

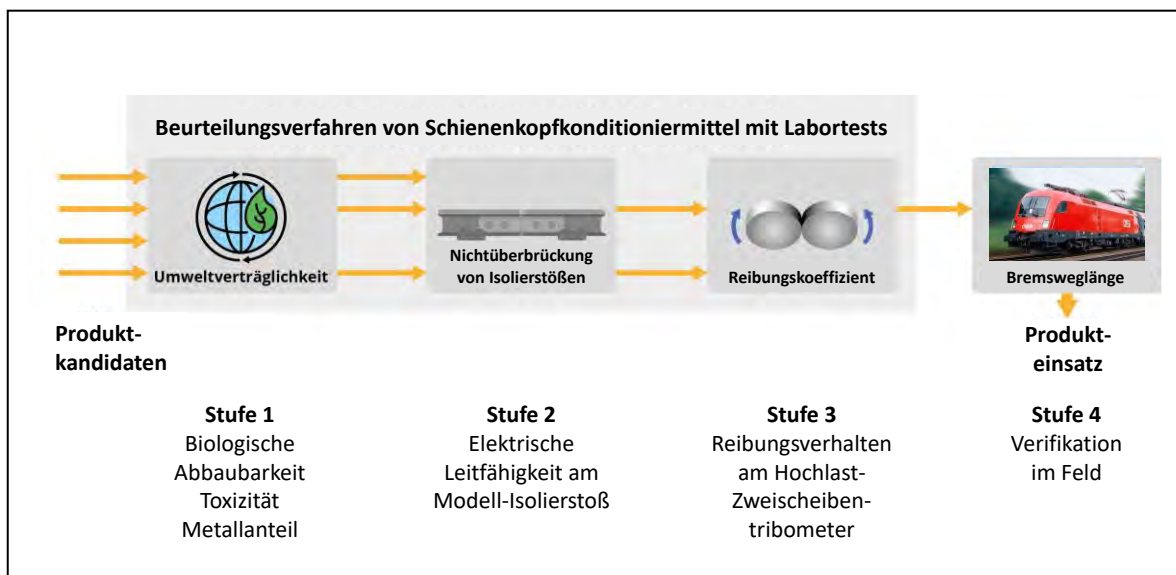
SafeRail

Beurteilungsverfahren

Schienenkopfkonditioniermittel

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2019
(VIF 2019)

Dezember 2022



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien



Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

AC2T research GmbH
Viktor-Kaplan-Straße 2/C
2700 Wiener Neustadt



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien



SafeRail

Beurteilungsverfahren

Schienenkopfkonditioniermittel

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2019)

AutorInnen:

DI (FH) DI DI Dr. mont. Andreas TRAUSMUTH

Dipl.-Ing. (FH) Astrid LEBEL, MSc.

Dipl.-Ing. Bettina RONAI

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Nicole DÖRR

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AC2T research GmbH

Inhaltsverzeichnis

1. ERKLÄRUNG (DISCLAIMER)	7
2. HINTERGRUND UND PROJEKTZIELSETZUNG	8
3. STAND DER TECHNIK	9
3.1. Tribologisches System	9
3.2. Reibung	13
3.3. Rad-Schiene-Kontaktmechanik.....	15
3.3.1. Normalkontaktproblem.....	16
3.3.1.1. Punktkontakt.....	18
3.3.1.2. Linienkontakt	22
3.3.1.3. Tiefenspannungen	25
3.3.2. Tangentialkontaktproblem.....	25
3.4. Schienenkopfkonditionierung	28
3.4.1. Einsatzzweck.....	28
3.4.2. Aufbringung von SKKM	31
3.4.2.1. Stationäre Schienenkopfkonditionierung	31
3.4.2.2. Fahrzeugseitige Schienenkopfkonditionierung.....	33
3.4.3. Aktuelle Untersuchungen zur Schienenkopfkonditionierung.....	34
3.4.3.1. Aufnahme des SKKM vom Rad	35
3.4.3.2. Reichweite von stationär aufgebrachtem SKKM	36
3.4.3.3. Verschleiß und Rollkontaktermüdung	37
3.4.3.4. Einfluss von SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei Zweiseiben- Tribometern und Full-Scale-Testständen	38
3.4.3.5. Einfluss von SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei Feldversuchen	42
3.4.3.6. Energieeinsparung durch SKKM.....	43
3.4.3.7. Chemische Zusammensetzung.....	44
3.5. Marktrecherche.....	45
3.6. Umweltverträglichkeit.....	47

3.6.1. Umweltzeichen „Blauer Engel“	48
3.6.2. Prüfmethoden für Umweltverträglichkeit	52
4. MEHRSTUFIGES BEURTEILUNGSVERFAHREN ZUR BEURTEILUNG VON SKKM 56	
5. CHARAKTERISIERUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT – STUFE 1	57
5.1. Methode zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit	59
5.2. Methoden zur Untersuchung der Toxizität.....	59
5.3. Methode zur Bestimmung der Metallanteile	61
5.4. Ergebnisse.....	61
5.5. Zusammenfassung	65
6. EINFLUSS VON SKKM AUF DIE LEITFÄHIGKEIT VON ISOLIERSTÖßEN – STUFE 2.....	67
6.1. Testaufbau und Testparameter	67
6.2. Ergebnisse im Labor.....	68
6.3. Ergebnisse am realen Isolierstoß und im Feld	71
6.4. Zusammenfassung	72
7. EINFLUSS VON SKKM AUF DEN REIBUNGSKOEFFIZIENTENVERLAUF IM LABOR – STUFE 3.....	74
7.1. Prüfkette	74
7.1.1. Auswahl der Teststände für die Prüfkette	77
7.1.2. Vergleich von Realsystem mit Modellversuchen	80
7.2. Analytische Berechnung und Finite Elemente Analyse der auftretenden Kontaktbedingungen.....	81
7.2.1. Zweiseiben-Tribometer	82
7.2.2. Rad-Schiene-Teststand	88
7.2.3. Rad-Schiene-Kontakt im Feld	93
7.2.4. Vergleich von Realsystem mit Modellsystemen	98
7.3. Beschreibung der Laborexperimente	99

7.3.1.	Hochlast-Zweischeiben-Tribometer	100
7.3.2.	Rad-Schiene-Teststand	114
7.3.3.	Aufbringung von SKKM	122
7.4.	Ergebnisse der Laborexperimente	127
7.4.1.	Auswahl der SKKM.....	127
7.4.2.	Hochlast-Zweischeiben-Tribometer	127
7.4.3.	Rad-Schiene-Teststand	137
7.4.4.	Zusammenfassung	143
8.	FELDVERSUCHE – STUFE 4	145
8.1.	Beschreibung der Durchführung	145
8.1.1.	Test- und Messequipment	146
8.1.2.	Versuchsvorbereitung.....	150
8.1.3.	Versuchsablauf.....	153
8.1.4.	Versuche mit Wasser.....	155
8.1.5.	Versuche mit Laub.....	156
8.1.6.	Versuche mit nachträglicher Besandung.....	157
8.2.	Ergebnisse.....	157
8.2.1.	Bremswege.....	158
8.2.1.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	165
9.	ÜBERTRAGBARKEIT VON LABORVERSUCHEN AUF FELDVERSUCHE	166
10.	MEHRSTUFIGES BEURTEILUNGSVERFAHREN IN ANWENDUNG	171
11.	MÖGLICHE EINFLÜSSE AUF WARTUNG UND INSTANDHALTUNG VON AUFBRINGUNGSANLAGEN	174
12.	AUSARBEITUNG FÜR REGELWERKE UND NORMEN	175
13.	ZUSAMMENFASSUNG	177
14.	REFERENZEN	179
	Abbildungsverzeichnis	186
	Tabellenverzeichnis	191

1. ERKLÄRUNG (DISCLAIMER)

Im Rahmen des Projektes SafeRail wurden zwei Masterarbeiten verfasst:

- Stefan Zechner: Untersuchung des Einflusses von Schienenkopfkonditioniermitteln auf den Reibungskoeffizienten am Rad-Schiene-Teststand der TU Wien – Verifizierung mittels Feldversuche, TU Wien, 2022
- Philipp Andreas Stadlmair: Auswirkungen unterschiedlicher Schienenkopfkonditioniermittel und Witterungsbedingungen auf den Reibungskoeffizienten mittels neuartiger Modellversuche, TU Wien, 2022

Diese Arbeiten stellen einen wesentlichen Anteil der Projektarbeit dar. Daher übernimmt dieser Abschlussbericht Teile aus den Masterarbeiten. Dies wird am Anfang des jeweiligen Kapitels vermerkt, hierbei wurde bewusst auf Anführungszeichen verzichtet.

2. HINTERGRUND UND PROJEKTZIELSETZUNG

Der Eisenbahnpassagier- und Güterverkehr hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen und wird auch weiter steigen. Für einen sicheren Betrieb darf der Reibungskoeffizient einen Mindestwert von $\mu = 0,15$ nicht unterschreiten. Damit können die geforderten Bremswege eingehalten und Traktionsprobleme verhindert werden. Aufgrund von Umgebungseinflüssen und witterungsbedingten Ursachen, wie z.B. Regen, Laub, Staub und Schnee, kann es zu Verringerung des Reibungskoeffizienten kommen. Ebenfalls soll für optimale Betriebsverhältnisse der Reibungskoeffizient einen maximalen Wert von $\mu = 0,4$ nicht überschreiten, da dies zu erhöhtem Verschleiß und Quietschgeräuschen führen kann. Schienenkopfkonditioniermittel (SKKM) haben den Zweck, den Reibungskoeffizient in dem gewünschten Bereich 0,15 bis 0,4 einzustellen und so Lärm und Verschleiß in Gleisbögen zu reduzieren sowie zu lange Bremswege zu verhindern. Trotz der hohen Sicherheitsrelevanz gibt es derzeit kein normiertes Beurteilungsverfahren für die Anwendung von Schienenkopfkonditioniermitteln.

Das Projekt „SafeRail – Beurteilungsverfahren Schienenkopfkonditioniermittel“ hat die Zielsetzung, erstmals ein einheitliches und umfassendes Beurteilungsverfahren zu entwickeln, welches objektive Nachweise zur Sicherstellung eines definierten Reibungskoeffizienten zwischen Rad und Schiene bzw. der Einhaltung der erforderlichen Bremsweglängen, der Nichtüberbrückung von Isolierstößen und der Unbedenklichkeit bzgl. Umweltverträglichkeit umfasst. Die Labormethode für die Bestimmung der Reibungskoeffizienten folgt einer Messkette aus Modelltests, Full-Scale-Tests zur Vorvalidierung und Feldversuche zur Validierung des Modelltests.

Für den Reibungskoeffizienten und die Isoliereigenschaften werden Einflüsse auf die Sicherheit umfassend untersucht und kategorisiert, insbesondere Temperatur und Nässe. Zur kosten- und zeitgünstigen Abwicklung der Nachweise wird ein mehrstufiges Beurteilungsverfahren erarbeitet. Dies soll den Genehmigungszeitraum und die Kosten für die Zulassung deutlich reduzieren. Weiteres wesentliches Ergebnis sind Textbausteine zu den genannten Nachweisverfahren für künftige Normen und Regelwerke, die um Aspekte der SKKM-Beschaffung, -Lagerung und -Entsorgung sowie Wartung und Instandhaltung von Aufbringungsanlagen ergänzt werden.

3. STAND DER TECHNIK

Um zukünftige Charakterisierungen und definierte Beurteilungsverfahren für die Anwendung von SKKM vorzugeben, wurde in diesem Kapitel eine Recherche der bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Arbeiten hinsichtlich SKKM zusammengefasst. Die Inhalte in diesem Kapitel wurden zum großen Teil aus den Literaturrecherchen der Masterarbeiten von Stefan Zechner¹ und Philipp Andreas Stadlmair² übernommen.

3.1. Tribologisches System

Beim Rad-Schiene-Kontakt treten verschiedene lokale Kontaktbeanspruchungen, materielle Komponenten, Reibungs- und Verschleißarten auf. Der Aufbau entspricht einem tribologischen System nach Abbildung 1. Dabei gehen die Eingangsgrößen, wie zum Beispiel Oberflächenstruktur, Beanspruchungskollektiv und Reibungszustand, in das System ein. Die Elemente des tribologischen Systems bestehen aus werkstofflichen Komponenten und dem örtlich und zeitlich veränderlichen Kollektiv der Beanspruchung (in Form von Bewegungs-, Belastungsart und Temperatur) als Eingangsgrößen, aus denen der Reibungszustand des tribologischen Systems folgt. Änderungen und Verluste des tribologischen Systems werden als Ausgangsgrößen erhalten.

Die materiellen Komponenten sind:

- Grundkörper
- Gegenkörper
- Zwischenstoff (z.B.: Schmierstoffe), Umgebungsmedium (z.B.: Luft)

¹ St. Zechner, Untersuchung des Einflusses von Schienenkopfkonditioniermitteln auf den Reibungskoeffizienten am Rad-Schienen-Teststand der TU Wien, Diplomarbeit, Wien 2022

² Ph. A. Stadlmair, Auswirkungen unterschiedlicher Schienenkopfkonditioniermittel und Witterungsbedingungen auf den Reibungskoeffizienten mittels neuartiger Modellversuche, Diplomarbeit, Wien 2022

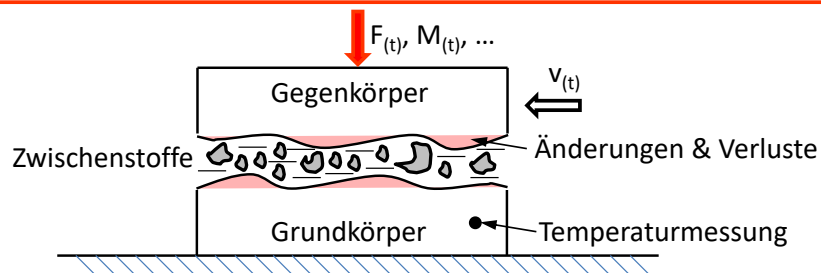
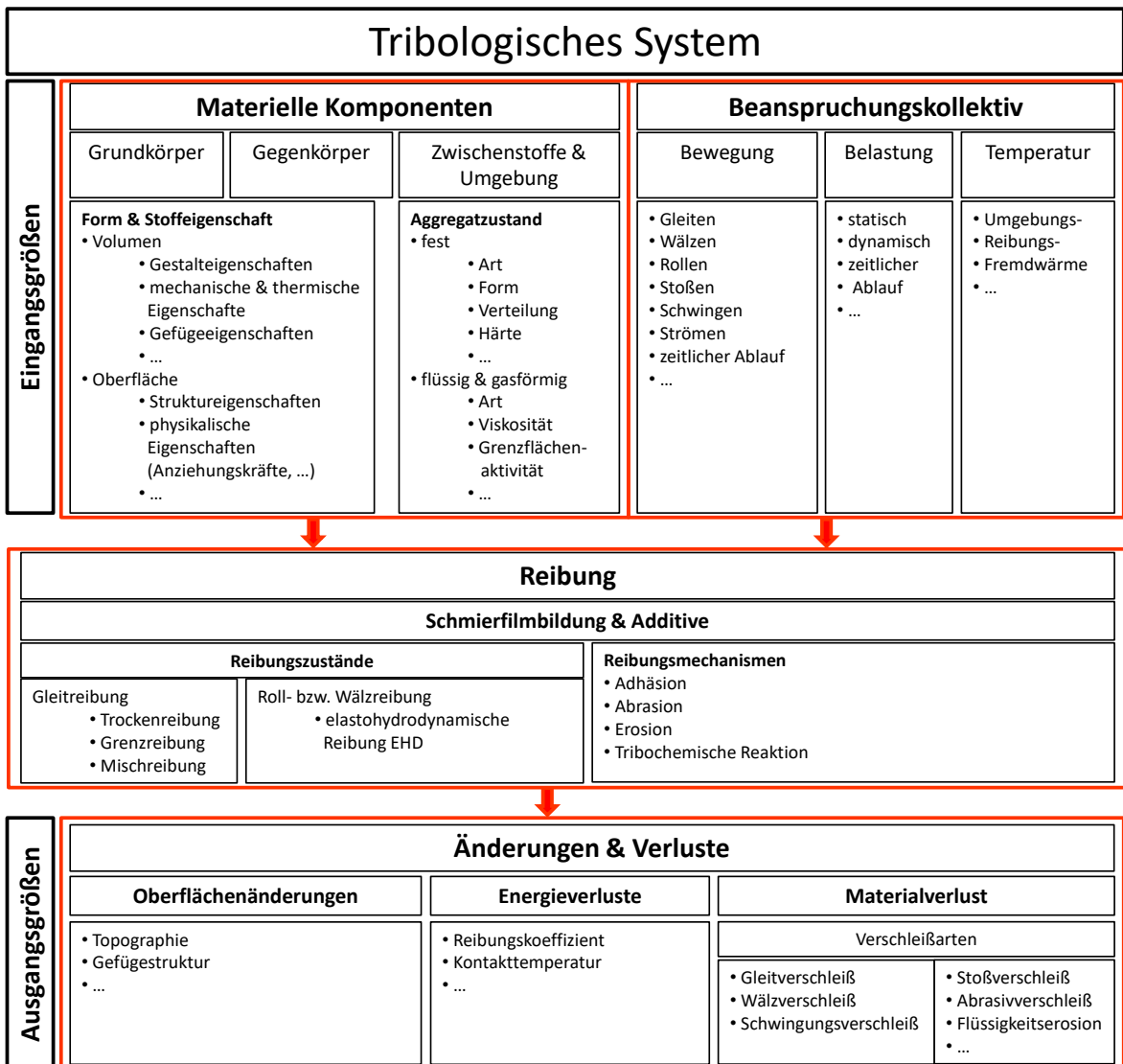


Abbildung 1: Tribologisches System, modifiziert nach ^{3, 4, 5}

³ H. Czichos und K.-H. Habig, Tribologie Handbuch, 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2020.

⁴ K. Sommer, H. Rudolf und J. Schöfer, Verschleiß metallischer Werkstoffe, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2014.

⁵ A. Trausmuth, Oberflächenermüdung von nitrierten, einsatz- und durchgehärteten Werkstoffen, Dissertation, Leoben 2012.

Bei Untersuchungen von tribologischen Vorgängen können nach *Muhs et al.*⁶ alle beteiligten Komponenten nur gemeinsam betrachtet werden. Eine unabhängige einzelne Betrachtung ist aufgrund der Wechselwirkungen nicht möglich. Im Vergleich zu geschlossenen tribologischen Systemen, z.B. Gleitlager, weist der Rad-Schiene-Kontakt ein wesentlich komplexeres System mit offenem Systemcharakter auf.

Aus dem tribologischen System ergeben sich die Änderungen und die Verluste. Durch den Materialverlust an den Kontaktzonen der involvierten Bauteile kommt es zu Oberflächenschädigungen, die zu einem Ausfall führen können. In Abhängigkeit von der tribologischen Struktur, der Belastungskollektive und dem Reibungszustand ergeben sich unterschiedlich wirkende Verschleißmechanismen, siehe Abbildung 2. Jeder Verschleißvorgang geht mit einem Energieaufwand einher, der dem tribologischen System zugefügt werden muss und daher bewegungshemmend wirkt.

Verschleißmechanismen		Kennzeichen	Merkmale
Adhäsion und Scherung			<ul style="list-style-type: none"> • Vertiefungen • Risse • Werkstoffübertragung • Verformungen • Gefügeänderungen
Abrasion (Riefen oder Mikrospalten)			<ul style="list-style-type: none"> • Riefen • Span • Mulden • Verformungen • Gefügeänderungen
Oberflächen-zerrüttung	Grübchen (Pitting)		<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Risse • Grübchen • Gefügeänderungen
	Graufleckigkeit		
	Abblättern		
Thermisch- mech. Oberflächen-zerrüttung (Fressen)			<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenverschweißung • Gefügeänderungen • Werkstoffübertragung
Tribo-chem. Reaktionen und physik. Wechselwirkungen	Reaktionsschichtbildung		<ul style="list-style-type: none"> • Schichtbildung • Oxidation
	Ablation		<ul style="list-style-type: none"> • Verdampfen • Zersetzen • Ausgasen
Plastische Deformationen			<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Gefügeänderungen

Abbildung 2: Verschleißmechanismen, modifiziert nach ^{3, 4, 5}

⁶ D. Muhs, H. Wittel, M. Becker, D. Jannasch und J. Vošiek, *Roloff/Matek Maschinenelemente*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003.

Beschreibung der Verschleißmechanismen⁴:

- Adhäsion tritt in Form eines allmählichen Materialabtrages an der Oberfläche auf. Es entstehen Vertiefungen und Risse, welche durch das punktuelle Verschweißen der Rauigkeitsspitzen zu begründen sind.
- Bei der Abrasion (Riefen oder Mikropflügen) wird der Werkstoff unter der Einwirkung von harten, abrasiven Teilchen, stark plastisch verformt. Diese harten Teilchen verursachen Riefen, Mulden und Späne, die die Abrasion fördern.
- Die Oberflächenzerrüttung kann als Überbegriff für Grübchen (Pittings), Mikropittings und Abblätterungen definiert werden. Oberflächenzerrüttung ist eine Folge von Materialermüdung. Bei Grübchen (Pittings) tritt diese unterhalb der Oberfläche auf, wo die lokale Vergleichsspannung am größten ist. Bei Mikropittings ist die Werkstoffermüdung in dünnen Oberflächenschichten bis etwa 25 μm Tiefe zu beobachten. Diese wird als Graufleckigkeit definiert. Abblätterungen bilden sich speziell bei harten Oberflächen, wie beschichtete oder nitrierte Oberflächen.
- Thermisch-mechanische Oberflächenzerrüttung (Fressen) tritt infolge des Versagens des Schmierfilms auf. Die Werkstoffe der beiden Kontaktflächen verschweißen aufgrund der Pressung und höheren Temperatur miteinander und werden unmittelbar danach wieder getrennt.
- Tribochemische Reaktionen und physikalische Wechselwirkungen können als Überbegriff für Reaktionsschichtbildung und Ablation definiert werden. Reaktionsschichtbildung entsteht bei Verwendung von Schmierstoffen, wobei durch chemische Reaktion und physikalische Wechselwirkung an der Oberfläche eine schützende Schicht entsteht. Bei der Ablation wird die Oberfläche zersetzt. Dadurch tritt eine Schädigung auf.
- Plastische Deformationen treten bei zu hoher Kontaktpressung auf und verformen die Oberfläche, was zu Schädigungen führen kann.

Welche Verschleißmechanismen im Rad-Schiene-Kontakt auftreten ist von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig⁷:

- Fremdpartikel (z.B.: Brems sand, Laub)
- Gleisverwindungen
- Oberflächenbeschaffenheit
- Unterschiedliche Belastungen
- Unterschiedliche Kontaktzonen zwischen Rad und Schiene
- Werkstoffänderungen
- Witterung
- Zwischenstoffe (z.B.: SKKM)

⁷ L. Fendrich, W. Fengler, Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2013.

In Ergänzung zu ⁷ sind noch die Antriebs- und Verzögerungsbedingungen, der Schlupf (siehe Kapitel 3.3.2) und der Gleisbogen (Radius, Innen- und Außenschiene) als Einflussgrößen anzuführen.

Beim Rad-Schiene-Kontakt tritt hauptsächlich eine Kombination von Roll- und Gleitbewegung auf. Gleitanteile werden dem reinen Rollvorgang überlagert. Je nach Betriebsbedingung, wie gerader Lauf oder Bogenfahrt ohne Berücksichtigung von Witterung und Fremdpartikel, kann der Gleitanteil überwiegen. Daher sind die häufigsten Verschleißmechanismen:

- Rollkontaktermüdung
- Oberflächenverschleiß

Die Traktion und die Verschleißmechanismen sind stark von der Reibung und der wahren Kontaktfläche abhängig. Daher wird dies nachstehend genauer beschrieben.

3.2. Reibung

Nach der Definition von *Czichos et al.* ³ ist Reibung ein Bewegungszustand. Er äußert sich als Widerstandskraft sich berührender Körper gegen die Einleitung einer Relativbewegung (Ruhreibung, statische Reibung) oder deren Aufrechterhaltung (Bewegungsreibung, dynamische Reibung). Neben dieser „äußeren Reibung“ gibt es die „innere Reibung“ von Stoffen (Viskosität), dies wird in der Rheologie beschrieben.

Die Reibung wird einerseits durch Reibungszustände/Reibungsbegriffe beschrieben, die anhand der Stribeckkurve, siehe Abbildung 3, beschrieben werden können. In Tabelle 1 sind die Reibungszustände mit den jeweiligen üblichen Reibungskoeffizienten aufgelistet. Unter den Begriffen ist nach *Czichos et al.* ³ Folgendes zu verstehen:

- I. *Festkörperreibung*: Reibung beim unmittelbaren Kontakt fester Körper.
- II. *Grenzreibung*: Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen Grenzschichtfilm bedeckt sind.
- III. *Mischreibung*: Reibung, bei Koexistenz von Festkörper-/Grenzreibung und Flüssigkeitsreibung.
- IV. *Flüssigkeitsreibung*: Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden flüssigen Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann.
- V. *Gasreibung*: Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden gasförmigen Film, der aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt werden kann.

Reibungsart	Reibungszustand	Zwischenstoff	Reibungs- koeffizient
Gleitreibung	I Festkörperreibung	-	0,1 bis >1
	II Grenzreibung	geringste Schmierstoff- mengen	0,1 bis 0,2
	III Mischreibung	teilweise Schmierstoff	0,01 bis 0,1
	IV Hydrodynamische Reibung	Öl	≤ 0,01
	v aerodynamische Reibung	Gas	0,0001
Roll- bzw. Wälzreibung	elastohydrodynamische Reibung, Mischreibung	Öl, Fett	0,001 bis 0,005

Tabelle 1: Reibungskoeffizienten-Größenordnung für die verschiedenen Reibungsarten und Reibungszustände ³

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass bei Festkörperreibung wesentlich größere Reibungskoeffizienten auftreten als mit Verwendung eines Schmierstoffs. Die Grenzen zwischen den einzelnen Reibungsarten sind nicht immer eindeutig bestimmbar, es können Mischformen der Reibungsarten auftreten.

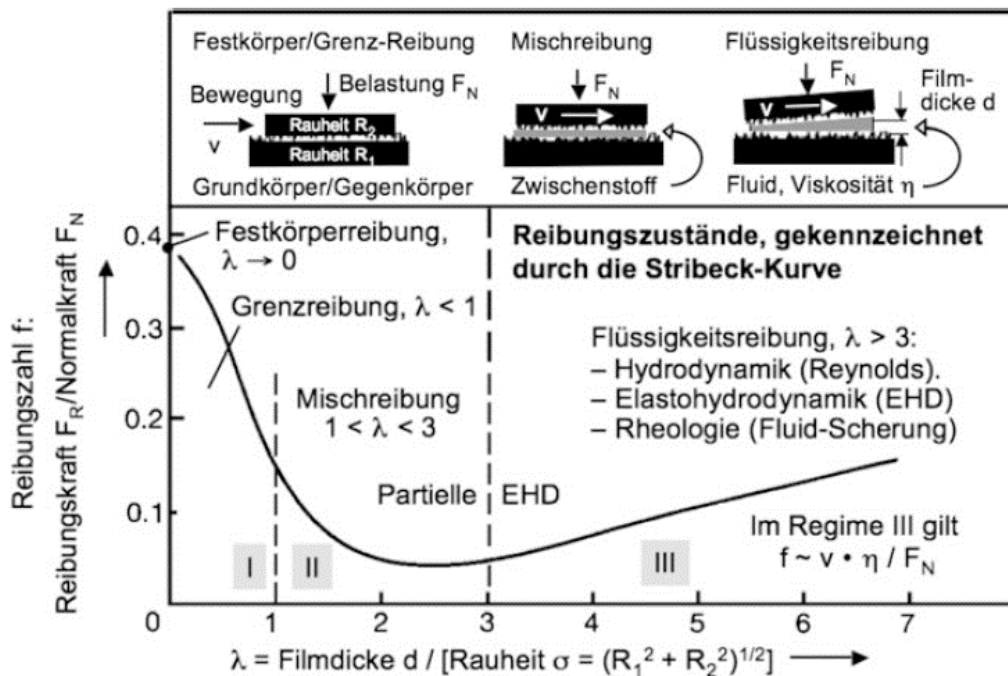


Abbildung 3: Reibungszustände/Reibungsbegriffe eines tribologischen Systems ³

Beim Rad-Schiene-Kontakt tritt Festkörperreibung ohne SKKM auf. Durch SKKM soll Grenzreibung erreicht werden.

3.3. Rad-Schiene-Kontaktmechanik

Im Allgemeinen beschäftigt sich die Kontaktmechanik mit der Beschreibung von Vorgängen während des Kontakts von Körpern. Beim Rad-Schiene-Kontakt treten Längs-, Quer- und Vertikalkräfte auf. Im allgemeinen wird zwischen Normalkontakt- und Tangentialkontaktproblem unterschieden.

Längskräfte in der Schiene können durch temperaturbedingte Längenänderung der Schiene, durch Bremsen oder Beschleunigungsvorgänge, Schieneneigenspannungen oder Schrumpfspannungen nach dem Schweißen ausgelöst werden.

