wurde untersucht, um das (viel seltenere) Kreischen unter Bedingungen zu erklären, die mit der herkömmlichen Theorie der „fallenden Reibungscharakteristik“ nicht zu erklären sind. Die seitliche Anregung durch die Kraftschlusskräfte führt nicht nur zu einer seitlichen Bewegung, sondern bezieht auch einen vertikalen Freiheitsgrad (DOF) mit ein, der wiederum die Kraftschlusskräfte variiert. Dieses System kann instabil werden und zu Kreischen führen, auch wenn die Reibungskräfte konstant sind (also nicht fallen).

Zur Vorhersage der Form des verschlissenen Rad- und Schienenprofils werden hauptsächlich zwei Ansätze verwendet, die statistische und kontaktmechanische Methode. Beim statistischen Ansatz werden die Profilmessdaten eines bestimmten Fahrzeugtyps unter bestimmten

Betriebsbedingungen verwendet, um die Form des verschlissenen Rad- oder Schienenprofils vorherzusagen. Dies ermöglicht eine schnelle und genaue Vorhersage der Laufflächenform, aber sobald sich die Betriebsbedingungen ändern, werden die Laufflächen Vorhersagen ungenau oder sogar unmöglich. Zur Vorhersage einer abgenutzten Lauffläche mit der auf der Kontaktmechanik basierenden Methode werden dynamische Mehrkörpersimulationen verwendet. Diese Methode ist rechenintensiv und erfordert mehrere Eingangsparameter, von denen einige unbekannt sind. Der Vorteil dieser Methode ist jedoch, dass andere Fahrzeugtypen oder sich ändernde Betriebsbedingungen leicht berücksichtigt werden können. Durch die Kombination der beiden Ansätze können deren Vorteile genutzt werden, so dass eine schnelle, genaue und flexible Vorhersage der Profile möglich ist. Ein solcher Ansatz wird als „hybrider Ansatz“ bezeichnet.

In dem statistisch basierten Modell zur Vorhersage verschlissener Radprofilformen werden die sogenannten Verschleißkurven als vertikaler Abstand zwischen einem gemessenen, verschlissenen Profil und einem neuen, unverschlissenen Profil (Referenzprofil) berechnet. Um eine neue Radprofilform vorherzusagen, wurden zunächst Polynome an die gemessenen Verschleißkurven angepasst. Anschließend wurden die Koeffizienten der angepassten Polynome in Abhängigkeit von der Laufleistung der gemessenen Radprofile berechnet. Um eine neue Verschleißkurve zu berechnen, müssen dann die Koeffizienten des Polynoms bei einer bestimmten Laufleistung berechnet werden. Um eine neue Radprofilform zu erhalten, wird die berechnete Verschleißkurve zum Referenzprofil addiert.

Der auf der Kontaktmechanik basierende Ansatz verwendet MBD-Simulationen und lokale Rad-Schiene-Kontaktanalysen zur Berechnung der Kontaktparameter (Kontaktfläche, Schlupf, Kräfte) zwischen Rad und Schiene. Unter Verwendung der Kontaktparameter als Eingabe für ein bestimmtes Verschleißmodell wird das Material an der Kontaktfläche abgetragen. Die aktualisierte Profilform wird als Eingabe für die MBD-Simulation der nächsten Schleife verwendet. Auf diese Weise wird die Entwicklung des Radprofils durch den auf der Kontaktmechanik basierenden Ansatz bestimmt. Es gibt zwei häufig verwendete Verschleißmodelle, das Archard-Modell und den Ty-Ansatz. Das Archard-Modell verwendet Last, Gleitweg, Härte und einen materialabhängigen Verschleißkoeffizienten zur Berechnung des Verschleißvolumens. Der Ty-Ansatz basiert auf dem Schlupf γ und der Zugkraft T .

Der hybride Ansatz zur Vorhersage verschlissener Laufflächenformen kombiniert den statistischen und den auf Kontaktmechanik basierenden Ansatz.