Querkräfte werden durch die Spurführung der Fahrzeuge erzeugt und können in einen zentrisch wirkenden Anteil, ein Torsionsmoment und eine Führungskraft zerlegt werden. Die Führungskraft wird durch Parameter wie Achskraft, Konstruktion des Drehgestells, Feder- und Dämpfungskonstanten aber auch durch gleisgeometrische Bedingungen und die Geschwindigkeit bestimmt ⁸.

Vertikalkräfte sind als der Oberflächendruck in der Kontaktfläche definiert und werden durch die Radaufstandskräfte verursacht. Typische Achslasten bei Vollbahnen sind 22,5 t und können bis 35 t bei Schwerlastverkehr erreichen. Vertikalkräfte verursachen Normal-, Schub- und Zugeigenspannungen unter der Schienenoberfläche ⁸.

Durch die Fahrbewegung treten dynamische Kräfte auf. Diese werden durch geometrische Unregelmäßigkeiten im Rad oder in der Schiene oder aufgrund von gefederten/ungefederten Massen hervorgerufen ⁸. Die auftretenden Kräfte beim Rad-Schiene-Kontakt entstehen grundsätzlich durch das Zusammenwirken von Fahrzeug, Ladung, Geschwindigkeit, Gleisstruktur, usw. Hinsichtlich der Veränderung der Ladung und Gleisstruktur mit der Zeit kann zwischen periodischer, zufälliger oder singulärer Anregung unterschieden werden. Der Frequenzbereich beträgt bei Beschleunigung des Fahrzeugkastens von 0,5 Hz bis 1 Hz und bei geometrischen Unregelmäßigkeiten bis zu 2000 Hz ⁹.

⁸ B. Lichtberger, Handbuch Gleis, Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, 2003.

⁹ C. Esveld, Modern Railway Track, 2. Auflage, MRT-Productions, 2001.

3.3.1. Normalkontaktproblem

Eine Lösung für das Normalkontaktproblem fand bereits *Hertz*¹⁰ im Jahr 1881. Die Hertzsche Kontakttheorie ermöglicht die Ermittlung der Kontaktfläche sowie der darin herrschenden Spannungsverteilung mithilfe der Berührgeometrien und der Werkstoffeigenschaften der Kontaktkörper sowie der wirkenden Normalkraft. Es werden folgende Annahmen in der Hertzschen Kontakttheorie getroffen¹⁰:

Mit dieser Theorie von 1881¹⁰ (von Heinrich Hertz, 1857 - 1894) lässt sich die elastische Kontaktdeformation gekrümmter Körper, unter den Voraussetzungen rein elastischer Materialien (elastischer Kontakt), mit ideal glatten, ebenen Oberflächen, ohne Schmierfilmwirkung unter der ausschließlichen Wirkung von Normalkräften, d.h. im reibungsfreien Zustand, behandeln³. Die Bedeutung der Hertzschen Theorie zeigte sich, als eine Vergleichsspannungshypothese (von Mises und Tresca) zur Verfügung stand und man damit die Beanspruchungen im Körper mit der Fließspannung vergleichen konnte. Damit lässt sich die Größe der Kontaktfläche, die Flächenpressung, der Spannungstensor und die maximale Hertzsche Pressung in der Kontaktfläche analytisch berechnen. Durch die Approximation der Geometrie nicht konformer elastischer Festkörper wie Kugel oder Zylinder entstehen vernachlässigbar kleine Fehler, wenn die Entfernung des Kontaktpunktes viel kleiner als der Krümmungsradius ist¹¹.

Zur Lösung des Kontaktproblems hat Hertz die in der Himmelsmechanik verwendeten Potentialfunktionen als elastische Grundgleichungen genutzt. Seine Betrachtungen stützen sich auf die durch diese Funktionen ausgedrückte Anziehungskräfte eines gleichmäßig mit der Masse gefüllten Ellipsoids, wobei die berührungsseitige Achse unendlich klein gegenüber den Achsen der Druckfläche ist. Bei der Anwendung der Potentialtheorie wurden die Kontaktkörper nicht als Paraboloiden, sondern als elastische Halbräume betrachtet. Diese Annahme ist immer akzeptabel, da die elastischen Verformungen um mehrere Größenordnungen kleiner sind als die Krümmungsradien. Nach der streng bewiesenen Theorie von Hertz berühren sich die gekrümmten Festkörper in einer Druckfläche, deren Projektion auf eine zur Krafrichtung senkrechte Ebene eine Ellipse mit den Halbachsen a und b ist. Der Kontaktpressungsverlauf, mit p als Druck, stellt ein Ellipsoid dar, das über der gepressten Kontaktfläche aufgebracht ist^{11,12}. Der Pressungsverlauf kann durch die

¹⁰ H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, 156 – 171, 1881.

¹¹ M. Wisniewski, Elastohydrodynamische Schmierung, Handbuch der Tribologie und Schmierungs-technik Band 9, 1. Auflage, expert Verlag, Renningen 2000.

¹² K. L. Johnson, Contact mechanics, Cambridge University Press, 1992.

Distanz x und y von Mittelpunkt ausgehen (der maximalen Pressung) berechnet werden, siehe Gleichung 1:

$$p = p_{\max} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \text{ für } 1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2 \geq 0 \quad 1$$

Bei einem realen Kontakt gibt es zahlreiche zusätzliche Effekte, welche die Werkstoffanstrengung beeinflussen, aber nicht durch die allgemeine Hertz'sche Theorie berücksichtigt werden. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Einflüsse auf die Werkstoffanstrengung beim Hertz'schen Kontakt dargestellt.

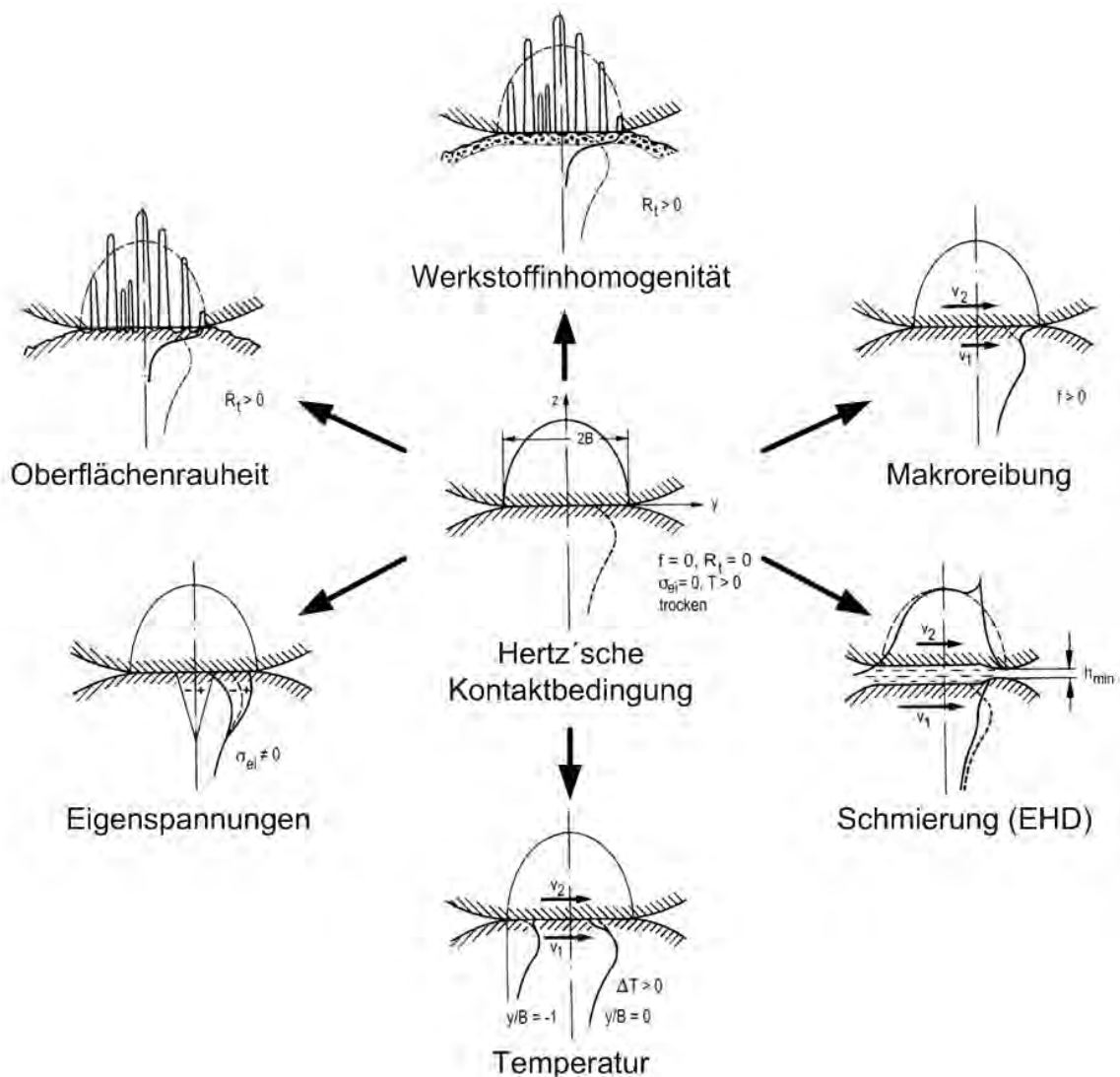


Abbildung 4: Einflüsse auf die Werkstoffanstrengung, modifiziert nach ^{4, 5}

Es gibt viele Erweiterungen zur Hertz'schen Theorie, um die in Abbildung 4 dargestellten Einflüsse zu berücksichtigen. Jedoch wird hier nicht auf alle diese Einflüsse eingegangen. Für die Behandlung des Normalkontaktproblems nach Hertz wurden die Arbeiten von

Deeg¹³ und Johnson¹² herangezogen. Die Formeln zur Hertzschen Kontakttheorie für Punkt- und Linienkontakt sind in den folgenden Sub-Kapiteln angeführt. Als Berührfläche ergibt sich durch die Geometrien von Rad und Schiene eine Ellipse mit den Halbachsen a und b . Die Kontaktprofile für den Rad-Schiene-Teststand sind im Kapitel 7.2.2 einerseits und für das Realsystem im Kapitel 7.2.3 andererseits aufgelistet. Der Verlauf der Flächenpressung innerhalb der Ellipse hat die Form eines Ellipsoids mit dem Maximum in der Mitte der Berührfläche. Empirische Versuche dazu zeigten, dass die theoretischen Maximalspannungen im Kontaktgebiet höher sind als in der Praxis, siehe z.B.¹⁴. Dennoch wird die Hertzsche Theorie aufgrund der Einfachheit, des geringeren Rechenaufwands und der geringen Anzahl an Eingabeparametern bis heute verwendet.

3.3.1.1. Punktkontakt

Grundlegend wird bei Punktkontakt zwischen drei Kontaktmodellen unterschieden:

- Modell 1: Kugel-Kugel
- Modell 2: Kugel-Ebene
- Modell 3: Kugel-Stift

Die entstehende Berührfläche nach *Hertz* ist bei Modell 1 und 2 eine symmetrische Kreisfläche. Ergänzt werden die Modelle durch den Sonderfall, der bei Kontaktkörpern mit unterschiedlicher Krümmung auftritt (Modell 3). Seine Untersuchungen zeigen, dass die sich berührenden Festkörper eine Druckfläche bilden, die in Projektion auf eine zur Krafrichtung senkrechte Ebene eine Ellipse ist, die durch ihre große Halbachse a und ihre kurze Halbachse b gekennzeichnet ist, siehe Abbildung 5.

Für die nachfolgenden Berechnungen wurde die erste Hauptkrümmungsebene quer zur Fahrtrichtung (y -Achse) und die zweite Hauptkrümmungsebene zur Fahrtrichtung (x -Achse) definiert. Für beide Kontaktkörper wurde ein kartesisches Koordinatensystem verwendet, mit dem Ursprung im Erstberührungspunkt der Kontaktkörper. Die z -Achse zeigt jeweils in das Körperinnere. Die sich einstellenden Radien werden mit r_{11} , r_{12} , r_{21} und r_{22} bezeichnet. Der erste Index kennzeichnet den zu betrachtenden Körper, der zweite Index beschreibt den Radius des Körpers in der betrachtenden Ebene. Je nachdem, ob sich der Mittelpunkt des Krümmungsradius innerhalb oder außerhalb des Körpers befindet, ist dieser positiv oder negativ. Der Reziprokwert des Radius r_{ji} wird Krümmung ρ_{ji} genannt.

¹³ E. W. Deeg, New Algorithms for Calculating Hertzian Stresses, Deformations, and Contact Zone Parameters, AMP Journal of Technology, 2, 14 – 24, 1992.

¹⁴ K. Knothe, S. Stichel, Schienenfahrzeugdynamik, Springer Verlag, 2003.

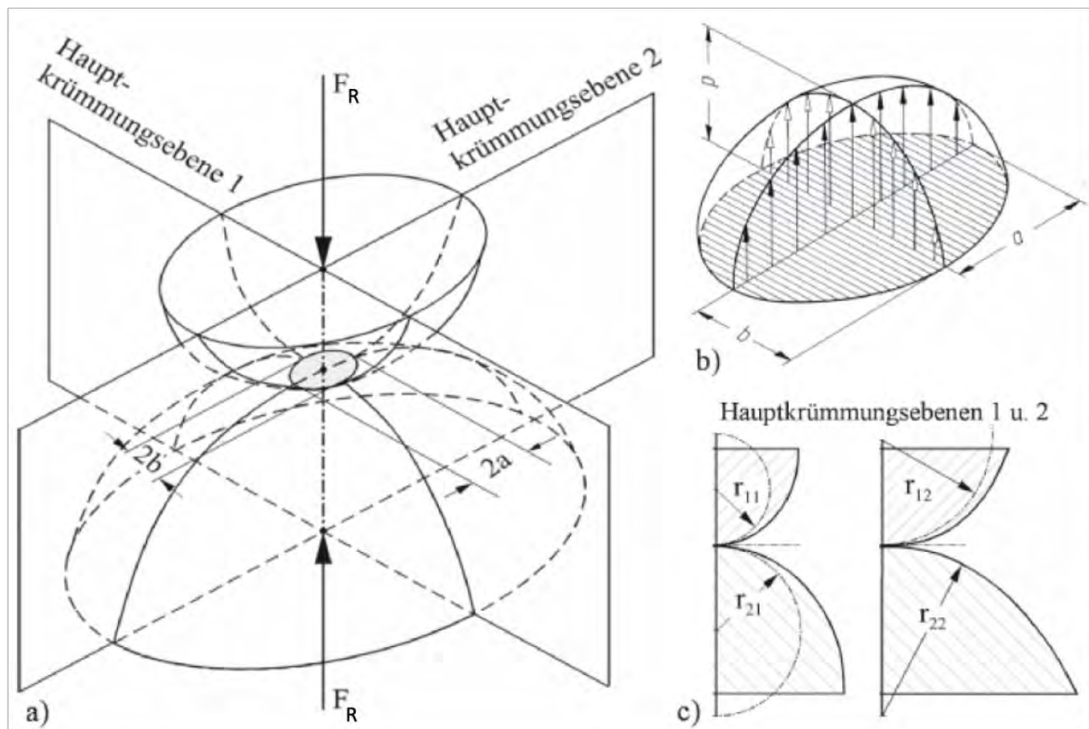


Abbildung 5: Berührung zweier allseitig gekrümmter Körper. a) Räumliche Ansicht; b) Druckverteilung in der ellipsoidalen Kontaktfläche; c) Hauptkrümmungsebenen.

Modifiziert nach ¹⁵

Für die Berechnung der Kontaktfläche und der auftretenden Flächenpressung wurde *Steinhilper und Bernd* ¹⁵ herangezogen. Die Berechnung stützt sich auf eine Zahlentafel von *Bär* ¹⁶, um die Hertzschen Beiwerte ξ , η und $\frac{2k}{\pi\xi}$ zu bestimmen. Diese Werte werden in Abhängigkeit des Hilfswertes $\cos(\tau)$ angegeben, welcher mit Hilfe des Flächenpressungsverlaufs in unterschiedlichen Richtungen ρ_{xy} nach Gleichung 2 berechnet wird ¹⁷

$$\cos(\tau) = \frac{\rho_{11} - \rho_{12} + \rho_{21} - \rho_{22}}{\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}} \quad 2$$

¹⁵ W. Steinhilper, S. Bernd, Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

¹⁶ C. Bär, Längspress- und Klebverbindungen unter statischer und wechselnder Torsion, Dresden: Dissertation, 1995.

¹⁷ A. Stribersky, Skriptum Schienenfahrzeugbau Vorlesung, Wien: TU Wien, 2019.

Wie bereits erwähnt, hat die Kontaktfläche zwischen zwei allseitig gekrümmten Körpern, die Form einer Ellipse, und ihre Halbachsen a und b werden mittels Gleichung 3 und 4 berechnet. Die Werte der Halbachsen a und b sind von der Normalkraft F , der Querkontraktionszahl ν und dem E-Modul E abhängig.

$$2a = 2\xi \sqrt[3]{\frac{3F(1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}} \quad 3$$

$$2b = 2\eta \sqrt[3]{\frac{3F(1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}} \quad 4$$

Mit den bekannten Halbachsen a und b lässt sich mit Gleichung 5 die Fläche der Ellipse $A_{Ellipse}$ bestimmen.

$$A_{Ellipse} = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \xi \cdot \eta \sqrt[3]{\left[\frac{3F_R(1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}\right]^2} \quad 5$$

Mit Hilfe der ermittelten Kontaktfläche ist es nun möglich, die maximale Flächenpressung zu bestimmen. Das Maximum der Pressung liegt in der Mitte der Druckellipse und beträgt das 1,5-fache der mittleren Pressung, die zur Vereinfachung mittels der Radlast F_R berechnet werden kann, siehe Gleichung 6.

$$p_{max} = \frac{1,5 \cdot F_R}{A_{Ellipse}} \quad 6$$

Innerhalb der Kontaktfläche kann neben der maximalen Flächenpressung p_{max} auch der Verlauf der Flächenpressung $p(x,y)$ angegeben werden. Diese hat die Form eines Halbellipsoids und wird mittels Gleichung 7 und 8 definiert.

$$p(x,y) = p_{max} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad 7$$

$$1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \geq 0 \quad 8$$

Zur Berechnung der Oberflächenspannungen für den vorliegenden Fall der elliptischen Kontaktflächen wurde eine Vereinfachung vorgenommen, da die Darstellung der Spannungsverläufe kompliziert ist. Die Formeln für die Berechnungen sind z.B. in ^{18,19} angeführt. Es wird der Spezialfall eines rotationssymmetrischen Körpers betrachtet, um wesentliche Abweichungen der Ergebnisse zu vermeiden. Die nachfolgenden

¹⁸ J. Barber, Contact Mechanics, Springer, 2018.

¹⁹ K. Johnson, Contact mechanics, 1. Auflage, Cambridge University Press, reprinted Cambridge 1999.

Berechnungen beschränken sich daher auf den Fall des kreisförmigen Punktkontaktes mit dem Kontaktradius i . An den freien Oberflächen außerhalb des Kontaktbandes herrscht ein ebener Spannungszustand $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$. Innerhalb des Kontaktbandes entspricht σ_{zz} der negativen Verteilung der Flächenpressung (Gleichung 11). Aufgrund der Annahme der reibungsfreien Berührung sind innerhalb der Kontaktfläche die Schubspannungskomponenten σ_{xz} und σ_{yz} gleich Null. σ_{xz} ist aufgrund der kreisförmigen Kontaktfläche ebenfalls Null.

Nach *Johnson*¹⁹ ergeben sich die Hauptspannungen $\sigma_{xx}(x)$, $\sigma_{yy}(x)$ und $\sigma_{zz}(x)$ innerhalb und außerhalb der Kontaktfläche wie folgt:

$$\sigma_{xx}(x) = \begin{cases} p_{max} \cdot \left[\frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{i^2}\right)^3} \right) - \sqrt{1 - \frac{x^2}{i^2}} \right] & 0 \leq x \leq i \\ p_{max} \left[\frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \right] & i \leq x \leq \infty \end{cases} \quad 9$$

$$\sigma_{yy}(y) = \begin{cases} p_{max} \cdot \left[\frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{i^2}\right)^3} \right) - 2 \cdot \nu \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{i^2}} \right] & 0 \leq x \leq i \\ p_{max} \left[-\frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \right] & a \leq x \leq \infty \end{cases} \quad 10$$

$$\sigma_{zz}(x) = \begin{cases} p_{max} \cdot \left[-\sqrt{1 - \frac{x^2}{i^2}} \right] & 0 \leq x \leq i \\ 0 & i \leq x \leq \infty \end{cases} \quad 11$$

Die Berechnungen der Oberflächenspannungen mit Schlupf sind wesentlich komplexer. Die ersten analytischen Lösungen des elastischen Kontakts zwischen zwei Kugeln unter kombinierter Normal- und Tangentiallast wurden von *Cattaneo* 1938²⁰ und in *Johnson* 1985¹⁹ präsentiert. Die Studien basieren auf den Annahmen, dass die anfängliche, durch Normalbelastung gebildete, Haftzone nicht in ihrer Größe durch die zusätzliche tangentielle Belastung beeinflusst wird. Die tangentielle Belastung erzeugt lediglich eine zunehmende

²⁰ C. Cattaneo, Sul contatto di due corpi elastici distribuzione locale degli sforzi, Rend. dell'Accad. Naz. Dei Lincei, 27, 342 – 348, 1938.

ringförmige Gleitzone am Rand der Kontaktfläche. In dieser Gleitzone gilt das Coulombsche Reibungsgesetz mit dem Reibungskoeffizienten μ . Mit zunehmender tangentialer Belastung dehnt sich die ringförmige Gleitzone zur Mitte der kreisförmigen Kontaktfläche hin aus, die zentrale Haftzone schrumpft und verschwindet schließlich zu Beginn des Gleitens ¹⁴.

Mithilfe der Annahme der Hertzschen Kontaktdruckverteilung und der Anwendung der Mindlinschen Scherspannungsverteilung bzw. Querkraftverteilung $q(x)$ (bei Schlupf) ⁴ siehe Gleichung 12, entwickelte *Hamilton* ²¹ explizite Gleichungen für die Spannungen unter dem Kontakt, siehe Gleichung 13.

$$q(x) = p(x) * \mu \quad 12$$

Die Gleichungen für die Oberflächenspannung $\sigma_{xx}(x)$ in x-Richtung lauten wie folgt:

$$\sigma_{xx}(x) = \begin{cases} p_{max} \cdot \left[\frac{1-2v}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{i^2}\right)^3} \right) - \sqrt{1 - \frac{x^2}{i^2}} \right] & i \leq x \leq \infty \\ + \frac{p_{max}}{i} \left\{ \left[-x \cdot \left(1 + \frac{v}{4}\right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{i}{\sqrt{x^2 - i^2}} \right) + \frac{i \cdot x \cdot \sqrt{x^2 - i^2}}{x^4} \right] \right. \\ \quad \times \left. \left\{ v \cdot (x^2 - i^2) \cdot \left(\frac{3}{2} - 2 \right) + \frac{7vx^2}{4} - 2vx^2 + x^2 \right\} \right\} \\ p_{max} \left[\frac{1-2v}{3} \cdot \frac{i^2}{x^2} \right] + \frac{p_{max}}{i} \left[\frac{-\pi \cdot x}{2} \left(\frac{v}{4} + 1 \right) \right] & 0 \leq x \leq i \end{cases} \quad 13$$

3.3.1.2. Linienkontakt

Linienberührung tritt auf, wenn zwei Körper in Kontakt treten, wobei ein Körper nur eine Krümmung in einer Hauptkrümmungsebene aufweist und der Kontaktpartner ebenfalls eine Krümmung in derselben Ebene besitzt (Zylinder-Zylinder-Modell) oder eben ist (Zylinder-Ebene-Modell), siehe Abbildung 6. Unter Last entsteht durch elastische Deformationen an den Körpern eine rechteckige Kontaktfläche mit der Länge $2a$ und der Breite l . Treten zwei unterschiedlich lange Wälzylinder in Kontakt, wird die Breite der Kontaktfläche durch den kürzeren Zylinder bestimmt. Dabei bilden sich in beiden Randbereichen Druckspitzen; dieser Effekt wird auch als Kanteneffekt bezeichnet und ist von der Randgestaltung und Geometrie abhängig.

²¹ G. Hamilton, Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 197, 7 – 14, 1983.

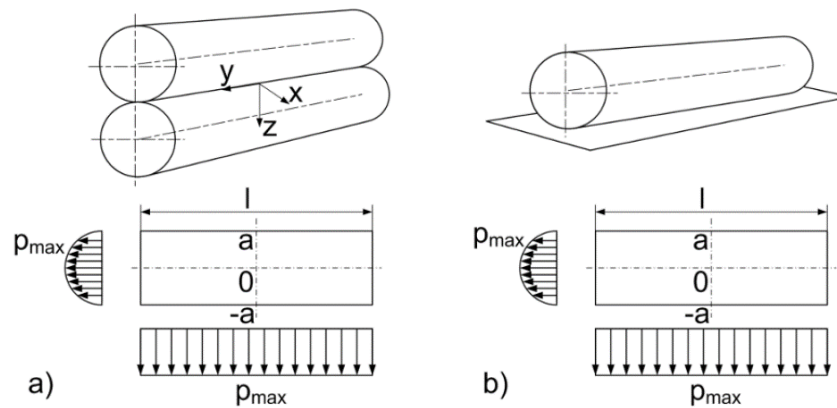


Abbildung 6: Kontaktmodell mit Kontaktfläche, modifiziert nach ^{5, 22}:

a) Zylinder-Zylinder; b) Zylinder-Ebene

Für die Bestimmung der maximalen Flächenpressung im Zylinder-Zylinder-Modell wird die Berechnung nach *Johnson* ¹⁹ und *Czichos et. al.* ³ herangezogen.

Zuerst wird eine Ersatznormalkraft F'_N für eine Einheitsdicke bzw. Einheitslänge l nach Gleichung 14 berechnet, wobei F_N die Normalkraft beschreibt, welche beide Körper aneinanderdrückt.

$$F'_N = \frac{F_N}{l} \quad 14$$

Die Breite der halben Berührfläche a ergibt sich mit:

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot F'_N}{\pi} \cdot \frac{1}{\Sigma \rho} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E}} \quad 15$$

Zur Berechnung des Krümmungsradius ρ_x für Linienberührung gilt mit den entsprechenden Vorzeichen für konvexe Krümmung (+) und konkave Krümmung (-).

$$\Sigma \rho = \rho_1 + \rho_2 \quad 16$$

Die vorhandene Flächenpressung ist von der Lage innerhalb der Kontaktfläche abhängig. Die Normalspannung in der Berührfläche ist über der Breite $2a$ elliptisch verteilt. Außerhalb der Kontaktfläche ist die Flächenpressung 0 N/mm^2 . Mit Gleichung 17 und 18 wird die Flächenpressung $p(x)$ in Abhängigkeit vom Mittenabstand beschrieben.

$$p(x) = \frac{2 \cdot F'_R}{\pi \cdot a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad 17$$

$$-a \leq x \leq a \quad 18$$

²² M. Freudenberger, S. Krenn, G. Vorlauffer, A. Trausmuth, Rad/Schiene Interaktion – Analyse der Auswirkung von Fahrzeuglasten auf Schienenstöße, Verkehrsinfrastrukturforschung 2016, Ausschreibung VIF 2016, FFG-Projektnummer: 860563, Bericht Jan. 2020.

Die größte Flächenpressung p_{max} und somit auch die größte Werkstoffbelastung treten bei Kontakten ohne Kanteneffekt in der Mitte auf bei $x = 0$. Der normierte Pressungsverlauf für Linienkontakt ist in Abbildung 7 dargestellt.

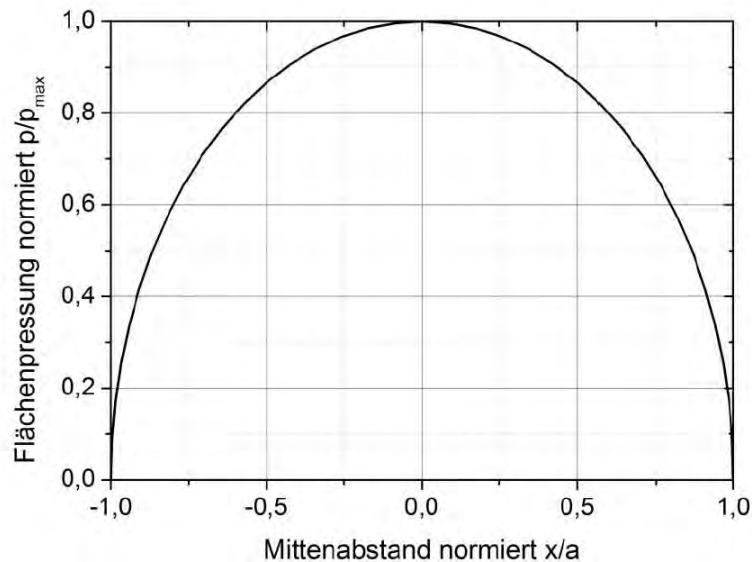


Abbildung 7: Normierter Pressungsverlauf Linienkontakt ⁵

Beim reibungslosen Linienkontakt (ohne Schlupf) treten, aufgrund eines ebenen Dehnungszustandes, innerhalb des Kontaktes nur Druck- und keine Zugspannungen auf. Die Oberflächenspannungen $\sigma_{xx}(x)$ werden durch die Flächenpressung verursacht und werden anhand der Gleichung 19 nach *Johnson*¹⁹ wie folgt berechnet:

$$\sigma_{xx}(x) = \sigma_{zz}(x) = -p_{max} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad 19$$

$$-a \leq x \leq a \quad 20$$

Innerhalb des Kontaktbandes entspricht σ_{xx} und σ_{zz} der negativen Verteilung der Flächenpressung $p(x)$. Aufgrund des ebenen Dehnungszustandes treten beim reibungslosen Kontakt nur Druckspannungen innerhalb der Kontaktfläche und keine Zugspannungen außerhalb auf. Erst durch die Berücksichtigung eines Schlupfs kann eine Zugspannung außerhalb des Kontaktbandes festgestellt werden.