Kraftschlusskraftmodelle sind äußerst nützlich für die Vorhersage und Simulation von Eisenbahnleistungen und werden daher ständig verbessert und erweitert. Die Modelle „Extended Creep Force“ (ECF) und „CONTACT“ sind in der Lage, die Auswirkungen von Reibungsmodifikatoren zu modellieren. Es gibt auch das Popovici-Modell, das in der Lage ist, Schmierstoffe in der Mischschmierung zu modellieren, aber es müssten Anpassungen vorgenommen werden, um mit festen Grenzflächenprodukten wie SKK umzugehen. Es gibt nur wenige Studien, die sich mit SKK-Produkten und Verschmutzungsmodellen befassen, die sich auf die Drittkörperschicht konzentrieren. In einer Studie von Meierhofer et al. wurden experimentelle Ergebnisse von Doppelscheiben-Prüfstand zur Parametrisierung eines Modells verwendet, das eine Drei-Körper-Schicht einschließt. Das Modell mit den Drei-Körper-Eigenschaften zeigte eine bessere Genauigkeit im Vergleich zu Modellen ohne Drei-Körper-Schicht. Wenn man davon ausgeht, dass der hydrodynamische Effekt die Reibung im System beeinflusst, ist es erwähnenswert, dass dieser Effekt mit zunehmender Relativgeschwindigkeit an Bedeutung gewinnt.

Der Haupteinfluss der Rauheit ist das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Kontaktfläche der Unebenheiten und der nominalen Kontaktfläche; das Verhältnis der tatsächlichen Kontaktfläche wird auch als Parameter in die ursprüngliche Berechnung der Reibungskräfte einbezogen. Die Abnahme des Haftungskoeffizienten bei hohem Schlupf kann mit dem Anstieg der Kontakttemperatur aufgrund der erzeugten Reibungswärme zusammenhängen. Aus diesem Grund wurde ein temperaturabhängiger Reibungskoeffizient in die Berechnung einbezogen, indem eine analytische Schätzung der durchschnittlichen Kontakttemperatur verwendet wurde.

Eine der einfachsten Möglichkeiten zur Modellierung der Verschleißeffekte wäre die Verwendung des $T\gamma$ -Ansatzes. Bei dieser Methode werden Verschleiß und Ermüdung zu einem einzigen Parameter namens Schädigung zusammengefasst. Sie stützt sich auch auf Korrelationen zwischen bestimmten $T\gamma$ -Zahlen und dem Verschleiß-/Ermüdungsverhalten im Gleis, was z. B. bei der Einführung neuer Schienenstähle oft ein Problem darstellen kann. Der Verschleißkoeffizient ist repräsentativ für die in der Kontaktfläche verbrauchte Energie, unterscheidet aber nicht zwischen verschiedenen Energieformen (Verschleiß, Wärme, Lärm usw.). Die Verschleißkoeffizienten basieren auf experimentellen Daten aus Roll-/Gleitversuchen, die für trockene Kontakte gut erforscht sind, aber es gibt inzwischen auch einige Versuche mit nassen, verschmutzten Kontakten. Für Reibungsmodifikatoren gibt es jedoch nur wenige experimentelle Daten.

9 Ausblick und Empfehlungen

Das überwiegend zur Normalspur verfügbare Wissen soll auf die Meterspurbahn übertragen werden, sowohl durch Experimente als auch durch Modellierung und abschließender Verifizierung im Feld. Hinsichtlich der Wirkungsweise von SKK und SKS sollte eine Parametervariation durchgeführt werden, die die (kritischen) Betriebsbedingungen erfasst, z.B. Temperatur, Regen, Schmierstoffmenge. Die daraus resultierende Wirkungsmatrix soll für das Aufsetzen von RTE zwecks Spezifizierung von SKK und SKS für Meterspurbahnen herangezogen werden. Hierzu kann auf Studienergebnisse sowie Normen und Regelwerken zur Normalspur aufgebaut werden.

In der Literatur wird zum Teil darauf hingewiesen, dass SKK an beiden Schienenaufläufen aufgebracht werden sollte. Dieser Aspekt soll im Laufe der Forschungsarbeiten von P2 noch vertieft betrachtet werden. Die genauen Effekte der Vermischung von SKK und SKS sollen ebenfalls untersucht werden.