Die Berechnungen der Oberflächenspannungen $\sigma_{xx}(x)$ mit Gleichung 21 mit Schlupf in x -Richtung wurden 1953 mit Hilfe von *Smit et al.* ²³ durchgeführt:

²³ J. Smit, C. K. Liu, Stresses Due to Tangential and Normal Loads on an Elastic Solid With Application to Some Contact Stress Problems, Journal of Applied Mechanics, ASME J, 20, 157 – 166, 1953.

$$\sigma_{xx}(x) = \begin{cases} -2 \cdot \mu \cdot p_{max} \left[\frac{x}{a} - \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right] & x \geq a \\ -p_{max} \left[\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{\mu \cdot 2 \cdot x}{3 \cdot a} \right] & |x| \leq a \\ -2 \cdot \mu \cdot p_{max} \left[\frac{x}{a} + \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right] & x \leq -a \end{cases} \quad 21$$

3.3.1.3. Tiefenspannungen

Zum Vergleich der unterschiedlichen Kontakte wurden die Vergleichsspannungen nach von Mises in die Tiefe ebenfalls berechnet. Die Gestaltänderungshypothese besagt, dass ein Bauteil versagt, wenn die Gestaltänderungsenergie einen materialabhängigen Grenzwert überschreitet. Die Vergleichsspannung setzt sich aus den wirkenden Zug-/Druck-Spannungen und Schubspannungen zusammen. Nach *Hertz* liegt das Maximum der von Mises-Vergleichsspannung knapp unter der Oberfläche.

Die Berechnung der von Mises-Vergleichsspannung σ_v nach Gleichung 22 erfolgte 2011 nach *Gebhardt* ²⁴:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx}(z) - \sigma_{yy}(z))^2 + (\sigma_{yy}(z) - \sigma_{zz}(z))^2 + (\sigma_{zz}(z) - \sigma_{xx}(z))^2]} \quad 22$$

3.3.2. Tangentialkontaktproblem

Beim Tangentialkontaktproblem wird auf Basis der Lösung des Normalkontaktproblems eine Beziehung zwischen den übertragenen Tangentialkräften und dem relativen Bewegungszustand hergestellt. Dafür ist zunächst der Begriff Schlupf zu definieren. Der Schlupf stellt eine Relativbewegung zwischen Rad und Schiene dar, der bei Antrieb (bzw. Verzögerung) durch die jeweils beiden Räder auf einer Achse oder im Gleisbogen aufgrund der Rollradiendifferenz zwischen Innen- und Außenrad auftritt. Im Vergleich dazu tritt beim Rollen keine Relativgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene auf.

²⁴ C. Gebhardt, Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.

Der auftretende Schlupf wird in einen Längs-, Quer- und Bohrschlupf gegliedert. Der Längsschlupf findet auf der Tangentialebene des Rades statt und ist von der Differenz der Fahrgeschwindigkeit v und der Umfangsgeschwindigkeit v_u gekennzeichnet. Der Querschlupf, ebenfalls ein translatorischer Anteil, kennzeichnet den Schräglauf des Rades. Der Bohrschlupf ist der rotatorische Anteil des Schlupfes und ergibt sich, wenn der Winkel der Drehachse des Rades und der im Kontakt gezogenen Normalen ungleich 90° ist. Nachfolgend wird in dieser Arbeit der Längsschlupf v_x stets mit dem Begriff „Schlupf“ bezeichnet.

Die genaue Definition des Schlupfes variiert je nach Anwendungsfall und wird in der Literatur unterschiedlich bezeichnet. Diese Arbeit bezieht sich auf das Gleit-zu-Roll-Verhältnis (engl. “Slide-to-Roll ratio”, *SRR*), welches üblicherweise bei Zweischeiben-Tribometer, z.B. *Arias-Cuevas et al.* ²⁵, verwendet wird:

$$SRR = \frac{\text{Gleitgeschwindigkeit}}{\text{Rollgeschwindigkeit}} = \frac{|U_1 - U_2|}{\frac{1}{2} * (U_1 + U_2)} \quad 23$$

$$SRR = \frac{w_{Prob} * r_{Prob} - w_{Schiene} * r_{Schiene}}{w_{Prob} * r_{Prob} + w_{Schiene} * r_{Schiene}} * 200\% \quad 24$$

Gleichungen 23 bzw. 24 beschreiben das Verhältnis von Translations- bzw. Gleitanteilen und Rotations- bzw. Rollanteilen. Für Wälzkontakte mit gleichsinniger Umfangsgeschwindigkeit gilt $0 < |SRR| < 2$ und für reine Rollkontakte ist $SRR = 0$.

In der wissenschaftlichen Publikation von *Havlicek und Kartnig* ²⁶ werden folgende Punkte bezogen auf Schlupf für Kranlaufräder genannt, die ebenso für Schienenfahrzeugräder gültig sind:

- Die maximal übertragbare Brems- und Antriebskraft ist abhängig vom Schlupfverhalten (Kraftschlussfunktion).
- Das Ausnützen des Haftreibungskoeffizienten ist bei höherem Schlupf mit höherem Verschleiß verbunden.
- Auch Fertigungstoleranzen und Verschleiß an den Raddurchmessern resultieren in unterschiedlichen Umfangskräften an den Rädern und somit abweichenden Schlupfwerten.

Grundlegend ist bei der Betrachtung des Schlupfs zwischen Mikro- und Makroschlupf zu unterscheiden. Bei Mikroschlupf unterteilt sich die Berührfläche in ein Haftgebiet mit

²⁵ O. Arias-Cuevas, Z. Li, R. Lewis, E. Gallardo-Hernandez, Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts, *Wear*, 268, 843 – 551, 2010.

²⁶ G. Havlicek, G. Kartnig, Ermittlung des Längsschlupfes eines angetriebenen Kranrads bei bombiertem Schienenkopf, *Logistics Journal*, 10, 2017, DOI 10.2195/lj_Proc_havilicek_de_201710_01

gleicher Geschwindigkeit sowie ein Gleitgebiet mit Relativgeschwindigkeit zwischen den Kontaktpartnern, siehe Abbildung 8.

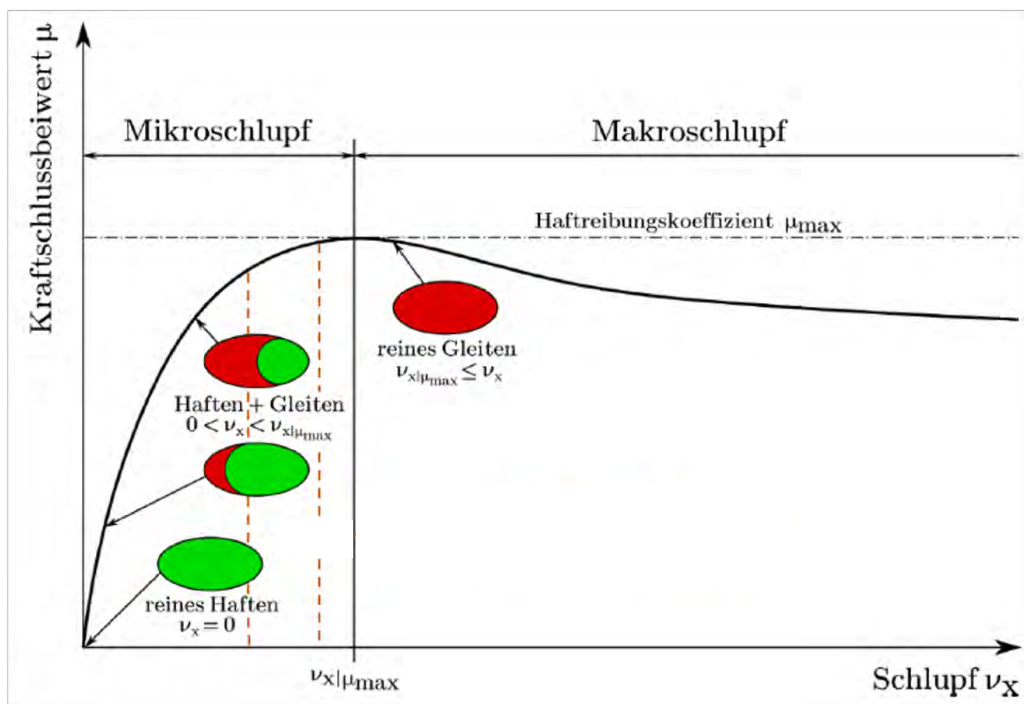


Abbildung 8: Qualitativer Zusammenhang zwischen Kraftschluss und Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt, modifiziert nach ²⁷

Der Haftreibungskoeffizient ist dabei der begrenzende Faktor für die übertragbare Tangentialkraft. Eine Erhöhung des Schlupfs verursacht eine Verkleinerung des Haftgebiets und ist vollständig bei $v_{x,max}$ verschwunden. Ab diesem Zeitpunkt erstreckt sich das Gleitgebiet über die gesamte Berührfläche und man spricht von Makroschlupf; hier ist der Gleitreibungskoeffizient bestimmend ²⁶. Mit steigenden Gleitgeschwindigkeiten sinkt der Reibungskoeffizient und die betroffenen Oberflächen werden weniger beansprucht. Mithilfe sogenannter Gleitschutzeinrichtungen können beim Bremsen gewünschte Schlupfwerte bei Schienenfahrzeugen erreicht werden.

Höchstwerte für Reibungskoeffizienten werden bei trockenen Verhältnissen und bei einem Schlupf im Bereich von $\sim 1 - 3 \%$ erzielt. Der exakt benötigte Schlupf für den Maximalwert ist u.a. abhängig vom Triebfahrzeug, der Geschwindigkeit, den Umwelteinflüssen. Alle experimentellen Versuche befinden sich in dem in markierten Mikroschlupfbereich, da ein hoher Reibungskoeffizient angestrebt wird.

²⁷ M. Paces, Sand im Rad/Schiene-Kontakt, TU Wien: Dissertation, 2013.

3.4. Schienenkopfkonditionierung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik zur Schienenkopfkonditionierung (SKK) angeführt. Es wird auf die derzeit bekannten Vor- und Nachteile der Schienenkopfkonditioniermittel (SKKM) eingegangen, die möglichen Aufbringungsmethoden und chemischen Zusammensetzungen erläutert. Anschließend werden aktuelle Untersuchungen zu SKKM betrachtet. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Aussagen unterschiedlicher Forschungsarbeiten und Berichten näher beleuchtet und die erlangten Erkenntnisse dienen als Ausgangsbasis für die späteren experimentellen Versuche.

3.4.1. Einsatzzweck

Der Einsatz von SKKM stellt eine Anwendung von Schmierung dar, wobei im Gegensatz zur konventionellen Schmierung ein Mindestreibwert sichergestellt sein muss. Sie ist in den meisten tribologischen Systemen ein essenzieller Bestandteil. In Abhängigkeit von der geometrischen Gestaltung und Anordnung der Kontaktpartner, ihrer Oberflächenrauheit, der Schmierstoffviskosität, der Relativgeschwindigkeit und der Belastung werden unterschiedliche Reibungs- bzw. Schmierungszustände durchlaufen, die wie bereits in Kapitel 3.2. Reibung angeführt mit der Stribeck-Kurve beschrieben werden ³.

In der Praxis werden SKKM derzeit zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt. Durch SKKM kann eine Minimierung von durch Schlupf bedingten Lärm und Verschleiß in Gleisbögen, sowie von Rollkontaktermüdung, Schlupfwellen und des Energieverbrauchs erzielt werden. Diese Vorteile sind hinlänglich bekannt und bereits durch eine Vielzahl von Forschungsergebnissen belegt ^{25,28,29,30}. Wie sich die Vorteile von SKK optimieren lassen und welche eventuell negativen Effekte bei der Verwendung auftreten können, sind aktuell Bestandteil weltweiter Untersuchungen. Oftmals wird ein Zielwert für den Reibungskoeffizienten μ im Bereich von 0,3 – 0,4 angegeben ³¹. Beim Einsatz von SKK soll

²⁸ L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick and R. Stock, A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 233, 201 – 210, 2018.

²⁹ L. Wu, X. Yao, J. VanderMarel, X. Lu, J. Cotter, D. T. Eadie, Z. Wen, H. Wang, Effects of curve radius and rail profile on energy saving in heavy haul achieved by application of top of rail friction modifier, *Wear*, 366, 279 – 286, 2016.

³⁰ D. T. Eadie, D. Elvidge, K. Oldknow, R. Stock, P. Pointner, J. Kalousek, P. Klauser, 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, 1222 – 1230, 2008.

³¹ M. Harmon, R. Lewis, Review of top of rail friction modifier tribology, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 10, 150 – 162, 2016.

der Zugbetrieb beim Beschleunigen und Bremsen nicht negativ beeinflusst werden. Das Ziel ist entweder eine Erhöhung des Reibungskoeffizienten, um z.B. bei schlechten Umgebungsbedingungen Bremswege zu verkürzen, oder eine Verringerung des Reibungskoeffizienten, um z.B. bei heißem bzw. trockenem Wetter die Schienenbeanspruchungen möglichst klein zu halten.

In der Theorie wird die Funktionsweise dieser Mittel so erklärt, dass SKKM eine stabile Zwischenschicht erzeugen, die Hohlräume in der Oberflächenrauheit auszufüllen vermögen und damit die Belastung zwischen Rad und Schiene besser verteilen ³². Das SKKM wird dabei im Kontaktpunkt zwischen der Schienenoberkante und der Radlaufläche aufgetragen. Die in der Praxis öfter verwendeten Schienenflankenschmierstoffe werden im Gegensatz dazu zwischen dem Spurkranz des Rades und im Bereich der Schienenkopfrundung zur Schienenflanken- bzw. Spurkranzschmierung appliziert, siehe Abbildung 9.

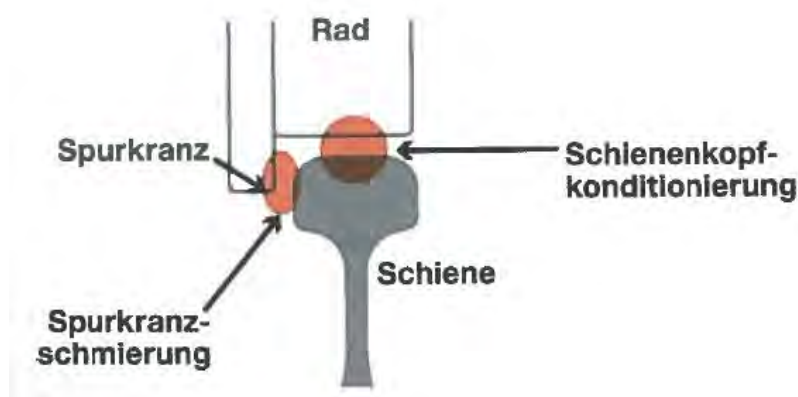


Abbildung 9: Applikationsbereich von Schienenkopfkonditionierung und Spurkranzschmierung ³³

Produkte für die Beeinflussung des Reibungskoeffizienten können ein unterschiedliches Verhalten, in Abhängigkeit auf den aufgetragenen Schlupf, aufweisen, siehe Abbildung 8. Weist ein Produkt eine positive Reibungskennlinie auf, kann das Vorteile bieten, indem es Stick-Slip-Schwingungen verhindert und die Traktions-/Bremswirkung im Einsatz

³² S. A. Khan, J. Lundberg, C. Stenström, Carry distance of top-of-rail friction modifiers, Journal of Rail and Rapid Transit, 232, 2418 – 2430, 2018.

³³ F. Zbinden, R. Zoller, D. Leibundgut, Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens durch den Einsatz der Schienenkopfkonditionierung, Eurailpress, Ausgabe Mai, 2020.

verbessert³⁴. Erreicht wird dies durch die Wechselwirkung zwischen dem SKKM und der Grenzflächenschicht, siehe Abbildung 10.

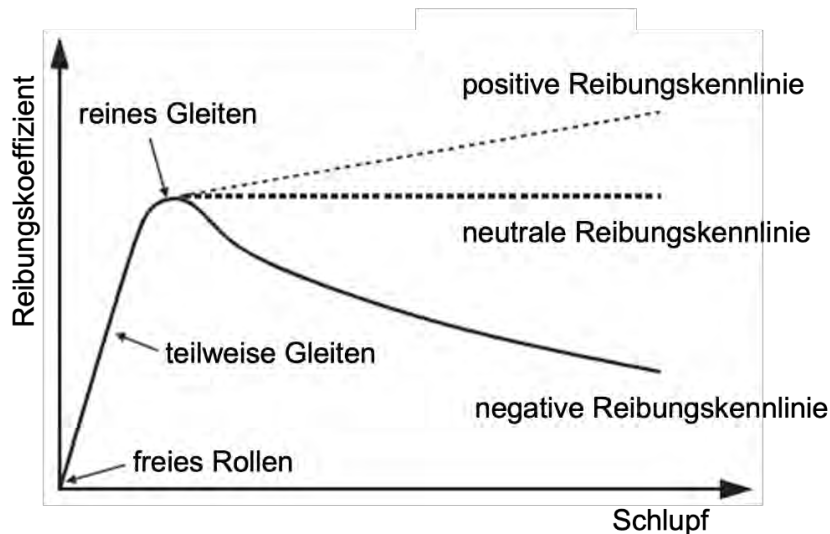


Abbildung 10: Mögliche Reibungskennlinien³⁵

Im Vergleich zu den positiven Effekten gibt es deutlich weniger Wissen über die optimale Produktmenge oder wie lange das Mittel im Kontaktband bleibt und auf welcher Streckenlänge es sich wie verteilt. Demgemäß unterscheiden sich Herstellerangaben zu erreichbaren Reibungskoeffizienten und der Verteilungslänge zum Teil von wissenschaftlichen Untersuchungen. Typischerweise geben Lieferanten keine Wirkungsgarantie, somit liegt das Risiko einer ungenügenden Wirkung beim Betreiber.

Recherchen im Bereich bestehender Richtlinien haben gezeigt, dass es aktuell keine gleichwertige Normung für Schienenkopfkonditioniermittel wie EN 15427-1-1³⁶ und EN 15427-2-1³⁶ über die Behandlung der Reibung zwischen Rad und Schiene mittels Spurkranzschmierung in Bahnanwendungen in Europa gibt. Spurkranzschmierstoffe sind im Gegensatz zu Schienenkopfkonditioniermittel bereits sehr gut in der Praxis etabliert.

³⁴ R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, E. Donald, L. Roger, Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application, *Wear*, 366, 225 – 232, 2016.

³⁵ R. Lewis, R. Dwyer-Joyce, S. Lewis, C. Hardwick, E. Gallardo-Hernandez, Tribology of the Wheel-Rail Contact: The Effect of Third Body Materials, *International Journal of Railway Technology*, 1, 167 – 194, 2012.

³⁶ DIN EN 15427-1-1:2022-06, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-1: Vorrichtungen und Anwendung – Spurkranzschmierstoffe und DIN EN 15427-2-1:2022-07, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 2-1: Eigenschaften und Merkmale – Spurkranzschmierstoffe

Derzeit wird an einer Normung für Schienenkopfkonditionierung gearbeitet, die als technische Spezifikationen CEN/TS15427-1-2³⁷ und CEN/TS15427-2-2³⁷ vorliegen.

3.4.2. Aufbringung von SKKM

Die Aufbringung stellt einen wesentlichen Faktor dar, um die gewünschten Effekte der SKK zu erzielen. Die erforderliche Menge soll zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem bestimmten Bereich direkt auf die Schienenoberkante aufgebracht werden. Dabei ist eine Vermischung mit einem eventuell vorhandenen Spurkranzschmierstoff (geringer Reibungskoeffizient $\mu = 0,05 - 0,1$) zu vermeiden. Bei der Auftragsform kann nach Weidinger³⁸ zwischen

- mobiler, wie z.B. durch schienenfahrtaugliche „Pickups“,
- stationärer und
- on-board Applikation unterschieden werden.

Aktuell werden für die SKK nur wenige Anlagen im österreichischen Bahnnetz eingesetzt, mit dem Ziel die Lärmbelastung durch Kurvenkreischen in Bögen lokal zu minimieren. Die Anlagen werden oftmals im geraden Gleisstück vor Gleisbögen eingesetzt und haben den Vorteil, dass alle darauf verkehrenden Schienenfahrzeuge (von mehreren Bahnbetreibern) die Konditionierung nützen können. Mit jeder Überrollung wird das SKKM auf die nachfolgende Strecke verteilt, und ein gleichmäßiger Film bildet sich auf der Schienenoberkante. Laut Herstellerangaben können mit Schienenkopfkonditionieranlagen Gleisbögen von ca. 400 bis 500 m Länge versorgt werden. Die SBB gibt an, dass Kurvengeräusche reduziert, aber nicht eliminiert werden. Je nach Standort, Trassierung und den eingesetzten Fahrzeugtypen wird eine unterschiedliche Wirkung festgestellt³⁹.

3.4.2.1. Stationäre Schienenkopfkonditionierung

Stationäre Anlagen befinden sich an festgelegten Orten. Diese werden grundsätzlich im Bereich von Gleisbögen eingesetzt. Stationären Anlagen bestehen entweder aus mechanischen, hydraulischen oder elektrischen Systemen, die bei Auslösung des Kontakts durch eine Zugüberfahrt Schmierstoff auf die Schienenoberkante pumpen.

³⁷ DIN CEN/TS 15427-1-2:2021-03, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 1-2: Vorrichtungen und Anwendung – Behandlung der Schienenoberfläche und DIN CEN/TS 15427-2-2:2021-03, Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene Teil 2-2: Eigenschaften und Merkmale – Behandlung der Schienenoberfläche

³⁸ P. Weidinger, Rauigkeit im Rad-Schiene System, Leoben: Diplomarbeit, 2008.

³⁹ F. Zbinden, Schienenkopfkonditionierung, 17. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Dresden, Februar 2020.

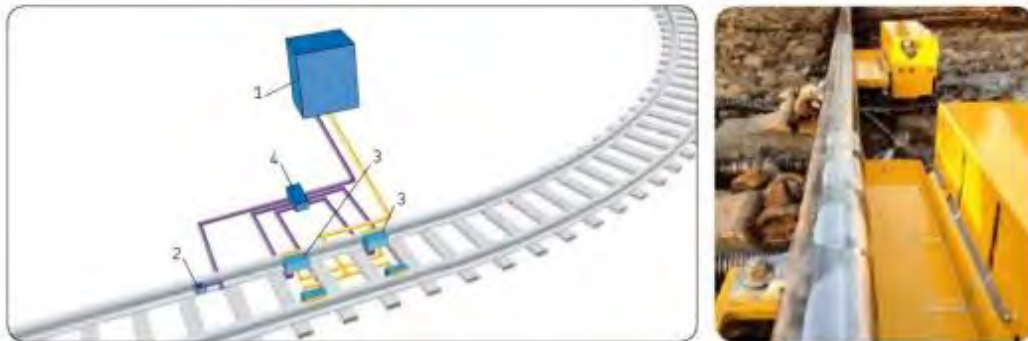


Abbildung 11: Stationäre Aufbringung des SKKM ⁴⁰:
Links) Anlagenschema, rechts) Applikatorleisten

Abbildung 11 zeigt das prinzipielle Anlagenschema einer Schienenkopfkonditionieranlage ⁴⁰. Das SKKM wird im Pumpenschrank (1) außerhalb des Gleisbereichs gelagert. Weiters befinden sich eine Hochdruckpumpe und die gesamte Steuerung darin. Das Auslösen eines Schmierzyklus erfolgt über einen gleisgebundenen Achszähl-sensor (2). Dieser ermittelt die Anzahl an vorbeifahrenden Achsen und teilt der Steuerung mit, wann mit dem Schmierzyklus gestartet werden soll. Darauf folgend (in der Regel in Zugspausen) wird das SKKM mithilfe der Pumpe in der vorgegebenen Menge über Leitungen zu den zwei Applikatorleisten mit jeweils vier Öffnungen (3) und schließlich, wie auch in Abbildung 11 rechts dargestellt, auf die Schiene gefördert. Die Applikatorleisten können an der Innen- oder Außenseite der Schiene montiert werden ⁴¹. Insgesamt wird laut ÖBB-Infrastruktur AG (ÖBB) dabei eine Menge von $0,2 \text{ cm}^3$ pro Öffnung aufgebracht. Streckenseitige Applikationseinrichtungen haben jedoch Probleme im Zusammenhang mit den Umgebungsbedingungen, insbesondere Temperatur und Feuchtigkeit, die sich auf die Wirkung des Produkts auswirken können. Zum Beispiel können Temperatureinflüsse unterschiedliche Aufbringungsmengen verursachen. Mögliche Störfaktoren und deren Auswirkungen sollten daher kontrolliert und bewertet werden. Zusätzlich gibt es noch einen Haupt- bzw. Kabelverteilerkasten (4), der die elektrischen Anschlüsse zusammenfasst. Ebenfalls ist ein integriertes Heizsystem vorhanden. Damit verhindert man in den kälteren

⁴⁰ SKF Gruppe, Reibung erfolgreich beherrschen mit automatischen SKF und Lincoln stationären und fahrzeuggebundenen Schmiersystemen, www.skf.com/at/industries/railways/solutions/easyrail-compact, https://www.skf.com/binaries/pub41/images/0901d19680389a8d-14824DE_tcm_41-160324.pdf, 2014, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022.

⁴¹ SKF Gruppe: Stationäre Schienenschmiersysteme für die Schieneninfrastruktur von Vollbahnen – Systeme zur Förderung von Schmier- und Konditioniermittel an die Schiene. https://www.vogel-gruppe.de/fileadmin/user_upload/Schmiertechnik/SKF/Branchen/SKF-Stationaere%20Schienenschmierung_Vollbahnen_Vogel-W-202-DE-0912_LSP2%2013193%20DE.pdf, 2012, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022.

Jahreszeiten das Einfrieren der Düsen, die Funktion der Schienenkopfkonditionieranlage bleibt trotz Eiseskälte und Nässe erhalten. Laut Herstellerangaben können mit einer Schienenkopfkonditionieranlage, unter Berücksichtigung der Reichweite des SKKM, Gleisbögen von ca. 400 bis 500 m Länge versorgt werden.

Eine stationäre SKK hat den Vorteil, dass die Konditionierung lokal an den Stellen mit erhöhten Geräuschemissionen erfolgt und von allen darauf verkehrenden Schienenfahrzeugen genutzt werden kann. Gerade bei Bahnnetzen, wie auch jenes der ÖBB, die auch von anderen Schienenfahrzeugen anderer Bahnbetreiber verwendet wird, scheint diese Art der SKK am sinnvollsten.

3.4.2.2. Fahrzeugseitige Schienenkopfkonditionierung

Fahrzeugseitig wird das SKKM zumeist vor dem ersten Radsatz des Triebfahrzeuges direkt auf den Schienenkopf gesprüht (siehe Abbildung 12). Durch die Überrollung des Rades wird das SKKM im Kontaktband verteilt und überschüssiges SKKM aus der Kontaktzone gedrückt.

In Abbildung 12 ist das Schema einer fahrzeugseitigen Sprühanlage dargestellt. Dieses System wird noch nicht standardmäßig verbaut, sondern zu Testzwecken. Bei Betätigung des Systems wird mittels Druckluft das SKKM vom Schmierstoffbehälter (1) zu den Sprühdüsen (2) befördert. Bei Schienenfahrzeugen ohne eigene Druckluftversorgung kann eine integrierte Pumpe Abhilfe schaffen. Über die Sprühdüsen wird das SKKM dünn-schichtig und vertikal auf den Schienenkopf gesprüht. Optional lässt sich eine effektive SKK über eine Kontrolleinheit mit integriertem Kurvensensor (3) realisieren. Montiert wird der Schmierstoffbehälter entweder im Inneren des Wagenkastens oder direkt am Drehgestell. Die Düsen werden am Drehgestell fixiert. Zusätzlich sorgt wieder ein integriertes Heizsystem für den einwandfreien Betrieb in allen Jahreszeiten⁴⁰. Ein Vorteil der fahrzeugseitigen SKK ist die bedarfsgesteuerte Aktivierung. In Abhängigkeit der Kurven, Zeit oder Entfernung kann das SKKM auf die Schiene gesprüht werden. Wird vom Netzbetreiber auf eine fahrzeugseitige SKK gesetzt, muss jedoch nahezu jedes Schienenfahrzeug mit einer solchen Sprühanlage ausgerüstet werden. Bei Anwendung von fahrzeugseitigem und infrastrukturseitigem SKK muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Überdosierung der aufgebrauchten Mengen kommt, sowie zu keinen Reaktionen zwischen den beiden, möglicherweise unterschiedlichen SKK-Mitteln.

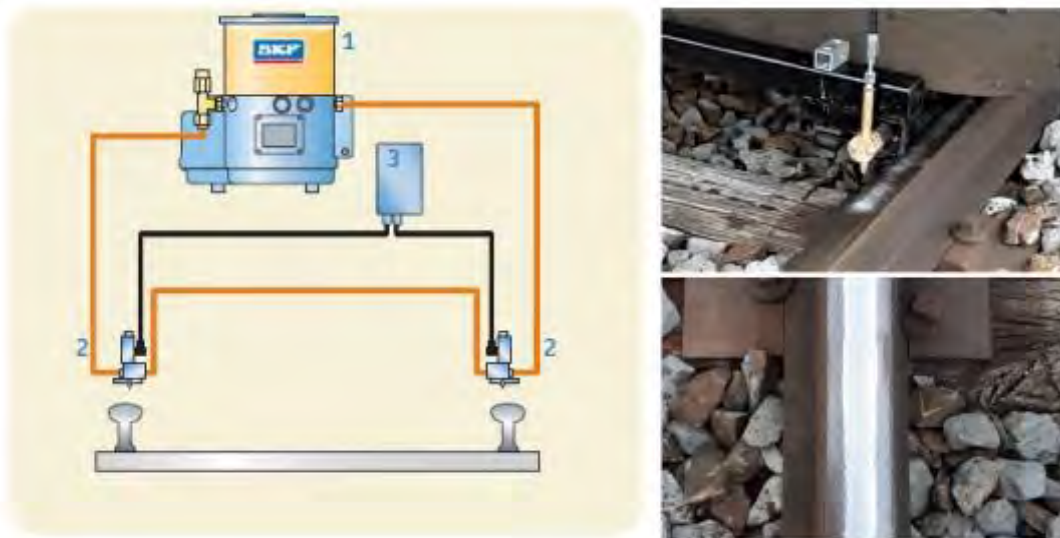


Abbildung 12: Fahrzeugseitige Aufbringung des SKKM
Links) Anlagenschema ⁴⁰, rechts) Sprühen auf das Gleis ³⁹

Ein weiteres fahrzeugseitiges System ist die Stiftschmierung. Dabei wird ein Haftblock (z.B. ein Graphitstift) über eine federbelastete Vorrichtung auf das Rad gepresst. Somit wird durch die Rotation kontinuierlich eine Schicht des Festschmierstoffes auf die Radoberfläche aufgetragen. Der ständige mechanische Kontakt zwischen Schmiersystem und Rad ist jedoch unvorteilhaft.

3.4.3. Aktuelle Untersuchungen zur Schienenkopfkonditionierung

Ursprünglich wurden Reibungsmodifikatoren entwickelt, um die auftretenden Schlupfwellen und die damit verbundene Geräuschentwicklung des Schienennahverkehrs von Vancouver in den 1980er Jahren zu reduzieren. Dazu führten *Kalousek und Johnson* ⁴² die ersten Untersuchungen durch. Im Laufe der Zeit konnten weitere Vorteile, die durch die Aufbringung von SKKM entstehen, festgestellt werden. Diese sind z.B. die Reduktion von Rollkontaktermüdung und Verschleiß. Wie sich diese Vorteile optimieren lassen und welche eventuell negativen Effekte durch die Verwendung von SKKM auftreten können, sind aktuell Bestandteil weltweiter Untersuchungen. Diese beziehen sich überwiegend auf:

- Aufnahme des SKKM vom Rad
- Reichweite von stationär aufgetragenen SKKM

⁴² J. Kalousek, K. L. Johnson, An Investigation of Short Pitch Wheel and Rail Corrugations on the Vancouver Mass Transit System, Proc IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 206, 127 – 135, 1992.

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen erfolgten hauptsächlich mithilfe einfacher Laborteststände, wie z.B. Zweischeiben-Tribometer. Zur Absicherung wurde auch ein Full-Scale-Teststand eingesetzt oder Versuche direkt im Feld durchgeführt. In weiterer Folge werden die gewonnenen Erkenntnisse der bereits durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst.

3.4.3.1. Aufnahme des SKKM vom Rad

Erkenntnisse über die Aufnahme des SKKM sind für die anschließende Wirkung und deren Dauer von Bedeutung. Durch eine bestmögliche Aufnahme des SKKM vom Rad kann sich dieses im Kontaktband verteilen und somit einen konstanten Reibungskoeffizienten über eine möglichst lange Distanz gewährleisten. *Harmon und Lewis*⁴³ führten dazu erste Untersuchungen durch. Ziel ihrer Arbeit war es, Testmethoden zu entwickeln, mit denen die Abholung von SKKM durch das erste Rad im Labor analysiert werden kann. Als Parameter für das Aufnahmeverhalten wurde die Haftung gewählt, denn bei zu niedriger Haftung (Anmerkung: aber auch bei zu niedriger Konsistenz) würde das SKKM bereits vor der Überrollung des Rades von der Schiene ablaufen. Zu hohe Haftung könnte wiederum eine schwierige Übertragung auf das Rad mit sich bringen. Die Haftung der drei untersuchten SKKM wurde anhand des Übertrags zwischen zwei Platten bestimmt. Um den Einfluss der Haftung auf die Aufnahme des SKKM zu bestätigen, wurden weitere Untersuchungen mit einem skalierten Rad auf einem Schienenabschnitt sowie auf einem Full-Scale-Linearteststand durchgeführt. Dabei wurde nach jeder Überrollung die Menge an SKKM am Rad gemessen und die Auswirkungen auf Schlupf, Radlast, usw. analysiert. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Je mehr SKKM aufgetragen wird, desto höher ist die Abholung, also die Aufnahme durch das Rad.
- Die seitliche Verschiebung des Rades hat kaum Einfluss auf die Aufnahmemenge, da sich die Kontaktzone nicht wesentlich ändert.
- Mit zunehmendem Schlupf ist die Aufnahmemenge an SKKM ebenfalls nahezu unverändert.
- Bei Erhöhung der Radlast wird mehr SKKM aus dem Kontakt gedrückt und somit weniger vom Rad aufgenommen.

⁴³ M. Harmon, R. Lewis, New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales, Proc IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 235, 191 – 200, 2020.

- Eine Steigerung der Aufnahmemenge bei Mehrfachüberrollungen wird mit SKKM höherer Klebrigkeit erzielt. Dabei wird vom ersten Rad weniger SKKM abgeholt, dieses dafür über die Schiene gezogen und somit von den folgenden Rädern aufgenommen.
- Aufgrund der unterschiedlichen Testparameter, wie z.B. Radlast und Geschwindigkeit, ergaben sich unterschiedliche Aufnahmemengen der jeweiligen Testmethoden. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass sich bei allen drei Testmethoden die gleiche relative Rangfolge der SKKM ergibt. Dazu wurden die Ergebnisse der Klebrigkeit in Verhältnis zum Wert des klebrigsten SKKM gesetzt und bei den beiden anderen Methoden (skaliertes Rad auf Schienenabschnitt und Full-Scale-Linearteststand) das Verhältnis von aufgenommener zu aufgetragener Menge an SKKM bei fünf Überrollungen herangezogen.

Ein Unterschied zwischen den erhaltenen Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen und der tatsächlichen Aufnahme bei Feldversuchen ist anzunehmen. Für ein eindeutiges Ergebnis können die Feldbedingungen auf den Labortestständen nicht exakt genug nachgestellt werden. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zeigten jedoch, dass die relative Rangfolge von den unterschiedlichen Bedingungen nicht beeinflusst wird.

3.4.3.2. Reichweite von stationär aufgebrachtem SKKM

*Khan et al.*³² führte Forschungen durch, um die Tragweite von SKKM im Feld zu untersuchen. Es wird beschrieben, dass zur Bestimmung der Tragweite von SKKM einige Forscher Handtribometer verwenden, um Reibungskoeffizienten an verschiedenen Stellen am Gleis zu messen. Allerdings können Feuchtigkeit und Ablagerungen aus der Umwelt und durch Züge die Reibung an der Schienenoberkante verändern und so einen irreführenden Hinweis auf das Vorhandensein eines SKKM geben. Daher ist der Reibungskoeffizient selbst kein eindeutiger Indikator. In der vorliegenden Studie wurden in eine Alkohol-Ester-Mischung getauchte Wattestäbchen verwendet, um Oberflächenablagerungen sowohl vom Rad als auch von der Schiene in verschiedenen Abständen von der Applikationsstelle zu sammeln. Anschließend wurden die auf dem Wattestäbchen gesammelten Ablagerungen mit einer energiedispersiven Röntgenanalyse analysiert. Der mögliche Einsatz dieser Nachweismethode setzt jedoch voraus, dass ein charakteristisches Element des SKKM vorhanden ist. In der genannten Arbeit konnten Molybdän, Magnesium und Barium als repräsentative Elemente von SKKM A bzw. SKKM B herangezogen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass bei konstanter Auftragsrate von 1 /1000 Achspaarungen, die maximale Tragweite für SKKM A 70 m

und für SKKM B 450 m an der Schienenoberkante betrug. Für beide SKKM war die Tragweite um einiges geringer als die von den Herstellern beworbene Reichweite von mehreren Kilometern. An den nichtbeteiligten Oberflächen des Schienenrades konnten die beiden SKKM für eine Distanz von länger als 3 km nachgewiesen werden. Wird das SKKM einmal aus dem Kontaktband hinausgedrückt, gelangt es nicht wieder hinein und steht zur SKK nicht mehr zur Verfügung, selbst wenn das SKKM über eine längere Distanz verfrachtet wird.

3.4.3.3. Verschleiß und Rollkontaktermüdung

Aufgrund der auftretenden Relativbewegungen im Rad-Schiene-Kontakt tritt eine gleitende Beanspruchung auf, welche Verschleiß und Rollkontaktermüdung hervorruft. Die Rollkontaktermüdung umfasst dabei die Schäden an Rad und Schiene, die infolge zyklischer Belastung im Rollkontakt entstehen. Die hohen lokalen Spannungen in der Kontaktzone können zu Rissen und lokalen Ausbrüchen führen. Der Theorie nach bildet sich durch das Aufbringen von SKKM eine saubere Drittkörperschicht zwischen Rad und Schiene. Diese Schutzschmierschicht soll dabei unter anderem den Verschleiß und die Rollkontaktermüdung reduzieren. Dementsprechend wurden bereits einige Untersuchungen in diesem Bereich durchgeführt.

Erste Untersuchungen zur Wirkung des SKKM auf Verschleiß, Rollkontaktermüdung und plastische Verformung wurden von *Eadie et al.*³⁰ an einem Full-Scale-Teststand unternommen. Es zeigte sich, dass der Verschleiß bei der Verwendung von SKKM wesentlich geringer als bei trockenen Bedingungen ist. Bei der Aufbringung des SKKM nach je 50 Raddurchläufen und nach je 250 Raddurchläufen kam es zu keinen Rissen in der Schienenprobe, bei der Aufbringung des SKKM nach je 500 Raddurchläufen sehr wohl. Damit lässt sich allgemein sagen, dass es eine optimale Aufbringungsmenge an SKKM gibt³⁰.

Weiters führten *Arias-Cuevas et al.*²⁵ an einem Zweischeiben-Tribometer Versuche durch, um unter anderem die Oberflächenschäden der Rad- und Schienenscheibe zu analysieren. Dabei wurden zwei SKKM getestet. Bei einem der beiden SKKM konnten Oberflächenschäden in Form von Einbuchtungen an Rad und Schiene festgestellt werden. Bei diesem Konditioniermittel stellte sich auch nahezu der gleiche Reibungskoeffizient wie bei trockenen Bedingungen ein, wodurch dieses nicht die gewünschten Vorteile brachte.

Eine Rollkontaktermüdung entsteht infolge von zyklischen Belastungen. Die Arbeit von *Hardwick et al.*⁴⁴ ergab, dass nicht trocknende SKKM mit niedriger Viskosität schnellere Risswachstume verursachen. Ursache dafür ist, dass das flüssigere SKKM durch den Kontaktdruck leichter in vorhandene Risse eindringt und dadurch das Risswachstum mehr beschleunigt. Eine Reihe an Tests mit verschiedenen Mittel zeigt, wie die Rissbildung bei Belastung voranschreitet. Jeder Test begann mit 4000 *U* unter trockenen Bedingungen (400 *U/min*, 1500 *N/mm²*, 1 % Schlupf). Nach den Trockenzyklen wurden verschiedene SKKM mit einer kontrollierten Aufbringungsrate und -menge getestet, darunter Wasser, öl-basierte SKKM, hybride SKKM, Reibungskoeffizient-Modifizierer und andere Schmierstoffe. Alle Tests wurden nach 25.000 *U* beendet. Abbildung 13 zeigt deutlich die Unterschiede des Risswachstums.

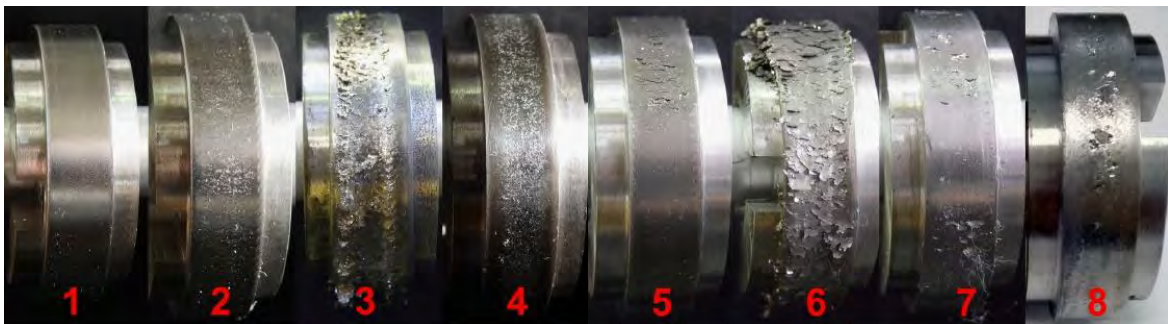


Abbildung 13: Oberflächenbilder nach Versuchen auf einem Zweiseiben-Tribometer bei 1,5 GPa, 1 % Schlupf und 400 *U/min*. Trocken nach 4000 *U* (1); Trocken nach 25.000 *U* (2); Wasser nach 25.000 *U* (3); SKKM nach 25.000 *U* (4); SKKM nach 25.000 *U*; Trocken nach 25.000 *U* (5); SKKM (Öl-basiert) nach 25.000 *U* (6); SKKM (Fett-basiert) nach 25.000 *U* (7); und SKKM (hybrid) nach 25.000 *U* (8)⁴⁴

3.4.3.4. Einfluss von SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei Zweiseiben-Tribometern und Full-Scale-Testständen

Die wissenschaftlichen Arbeiten von *Arias et al.*²⁵ und *Buckley-Johnstone et al.*²⁸ berichten über den Einfluss von nicht näher spezifizierten SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei einem Zweiseiben-Tribometer und einem Full-Scale-Teststand. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird üblicherweise der Verlauf des Reibungskoeffizienten über die Anzahl der Überrollungen aufgetragen.

⁴⁴ C. Hardwick, R. Lewis, R. Stock, The effects of friction management materials on rail with pre-existing RCF surface damage, *Wear*, 384 – 385, 50 – 60, 2017.

Bei trockenen Verhältnissen lieferten die Versuche von *Arias et al.*²⁵ am Zweischeiben-Tribometer Reibungskoeffizienten zwischen $\mu = 0,3$ bis $0,6$ je nach einem eingestellten Schlupf von $0,5\%$ bis 3% . Der maximale Reibungskoeffizient wurde bei einem Schlupf von 2% erreicht. Die zwei untersuchten SKKM, Friction Modifier A und B, zeigten ein sehr unterschiedliches Verhalten, siehe Abbildung 14. Bei keinem der SKKM wurde ein konstantes Plateau im Bereich von $0,3$ bis $0,4$ erreicht. Außerdem stieg Friction Modifier B schneller (weniger als 200 Zyklen) auf den trockenen Referenzwert als Friction Modifier A.

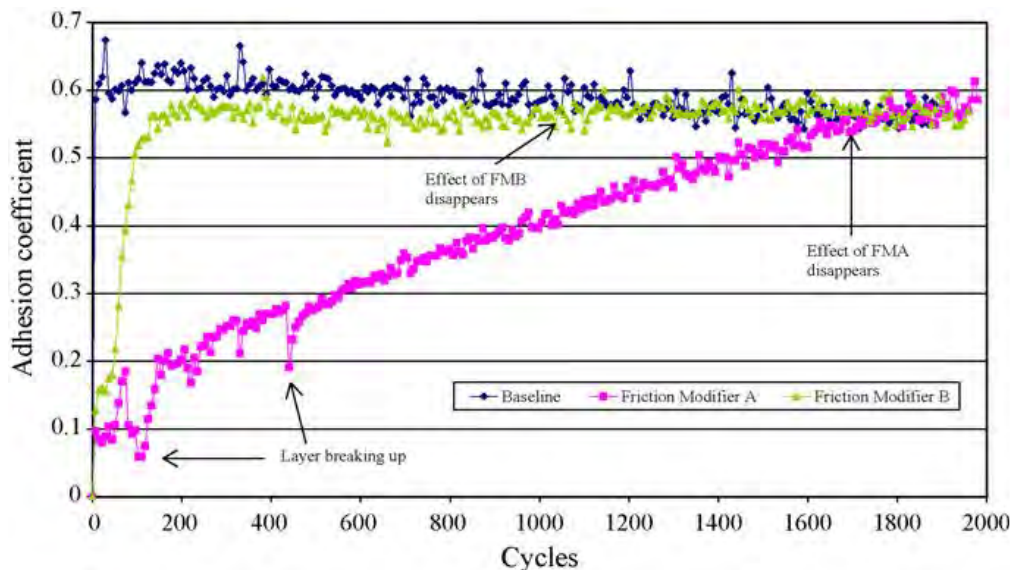


Abbildung 14: Reibungskoeffizienten zwei Friction Modifier am Zweischeiben-Tribometer bei 2% Schlupf²⁵

Der Einfluss von Wasser wurde ebenfalls untersucht. Wurde neben dem SKKM auch Wasser aufgebracht, reduzierte sich der Reibungskoeffizient bei Friction Modifier A auf einen kurzzeitigen Minimalwert von rund $\mu = 0,07$, siehe Abbildung 15. Der Zeitpunkt der Wasserapplikation ist am plötzlichen Abfall der Kurven für Friction Modifier A und B deutlich zu erkennen. Die niedrigen Reibungskoeffizienten können zu verlängerten Bremswegen und Traktionsproblemen führen. Die Arbeit belegt außerdem, dass bei höherem Tangentialschluss die Wiederherstellungszeit, die Zeit bis zum Erreichen des ursprünglichen Reibungskoeffizienten-Niveaus vor der Zugabe von Wasser, verringert wurde.

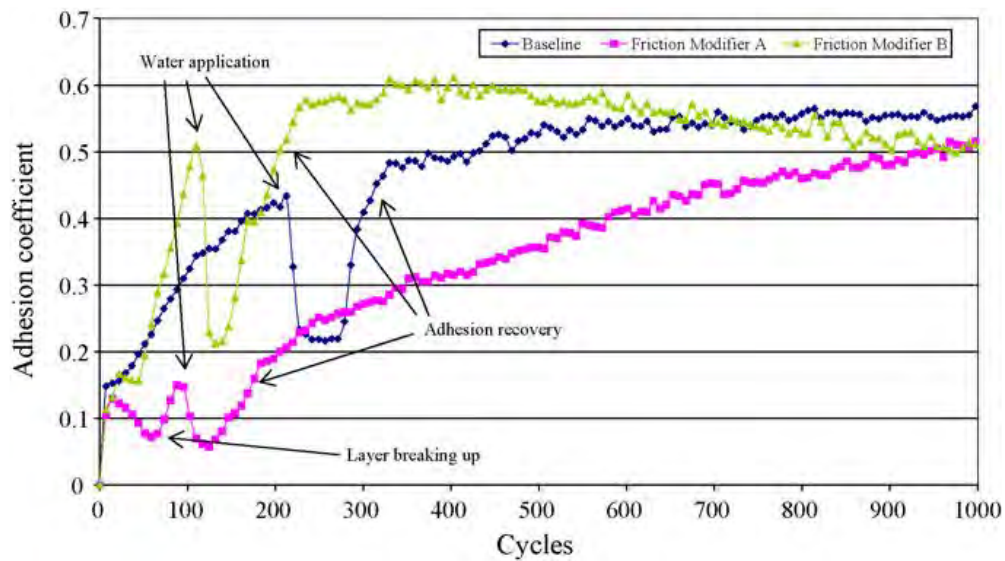


Abbildung 15: Reibungskoeffizienten von zwei Friction Modifier mit Wasser am Zweiseiben-Tribometer bei 2 % Schlupf ²⁵

In der Arbeit von *Buckley-Johnstone et al.* ²⁸ wurde ein SKKM an einem Zweiseiben-Tribometer und an einem Full-Scale-Teststand untersucht. Die Ergebnisse der Tests werden in Abbildung 15 gegenübergestellt und zeigen, dass am Zweiseiben-Tribometer ein Plateau des Reibungskoeffizienten im Bereich von $\mu = 0,1$ vorliegt. Der Bereich streckt sich bis ungefähr 10.000 U , bis ein Anstieg der Kurve zu erkennen ist. Ab ca. 22.500 U wird der Referenzwert bei trockenen Bedingungen erreicht. Der gewünschte Reibungskoeffizient im Bereich von $\mu = 0,3$ stellte sich beim Full-Scale-Teststand schnell nach 200 U ein und blieb annähernd stabil. Der Versuch wurde jedoch vorzeitig abgebrochen und der Reibungskoeffizient des Teststandes bei trockenen Bedingungen nicht bekanntgegeben. Dadurch kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, ob sich am Ende des Tests noch ein SKKM im Kontakt befindet bzw. wie groß der Einfluss war. Die niedrigen Reibungskoeffizienten am Zweiseiben-Tribometer decken sich mit den Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten.

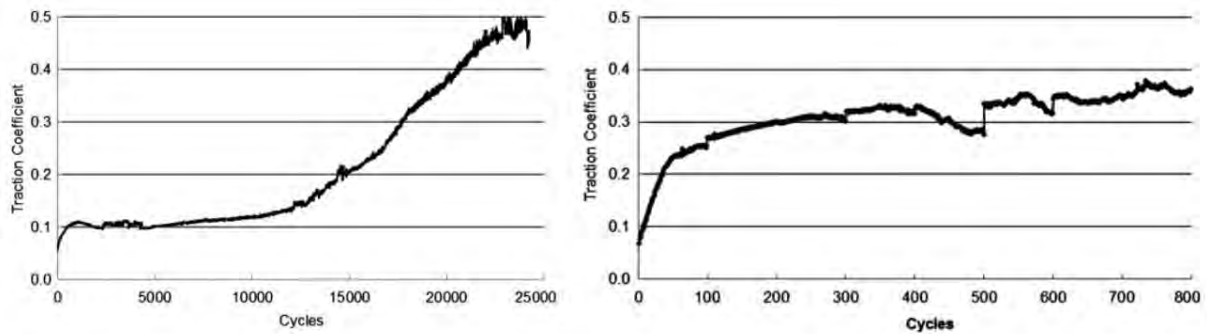


Abbildung 16: Reibungskoeffizient am Zweiseiben-Tribometer mit 2 % Schlupf, 1500 N/mm² Flächenpressung und SKKM (links); Reibungskoeffizient am Full-Scale-Teststand mit 2 % Schlupf, 1500 N/mm² Flächenpressung und SKKM (rechts) ²⁸

Beide gerade behandelte wissenschaftlichen Arbeiten zeigen gewisse Lücken. Die genau aufgebrauchte Menge von SKKM und die Aufbringungsart werden nicht näher beschrieben. Ebenso sind keine Wiederholungsversuche durchgeführt bzw. publiziert worden, die eine Absicherung der Messergebnisse zeigen würden. Da die aufgebrauchte Menge und die Aufbringungsart sehr kritische Faktoren sind, sollten die Ergebnisse mit Bedacht betrachtet werden.

Weitere themenverwandte Arbeiten sind in der Literatur ^{45, 46, 47} zu finden.

⁴⁵ E. Gallardo-Hernandez, R. Lewis, Twin disc assessment of wheel/rail adhesion, *Wear*, 265, 1309 – 1316, 2008.

⁴⁶ H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, Experimental investigation on influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions, *Wear*, 265, 1504 – 1511, 2008.

⁴⁷ W. Zhang, J. Chen, X. Wu, X. Jin, Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig, *Wear*, 258, 82 – 88, 2002.

3.4.3.5. Einfluss von SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei Feldversuchen

In diesem Kapitel werden Erkenntnisse aus bisherigen Feldversuchen aufgezeigt, da im Rahmen des Projekts SafeRail ebenfalls Versuche im Feld geplant sind. Die Einhaltung von geforderten Bremswegen stellt dabei aus Sicherheitsgründen die höchste Priorität dar. Im Vergleich zu trockenen Bedingungen vermindert SKKM den Reibungskoeffizienten, sodass bei einer falschen Auftragungsmenge oder einem ungeeignetem SKKM eine Verlängerung des Bremswegs auftreten kann. Dies stellt eine beträchtliche Gefahr für Zugbegleiter und Passagiere dar.

Zbinden *et al.*³³ führten dazu experimentelle Feldversuche mit drei unterschiedlichen Konditioniermittel (Produkt A auf Ölbasis, Produkt B auf Fettbasis und Produkt C auf Wasserbasis) durch. Die Aufbringung der SKKM erfolgte dabei kontinuierlich auf der Schienenoberkante. Um möglichst stabile und reproduzierbare Testbedingungen zu gewährleisten, wurde dafür ein Schienenfahrzeug eingesetzt. Das Sprühbild (Sprühbreite, aufgebrauchte Menge pro Meter) wurde nicht näher definiert.

Anhand einer Messreihe wurde einerseits das Traktionsverhalten, beim Beschleunigen aus dem Stillstand bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit von 120 km/h, untersucht. Andererseits wurde das Bremsverhalten mit unterschiedlichen Bremssystemen, Bremsstellungen und Ausgangsgeschwindigkeiten bei der Auslösung einer Schnellbremsung geprüft. Der mittlere Bremsweg wurde in Anlehnung an das Merkblatt UIC 544-1⁴⁸ bestimmt. Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die Ergebnisse der Versuchsserien. Lediglich Produkt C auf Wasserbasis der drei untersuchten Konditioniermittel zeigte kaum eine Verlängerung des Bremswegs und der Beschleunigungszeit. Die längsten Bremswege wurden mit elektrodynamischen Bremsungen festgestellt. Bei der Klotzbremsung zeigte sich bei keinem der drei SKKM eine Verlängerung des Bremswegs. Durch den Klotz wird das SKKM zu rasch abgetragen, um eine Verlängerung des Bremswegs zu bewirken. Eine Erhöhung der Anhängelast brachte eine Verlängerung der Beschleunigungszeit mit sich. Auf dem Versuchsabschnitt wurden ebenfalls die Haftreibungskoeffizienten auf dem Fahrspiegel des Schienenkopfs mithilfe eines Handtribometers gemessen. Mittels fortlaufender Stichproben wurde der Median aus den Messungen gebildet. Der gemessene Wert bei trockenen Kontaktbedingungen betrug $\mu = 0,4$ und $\mu = 0,2$ bis $0,38$ bei aufgetragenen SKKM.

⁴⁸ UIC 544-1:2014-10, Bremse – Bremsleistung, Oktober 2014.

Die Untersuchungen zeigen, dass die negativen Effekte auf das Brems- und Beschleunigungsverhalten im Feld keineswegs zu unterschätzen sind. Es muss somit vermutlich ein Kompromiss zwischen der Reduktion von Verschleiß, Lärm, Rollkontaktermüdung, usw. und der Erhöhung des Bremswegs sowie der Beschleunigungszeit gefunden werden ^{32,33}.

**Prozentuale Verlängerung des Anhaltewegs,
Ausgangsgeschwindigkeit 115 km/h (E-Bremse) bzw. 120 km/h**

Bezeichnung	Produkt A	Produkt B	Produkt C
Klotzbremse	Unverändert	Unverändert	Unverändert
Scheibenbremse	7%	7%	Unverändert
Elektrodynamische Bremse	34%	39%	4%

Tabelle 2: Einfluss von SKKM auf den Bremsweg ³³

**Prozentuale Verlängerung der Beschleunigungszeit,
Zielgeschwindigkeit 120 km/h**

Bezeichnung	Produkt A	Produkt B	Produkt C
Anhängelast: 87 t	24%	18%	Unverändert
Anhängelast: 111 t	54%	48%	Unverändert

Tabelle 3: Einfluss von SKKM auf die Beschleunigungszeit ³³

3.4.3.6. Energieeinsparung durch SKKM

Untersuchungen zur Energieeinsparung durch die SKK wurden beispielsweise von *Wu et al.* ²⁹ anhand eines numerischen Modells durchgeführt. Man erwartete sich eine Energieeinsparung aufgrund der Verringerung der Rollwiderstände durch das SKKM. Die Simulationen zeigten bei Kurven mit kleineren Radien eine größere Einsparung. Weiters ist auf abgenutzten Schienen ebenfalls eine größere Energieeinsparung als bei neuen Schienen zu erwarten ²⁹.