Hinsichtlich Auswahl und Untersuchung von SKK und SKS wird empfohlen, leichter verfügbare Informationen wie beispielsweise die Umweltverträglichkeit an den Anfang zu stellen, um die Anzahl der Produkte und somit der Anzahl der Versuche in der Studie klein zu halten, insbesondere für tribometrische Untersuchungen.

Der hybride Ansatz zur Abschätzung des Verschleißes von Rad und Schiene hat Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit auf verschiedene Szenarien und der Berechnungseffizienz. Für die Anwendung auf der Meterspurbahn muss eine Analyse des Verschleißes in engen Kurven durchgeführt werden, um das Modell auf diese Betriebsbedingungen zu übertragen. Auch die Interaktion mit SKK und SKS Produkten muss untersucht und in das Modell implementiert werden.

Eine genaue Bestimmung und Modellierung des Bereichs der „fallenden Reibungscharakteristik“ des Adhäsionskoeffizienten ist zwingend erforderlich, um das Kurvenkriechen gut zu beschreiben. Messungen der "fallenden Reibung" unter realen Bedingungen sind schwierig. In der Literatur finden sich viele verschiedene Annäherungen an die Kriechkurve. Der Ansatz von Kalker ist für den stationären Zustand gültig, aber es gibt keine Theorien für das dynamische Kriechen. Die Literatur befasst sich hauptsächlich mit Normalspur oder Straßenbahnen. Ein Zeitbereichskriechmodell, das für Anwendungen mit 1 m Spurweite ausreichend repräsentativ ist, ist erforderlich. Dieses Modell ist zwingend erforderlich, um anschließend Maßnahmen zur Schadensbegrenzung zu entwickeln.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema eines Tribosystems

Abbildung 2: Wichtige tribologische Faktoren bei der Bearbeitung eines tribologischen Problems

Abbildung 3: Kräfteschema des Rad/Schiene-Kontakts

Abbildung 4: Darstellung der theoretischen Traktionskurve von Carter sowie der Gleit- („slip“) und Haftbereiche („stick“) in der Kontaktfläche ⁷

Abbildung 5: Schlupf-Traktions-Diagramm zur Darstellung des Unterschiedes zwischen positiver und negativer Reibungscharakteristik ¹⁵

Abbildung 6: Schematische Darstellung typischer Bereiche bei der Anwendung von SKK und SKS zum Reibungsmanagement ⁸

Abbildung 7: Bevorzugte Reibungskoeffizient-Bereiche verschiedener Produkte zum Reibungsmanagement

Abbildung 8: Typisches schienenseitiges Fettapplikationssystem

Abbildung 9: Metallographischer Querschnitt einer Schiene und einer dritten Körperschicht

Abbildung 10: (a) Glänzende Flecken (1 bis 4) auf der Schiene und (b) dunkle Flecken auf dem Rad, die die Schlupfbereiche der Stick-Slip-Schwingungen darstellen ¹⁵

Abbildung 11: Glänzende Flecken auf der Schiene und Flecken auf dem Rad, die die Gleitbereiche der Stick-Slip-Schwingungen darstellen (Quelle: zb Zentralbahn AG)

Abbildung 12: Vergleich der Schlupfwellenwachstumsraten bei drei Schienensystemen mit und ohne Einsatz von SKK ²³

Abbildung 13: Auswirkung von a) SKK und b) Schmierstoff auf den Reibungskoeffizienten auf der äußeren und inneren Schiene über 10 Überfahrten ¹⁵

Abbildung 14: Darstellung des durchschnittlichen Reibungskoeffizienten in verschiedenen Szenarien des Rad/Schiene-Kontakts ²⁵

Abbildung 15: Traktionskoeffizient bei Aufbringung von SKK über verschiedene Sprühzeiten ²⁶

Abbildung 16: Traktionskurve für unterschiedliche Sprühzeiten bzw. Aufbringmengen ²⁶

Abbildung 17: Einfluss des Fettanteils (0 bis 60 mg) auf die Reibung von SKK in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ²⁷