3.4.3.7. Chemische Zusammensetzung

In der Tribologie ist ein Reibungsmodifikator ein Zusatzstoff, der die Reibungseigenschaften eines Schmierstoffs (z.B. Motoröl) verändert (erhöht oder verringert) ⁴⁹. Bei Anwendungen im Schienenverkehr bezieht sich der Reibungsmodifikator auf ein Mittel, das speziell die Reibung von hohen Werten unter trockenen Bedingungen ($\mu = 0,5$ bis $0,8$) auf einen mittleren Reibungskoeffizienten von $0,3$ bis $0,4$ reduziert. Ein Reibungsmodifikator kann jedoch einen niedrigen Reibungskoeffizienten nicht erhöhen ³⁵. Aus diesem Grund scheiden Produkte wie Sand oder andere Mittel (z.B. in Gel-Form), die für eine Erhöhung des Reibungskoeffizienten eingesetzt werden, bei dieser Definition aus. Sie werden als Reibungsverstärker (engl.: friction enhancer) bezeichnet. Moderne Reibungsverstärker verwenden vorzugsweise Stahlsand oder Aluminium anstelle von Sand, um Probleme mit Verschleiß, der bis zu 10-mal höher ausfallen kann als beim Einsatz von Sand, und Isolierung des Gleiskreises zu verringern.

Die jüngsten Entwicklungen haben zu einer neuen Generation von SKK-Produkten geführt, die auf Öl oder Fett basieren oder als Hybrid-Mittel bezeichnet werden. Hybride SKKM bestehen aus öl- und wasserbasierten Komponenten, wobei es keine klare Definition von wasserbasierten Komponenten bezogen auf SKKM gibt ³⁴.

Die Arbeit von *Stock et al.* ³⁴ zeigt, dass auch eine Unterscheidung nach dem Trocknungsverhalten sinnvoll ist; demgemäß werden SKKM in

- trocknende Mittel (Reibungsmodifikators) und
- nicht trocknende Mittel (top of rail lubricant)

eingeteilt. Bei trocknenden Mitteln dient Wasser als Transportmedium und verdunstet rasch bei den Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene. Wie in Abbildung 17 b ersichtlich interagieren die trockenen Partikel des Reibungsmodifikators mit der bereits existierenden Zwischenschicht (engl.: third body layer) und ermöglichen die Aufnahme von Scherbewegungen. Dieser Wirkungsmechanismus ist verantwortlich für die optimierte Reibung zwischen Rad und Schiene und erzeugt so eine positive Zugkraftcharakteristik. Solange Reibungsmodifikatoren in flüssiger Form bestehen, wird das Mittel zwischen Rad und Schiene transportiert. Ist das Wasser verdunstet, bleiben die Partikel des Reibungsmodifikators an der Oberfläche bei höherer relativer Oberflächengeschwindigkeit haften; der weitere Oberflächenübertrag des Mittels wird limitiert. Nicht trocknende Mittel erzielen die gewünschten Reibeffekte durch eine Grenz- oder Mischreibung. Das nicht

⁴⁹ G. Totten, S. Westbrook, R. Shah, Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing, 2nd edition, ASTM International, 2019.

trocknende Mittel (SKKM) bewirkt eine Benetzung über eine lange Strecke und wird so laufend zwischen Schiene und Rad befördert.

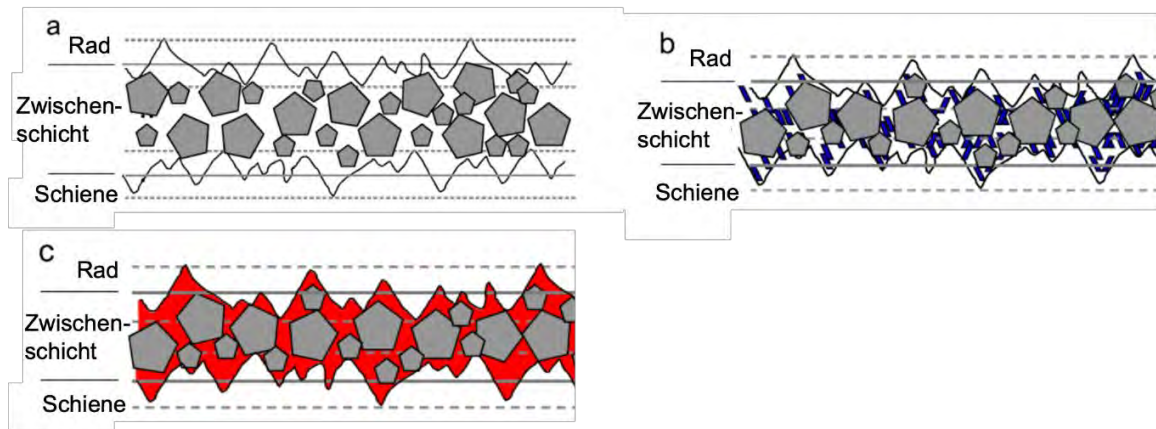


Abbildung 17: Trockener Kontakt mit Drittkörpermaterialien wie Abrieb und Oxide (a); Kontakt mit Partikel des Reibungsmodifikators (blau) (b); Kontakt mit SKKM (c) ³⁴

3.5. Marktrecherche

Es wurde eine Internetrecherche über gängige Schienenkopfkonditioniermittel (SKKM) durchgeführt. Tabelle 4 enthält eine Zusammenstellung ausgewählter Produkte einschließlich relevanter Informationen aus den jeweiligen Datenblättern.

Der Tabelle kann entnommen werden, dass nur knapp über die Hälfte der aufgeführten Produkte Angaben hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit macht, wovon nur zwei genauere Daten zur verwendeten Norm und dem erzielten Ergebnis offenlegen.

Die Auswirkung des SKKM auf den Reibungskoeffizienten wird noch seltener genannt. Lubcon gibt für „Sintono Terra HLK“ einen Reibungskoeffizienten von 0,33 an und LB Foster für „Kelsan HPF“ jenen von 0,35, während die restlichen Hersteller nicht näher auf diesen Aspekt eingehen.

Es ist anzumerken, dass das Produkt „Tramlub SSM ECO“ von Fuchs Lubritech ein für die Fahrkanten- und Schienenflankenschmierung formulierter Schmierstoff ist, der jedoch laut Angaben des Herstellers unter gewissen Bedingungen auch für die Schienenkopfkonditionierung angewendet werden kann.

Firma	Produktbezeichnung	Aufbringungsart	Biologische Abbaubarkeit	Basisöl	Additive	Temperaturbereich (°C)	Quelle
Lubcon	Sintono Terra HLK 00/0/1	stationär	ja, nach OECD 301	biologisch abbaubares synthetisches Öl	Weichmetalle	-40 bis +120	50
Igralub	HeadLub TS 0-2/00-2/1-1	stationär	ja	synthetischer Ester	Festschmierstoffe (> 30 %)	-30 bis +100	51
Igralub	HeadLub -/90	fahrzeugseitig	ja	polares Trägermedium	Festschmierstoffe (> 30 %)	-30 bis +100	52
LB Foster	Kelsan HPF	fahrzeugseitig	keine Angabe	kein Basisöl	100 % Festschmierstoff	keine Angabe	53
LB Foster	Keltrack	fahrzeugseitig & stationär	keine Angabe	wasserbasiert	keine Angabe	keine Angabe	54
Fuchs Lubritech	Tram-Silence 00	fahrzeugseitig & stationär	keine Angabe	synthetisches Trägermedium	Festschmierstoffe	-20 bis +80	55
Fuchs Lubritech	Tramlub SSM ECO	stationär	ja	synthetisch, biologisch schnell abbaubares Trägermedium	weiße Festschmierstoffe	-40 bis +120	56
Difacto	"Liquid top of rail friction modifier"	stationär	ja	keine Angabe	keine Angabe	Tieftemperatur bis -30	57
Difacto	µStick TFM	fahrzeugseitig	keine Angabe	kein Basisöl	100 % Festschmierstoff	keine Angabe	57

Tabelle 4: Produktübersicht über SKKM

⁵⁰ <https://www.lubcon.com/wp-content/uploads/2017/06/LUBCON-Schmierstoffe-Bahnindustrie-DE.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵¹ https://igralub.ch/?page_id=1299, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵² <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/solidstick4pagepamphlet041218.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵³ <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/solidstick4pagepamphlet041218.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵⁴ <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/lbfoster-keltrack-tor-friction-modifier-datasheet.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵⁵ <https://www.fuchs.com/de/de/produkt/product/150132-tram-silence-00/>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵⁶ <https://www.fuchs.com/at/de/produkt/product/57260-tramlub-ssm-eco/>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

⁵⁷ <https://difacto.eu/products-and-solution/>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

3.6. Umweltverträglichkeit

In Österreich bildet das Wasserrechtsgesetz (WRG) 1959⁵⁸ die rechtliche Grundlage für Maßnahmen sowie die zu ihrer Umsetzung erforderlichen rechtlichen Instrumente für folgende drei Themenkreise:

- Benutzung der Gewässer
- Schutz und die Reinhaltung der Gewässer
- Schutz vor den Gefahren des Wassers

Im WRG sind Umweltziele für Oberflächengewässer festgelegt. Im Zusammenhang damit beinhaltet der Anhang des WRG auch Listen der wichtigsten Schadstoffe, prioritären Stoffe und prioritär gefährlichen Stoffe gemäß der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie (EG) 2000/60)⁵⁹. Metalle und Metallverbindungen sowie organische Phosphorverbindungen sind auf der Schadstoffliste aufgeführt. Blei und Nickel zählen zu den prioritären Stoffen, während Cadmium und Quecksilber als prioritär gefährlicher Stoff eingestuft sind.

In Deutschland müssen Stoffe und Gemische bezüglich ihrer wassergefährdenden Eigenschaften in sogenannte Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft werden. Die Grundlagen der Einstufung bilden physikalische Kriterien wie z.B. Dichte und Wasserlöslichkeit, sowie ein Punktesystem, das sich an die aus wissenschaftlichen Prüfungen abgeleiteten R-Sätze und H-Sätze anlehnt.

Folgende Einstufungen gibt es:

- WGK 1: schwach wassergefährdend
- WGK 2: deutlich wassergefährdend
- WGK 3: stark wassergefährdend
- nicht wassergefährdend
- allgemein wassergefährdend

Die WGKs bereits eingestufter Stoffe können über die Rigoletto WGK-Suche des deutschen Umweltbundesamtes⁶⁰ abgerufen werden.

Es gibt verschiedene Umweltzeichen, die Produkte mit geringeren Umweltauswirkungen ausweisen und dabei anspruchsvolle Maßstäbe für umweltfreundliche Produkte und Dienstleistungen setzen. Im deutschsprachigen Raum sind v.a. das europäische

⁵⁸ Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich – Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG 1959, StF: BGBl. Nr. 215/1959 (WV), letzte Anpassung BGBl. Nr. 73/2018.

⁵⁹ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

⁶⁰ <https://webrigoletto.uba.de/Rigoletto/>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

Umweltzeichen „Ecolabel“, das deutsche Umweltzeichen „Blauer Engel“ und das „österreichische Umweltzeichen“ vertreten.

Die zuvor erwähnten Umweltzeichen werden im Bereich der Schmierstoffe nach in folgenden Dokumenten definierten Anforderungen vergeben:

- Ecolabel: Beschluss (EU) 2018/1702 der Kommission vom 8. November 2018 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Schmierstoffe ⁶¹
- Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ ⁶²
- Österreichisches Umweltzeichen: Richtlinie UZ 14 „Schmierstoffe“ (Anmerkung: „Die Kriterien dieser Österreichischen Umweltzeichen-Richtlinie sind mit jenen des EU Ecolabels (Beschluss (EU) 2018/1702) harmonisiert.“) ⁶³

Im Fokus stehen bei den Schmierstoffen die Ökotoxizität, biologische Abbaubarkeit sowie das Verbot bzw. die Einschränkung von schädlichen Inhaltsstoffen. Nicht berücksichtigt werden hier die Nachhaltigkeit, eine umweltschonende Produktion und soziale Aspekte.

SKKM fallen bei allen drei erwähnten Umweltzeichen in den Geltungsbereich der Schmierstoffe, insbesondere in die Untergruppe der Vollverlustschmierstoffe, bei denen der Schmierstoff bei bestimmungsgemäßem Einsatz überwiegend oder vollständig in die Umwelt gelangt.

3.6.1. Umweltzeichen „Blauer Engel“

Folgende Informationen sind an die Anforderungen des Blauen Engels (DE-UZ 178) angelehnt, vergleichbare Anforderungen sind im Ecolabel und im österreichischen Umweltzeichen definiert:

Generell gelten Anforderungen an das Endprodukt sowie an dessen Bestandteile gemäß europäischem Chemikalienrecht. Das Endprodukt darf kein Einstufungskriterium gemäß Anhang I der Verordnung (EG) 1272/2008 ⁶⁴ (CLP) erfüllen. CLP ist eine europäische Verordnung, die sich mit *Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures*, also Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen beschäftigt.

⁶¹ Beschluss (EU) 2018/1702 der Kommission vom 8. November 2018 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Schmierstoffe.

⁶² Blauer Engel, DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“.

⁶³ Österreichisches Umweltzeichen, Richtlinie UZ 14 „Schmierstoffe“.

⁶⁴ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

Anhand der CLP-Verordnung wird festgestellt, ob ein Stoff Eigenschaften aufweist, die zur Einstufung „gefährlich“ führen. Sind Einstufungskriterien erfüllt, werden die Gefahren durch Zuweisung zu einer bestimmten Gefahrenklasse angegeben, und es wird eine Gefahrenkennzeichnung mit Kennzeichnungsetiketten und Sicherheitsdatenblättern vorgeschrieben.

Besonders besorgniserregende Stoffe gemäß Artikel 57 bzw. Artikel 59 der Verordnung (EG) 1907/2006⁶⁵ (REACH) sind von der Verwendung im Endprodukt ausgeschlossen. REACH ist eine Verordnung der EU, die auf die Erhöhung des Schutzes der menschlichen Gesundheit und der Umwelt vor Risiken durch Chemikalien abzielt. REACH steht für Registrierung (*registration*), Bewertung (*evaluation*), Zulassung (*authorisation*) und Beschränkung (*restriction*) von Chemikalien. In der EU ansässige Hersteller, Importeure, Händler und nachgeschaltete Anwender, die mit Chemikalien zu tun haben, haben diesbezüglich Verpflichtungen.

Es dürfen keine Stoffe zugesetzt sein, die nach den Vorgaben der MAK-Kommission als krebserregend, keimzellmutagen oder fortpflanzungsgefährdend aufgeführt sind. Dies gilt auch für mögliche Abbauprodukte. Der Blaue Engel bezieht sich hier auf die MAK-Liste⁶⁶ der deutschen Forschungsgemeinschaft. Auf österreichischer (Verordnung BGBl. II Nr. 156/2021⁶⁷) und europäischer Ebene (Richtlinie 2019/983⁶⁸) gibt es dementsprechende Vorgaben.

Es gelten Stoffbeschränkungen für Stoffgruppen, die im Rahmen anderer regulatorischer Verfahren als REACH und CLP als problematisch für die Umwelt identifiziert wurden:

- Stoffe der OSPAR-Liste: Die Oslo-Paris Konvention aus dem Jahr 1992 hat die Erhaltung und den Schutz der Meeresökosysteme des Nordost-Atlantiks zum Ziel. Die OSPAR-Listen „*List of substances of possible concern*“⁶⁹ und „*List of chemicals for priority action*“⁷⁰ enthalten Stoffe, die für die Meeresumwelt von Bedenken sind.

⁶⁵ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe.

⁶⁶ MAK- und BAT-Werte-Liste 2021 – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe.

⁶⁷ BGBl. II Nr. 156/2021 – Änderung der Grenzwertverordnung 2020 und der Verordnung biologische Arbeitsstoffe.

⁶⁸ Richtlinie (EU) 2019/983 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit.

⁶⁹ <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/possible-concern/list>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

⁷⁰ <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/priority-action>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

- Stoffe der EU-Liste prioritärer Stoffe im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie ⁴⁵. In dieser EU-Richtlinie 2000/60 werden Stoffe aufgeführt, deren Eintrag in die Gewässer zu reduzieren ist. Besonders hervorgehoben werden prioritär gefährliche Stoffe, die toxisch oder bioakkumulierend sind oder vergleichbaren Anlass zur Besorgnis geben.
- Stoffe mit einer Wassergefährdungsklasse 2 oder 3, gemäß ihrer Einstufung nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).

Zusätzlich gibt es Stoffbeschränkungen auf Basis der Zugehörigkeit zu bestimmten Stoffgruppen (SKKM sind Anwendungsbereich 2.1.: Schmierstoffe, die bei bestimmungsgemäßem Einsatz überwiegend in die Umwelt gelangen, z.B. Schienenschmierstoffe):

- Organische Halogenverbindungen
- Nitritverbindungen
- Metalle und Metallverbindungen mit Ausnahme von Verbindungen, die Na, K, Mg, Ca als Metallatome enthalten (auch im Blauen Engel aufgelistet)
- Mineralöle für den Einsatz in Trennmitteln für Asphaltarbeiten.
- Mineralöle für den Einsatz in Kettenschmierstoffen für Motorsägen.

Die unter den Stoffbeschränkungen aufgeführten Stoffgruppen sind vom Einsatz im Endprodukt ausgeschlossen.

Neben den Kriterien hinsichtlich des Einsatzes von bestimmten Stoffgruppen werden Anforderungen an die **aquatische Toxizität** gestellt.

Bei aquatischen Toxizitätstests sollen generell drei trophische Ebenen untersucht werden:

- Algen repräsentieren meist Primärproduzenten.
- Stellvertretend für Konsumenten niedriger Ordnung werden oft Daphnien herangezogen.
- Repräsentativ für Konsumenten höherer Ordnung werden grundsätzlich Fische untersucht, wobei aus Tierschutzgründen stattdessen immer häufiger Fischeier eingesetzt werden.

Im Fall von komplexen Substanzen, die nur teilweise in Wasser löslich sind und toxikologischen Untersuchungen oder biologischen Abbaubarkeitstests unterzogen werden sollen, wird eine sogenannte *water accommodated fraction (WAF)* hergestellt. Diese ist ein wässriges Medium, das einen Teil der zu untersuchenden Mehrkomponenten-Substanzen enthält und deren Aufbereitung im *OECD Guidance Document on Aquatic Toxicity Testing of Difficult Substances and Mixtures* ⁷¹ beschrieben ist. Generell erfolgt die Herstellung durch

⁷¹ OECD Series on Testing and Assessment – Guidance Document on Aquatic Toxicity Testing of Difficult Substances and Mixtures.

Mischung und Equilibrierung der Substanz in Wasser, gefolgt von einer definierten Absetzzeit. Im Test erfolgt dann der Einsatz des klaren Überstandes. Angegeben wird eine *loading rate* (als Konzentration, üblicherweise in *mg/L*), d.h. die zudosierte Probenmenge, die sich jedoch in der Regel nicht vollständig im Testmedium löst.

Außerdem ist die Abbaubarkeit und das Bioakkumulationspotenzial der Stoffe zu untersuchen.

Von diesem Kriterium ausgenommen sind folgende Stoffgruppen:

- Anorganische Additive (mineralische Additive)
- Anorganische Verdicker (mineralische Verdicker)
- Verdicker aus wasserunlöslichen Biopolymeren (aus natürlich vorkommenden Bestandteilen)
- Polymere (unter bestimmten Bedingungen)

Generell wird die **biologische Abbaubarkeit** in folgende Kategorien unterteilt:

- Leichte biologische Abbaubarkeit
 - Als leicht abbaubar gelten Stoffe, wenn sie in einem der vorgegebenen Tests auf Basis des gelösten Kohlenstoffs zu mehr als 70 % abbaubar sind, oder auf Basis des Sauerstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Bildung mehr als 60 % des theoretischen Höchstwerts erreichen.
- Inhärente biologische Abbaubarkeit
 - Als inhärent biologisch abbaubar gelten Stoffe, wenn in einem inhärenten Abbautest eine Bioabbaubarkeit von > 70 % nachgewiesen wird oder in einem Test auf leichte biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Bildung mehr als 20 % aber weniger als 60 % des theoretischen Höchstwerts erreicht werden.
- Wenn die vorherigen Kriterien nicht erfüllt sind, gilt ein Stoff als nicht biologisch abbaubar.

Der Anteil von leicht biologisch abbaubaren Stoffen im Endprodukt im Geltungsbereich der Vergabekriterien des Blauen Engels⁶² muss einem Mindestwert (90 wt.%) entsprechen. Untersucht werden die Bestandteile (Reinsubstanzen) des Endprodukts. Der Anteil nicht biologisch abbaubarer Stoffe darf nicht höher als 2 wt.% des Endprodukts betragen.

Bei der Untersuchung auf biologische Abbaubarkeit ist bei schwer wasserlöslichen Stoffen auf eine geeignete Zugabe des Testgutes zu achten. Entsprechende technische Hinweise werden z.B. im Anhang III der OECD 301⁷² (*Evaluation of the biodegradability of poorly soluble compounds*) gegeben.

⁷² OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, Test No. 301: Ready Biodegradability.

Stoffe, die gemäß den angegebenen Kriterien als inhärent biologisch abbaubar oder nicht biologisch abbaubar gelten, müssen hinsichtlich ihres Bioakkumulationspotenzials untersucht werden.

Bioakkumulation wird anhand von folgenden Faktoren ermittelt:

- BCF (*bioconcentration factor*)
- Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient (wenn kein experimentell bestimmter BCF vorliegt)
- Oberflächenaktivität des Stoffes

Für den Blauen Engel und das Ecolabel gibt es jeweils eine Liste an Stoffen und Produkten, die die Kriterien des jeweiligen Umweltzeichens erfüllen. Für das Ecolabel ist dies die LuSC-Liste (*Lubricant Substance Classification List* ⁷³), die Substanzen sowie unter Markennamen vertriebene Basisöle und Additive enthält. Das deutsche Pendant dazu ist eine Einstufungsliste für Schmierstoffbestandteile ⁷⁴.

3.6.2. Prüfmethode für Umweltverträglichkeit

Tabelle 5 enthält OECD-Richtlinien, die Prüfmethode bezüglich der aquatischen Toxizität, biologischen Abbaubarkeit und der Bioakkumulation beschreiben. Tabelle 6 umfasst verschiedene DIN- und ISO-Normen zur Untersuchung der aquatischen Toxizität, während Tabelle 7 DIN- ISO-Normen zur biologischen Abbaubarkeit und Toxizität hinsichtlich der Bodenflora sowie eine Norm über die Anforderungen an Bio-Schmierstoffe enthält.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Untersuchung der biologische Abbaubarkeit nach einer der Methoden in OECD 301 ⁶² für Einzelsubstanzen entwickelt ist und nicht für fertig formulierte Stoffe.

⁷³ <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/LuSC-list%20vs%2007012021%2018-1702%20%20without%20track%20changes.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

⁷⁴ <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/schmierstoffe-hydraulikfluessigkeiten-bis-12-2022>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

Richtlinie	Titel	Test	Jahr	Äquivalente Norm
OECD 105	Water Solubility	Wasserlöslichkeit	1995	-
OECD 107	Partition Coefficient (n-octanol/water): Shake Flask Method	Bioakkumulation	1995	-
OECD 117	Partition Coefficient n-octanol/water	Bioakkumulation	2004	-
OECD 123	Partition Coefficient (1-Octanol/Water): Slow-Stirring Method	Bioakkumulation	2006	-
OECD 201	Freshwater Alga and Cyanobacteria Growth Inhibition Test	Aquatische Toxizität	2011	DIN EN ISO 8692
OECD 202	Daphnia sp. Acute Immobilisation Test	Aquatische Toxizität	2004	DIN EN ISO 6341
OECD 203	Fish Acute Toxicity Test	Aquatische Toxizität	2019	DIN EN ISO 7346-1
OECD 210	Fish, Early-life Stage Toxicity Test	Aquatische Toxizität	2013	-
OECD 211	Daphnia magna Reproduction Test	Aquatische Toxizität	2012	-
OECD 212	Fish, Short-term Toxicity Test on Embryo and Sac-fry Stages	Aquatische Toxizität	1998	-
OECD 215	Fish, Juvenile Growth Test	Aquatische Toxizität	2000	ISO 12890
OECD 221	Lemna sp. Growth Inhibition Test	Aquatische Toxizität	2006	-
OECD 236	Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test	Aquatische Toxizität	2013	-
OECD 301 A	Ready Biodegradability - DOC Die-Away	Biologische Abbaubarkeit	1992	EN ISO 7827
OECD 301 B	Ready Biodegradability - CO ₂ Evolution (Modified Sturm Test)	Biologische Abbaubarkeit	1992	EN ISO 9439
OECD 301 C	Ready Biodegradability - MITI (I)	Biologische Abbaubarkeit	1992	-
OECD 301 D	Ready Biodegradability - Closed Bottle	Biologische Abbaubarkeit	1992	EN ISO 10707
OECD 301 E	Ready Biodegradability - Modified OECD Screening	Biologische Abbaubarkeit	1992	EN ISO 7827
OECD 301 F	Ready Biodegradability - Manometric Respirometry	Biologische Abbaubarkeit	1992	EN ISO 9408
OECD 302 A	Inherent Biodegradability: Modified SCAS Test	Biologische Abbaubarkeit	1981	-
OECD 302 B	Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/ EVPA Test	Biologische Abbaubarkeit	1992	-
OECD 302 C	Inherent Biodegradability: Modified MITI Test (II)	Biologische Abbaubarkeit	2009	-
OECD 305	Bioaccumulation in Fish: Aqueous and Dietary Exposure	Bioakkumulation	2012	-
OECD 306	Biodegradability in Seawater	Biologische Abbaubarkeit	1992	ISO 16221
OECD 310	Ready Biodegradability - CO ₂ in sealed vessels (Headspace Test)	Biologische Abbaubarkeit	2014	DIN EN ISO 14593
OECD 317	Bioaccumulation in Terrestrial Oligochaetes	Bioakkumulation	2010	-

Tabelle 5: OECD-Richtlinien, die Prüfmethode bezüglich der aquatischen Toxizität, biologischen Abbaubarkeit und der Bioakkumulation beschreiben

Norm	Titel	Test	Jahr	Äquivalentes Prüfverfahren
DIN EN ISO 6341	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) - Akuter Toxizitäts-Test	Aquatische Toxizität	2012	OECD 202
DIN EN ISO 8692	Wasserbeschaffenheit - Süßwasser-algen-Wachstumshemmtest mit einzelligen Grünalgen	Aquatische Toxizität	2012	OECD 201
DIN EN ISO 10253	Wasserbeschaffenheit - Wachstumshemmtest mit marinen Algen Skeletonema sp. und Phaeodactylum tricornutum	Aquatische Toxizität	2016	-
DIN EN ISO 7346-1	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der akuten letalen Toxizität von Substanzen gegenüber einem Süßwasserfisch	Aquatische Toxizität	1997	OECD 203
ISO 14669	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der akuten letalen Toxizität gegenüber Meereskopepoden	Aquatische Toxizität	2003	-
ISO 12890	Water quality - Determination of toxicity to embryos and larvae of freshwater fish - Semi-static method	Aquatische Toxizität	1999	OECD 215
DIN EN ISO 11348-1	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von Vibrio fischeri (Leuchtbakterientest) - Teil 1: Verfahren mit frisch gezüchteten Bakterien	Aquatische Toxizität	2009	-
DIN EN ISO 11348-2	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von Vibrio fischeri (Leuchtbakterientest) - Teil 2: Verfahren mit flüssig getrockneten Bakterien	Aquatische Toxizität	2009	-
DIN EN ISO 11348-3	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von Vibrio fischeri (Leuchtbakterientest) - Teil 3: Verfahren mit gefriergetrockneten Bakterien	Aquatische Toxizität	2009	-
DIN EN ISO 20079	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der toxischen Wirkung von Wasserinhaltsstoffen und Abwasser gegenüber Wasserlinsen (Lemna minor) - Wasserlinsen-Wachstumshemmtest	Aquatische Toxizität	2006	-
DIN 38412-30	Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) - Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Daphnien über Verdünnungsstufen	Aquatische Toxizität	1989	-
DIN 38412-33	Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) - Bestimmung der nicht giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Grünalgen (Scenedesmus-Chlorophyll-Fluoreszenztest) über Verdünnungsstufen	Aquatische Toxizität	1991	-
DIN 38412-37	Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasser auf das Wachstum von Bakterien (Photobacterium phosphoreum - Zellvermehrungs-Hemmtest)	Aquatische Toxizität	1999	-
DIN EN ISO 15088	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der akuten Toxizität von Abwasser auf Zebrafisch-Eier (Danio rerio)	Aquatische Toxizität	2009	-
DIN EN ISO 10712	Wasserbeschaffenheit - Pseudomonas putida Wachstumshemmtest	Aquatische Toxizität	2019	-

Tabelle 6: DIN- und ISO-Normen zur Untersuchung der aquatischen Toxizität

Norm	Titel	Test	Jahr	Äquivalentes Prüfverfahren
DIN EN ISO 11269-1	Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Wirkungen von Schadstoffen auf die Bodenflora - Teil 1: Verfahren zur Messung der Wurzelwachstumshemmung	Toxizität	2013	-
DIN EN ISO 11269-2	Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Wirkungen von Schadstoffen auf die Bodenflora - Teil 2: Wirkung von verunreinigten Böden auf Saataufbau und frühes Wachstum höherer Pflanzen	Toxizität	2013	-
DIN EN 16807	Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse - Bio-Schmierstoffe - Kriterien und Anforderungen für Bio-Schmierstoffe und biobasierte Schmierstoffe	Biobasierte Bestandteile, aquatische Toxizität, biologische Abbaubarkeit	2016	-
DIN EN ISO 9439	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe im wässrigen Medium	Biologische Abbaubarkeit	2000	OECD 301 B
DIN EN ISO 14593	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen biologischen Abbaubarkeit organischer Substanzen im wässrigen Medium - Verfahren mittels Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffs in geschlossenen Flaschen (CO ₂ -Headspace-Test)	Biologische Abbaubarkeit	2005	OECD 310
DIN EN ISO 9408	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe im wässrigen Medium über die Bestimmung des Sauerstoffbedarfs in einem geschlossenen Respirometer	Biologische Abbaubarkeit	1999	OECD 301 F
DIN EN ISO 7827	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe in einem wässrigen Medium - Verfahren mittels Analyse des gelösten organischen Kohlenstoffs	Biologische Abbaubarkeit	2013	OECD 301 A & E
DIN EN ISO 10707	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe in einem wässrigen Medium - Verfahren mittels Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs	Biologische Abbaubarkeit	1998	OECD 301 D
ISO 16221	Wasserbeschaffenheit - Richtlinie zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit in der marinen Umwelt	Biologische Abbaubarkeit	2001	OECD 306
CEC-L-103-12	Biological Degradability of Lubricants in Natural Environment	Biologische Abbaubarkeit	2012	-
ISO 10708	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Verbindungen in einem wässrigen Medium - Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs mit dem geschlossenen Flaschentest in zwei Phasen	Biologische Abbaubarkeit	1997	-

Tabelle 7: DIN- und ISO-Normen zur Toxizität und biologischen Abbaubarkeit

4. MEHRSTUFIGES BEURTEILUNGSVERFAHREN ZUR BEURTEILUNG VON SKKM

Das mehrstufige Beurteilungsverfahren ist dem Stage-Gate®-Modell⁷⁵ für die Innovations- und Produktentwicklung entlehnt. Die Einteilung im Stage-Gate®-Modell in die einzelnen Abschnitte, den sogenannten Stages, erfolgt dabei sachlogisch, so dass eine Innovation zu Beginn des mehrstufigen Beurteilungsprozesses zunächst im Hinblick auf ihre technische und betriebswirtschaftliche Güte analysiert wird. Das Beurteilungsverfahren im Projekt „SafeRail“ wurde in vier Stufen unterteilt, siehe Abbildung 18. Dadurch soll eine Vorvalidierung von SKKM im Labor für Umweltverträglichkeit, Isoliereigenschaften und Reibungskoeffizient stattfinden und im Feld abgesichert werden. Der entscheidende Vorteil des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens ist die kosten- und zeiteffiziente Beurteilung der SKKM, da zu erwarten ist, dass die Anzahl der SKKM-Kandidaten mit jeder Stufe abnimmt, daher auch eine geringer werdende Anzahl von Tests zwecks Beurteilung der SKKM vorgenommen werden muss. Die in Abbildung 18 gereihten Beurteilungsverfahren folgen den zu erwartenden Kosten. Beispielsweise könnte der Nachweis der Umweltverträglichkeit bereits durch den SKKM-Hersteller bzw. -Vertreiber erbracht werden. Da Feldversuche naturgemäß am aufwendigsten sind, erfolgen diese mit den wenigen verbleibenden, somit bestgereihten, SKKM erst am Ende des gesamten Beurteilungsverfahrens.



Abbildung 18: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren von SKKM im Projekt „SafeRail“

Die Umweltverträglichkeit wird immer bedeutsamer, weshalb in Zukunft SKKM vermehrt den Vorgaben zur Umweltverträglichkeit erfüllen müssen. Aus diesem Grund wurde die Umweltverträglichkeit im mehrstufigen Beurteilungsverfahren als erste Stufe berücksichtigt. Isolierstöße sind Teil der Gleisfreimeldeanlage und dürfen nicht durch SKKM leitend werden. Daher wird eine kostengünstige Labormethode zur Beurteilung der Isoliereigenschaften der SKKM als zweite Methode bzw. Stufe gereiht. Im Rahmen der dritten Stufe wird, der sich einstellende Reibungskoeffizient der SKKM im Labor ermittelt. Dies erfolgt an Tribometern und einem Full-Scale-Teststand. Dadurch wird eine weitere Vorauswahl bzw. Reihung von SKKM getroffen. In der letzten Stufe werden Feldversuche zur Übertragbarkeit der Laboruntersuchungen durchgeführt.

⁷⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Stage-Gate-Modell>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

5. CHARAKTERISIERUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT – STUFE 1

SKKM sind einer Reihe von Umwelteinflüssen ausgesetzt, die bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden sollten, wie in Abbildung 19 skizziert. Beispielsweise kann die Sonneneinstrahlung bereits eine Degradation des SKKM einleiten. Des Weiteren kann durch Niederschlag ein vertikaler Weitertransport des SKKM erfolgen; dies würde zwar das Gleis bzw. Gleisbett „reinigen“, jedoch SKKM oder Bestandteile davon in das Erdreich oder in Gewässer transportieren. Letzteres ist ebenso bei Drainage-Anlagen zu berücksichtigen. Bei geringer biologischer Abbaubarkeit ist die Möglichkeit der Bioakkumulation zu beachten. Daher wird empfohlen, bei der Auswahl des SKKM auf eine ausreichende biologische Abbaubarkeit zu achten, sodass das Potenzial der Bioakkumulation ausgeschlossen werden kann.

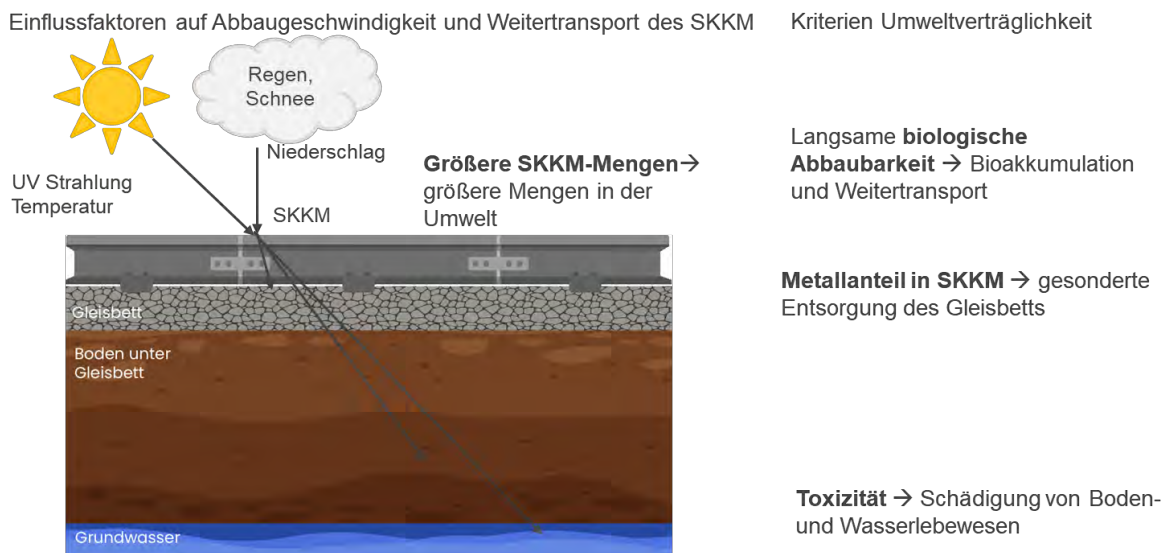


Abbildung 19: Umwelteinflüsse von SKKM und Umweltverträglichkeit

Zur Bewertung der Unbedenklichkeit hinsichtlich der Umweltverträglichkeit wird die Berücksichtigung folgender drei Kriterien empfohlen, siehe auch die Ausführungen in Kapitel 3.6:

- Biologische Abbaubarkeit
 - Es wird die Abbaubarkeit von organischen Bestandteilen beurteilt. Da die Recherche keine gängige Methode für fertig formulierte Schmierstoffe aufgezeigt hat, wird die Untersuchung bzw. Bewertung anhand einer Methode von OECD 301 ⁷¹ für Einzelkomponenten empfohlen. Falls Einzelkomponenten der SKKM nicht verfügbar bzw. bekannt sind, wird ein Produktvergleich für fertig formulierte Schmierstoffe z.B. nach OECD 301 D ⁷¹ empfohlen.

- Aquatische Toxizität
 - Es wird empfohlen, akute oder chronische aquatische Toxizitätstests für zumindest zwei der drei trophischen Ebenen nachzuweisen. Geeignete akute Prüfverfahren sind:
 - Algentest DIN EN ISO 8692 (OECD 201) ⁷¹
 - Daphnientest DIN EN ISO 6341 (OECD 202) ⁷¹
 - Fischeitest DIN EN ISO 15088 ⁷¹
- Metallanteile
 - Die Empfehlung als Bewertungskriterium erfolgt in Anlehnung an den Blauen Engel⁷⁶, welcher den Anteil an Stoffgruppen, darunter Metalle, beschränkt (siehe Kapitel 3.2.2 und 3.6.1 sowie Abschnitt 3.2 in Anhang B; keine Metalle außer Verbindungen, die Na, K, Mg, Ca als Metallatome enthalten). Metalle werden nicht abgebaut, sie können in der Umwelt in metallischer oder ionischer Form weiterverteilt werden und ggf. ihre schädliche Wirkung entfalten. Bei der Auswahl von SKKM sollte ein Produkt mit einem geringeren Metallanteil gewählt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Metalle wie Aluminium auch in anorganischen Verdicker zu finden sind, wo kein Gefährdungspotenzial zu erwarten ist. Beispielsweise ist das Schwermetall Kupfer in geringen Mengen für den Menschen notwendig, bei einer erhöhten Zufuhr von Kupfer kann es aber zu einer Kupfervergiftung kommen ⁷⁷. Neben der Umweltverträglichkeit kommt im Gleisbereich auch die ökonomische Komponente zum Tragen, da durch eine hohe Kontamination mit Metallen durch SKKM, z.B., wenn beim Auftragen eine signifikante Menge nicht auf die Schiene gelangt, sondern ins Gleisbett, beim Austausch des Schotterbetts höhere Kosten entstehen. Laut dem Blauen Engel sind Metalle wie Cu und Al nicht zulässig. Metalle in elementarer Form (Partikel) sind im Allgemeinen weniger umweltschädlich als Metalle in gelöster Form bzw. Salzform ⁷⁸ Um den in den SKKM zu erwartenden Metallen in elementarer Form und Salzform Rechnung zu tragen, ist eine Erleichterung gegenüber dem Blauen Engel sinnvoll.

⁷⁶ Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel 3.3.2 und Anhang B „3.2 Stoffbeschränkungen weiterer relevanter Stoffgruppen“

⁷⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Kupfervergiftung>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

⁷⁸ Umweltbundesamt, Umweltprobenbank des Bundes, Metalle, <https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10039>, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022

5.1. Methode zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit

Die in OECD 301 ⁷² enthaltenen Methoden beschreiben verschiedene Tests zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von Einzelsubstanzen. Die Methoden B, C, D und F werden für schwer wasserlösliche Verbindungen empfohlen. Während Methode B die CO₂-Entwicklung betrachtet, berücksichtigt Methode D den gelösten Sauerstoff, und die Methoden C und F werten den Sauerstoffverbrauch aus. Angesichts des Mangels an genormten Prüfverfahren für Gemische könnte z.B. die Methode OECD 301 D ⁷² auch für vollständig formulierte Produkte angewendet werden.

OECD 301 D ⁷² beschreibt den sogenannten geschlossenen Flaschentest. Hierbei wird die Prüfsubstanz in einem mineralischen Medium mit Inokulum (Mikroorganismen) angeimpft und in geschlossenen Flaschen inkubiert. Der Abbau wird über einen Zeitraum von 28 Tagen durch die Analyse des gelösten Sauerstoffs verfolgt. Der Grad des biologischen Abbaus wird berechnet, indem der verbrauchte Sauerstoff als Prozentsatz des theoretischen Sauerstoffbedarfs (*theoretical oxygen demand*, ThOD) ausgedrückt wird.

5.2. Methoden zur Untersuchung der Toxizität

Mit den fünf zur Verfügung stehenden SKKM wurden akute aquatische Toxizitätstests auf drei trophischen Ebenen durchgeführt. Die Wahl der Prüfverfahren basiert im Fall von Algen und Daphnien auf den Vorgaben des EU-Ecolabels und des Blauen Engels. Ökotoxizitätstests mit Fischen sollen aus Tierschutzgründen nicht durchgeführt werden, selbst wenn keine Daten vorliegen. Ersatzweise wurde hier ein Fischeitest durchgeführt. Auch für den Blauen Engel dürfen für bislang nicht getestete Substanzen keine Tests mit Fischen durchgeführt werden, alternativ ist ein Test nach OECD 236 (Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test) bzw. Teil C.49 des Anhangs der Verordnung (EG) Nr. 440/2008, welcher nicht als Wirbeltierversuch gilt, möglich.⁷⁹

Der Algentest wurde nach der Norm DIN EN ISO 8692 (Wasserbeschaffenheit – Süßwasseralgen-Wachstumshemmtest mit einzelligen Grünalgen) durchgeführt. Diese entspricht der OECD 201 ⁷¹ und beruht auf einer Bestimmung der Algenbiomasse mittels der Messung der Chlorophyllfluoreszenz. Eine Auswertung des Biomassezuwachses erfolgt mittels Messung zu Beginn und am Ende der 72-stündigen Expositionszeit. Eine

⁷⁹ Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel „Zusätzliche Anforderungen an die aquatische Toxizität“.

Wachstumshemmung wird als Verminderung der spezifischen Wachstumsrate im Verhältnis zu unter identischen Bedingungen gewachsenen Kontrollansätzen bestimmt.

Der Daphnientest wurde gemäß der Norm DIN EN ISO 6341 (Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von *Daphnia magna Straus*) ausgeführt. Äquivalent zur OECD 202⁷¹ erfolgt bei diesem Verfahren eine Bestimmung der Anzahl von schwimmunfähigen Daphnien am Ende der 48-stündigen Expositionszeit. Die Feststellung der Schädigung von Daphnien basiert auf dem Verlust ihrer Schwimmfähigkeit.

Der Fischeitest wurde laut der Norm DIN EN ISO 15088 (Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der akuten Toxizität von Abwasser auf Zebrafisch-Eier (*Danio rerio*)) durchgeführt. Bei dieser Methode wird am Ende der 48-stündigen Expositionszeit die Schädigung der Fischeier über den Tod der Embryonen sowie definierte Störungen der Embryonalentwicklung, die zum Tod führen, festgestellt.

Die DIN EN 16807⁸⁰ führt an, dass ein Bio-Schmierstoff nicht als „umweltgefährdend“ eingestuft sein darf. Dies wird nachgewiesen, indem die Untersuchung

- mit Algen nach EN ISO 8692 einen Wert von EC50 > 100 mg/L ergibt. Die mittlere effektive Konzentration EC50 ist die Konzentration, die bei Algen zu einer 50-prozentigen Hemmung der Wachstumsrate führt.
- mit Daphnien nach EN ISO 6341 einen Wert von EC50 > 100 mg/L ergibt. Die mittlere effektive Konzentration EC50 ist die Konzentration, bei der 50 % der exponierten Daphnien schwimmunfähig werden.
- mit Fischen nach EN ISO 7346-1 einen Wert von LC50 > 100 mg/L. ergibt. LC50 ist jene Konzentration, die für 50 % der Fische tödlich ist.

Im Blauen Engel sind noch strengere Schwellenwerte definiert: EC50 ≥ 1000 mg/L bei Algen und Daphnien und LC50 ≥ 1000 mg/L bei Fischen. Hierbei handelt es sich um die Angaben für den Anwendungsbereich 2.1⁸¹., der Schmierstoffe für Bereiche definiert, in denen bestimmungsgemäß Schmiermittelverluste auftreten (Verlustschmierung). Im Unterpunkt 2.1.1. sind solche Schmierstoffe definiert, die bei bestimmungsgemäßigem Einsatz überwiegend in die Umwelt gelangen, wie dies auf Schmierstoffe bei Weichen und Schienen zutrifft. Im Blauen Engel werden Schwellenwerte für akute und chronische Toxizität angegeben. Im

⁸⁰ DIN EN 16807 - Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse –Bio-Schmierstoffe –Kriterien und Anforderungen für Bio-Schmierstoffe und biobasierte Schmierstoffe

⁸¹ Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel „Geltungsbereich“

Rahmen dieses Projekts wurden Testmethoden zur akuten aquatischen Toxizität herangezogen.

Untersuchungen nach den angeführten Normen setzen die Durchführung in verschiedenen Konzentrationen voraus, um die Konzentration für EC50 bzw. LC50 zu ermitteln. Im Rahmen dieses Projektes wurden im Hinblick auf ein kostengünstiges Beurteilungsverfahren nur Tests mit der Konzentration des Schwellenwertes von 1000 mg/L durchgeführt. Aus den Tests kann eine Toxizität abgeschätzt werden, der Test ersetzt jedoch keine vollständige Testserie nach Norm.

5.3. Methode zur Bestimmung der Metallanteile

Aufgrund der großen Zahl an Elementen, die simultan bestimmt werden können, eignet sich die optische Emissionsspektroskopie in Kombination mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, ICP-OES) sehr gut für die Bestimmung von Metallanteilen in Schmierstoffen. Hierbei wird die Probe vor der spektroskopischen Analyse mit Salpetersäure in einem Mikrowellenofen aufgeschlossen, sodass die zu analysierenden Elemente als Ionen in einer wässrigen Lösung vorliegen. Die Lösung wird unverdünnt oder verdünnt dem ICP-OES zugeführt, wo im Plasma die Anregung der Elemente erfolgt. Dem folgt die Emission von Strahlung, deren Wellenlängen charakteristisch für jedes Element und deren Intensität abhängig von der Konzentration des Elements ist. Die emittierte Strahlung wird typischerweise mit einem Charge Coupled Device (CCD) als Detektor qualitativ und quantitativ erfasst.

5.4. Ergebnisse

Es wird darauf hingewiesen, dass für die biologische Abbaubarkeit nach OECD 301⁷² keine vollformulierten Produkte vorgesehen sind. Daher wird die Durchführung von Untersuchungen zur biologischen Abbaubarkeit mit den Einzelkomponenten der SKKM empfohlen, sofern dazu noch keine Ergebnisse vorliegen. Alternativ ist ein Produktvergleich in Anlehnung an OECD 301 D denkbar, wie dies für vollformulierte Schmierstoffe – also mit SKKM am besten vergleichbaren Produkten – von einigen Herstellern durchgeführt wird.

Da OECD 301 D für Reinstoffe, jedoch nicht Mehrstoffgemische konzipiert wurde, kann bei der Untersuchung von Mehrstoffgemischen (wie SKKMs) nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Produktbestandteile oder Abbau(zwischen)produkte / Metaboliten fertig abbaubar, inhärent abbaubar und/oder nicht abbaubar sind, da diese Richtlinie nur die Summe der

mineralisierten organischen Kohlenstoffverbindungen erfasst⁸². Da die Testergebnisse von Einzelkomponenten nicht verfügbar waren, wurden für einen Produktvergleich SKKM B und SKKM E mittels der Methode OECD 301 D untersucht. Zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit wurde der Sauerstoffverbrauch gemessen, es wurde dabei die vollständige Probe (inkl. unlöslicher Bestandteile) in die Flasche gegeben.

Im Blauen Engel gelten Stoffe (Anmerkung: Einzelkomponenten) als inhärent biologisch abbaubar, wenn in einem Test auf leichte biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs mehr als 20 % aber weniger als 60 % des theoretischen Höchstwerts erreicht werden⁷⁴.

Das Kriterium für die biologische Abbaubarkeit wurde in Anlehnung an den Blauen Engel definiert:

- Der Test ist bestanden, wenn zumindest inhärente biologische Abbaubarkeit erreicht wird, d.h. in einem Test auf leichte biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs mehr als 20 % des theoretischen Höchstwerts erreicht werden.

Die Ergebnisse der Tests zur biologischen Abbaubarkeit sind in Tabelle 8 dargestellt. Der Schwellenwert der leichten biologischen Abbaubarkeit (60 %) wird von beiden SKKM nicht erreicht. Nach dem oben genannten, an den Blauen Engel angelehnte, Kriterium sind die SKKM inhärent biologisch abbaubar.

SKKM	% Abbau	leicht biologisch abbaubar
SKKM B	33%	nein
SKKM E	41%	nein

Tabelle 8: Testergebnisse OECD 301 D mit SKKM, biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs in % des theoretischen Höchstwerts⁸³

Die Reihung der untersuchten SKKM auf Basis der biologischen Abbaubarkeit kann wie folgt vorgenommen werden (jenes SKKM mit der höchsten biologischen Abbaubarkeit zuerst):

SKKM E > SKKM B

Die Ergebnisse der Toxizitätstests sind in Tabelle 9 zusammengefasst⁸³. SKKM B zeigt in keinem der durchgeführten Tests Toxizität. Hingegen zeigt SKKM A in allen 3 Tests sehr hohe Mortalität bzw. Wachstumshemmung. Die Reihung der SKKM auf Basis der Toxizitätsuntersuchungen kann wie folgt vorgenommen werden (jenes SKKM mit der geringsten Toxizität zuerst):

⁸² R. Weyandt, SGS Institut Fresenius GmbH, Berichte Nr. 6244912-01-V1 und 6244912-02-V1: Test auf leichte biologische Abbaubarkeit, 13.09.2022

⁸³ M. Kretschmar, Hydrotox GmbH, Berichte Nr. 4264, 4265, 4266, 4267, 4268: Prüfung der aquatischen Ökotoxizität eines Schmierstoff-Eluates, 15.06.2021

SKKM B < SKKM D < SKKM E < SKKM C < SKKM A

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Metallanteils sind aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen nicht Teil des Berichts.

SKKM	Aquatische Toxizität		
	Algentest DIN EN ISO 8692	Daphnientest DIN EN ISO 6341	Fischartest DIN EN ISO 15088
SKKM A	98 % Wachstumshemmung	100 % Mortalität	80% Mortalität
SKKM B	keine Toxizität	keine Toxizität	keine Toxizität
SKKM C	25 % Wachstumshemmung	100 % Mortalität	keine Toxizität
SKKM D	keine Toxizität	20 % Mortalität	keine Toxizität
SKKM E	7 % Wachstumshemmung	40 % Mortalität	keine Toxizität

Tabelle 9: Toxizität der SKKM mittels Limittests mit einer loading rate von 1000 mg/L ⁸³

5.5. Zusammenfassung

Zur Bewertung der Unbedenklichkeit hinsichtlich Umweltverträglichkeit wird die Berücksichtigung folgender drei Kriterien empfohlen:

- Biologische Abbaubarkeit
 - Methoden
 - Bewertung der Einzelkomponenten anhand einer Methode von OECD 301 oder
 - Wenn Einzelkomponenten bzw. deren Daten nicht verfügbar sind: Produktvergleich von vollformulierten Schmierstoffen nach OECD 301 D
 - Die Produkte sollen zumindest folgenden Kriterien entsprechen:
 - Einzelkomponenten: mindestens inhärent biologisch abbaubar nach dem Blauen Engel, d.h. in einem Test für leichte biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs werden mehr als 20 % des theoretischen Höchstwerts erreicht
 - Produktvergleich: in einem Test für leichte biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs werden mehr als 20 % des theoretischen Höchstwerts erreicht
- Aquatische Toxizität
 - Die Produkte sind mit allen 3 der folgenden Methoden zu untersuchen:
 - Algentest DIN EN ISO 8692
 - Daphnientest DIN EN ISO 6341
 - Fischeitest DIN EN ISO 15088
 - Hinweis: Als Vorbereitung für diese Tests wird eine *water accommodated fraction (WAF)* hergestellt, also nur der klare Überstand verwendet (siehe Kapitel 3.6.1). Die Testergebnisse lassen daher keine toxikologischen Aussagen über nicht lösliche Bestandteile von SKKM zu.
 - Die Produkte müssen zumindest folgenden Kriterien entsprechen:
 - Algentest: $EC_{50} \geq 1000 \text{ mg/L}$
 - Daphnientest: $EC_{50} \geq 1000 \text{ mg/L}$
 - Fischeitest: $LC_{50} \geq 1000 \text{ mg/L}$

- Metallanteile
 - Der blaue Engel erlaubt für SKKM keine Metalle außer Verbindungen, die Na, K, Mg, Ca als Metallatome enthalten. Metalle in elementarer Form (Partikel) sind im Allgemeinen weniger umweltschädlich als Metalle in gelöster Form bzw. Salzform⁸⁴ Daher wird als Beurteilungskriterium ein möglichst geringer Metallanteil empfohlen.

Die Reihung der SKKM auf Basis der biologischen Abbaubarkeit kann wie folgt vorgenommen werden (jenes SKKM mit der höchsten biologischen Abbaubarkeit zuerst):

SKKM E > SKKM B

Die Reihung der fünf SKKM auf Basis der Toxizitätsuntersuchungen (Algen-, Daphnien- und Fischeitest) kann wie folgt vorgenommen werden (jenes SKKM mit der geringsten Toxizität zuerst):

SKKM B < SKKM D < SKKM E < SKKM C < SKKM A

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Metallanteils sind aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen nicht Teil des Berichts.

⁸⁴ <https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10039>, zuletzt aufgerufen am 22.09.2022

6. EINFLUSS VON SKKM AUF DIE LEITFÄHIGKEIT VON ISOLIERSTÖßEN – STUFE 2

Isolierstöße befinden sich zwischen Schienen und sind Teil der Gleisfreimeldeanlage. SKKM dürfen keine elektrische Überbrückung herstellen, wenn Sie in Isolierstöße gelangen. Im Rahmen des Projekts „SafeRail“ hat AC2T research GmbH (AC²T) einen Testaufbau entwickelt, um die Isolierwirkung von SKKM bei verschiedenen Bedingungen bereits im Labor zu bewerten. Diese Ergebnisse wurden mit Feldversuchen (siehe Kapitel 9) verifiziert.

6.1. Testaufbau und Testparameter

Abbildung 20 zeigt den Testaufbau bestehend aus einem Glasbehältnis mit einem Hauptrohr und einem Nebenrohr, das von der Mitte des Hauptrohrs wegführt. Das Hauptrohr nimmt auf beiden Seiten Elektroden (Elektroden Durchmesser 11 mm) auf. Der Zwischenraum wird mit SKKM gefüllt, wobei das Nebenrohr eine ausreichende und blasenfreie Füllung ermöglicht. Der Abstand der Elektroden ist einstellbar. Im Neuzustand im Feld weist ein Isolierstoß einen Abstand von 4 mm auf. Im gealterten Zustand erfolgt ein Austausch, wenn der Abstand unter 1 mm gesunken ist. Im Projekt „SafeRail“ wurden Untersuchungen mit einem Abstand von 1, 4 und 10 mm durchgeführt. Das Glasbehältnis samt Elektroden und SKKM wurde in einem Klimaschrank gestellt, um Untersuchungen bei Temperaturen von -30 °C bis 60 °C durchzuführen.

Mittels des Sicherheitstesters (Economical Safety Tester GPT-9603 von Good Will Instrument Co., Ltd.) wird eine elektrische Spannung von 1.000 Volt für 60 Sekunden aufgebracht. Wenn innerhalb dieser Zeitspanne kein Durchschlag (Kurzschluss) festgestellt wurde (Stromstärke kleiner als 6 mA bei dem eingesetzten Sicherheitstester), wurde der angezeigte Widerstandswert dokumentiert.

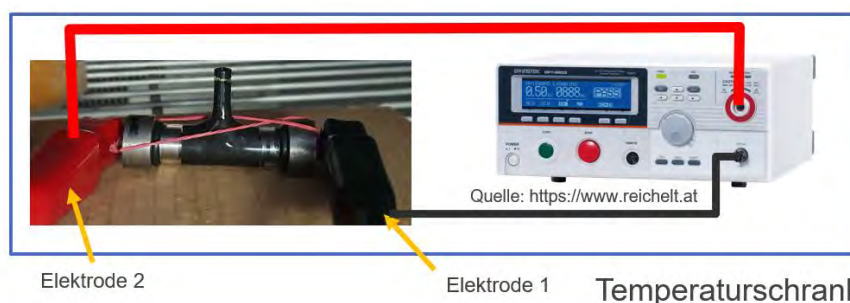


Abbildung 20: Testaufbau zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von SKKM bzw. Nichtüberbrückung von Isolierstößen

Es wurden die fünf ausgewählten SKKM bei folgenden Bedingungen untersucht:

- Elektrodenabstand: 1 mm, 4 mm und 10 mm
- Temperatur: -30 °C, -10 °C, 23 °C und 60 °C

Um die Veränderung der SKKM durch verschiedene Umwelteinflüsse darzustellen, wurden folgende Veränderungen untersucht:

- Einfluss von Regen durch Zugabe von Wasser
SKKM mit Wassergehalt von 10 % und 50 % (bei ausgewählten SKKM)
- Einfluss von Streusalz im Winter durch Zugabe einer Salzlösung
SKKM mit Anteil der Salzlösung von 2 % und 10 % (bei ausgewählten SKKM)
- Einfluss der Alterung von SKKM
SKKM im thermisch-oxidativ gealterten Zustand (162 Stunden bei 80 °C bzw. 120 °C)

Für den Einfluss von Streusalz im Winter wird bei Raumtemperatur eine gesättigte Salzlösung hergestellt. Die Salzlösung wird hierbei mit dem kleinen Fettkneter durch zumindest 60 Doppelhübe eingearbeitet⁸⁵. Für den Einfluss von Regen wird deionisiertes Wasser bei Raumtemperatur ebenfalls mit dem kleinen Fettkneter durch zumindest 60 Doppelhübe eingearbeitet.