Abbildung 18: Traktionskurve (hier: Adhäsion als Funktion des Anlaufwinkels) bei verschiedenen Kontaktbedingungen (trocken, SKK auf Wasserbasis und SKK auf Ölbasis) bei verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten (a) 800 U/min, (b) 600 U/min, (c) 400 U/min, (d) 200 U/min, (e) 100 U/min ²⁸

Abbildung 19: Gesamtansicht eines Doppelscheibenprüfstands ⁴⁸

Abbildung 20: Kumulierte Pegelhäufigkeitsverteilung der im Frequenzbereich von 2 kHz bis 10 kHz gefilterten Pegel LpAFmax, gemessen auf der Berliner Ringbahn für Geschwindigkeiten größer oder gleich 80 km/h: vor Einbau von Maßnahmen gegen Kurvenkreischen (volle Linie), nach Einbau von Maßnahmen gegen Kurvenkreischen (strichlierte Linie) ^{42,49}

Abbildung 21: Gemessene Verschleißkurven und prognostizierte Verschleißkurven berechnet von Han und Zhang ⁶²

Abbildung 22: Validierungsergebnisse für die Spurkranzdicke ⁵³

Abbildung 23: Kontaktmechanischer Ansatz – schleifenbasierte Methode

Abbildung 24: Validierungsergebnisse bei Verwendung eines kontaktmechanischen Ansatzes von Ding et al.

Abbildung 25: Validierungsergebnisse unter Anwendung der Kontaktmechanik nach Li et al.

Abbildung 26: Validierungsergebnisse von Zhu et al. unter Verwendung eines hybriden Ansatzes

Abbildung 27: Verschleißzustände ⁶³

Abbildung 28: Validierungsergebnisse von Hartwich et al. ⁶³ mit Hilfe des Hybridansatzes

Abbildung 29: Vergleich zwischen dem Modell mit und ohne die Eigenschaften der Schicht des dritten Körpers (3BL) und den Versuchsergebnissen für vier Szenarien. a) $p_0 = 1500 \text{ MPa}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, b) $p_0 = 1500 \text{ MPa}$, $v = 1 \text{ m/s}$, c) $p_0 = 900 \text{ MPa}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, d) $p_0 = 900 \text{ MPa}$, $v = 1 \text{ m/s}$ ⁸²

Abbildung 30: Flussdiagramm für die Berechnung des Adhäsionskoeffizienten

Abbildung 31: Vergleich von Grenzreibungskoeffizienten aus Ergebnissen mit Modellen und Experimenten ⁸⁶

Abbildung 32: Vergleich zwischen glattem und rauem Oberflächenmodell bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v = 30 \text{ km/h}$ ⁹⁶

Abbildung 33: Vergleich der Traktionskurve für verschiedene Rauheiten ⁹⁶

Abbildung 34: Tribologische Prüfkette für den Rad/Schiene-Kontakt ¹²⁵

Abbildung 35: Vergleich der $T\gamma/A$ -Verschleißraten von Versuchen am Doppelscheiben- und Full-Scale-Prüfstand bei trockenen Bedingungen und mit SKK ⁷⁷

Abbildung 36: Rückhaltevermögen in Abhängigkeit von der Fett-Menge ¹⁷

Abbildung 37: Verschleißdiagramm mit Anzeige der Rad-Schiene-Kontaktverhältnisse ⁷¹

Abbildung 38: Vergleich der Schlupfwachstumsraten zwischen verschiedenen Systemen im konditionierten und nicht konditioniertem Zustand ²³

Abbildung 39: Veränderung des Geräuschpegels bei Verwendung unterschiedlicher SKK-Produktmengen ¹³³

Abbildung 40: Schematischer Einfluss der SKK-Reibungswerte auf die Seitenkräfte in Kurven ¹⁵¹

Abbildung 41: Auswirkung des Anlaufwinkels auf die Verbrauchszeit des SKK bei einer Menge von $5 \mu\text{L}$ SKK am Doppelscheiben-Prüfstand ¹⁵²

Abbildung 42: Traktionskurven verschiedener SKK-Produkte und der trockenen Basislinie mittels Doppelscheiben-Prüfstand ¹³¹

Abbildung 43: Reibungskoeffizientenkurve eines SKK in Abhängigkeit von der Menge an SKK (oben), Schlupf (2. von oben), Temperatur (2. von unten) und Wasser (unten) ¹³⁵