6.2. Ergebnisse im Labor

Tabelle 10 fasst die Ergebnisse zur Variation der Temperatur und des Elektrodenabstands zusammen. SKKM A zeigt in den meisten Fällen bei einem Elektrodenabstand von 1 und 4 mm Durchschläge und ist somit das am schlechtesten abschneidende Produkt hinsichtlich Nichtüberbrückung der Isolierstöße. Die Produkte SKKM E und SKKM C führten zu keinen Durchschlägen (Kurzschlüssen) bei allen Temperaturen und Elektrodenabständen und zeigen somit das beste Verhalten hinsichtlich Nichtüberbrückung.

⁸⁵ DIN ISO 2137:2016-12 – Mineralölerzeugnisse und Schmierstoffe – Bestimmung der Konuspenetration von Schmierfetten und Petrolatum

SKKM	Abstand der Elektroden	Temperatur in °C			
		-30	-10	23	60
SKKM A	1mm	X	X	X	X
	4mm	2960MΩ	X	X	X
	10mm	>3GΩ	445MΩ	24MΩ	5MΩ
SKKM B	1mm	X	X	X	X
	4mm	>3GΩ	>3GΩ	2144MΩ	442MΩ
	10mm	>3GΩ	>3GΩ	>3GΩ	1124MΩ
SKKM C	1mm	>3GΩ	431MΩ	6MΩ	2MΩ
	4mm	>3GΩ	>3GΩ	734MΩ	64MΩ
	10mm	>3GΩ	>3GΩ	>3GΩ	172MΩ
SKKM D	1mm	X	X	X	X
	4mm	>3GΩ	>3GΩ	>3GΩ	1208MΩ
	10mm	>3GΩ	>3GΩ	>3GΩ	>3GΩ
SKKM E	1mm	1098MΩ	70MΩ	5MΩ	2MΩ
	4mm	>3GΩ	333MΩ	25MΩ	6MΩ
	10mm	>3GΩ	953MΩ	73MΩ	11MΩ

Legende:		X Kurzschluss, geringe Isolierwirkung
		Mittlere Isolierwirkung
		Hohe Isolierwirkung

Tabelle 10: Nichtüberbrückung von Isolierstößen durch SKKM im Testaufbau bei variierenden Temperaturen und Elektrodenabstand

Die qualitativen Einflüsse von Elektrodenabstand, Temperatur, Regen (Wasser-Kontamination), Streusalz (Salzwasser-Kontamination) und Alterung sind in Tabelle 11 dargestellt. Daraus kann entnommen werden, dass die Alterung von SKKM der einzige untersuchte Parameter ist, der zu einer Verbesserung der Isolierwirkung geführt hat. Folgende Einflussfaktoren führen zu einer Senkung der Isolierwirkung:

- Verringerung des Elektrodenabstands
- Erhöhung der Temperatur
- Wasserkontamination
- Salzwasserkontamination

Für eine Testprozedur für SKKM hinsichtlich Nichtüberbrückung von Isolierstößen werden folgende Testparameter empfohlen:

- Elektrodenabstand 1 mm
- Temperatur 60 °C
- Wasser-Kontamination von 10 % bei einem ggf. größeren Elektrodenabstand
- Salzwasser-Kontamination von 2 % bei einem ggf. größeren Elektrodenabstand

Neue Produkte verhalten sich ggf. anders als die im Rahmen dieses Projektes untersuchten SKKM. Daher wird empfohlen, die Nichtüberbrückung bei weiteren Parametern zumindest stichprobenartig zu untersuchen.

SKKM	Verringerung des Abstandes	Erhöhung der Temperatur	Wasser-Kontamination	Salzwasser-Kontamination	Alterung
Generell	↓	↓	↓	↓	↑
SKKM A	↓	↓	↓	↓	↑
SKKM B	↓	↓	→	→	↑
SKKM C	↓	↓	↓	↓	↑
SKKM D	↓	↓	↓	↓	↑
SKKM E	↓	↓	↓	→	↑

Legende:

Erhöhung der Isolierwirkung
 Etwa gleiche Isolierwirkung
 Senkung der Isolierwirkung

Tabelle 11: Einflussfaktoren auf die Nichtüberbrückung (Isolierwirkung) von SKKM auf Isolierstößen

Die Reihung der SKKM ist in Tabelle 12 zusammengefasst, wobei „1“ für die beste Isolierwirkung und „5“ für die schlechteste Isolierwirkung bei den jeweiligen Testbedingungen steht. Die finale Reihung wurde aus dem Mittelwert der einzelnen Positionen bestimmt. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren eine geänderte Reihung ergeben kann.

SKKM	Frisch	Wasser-Kontamination	Salzwasser-Kontamination	Alterung	Gesamt
A	5	5	5	5	5
B	3	1	1	3	2
C	1	3	3	1	2
D	3	4	4	4	4
E	1	2	2	2	2

Tabelle 12: Reihung der SKKM nach der Nichtüberbrückung (Isolierwirkung), „Frisch“ umfasst die Variation von Temperatur und Abstand

Auf Basis der Laborergebnisse ergibt sich folgende Reihung der SKKM (beginnend mit dem SKKM mit der besten Isolierwirkung bei den untersuchten Bedingungen):

$$\text{SKKM B} \sim \text{SKKM C} \sim \text{SKKM E} < \text{SKKM D} < \text{SKKM A}$$

6.3. Ergebnisse am realen Isolierstoß und im Feld

Die fünf SKKM wurden bei Raumtemperatur im Frischzustand sowie gemischt mit 10 % Wasser bzw. Salzwasser auf einen realen, neuen Isolierstoß aufgetragen. Auch hier wurde der elektrische Widerstand gemessen. Für die Korrelation wurden jene Messergebnisse herangezogen, welche innerhalb des Messbereichs (Widerstand < 3 GΩ) des Geräts waren. Die in Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse (innerhalb des Messbereichs) zeigen eine sehr gute Korrelation zwischen Labor und realem Isolierstoß, wobei die Labormethode um den Faktor 3 empfindlicher, sodass Einflüsse auf die Isolierwirkung im Labor deutlicher herausgearbeitet werden können.

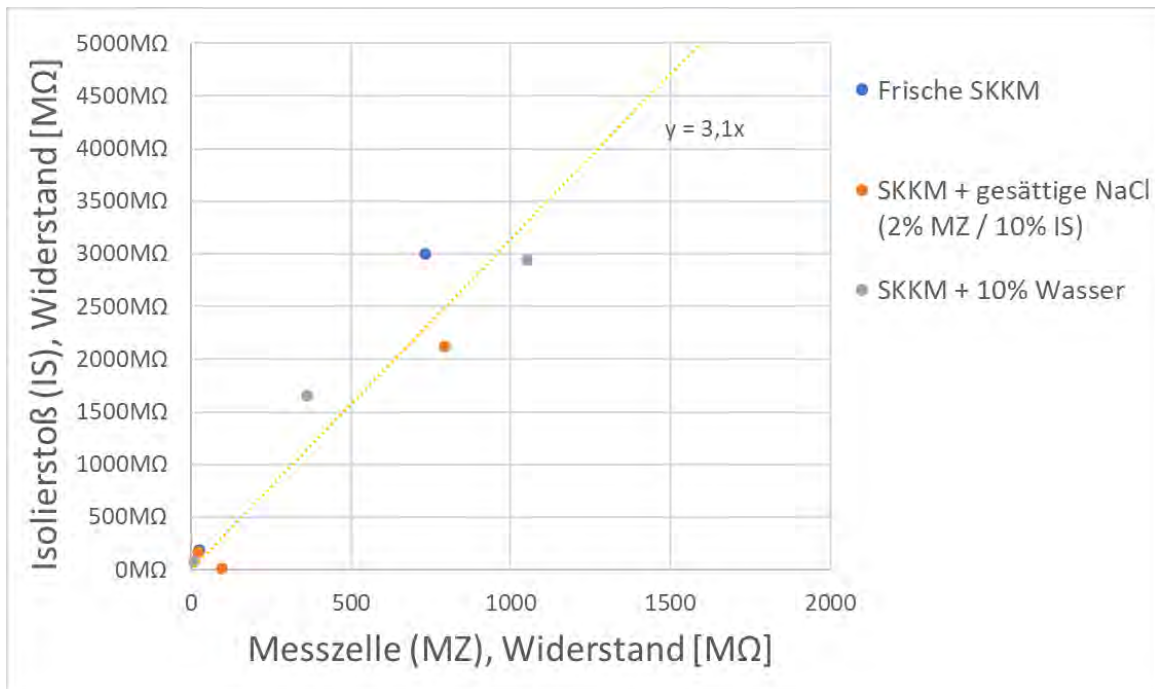


Abbildung 21: Korrelation der Labormessungen mit Messungen am realen Isolierstoß mit den fünf SKKM mit Widerstandswerten innerhalb des Messbereichs von < 3 GΩ

Im Zuge der Feldversuche wurden Messungen im Winter (Temperatur im Bereich um 7 °C) und im Sommer (Temperatur zwischen 24 und 33 °C) an einem gebrauchten Isolierstoß in eingebautem Zustand durchgeführt, wobei hier untersucht wurde, ob es zu einer Rotauslichtung (Gleisfreimeldeanlage erkennt einen Zug im überwachten Abschnitt) kommt. Die Versuche wurden mit den SKKM im Frischzustand durchgeführt. Eine Rotauslichtung wurde bei keinem SKKM festgestellt. Um die Realitätsnähe anzuheben, könnte das Spannungsniveau (derzeit 1.000 Volt) an das Niveau der realen Messsysteme (1 - 4 Volt⁸⁶) zur Gleisfreischaltung angepasst werden, wobei ggf. ein Verlust der Empfindlichkeit in Kauf genommen werden müsste.

6.4. Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Verhaltens von SKKM hinsichtlich Nichtüberbrückung von Isolierstößen wurde im Rahmen des Projekts eine Labormethode entwickelt. Diese erlaubte eine gute Differenzierbarkeit der fünf SKKM sowie die Untersuchung der Einflussfaktoren Elektrodenabstand, Temperatur, Kontamination durch Wasser und Salzwasser sowie Alterung der SKKM.

⁸⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleisfreimeldeanlage>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.

Auf Basis der Laborergebnisse im Frischzustand (Tabelle 10) ergibt sich folgende Reihung der SKKM (beginnend mit dem SKKM mit der besten Isolierwirkung bei den untersuchten Bedingungen):

SKKM C ~ SKKM E < SKKM B ~ SKKM D < SKKM A

Des Weiteren besteht eine gute Korrelation zwischen den Untersuchungen der Isolierwirkung von SKKM im Labor und auf einem realen Isolierstoß, wobei die Labormethode wesentlich sensibler ist als die Messung im Feld. Die Labormethode eignet sich für den Einsatz im mehrstufigen Beurteilungsverfahren zur kostengünstigen Selektion von SKKM-Kandidaten. Um die Realitätsnähe anzuheben, könnte das Spannungsniveau (derzeit 1.000 Volt) an das Niveau der realen Messsysteme (1 - 4 Volt⁸⁶) zur Gleisfreischaltung angepasst werden, wobei ggf. ein Verlust der Empfindlichkeit in Kauf genommen werden müsste.

Für eine Testprozedur für SKKM hinsichtlich Nichtüberbrückung werden folgende Testparameter empfohlen:

- Generelles Verhalten: 60 °C, 1 mm Elektrodenabstand, SKKM im Anlieferungszustand
- Einfluss von Streusalz im Winter: Raumtemperatur, 4 mm Elektrodenabstand, 2 Masse% Salzwasser in SKKM
- Einfluss von Regen: Raumtemperatur, 4 mm Elektrodenabstand, 10 Masse% Wasser in SKKM

7. EINFLUSS VON SKKM AUF DEN REIBUNGSKOEFFIZIENTENVERLAUF IM LABOR – STUFE 3

Teile in diesem Kapitel wurden den Masterarbeiten von Stefan Zechner und Philipp Andreas Stadlmair entnommen.

7.1. Prüfkette

Ein wesentlicher Teil des Projektes „SafeRail“ betrifft die Ermittlung des Einflusses der SKKM auf den Reibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Bedingungen im und um den Rad-Schiene-Kontakt. Zur Bewertung von Schienenkopfconditioniermittel hinsichtlich Reibungskoeffizienten soll eine wohl definierte, reproduzierbare, und kostengünstige Methode im Sinne einer ökonomischen Betrachtungsweise entwickelt werden. Auf diese Weise soll der Umfang von Feldversuchen durch Laborversuche deutlich reduziert und im besten Fall Feldversuche vollständig durch Laborversuche ersetzt werden. Neben einer Selektion soll auch ein Ranking der SKKM ermöglicht werden.

Nach erfolgreichem Bestehen der ersten beiden Methoden bzw. Stufen (Umweltverträglichkeit und Nichtüberbrückung von Isolierstößen in Kapitel 5 und 6) stellt die Untersuchung des Reibungskoeffizienten von SKKM im Labor die dritte Methode bzw. Stufe 3 des im Kapitel 4 skizzierten mehrstufigen Beurteilungsverfahrens dar. Hierfür wurde die sogenannte Prüfkette mit dem Ziel eingesetzt, eine möglichst gute Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Labor auf das Feld herzustellen. Eine Prüfkette muss realitätsnah und individualisiert für die jeweils geplanten Untersuchungen erstellt und durch geeignete Korrelationsüberprüfungen abgesichert werden³. Die in diesem Projekt herangezogenen Versuchskategorien vom Labor bis zum Feldversuch sind in Abbildung 22 dargestellt. Im Projekt „SafeRail“ wurden zwei Entwicklungsschleifen – eine experimentelle und eine zur Übertragbarkeit erforderliche simulative Schleife – entwickelt. Zwecks Übertragbarkeit der experimentellen und simulativen Ergebnisse wurden Feldversuche durchgeführt.

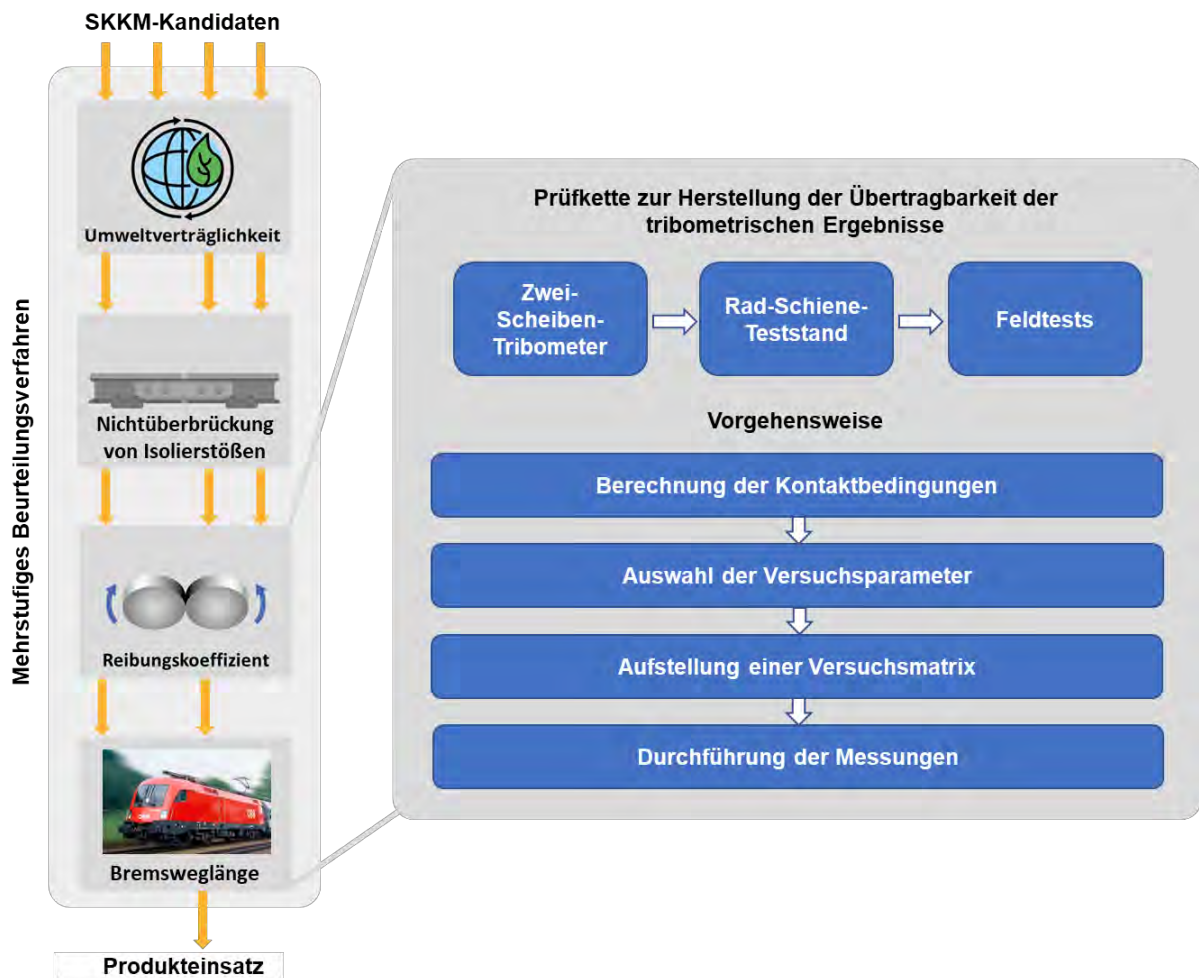


Abbildung 22: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren zur Beurteilung von SKKM mit Einbindung der Prüfkette für den Reibungskoeffizienten ⁸⁷

Die Größe und der Umfang der tribologischen Messtechniken werden in die Kategorien I bis VI ³ unterteilt, siehe Abbildung 23. In den Kategorien I bis III bleibt die Systemstruktur des originalen tribologischen Aggregates erhalten, und nur das betreffende Beanspruchungskollektiv wird vereinfacht. In den Kategorien IV bis VI wird auch die Systemstruktur des Testsystems zunehmend vereinfacht. Die Übertragbarkeit der Testergebnisse reduziert sich daher auf vergleichbare praktische tribotechnische Systeme. Als Vorteile der Kategorien IV bis VI können der messtechnisch immer leichter zugängliche Tribokontakt, die geringeren Testkosten und die kürzeren Testzeiten genannt werden ³. Abbildung 23 zeigt eine auf das System „Rad-Schiene“ angepasste Zuordnung der Kategorien mit den wesentlichen Merkmalen der jeweiligen Kategorien. Eine erste Beurteilung von SKKM

⁸⁷ Bildquellen: AC²T und ÖBB

mithilfe einer Prüfmethode aus Kategorie V bzw. VI ist aus Kostengründen erstrebenswert. Für eine gute Übertragbarkeit der Messergebnisse wurde in „SafeRail“ eine Prüfkette aus drei Gliedern definiert, wobei die Kategorien V und III auf Untersuchungen zum Reibungskoeffizienten auf einem Tribometer und Teststand beruhen und Kategorie I auf solchen im Feld.

	Kategorie	Mess- und Prüftechnik	System, Baugruppe, Modell	Merkmale
Feldversuch	I	Betriebsversuch und betriebsähnliche Versuche	Maschinentechnische Messgruppe	<ul style="list-style-type: none"> • Teuer (Teststand, Prüfmittel) • Sehr realitätsnah • Geringere dynamische Effekte
	II	Betriebsversuch und betriebsähnliche Versuche	Full-Scale-Teststand RTRI Tokio	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr aufwendig (Organisation) • Sehr teuer (Prüfmittel) • Reale Betriebsbedingungen
Rad-Schiene-Teststand	III	Originalsystemstruktur mit vereinfachter Beanspruchung	Full-Scale-Teststand TU Wien	<ul style="list-style-type: none"> • Teuer (Teststand, Prüfmittel) • Werkstoff und Geometrie realitätsnah • Dynamische Effekte werden nicht abgebildet
	IV	Originalsystemstruktur mit vereinfachter Beanspruchung	Proben-, Bauteil-, Modellteststand AC ² T	<ul style="list-style-type: none"> • Günstiger (Teststand, Prüfmittel) • Werkstoff & Oberflächentopographie realitätsnah • Kleine ähnliche Kontaktflächen
Zwei-Scheiben-Tribometer	V	Modellstruktur und einfache Beanspruchung	Zwei-Scheiben-Tribometer AC ² T	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig (Teststand, Prüfmittel) • Werkstoff realitätsnah (kein Produktionsgefüge) • Kleine Kontaktflächen
	VI	Modellstruktur und einfache Beanspruchung	Stift-Scheibe-Teststand	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr günstig (Teststand, Prüfmittel) • Werkstoff realitätsnah (chemisch) • Andere Kontaktflächen

Abbildung 23: Zuordnung der tribologischen Messtechnik auf das System „Rad-Schiene“⁸⁸

Für die Auswahl geeigneter Teststände wurden die realen Gegebenheiten und Einflussfaktoren auf das Tribosystem „Rad-Schiene“ analysiert und in Tabelle 13 übersichtlich dargestellt.

⁸⁸ Bildquellen AC²T, ÖBB, RTRI Tokio, TU Wien

Bezeichnung	Einheit	Wert
Radlast	kN	70 - 150
Geometrie Rad	-	z.B. S 1002
Geometrie Schiene	-	z.B. UIC 60 E1
Durchmesser Schiene	mm	gerade
Durchmesser Rad	mm	Ø 950 - 1150
Kontaktform	-	elliptisch
Reibungskoeffizient trocken	-	> 0,4
Mögliche Oberflächentemperaturen der Schiene (Winter)	°C	bis -20
Mögliche Oberflächentemperaturen der Schiene (Sommer)	°C	bis +70
Werkstoff Schiene	-	R220, R260, R350HT, R400HT
Werkstoff Rad	-	ER7, ER8, ER9
Oberflächenbeschaffenheit Rad	µm	≤ 6,3
Oberflächenbeschaffenheit Schiene	µm	2-10
Härte Schiene	HBW	200 - 390
Härte Rad	HBW	Min. 225 - 255
Witterungs- und Betriebsbedingungen	-	trocken, nass, Laub, Sand, Staub, Schmierstoffe und -mittel, Verschmutzungen
SKKM-Aufbringung an stationären Anlagen	-	an 8 Punkten ca. 0,2 ml, abhängig von Anlagenhersteller und situationsangepasst

Tabelle 13: Reale Gegebenheiten und Einflussfaktoren auf das Tribosystem „Rad-Schiene“

7.1.1. Auswahl der Teststände für die Prüfkette

Zu Beginn der Prüfkette sollten kostengünstige und schnell durchführbare Modellversuche gewählt werden. Dazu gehören solche am Zweischeiben-Tribometer mit realitätsnahen Werkstoffen. So können erste Aussagen über auftretende Reibungskoeffizienten getroffen werden.

Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen auf Tribosysteme im Allgemeinen ist bei tribologischen Untersuchungen eine sorgfältige Planung und Auswertung erforderlich. Dadurch soll der Zusammenhang der Einflussgrößen mit dem Reibungskoeffizienten bzw. dessen Verlauf hergestellt werden. Im ersten Schritt wurde die Art bzw. Produkt des SKKM definiert. Im zweiten Schritt wurde die Menge an SKKM variiert. Alle anderen Parameter und

Bedingungen wurden zunächst konstant gehalten (konstanter Schlupf und Belastung sowie möglichst gleiche Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit).

In weiterführenden Versuchsserien wurde der Einfluss anderer unabhängiger Variablen untersucht, insbesondere von Hitze, Kälte und Nässe in Kombination mit SKKM. Die Temperatursteuerung und die Zugabe von Wasser lassen sich bei Modellversuchen im Labor am einfachsten realisieren. In Anlehnung an die maximal auftretenden Temperaturen im Feld, siehe Tabelle 13, sollte die tiefste Temperatur bei -20 °C und die höchste Temperatur bei $+70\text{ °C}$ im Labor abgebildet werden. Die Entwicklung und Durchführung von geeigneten Heiz- und Kühlmethoden waren dafür notwendig.

Die Auswahl des Tribometers und Teststands basierte auf der benötigten Versuchszahl und den ermittelten Informationen aus dem Feld, siehe Tabelle 13. Dieser Abgleich zwischen Labor und Feld zeigte, dass ein Zweiseiben-Tribometer entsprechend der Kategorie V alle genannten Punkte nahezu erfüllt und sich als erstes Glied der Prüfkette eignete.

Aufgrund von Einschränkungen hinsichtlich Kontaktfläche und erzielbarer Flächenpressung waren Abweichungen von den realen Verhältnissen zu erwarten. Um die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf das Feld zu verbessern, folgte als nächster Schritt eine Untersuchung des Reibungskoeffizienten mit SKKM am Rad-Schiene-Teststand (Full-Scale-Teststand) der TU Wien, welcher der Kategorie III zuordenbar ist. Der Teststand baut auf einer realitätsnahen Systemstruktur und Belastung auf. Die Messergebnisse sollen Korrelationen beim Einsatz von SKKM zwischen Zweiseiben-Tribometern und dem Rad-Schiene-Teststand aufzeigen. Weiters wurden wichtige Erkenntnisse bezüglich der Verdrängung des SKKM im Kontakt und des Einflusses von Wasser auf den Reibungskoeffizienten mit dem Rad-Schiene-Teststand erwartet.

Die Versuche am Rad-Schiene-Teststand sind im Vergleich zum Zweiseiben-Tribometer komplexer, benötigen erhebliche Vorbereitungs- und Nachbearbeitungszeit je Versuch. Die Kosten sind aufgrund der höheren Entwicklungs-, Herstell- und Betriebskosten deutlich höher. Für alle Versuche am Zweiseiben-Tribometer wurden dieselben Schlupfverhältnisse und eine konstante Radlast definiert, um die Vergleichbarkeit der Tendenzen der Ergebnisse zwischen Zweiseiben-Tests und Full-Scale-Tests herzustellen. Die Versuche sollten bei einer möglichst konstanten Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden.

Bei realen Betriebsbedingungen fließen viele Einflussfaktoren auf den Rad-Schiene-Kontakt ein, welche von Tribometern und Testständen nicht vollständig nachgebildet werden können. Erst ein Feldversuch kann die tatsächlichen Effekte der untersuchenden SKKM zeigen. Zur Validierung der Laborversuche wurden daher im mehrstufigen Beurteilungsprozess

Feldversuche angeführt, die hinsichtlich der Übertragbarkeit zur Prüfkette hinzugefügt wurden, siehe Abbildung 24. Die Feldversuche wurden in Zusammenarbeit von AC²T mit ÖBB realisiert. Solche Untersuchungen des Realsystems sind in der Kategorie I eingeordnet. Die Feldversuche sind dabei ein wichtiges Standbein des gesamten Projekts und ermöglichen die Entwicklung eines Modells, welches zur Abschätzung des Reibungskoeffizienten im Feld auf Basis von Tribometer- und/oder Teststandergebnissen herangezogen wird. Auf diese Weise wird eine einheitliche relative Reihung der SKKM bezogen auf den Reibungskoeffizienten erhalten.