Abbildung 44: Traktionskoeffizient in Längsrichtung mit unterschiedlichen Mengen an wasserbasierten SKK ¹⁵⁴

Abbildung 45: Einfluss der Menge des ölbasierten SKK auf den Adhäsionskoeffizienten ¹⁵⁵

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für den Adhäsionskoeffizienten zwischen Rad und Schiene verschiedener Bahnen

Tabelle 2: Überblick über die Aufgaben der in SKK-Produkten verwendeten Komponenten ⁸

Tabelle 3: Wichtige bei Feldversuchen berücksichtigte Parameter

Tabelle 4: Übersicht über die SKK- und SKS-Produkte hinsichtlich Hersteller, Verwendungsart und Anwendungen, Vorteile und Umwelteigenschaften in Datenblättern

Tabelle 5: Labortestmethoden

Tabelle 6: Verschleppungs-Eigenschaften von zwei Arten von SKK-Produkten

Tabelle 7: Energieeinsparungen bei Kurven ⁷²

Tabelle 8: Energieeinsparungen bei verschiedenen Schmierungsstrategien ⁷²

Tabelle 9: Anwendungsbeispiele

Appendix

Appendix 1: Auflistung von SKK- und SKS-Produkten

(Report_P2_Module 1_Finalreport_Appendix1_TOR-FM_FL.xlsx)

The image displays a large, multi-column spreadsheet table. The table is organized into several main sections, likely representing different categories of SKK- and SKS-Produkten. Each row contains a significant amount of data, with some cells highlighted in various colors such as green, yellow, orange, and blue. The columns are densely packed with text and numbers, and the overall layout is highly structured and detailed. The table appears to be a comprehensive list or inventory of products, with each entry having its own set of associated data points.

Appendix 2: Auflistung und Bewertung der Anhänge der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) im Hinblick auf die Komponenten in SKK und SKS

(Report_P2_Module 1_Finalreport-Appendix2_ChemRRV.xlsx)

		Relevanz	Begründung / Anmerkung
Anhang 1	Bestimmungen für bestimmte Stoffe		
1,1	Persistente organische Schadstoffe	möglich	möglicherweise in Spezialschmierstoffen, generell nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,2	Halogenierte organische Stoffe	möglich	möglicherweise in Spezialschmierstoffen, generell nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,3	Aliphatische Chlorkohlenwasserstoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,4	Ozonschichtabbauende Stoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,5	In der Luft stabile Stoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,6	Asbest	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,7	Quecksilber	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,8	Octylphenol, Nonylphenol und deren Ethoxylate	nein	Verbote/Einschränkungen beziehen sich nicht auf (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren, eine Verbindung dieser Kategorie wurde im Sicherheitsdatenblatt eines TOF-FM aufgeführt
1,9	Stoffe mit flammhemmender Wirkung	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,10	Krebs erzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Stoffe	möglich	generell nicht auszuschließen, muss auf Sicherheitsdatenblatt aufgeführt werden
1,11	Gefährliche flüssige Stoffe	nein	Verbote/Einschränkungen beziehen sich nicht auf (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren
1,12	Benzol und Homologe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,13	Nitroaromaten, aromatische Amine und Azofarbstoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,14	Zinnorganische Verbindungen	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,15	Teere	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,16	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1,17	Stoffe nach Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006	möglich	generell nicht auszuschließen, muss von den "Inverkehrbringern" beachtet werden
1,18	Phthalate	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
Anhang 2	Bestimmungen für Gruppen von Zubereitungen und Gegenständen		
2,1	Textilwaschmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,2	Reinigungsmittel, Desodorierungsmittel und kosmetische Mittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,3	Lösungsmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,4	Biozidprodukte	nein	eine Verbindung dieser Kategorie wurde im Sicherheitsdatenblatt eines TOF-FM aufgeführt
2,5	Pflanzenschutzmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,6	Dünger	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,7	Auftaumittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,8	Anstrichfarben und Lacke	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,9	Kunststoffe, deren Monomere und Additive	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,10	Kältemittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,11	Löschmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,12	Aerosolpackungen	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,13	Brennstoffzusätze	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,14	Kondensatoren und Transformatoren	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,15	Batterien	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,16	Besondere Bestimmungen zu Metallen	nein	Beschränkung auf Blei, Cadmium, Quecksilber, Chrom(VI) in bestimmten Anwendungen, nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,17	Holzwerkstoffe	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2,18	Elektro- und Elektronikgeräte	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend

Appendix 3: Vergleich zwischen den Anforderungen an Schmierstoffe (konkret Hydrauliköle) im "Blauem Engel" und für SKS in R RTE 49410

(Report_P2_Module 1_Finalreport-v1_Appendix3_BlauerEngel_vs RTE.xlsx)

Specification	Subject	Requirements	"Blauer Engel" DE-ZU 178	"Blauer Engel" Value	RTE 49410	RTE 49410 Value
CLP (1272/2008)	Final product	Ban or restriction of hazardous substances (details see respective document) according to CLP	x		x	
MAK list	Final product	Ban of "carcinogenic", "mutagenic" or "toxic to reproduction" substances according to MAK	x			
REACH (1907/2006) regarding SVHC (substances of very high concern)	Final product	Ban of SVHC	x			
OSPAR list	Final product	Ban of OSPAR list substances	x		x	
List of priority substances under the water framework directive (2000/60/EG + 2008/105/EG)	Final product	Ban of priority list substances	x		x	
Wassergefährdungsklasse (WGK) according to "Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)"	Final product	Ban of substances of WGK 2 and 3	x		x	
Organic halogen compounds	Final product	Ban of organic halogen compounds	x	-	x	
Nitrite compounds	Final product	Ban of nitrite compounds	x	-	x	
Metals and metal compounds (except Na/K/Mg/Ca & Li/Al in thickener)	Final product	Ban of metals and metal compounds (except exceptions)	x	-	x	
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	ISO 10253	x	> 100 or 1000 mg/l		
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	ISO 8692	x	> 100 or 1000 mg/l		
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	OECD 201 or C.3 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Daphnia (acute) EC50 (96h)	Final product	ISO 6341	x	> 100 or 1000 mg/l		
Daphnia (acute) EC50 (96h)	Final product	OECD 202 or C.2 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Daphnia (chronic) NOEC	Final product	OECD 211 or C.20 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (acute) LC50	Final product	OECD 203 or C.1 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Fish (acute) LC50	Final product	OECD 236 or C.49 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 210 or C.47 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 212 or C.15 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 215 or C.14 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Algae (acute)	Product components	OECD 201 or C.3 of annex of 440/2008	x			
Daphnia (acute)	Product components	OECD 202 or C.2 of annex of 440/2008	x			
Daphnia (chronic) NOEC	Product components	OECD 211 or C.20 of annex of 440/2008	x			
Fish (acute)	Product components	OECD 203 or C.1 of annex of 440/2008	x			
Fish (chronic) NOEC	Product components	OECD 210 or C.47 of annex of 440/2008	x			
Ready biodegradability	Product components	OECD 301 (B/C/D/F) or C.4 (C-F) of annex of 440/2008	x	> 60 %	x	> 60 %
Ready biodegradability	Product components	OECD 310 or C.29 of annex of 440/2008	x	> 60 %		
Ready biodegradability	Product components	OECD 306 or C.42 of annex of 440/2008	x	> 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 301 (B/C/D/F) or C.4 (C-F) of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 310 or C.29 of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 306 or C.42 of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 302 B or C.9 of annex of 440/2008	x	> 70 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 302 C	x	> 70 %		
log P _{ow} (log of octanol-water partition coefficient)	Product components	OECD 107, OECD 117, OECD 123 or A.8 of annex of 440/2008	x	< 3 or > 10	x	< 3 or > 7
BCF (bioconcentration factor)	Product components	OECD 305 or C.13 of annex of 440/2008	x	< 500 l/kg	x	< 100 l/kg
Surface tension of aqueous solutions	Product components	OECD 115 or C.13 of annex of 440/2008	x	< 50 mN/m at 1 g/l		
Nanomaterials	Final product	Labeling of nanomaterials is mandatory		-	x	