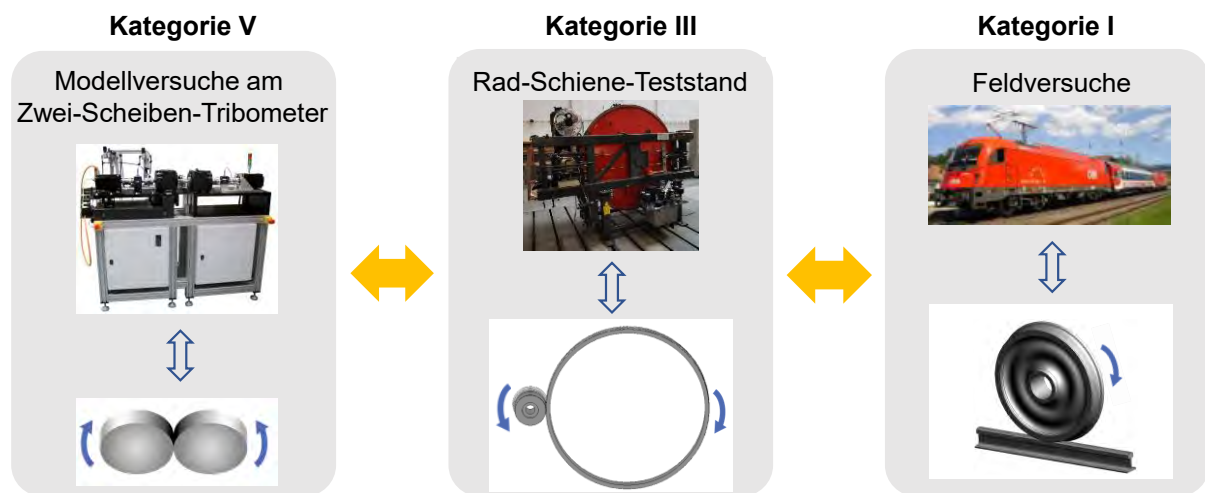


Abbildung 24: Vollständige Prüfkette im Projekt „SafeRail“. Modellversuche am Zweiseiben-Tribometer bei AC²T (links) ⁸⁷; Rad-Schiene-Teststand der TU Wien (Mitte) ⁸⁹, Feldversuche im ÖBB-Schienenetz (rechts) ⁸⁷

⁸⁹ Bildquellen: AC²T, ÖBB, TU Wien

7.1.2. Vergleich von Realsystem mit Modellversuchen

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Unterschiede von Modellversuchen mit Zweischeiben-Tribometern den Feldversuchen gegenübergestellt ²⁸:

- An Zweischeiben-Tribometern berührt ein Rad immer wieder den gleichen Abschnitt der Schiene, beide als Scheiben ausgeführt. Stattdessen fährt im Feld ein Rad auf einem langen Abschnitt einer Schiene. Dies hat Auswirkungen auf die Oberflächenbeschaffenheit und -geometrie sowie auf die Temperatur des Kontakts.
- An Testständen wirken immer die gleichen bzw. keine Lenkkräfte, während sich die Lenkkräfte in der Praxis ständig ändern, da ein Radsatz in der Kurve selbst lenkt.
- Durch zyklische Wiederbeanspruchung und mangelnde Wärmeabfuhr können höhere Temperaturen bei Modellversuchen, insbesondere bei Zweischeiben-Tribometern, entstehen.
- Die Pressung verbleibt bei Testständen in einem definierten Bereich. In der Praxis jedoch laufen verschieden profilierte Räder in verschiedenen Abnutzungszuständen und unterschiedlichen Radlasten auf der Schiene, die ebenfalls unterschiedliche Profile und Abnutzungszustände aufweisen kann. Dadurch sind mit Schwankungen der Pressung im realen Rad-Schiene-Kontakt zu rechnen.
- Die vom Traktionssystem eines Zuges bereitgestellten Längskräfte variieren (Beschleunigen/Bremsen). Dies führt zu Veränderungen bei der Entstehung von Verschleiß und anderen Schäden. Bei Laborversuchen werden die Längskräfte über das Schlupfniveau gesteuert und für die Dauer des Versuchs typischerweise konstant gehalten.
- Die Umgebung wird im Labor im Vergleich zu normalen Streckenbedingungen, die zeitlich und örtlich stark variieren können, typischerweise konstant gehalten.
- Der Einfluss von Nässe und Temperatur in Kombination mit dem SKKM auf den Reibungskoeffizienten wird hinsichtlich Sicherheit als relevanter eingeschätzt als die Verschmutzung von Rad und Schiene, z.B. durch Blätter oder Brems sand. Daher wurden Letztere nicht in den geplanten Labortests simuliert.
- Die verwendeten Werkstoffe sollen möglichst der Realität entsprechen, um den Werkstoffeinfluss auf das Messergebnis zu minimieren. Dafür wurden die Proben der Zweischeiben-Tribometer aufwändig aus Schienen und Räder hergestellt, siehe Kapitel 7.3.

Um einen guten Vergleich bei allen Tribometern erzielen zu können, war eine geeignete Auswahl der einzelnen Testparameter wichtig, besonders die aufgebrachte Radlast. Die optimale Kraft und Probengeometrie wurden durch die analytischen Berechnungen festgelegt, siehe Kapitel 7.2.

7.2. Analytische Berechnung und Finite Elemente Analyse der auftretenden Kontaktbedingungen

Das Ziel war, die richtige Kombination aus Last und Probengeometrie für die jeweils eingesetzte Labormethode zu ermitteln, um einen Vergleich mit realen Verhältnissen herstellen zu können.

Bei der Gegenüberstellung der auftretenden Belastungen wurde ausschließlich der Rad-Schiene-Normalkontakt betrachtet. Anhand der ermittelten Systemdaten war das primäre Ziel, eine Flächenpressung von ca. 1,2 GPa zu erhalten. Aufgrund erhöhter Verschleißerscheinungen wurde die Flächenpressung etwas reduziert. Die Randbedingungen (Lagerung, Geometrie einschränkungen und Kraftaufbringungsart) waren aufgrund der Versuchsaufbauten als nicht veränderbar anzusehen. Als Steuerungsgröße der Flächenpressung folgte daraus die einzuleitende Kraft und die Kontaktgeometrie.

Für die Beurteilung von SKKM sind die Kontaktgeometrie und -größe als auch die Oberflächenspannungen unerlässlich. Die Tiefenspannungen wurden vernachlässigt.

Die Kontaktflächen und auftretenden Spannungen wurden analytisch nach *Hertz*¹⁰, *Johnson*¹² und *Deeg*¹³ und mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) für Zweiseiben-Tribometer, Rad-Schiene-Teststand und Feld berechnet (siehe Kapitel 3.3).

Für eine genaue Berechnung der Flächenpressung und der Analyse der Kontaktgeometrie wurden FE-Simulationen mit dem Programm ANSYS durchgeführt. Um mögliche Fehler im Aufbau der FE-Simulationen auszuschließen, wurden die erhaltenen Ergebnisse mit den analytischen Berechnungen verglichen.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren und Doppelkontakte zu vermeiden, wurde ein symmetrischer Kontakt definiert. Da sowohl die Last als auch die Geometrie symmetrisch ist, wurde bei allen Simulationen ein Halbmodell angewandt. Infolgedessen wurden an den Symmetrieebenen reibungsfreie Lagerungen als Randbedingungen definiert. Zwischen den Kontaktflächen wurde ein reibungsbehafteter Kontakt mit einem Haftreibungskoeffizienten von 0,3 gewählt.

Als Lösungslogarithmus wurde das Augmented-Lagrange-Verfahren verwendet, um bessere Chancen auf Konvergenz als beim reinen Penalty-Verfahren zu erhalten. Die Augmented-Lagrange-Methode wird im Vergleich zu Pure Penalty um einen Lagrange-Multiplikator erweitert, wodurch dieser Ansatz eine geringere Anfälligkeit auf etwaige falsch gesetzte Kontaktsteifigkeiten aufweist. Außerdem nutzt das Augmented-Lagrange-Verfahren ein erweitertes Durchdringungsverfahren, eine weitere Prüfung der Durchdringung und resultiert

daher in eine höhere Genauigkeit⁹⁰. Die finale Kontaktnormalkraft wird als Randbedingung auf den jeweiligen Körper aufgebracht.

Die Modelle wurden in drei Teilvolumina mit steigender Netzdichte von grob bis fein zerlegt (siehe Abbildung 25). Damit wurde die Anzahl der Knoten und die damit verbundene Rechenzeit geringgehalten. Die Elementgröße im Kontakt variiert je nach Modell von 0,03 mm bis 0,09 mm.

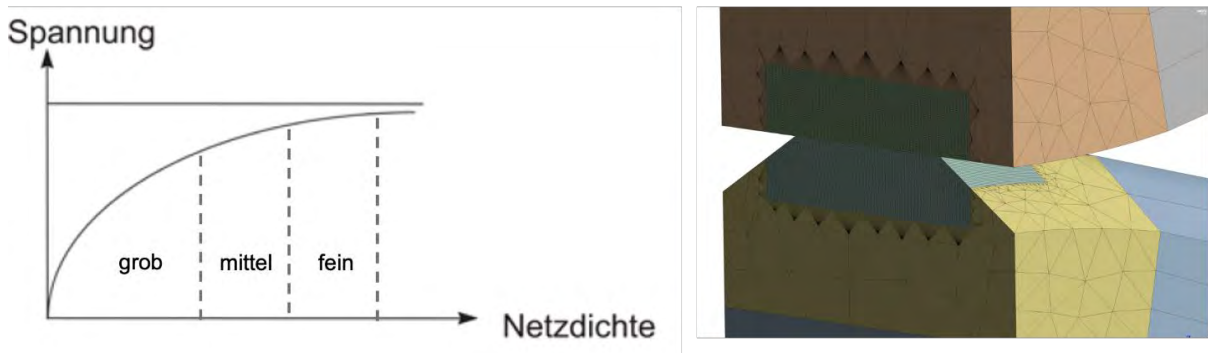


Abbildung 25: Konvergenzverhalten⁹⁰ (links, angepasst) und Vernetzungsbeispiel am ZST (rechts)

7.2.1. Zweiseiben-Tribometer

Die Modellversuche wurden am Hochlast-Zweiseiben-Tribometer (Zweiseiben-Tribometer, ZST bzw. HL-ZST) durchgeführt. Der Hochlast-ZST kann Lasten bis 15 kN aufbringen. Als Belastung wurde eine Radlast von $F_R = 1890\text{ N}$ verwendet. Die Kraft wurde sukzessiv nach mehreren experimentellen Testläufen eruiert und ermöglichte nahezu konstante Oberflächenbedingungen über mehrere Versuche hinweg. Die Angaben zu den Kontaktkörpern sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Abbildung 26 zeigt die Geometrie der Probekörper mit den wichtigsten Abmessungen. Dabei ist zu erkennen, dass zwei achsparallele zylindrische Laufflächen in Kontakt treten und sich linienförmig berühren.

⁹⁰ ANSYS Mechanical User's Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2013.

Bezeichnung	Einheit	Rad	Schiene
Werkstoff	-	ER9	R260
E-Modul	N/mm ²	210000	210000
Querkontraktionszahl	-	0,3	0,3
Scheibenradius	mm	65	32
Scheibenprofilradius	mm	∞	∞
Radlast	N		1890

Tabelle 14: Hochlast-ZST: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung

Die Berechnung wurde mit den Gleichungen aus Kapitel 3.3 für den Linienkontakt durchgeführt.

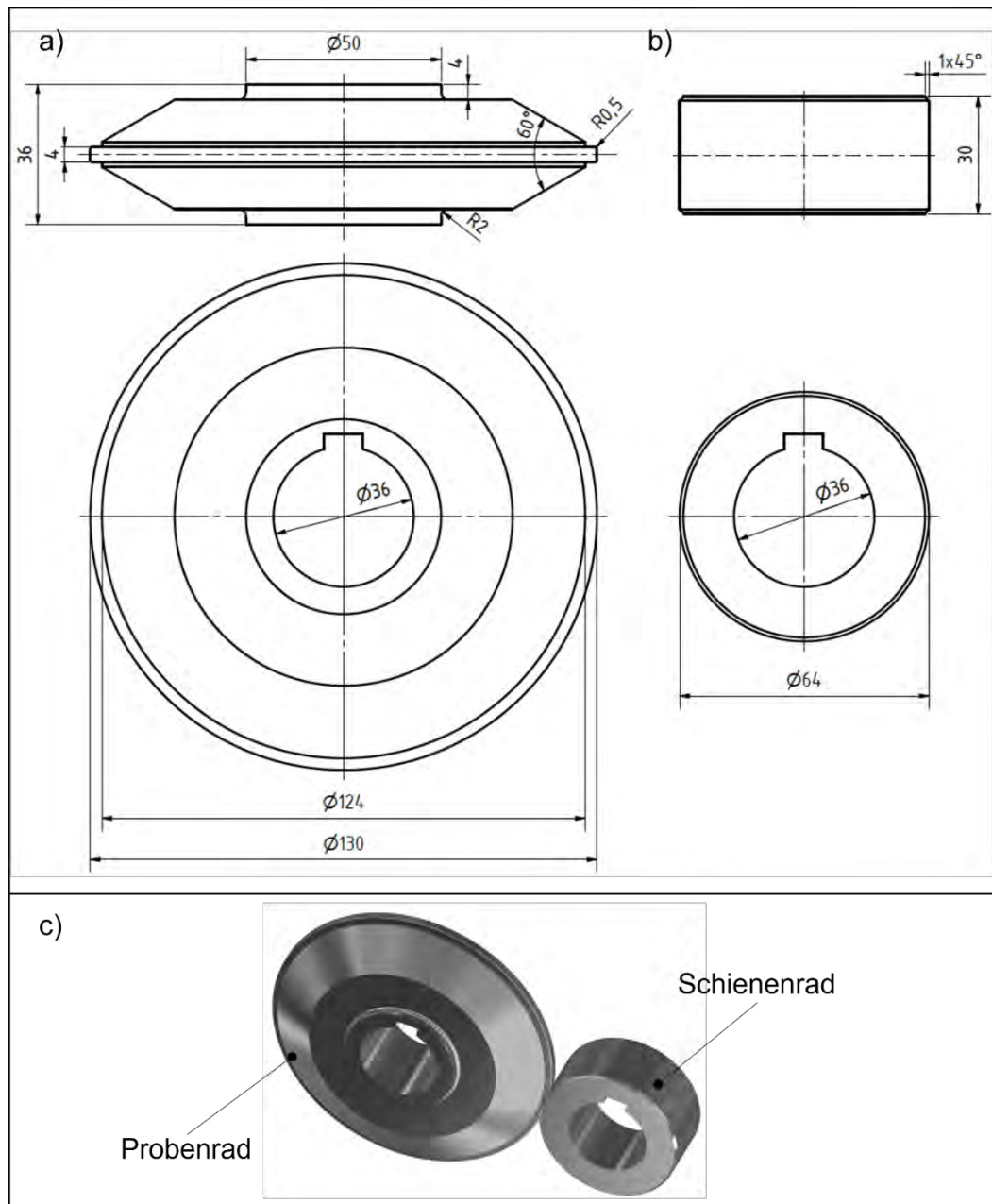
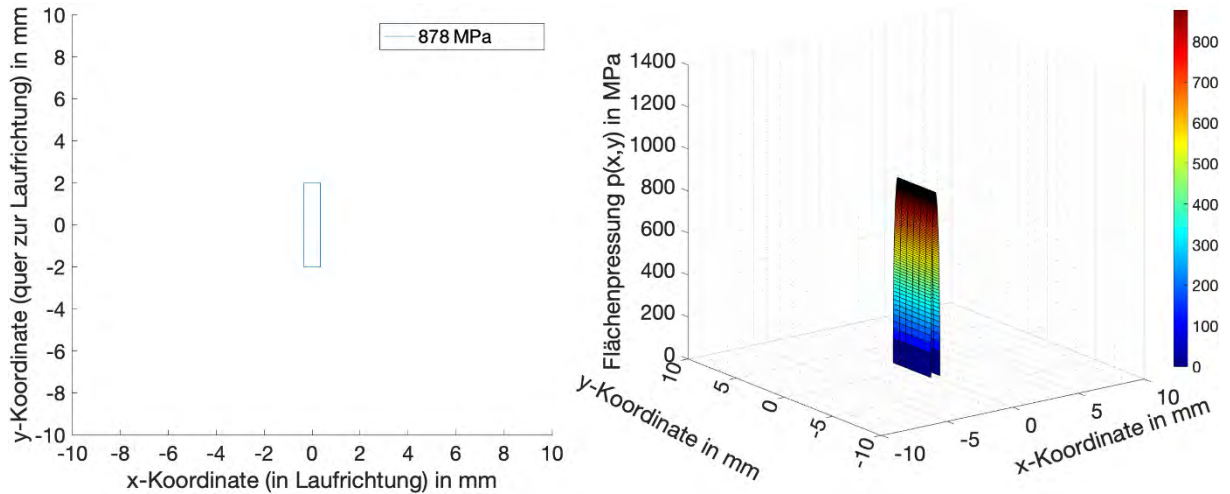


Abbildung 26: Probengeometrie im Hochlast-ZST
(a) Probenrad; (b) Schienenrad); (c) 3D-Modell

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Radlast von $F_R = 1890 \text{ N}$ eine rechteckige Kontaktfläche mit einer Länge von $2a = 4 \text{ mm}$ und einer Breite von $l = 0,69 \text{ mm}$ entsteht (siehe Abbildung 27), wobei die Länge der Kontaktfläche genau der Kontaktbandbreite entspricht. Daraus resultiert eine Kontaktfläche von $A_{\text{Hertz}} = 2,74 \text{ mm}^2$. In der Abbildung 27 ist ebenfalls der Verlauf der Flächenpressung über die Kontaktbandbreite dargestellt. Die maximale Flächenpressung beträgt ($x = 0$) $p_{\text{max.Hertz}} = 878 \text{ N/mm}^2$. Die genaue Verteilung der

Flächenpressung konnte nicht ermittelt werden, da bei der Näherungsberechnung der auftretende Kanteneffekt nicht berücksichtigt wird. An den beiden Enden des Kontaktbandes wird daher eine größere Abweichung zum Simulationsmodell erwartet.



**Abbildung 27: Hochlast-ZST: Analytisch – Kontaktfläche (links);
Flächenpressung (rechts)**

Abbildung 28 zeigt die Verläufe der Hauptspannungen $\sigma_{xx}(x)$ und $\sigma_{zz}(x)$ an der Oberfläche ($x = 0$). Aufgrund der Annahme, dass das elastische Verhalten beider Kontaktkörper ident ist, gelten die dargestellten Spannungsverläufe für beide Körper gleichermaßen.

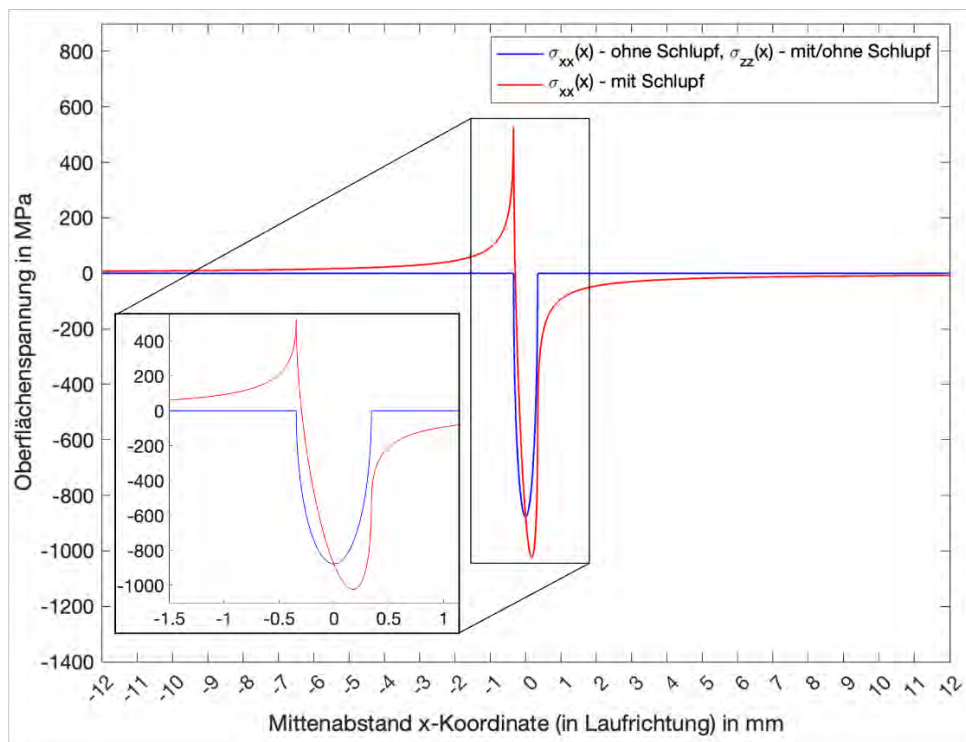


Abbildung 28: Hochlast-ZST: Analytisch – Oberflächenspannungen

Die Oberflächenspannung ohne Schlupf entspricht der negativen Hertzschen Flächenpressung und wird Null beim Verlassen des Kontaktbandes. Bei der Berücksichtigung von Schlupf und einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,3$ erhöht sich $\sigma_{xx}(x)$, und am Kontaktende kommt es zu einer Zugspannung. Die Zugspannung beträgt $\sigma_{xx} = 527 \text{ N/mm}$. Das entspricht etwa 60 % von dem Betrag der Druckspannung ($\sigma_{zz}(x)$) in der Mitte des Kontaktbandes. Der Betrag der Zugspannungsspitze ist linear vom Reibungskoeffizienten abhängig. Die höchste Druckspannung σ_{xx} , liegt aufgrund des Schlupfes etwas außerhalb der Mitte und ist mit $\sigma_{xx} = -1024 \text{ N/mm}^2$ höher als ohne Schlupf.

Die im Anschluss durchgeführte FE-Simulation zeigt im Gegensatz zur analytischen Berechnung den Einfluss des Kanteneffekts: An der Kante des Probenrads treten lokal eng begrenzt hohe Kontaktkräfte und Spannungen auf, die wesentlich höher als die Flächenpressungen in der Mitte sind. Für die Simulation wurden auch hier die Passfedernuten beider Scheiben entfernt, da sie die Ergebnisse im Kontaktbereich nicht beeinflussen. Abbildung 29 zeigt, dass bei der Radlast $F_R = 1890 \text{ N}$ in der Mitte des Kontaktbandes ($x = 0$, $y = 0$) eine Flächenpressung von $p_{max,FE} = 849 \text{ N/mm}^2$ entsteht. Die Berührgeometrie deckt sich sehr gut mit den rechnerisch ermittelten Werten und weist ein Rechteck mit der Länge $2a = 4 \text{ mm}$ und der Breite $l = 0,69 \text{ mm}$ auf. Das entspricht einer Fläche von $A_{FE} = 2,72 \text{ mm}^2$.

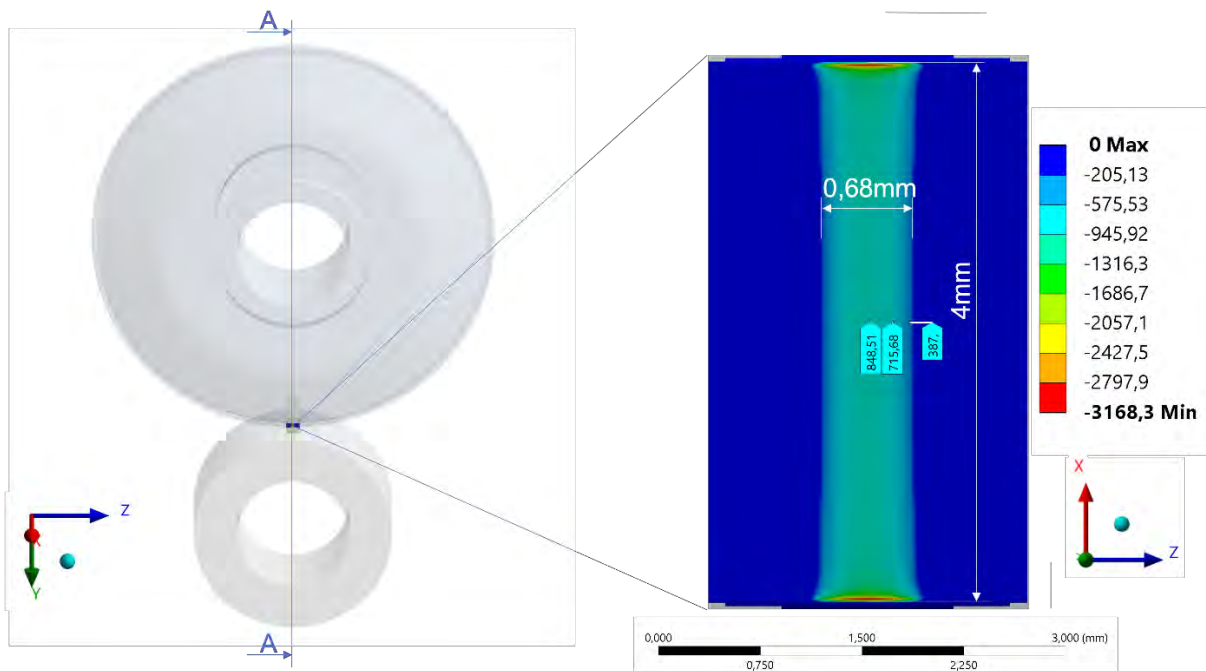


Abbildung 29: Hochlast-ZST: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche

Im Schnitt A-A durch die Symmetrieachse wurde die maximale von Mises-Vergleichsspannung ausgewertet, siehe Abbildung 30. Auch hier ist der Einfluss des Kanteneffekts deutlich zu sehen. Die maximale Spannung befindet sich am Anfang der Rundung knapp unter der Oberfläche. Bei $x = 0$ beträgt die maximale Vergleichsspannung etwa 500 N/mm^2 .

Schnitt A-A

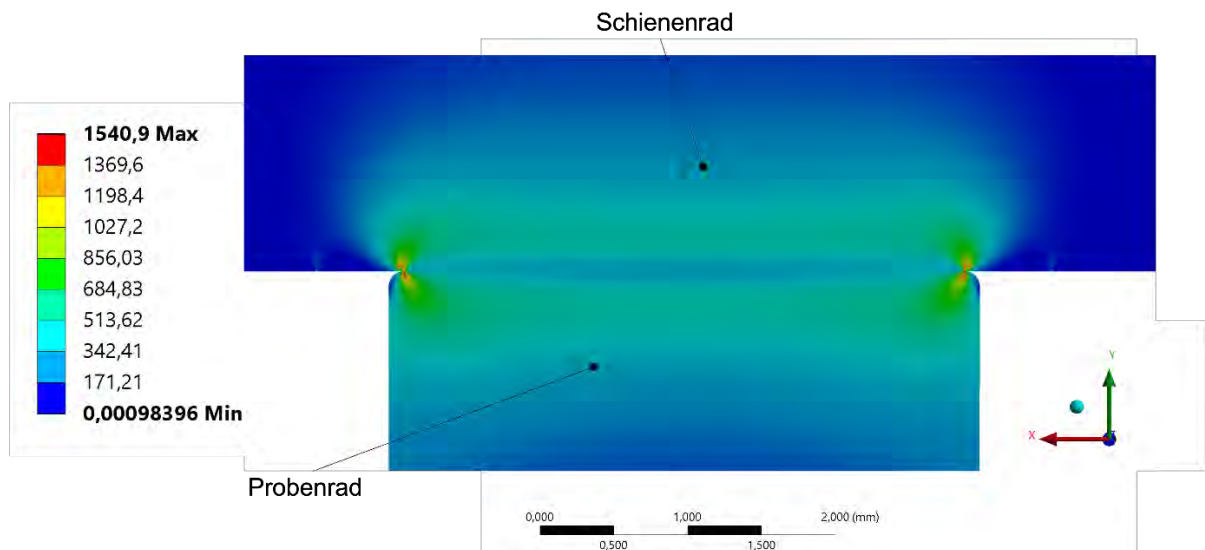


Abbildung 30: Hochlast-ZST: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (XY-Ebene)

In Tabelle 15 erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der analytischen Berechnung und der FE-Simulation bei einer Radlast von $F_R = 1890 \text{ N}$. Außerdem ist die Abweichung der analytischen Berechnung bezogen auf die numerischen Ergebnisse angegeben. Die Berechnung der maximalen Flächenpressung p_{\max} stimmt sehr gut mit der FE-Simulation überein. Hier besteht nur eine Abweichung von 3,4 %. Die berechnete Kontaktfläche ist nahezu mit dem Simulationsergebnis ident.

Bezeichnung	Einheit	Analytisch	FEA
Kontaktfläche A	mm ²	2,74 (+ 0,7%)	2,72
max. Flächenpressung p_{\max}	N/mm ²	878 (+3,4%)	849
max. Vergleichsspannung $\sigma_{V,max}$	N/mm ²	-	500

Tabelle 15: Hochlast-ZST: Gegenüberstellung der Ergebnisse

7.2.2. Rad-Schiene-Teststand

Der Rad-Schiene-Teststand nimmt das zweite Glied der Prüfkette ein und soll durch realitätsnahe Geometrien und Belastungen bessere Vergleiche zu den Feldversuchen als die Zweischeiben-Tribometern ermöglichen. Der Teststand kann weitaus höhere Radlasten (bis 200 kN als die Laborteststände aufbringen. Bei den durchgeführten experimentellen Versuchen wurde eine Radlast von $F_R = 15 \text{ kN}$ aufgebracht. Die Angaben zu den Kontaktkörpern sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Abbildung 31 zeigt die Geometrie der Probekörper mit den wichtigsten Abmessungen. Die genaue Erläuterung zur aufgebrachten Kraft und der verwendeten Berührgeometrie befindet sich in Kapitel 3.3.

Bezeichnung	Einheit	Probenrad	Schienenrad
Werkstoff	-	34CrNiMo6	R260
E-Modul	N/mm ²	210000	210000
Querkontraktionszahl	-	0.3	0.3
Scheibenradius	mm	191	998
Scheibenprofilradius	mm	∞	177 ^[a]
Radlast	N	15 000	

[a] gewählter Ersatzradius für die Berechnung nach Hertz

Tabelle 16: Rad-Schiene-Teststand: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung

Bei näherer Betrachtung der Kontaktsituation in Abbildung 31 zeigt sich, dass eine Voraussetzung für die Berechnung nach *Hertz*¹⁰ verletzt wird. Im Kontaktgebiet findet ein Übergang von dem Profilradius von 300 mm auf 80 mm statt. Für die näherungsweise Berechnung wurde in diesem Gebiet mit einem konstanten Ersatzradius von $R_{\text{Schiene-Ersatz}} = 177\text{ mm}$ gerechnet. Es werden daher Abweichungen zur FE-Simulation erwartet.

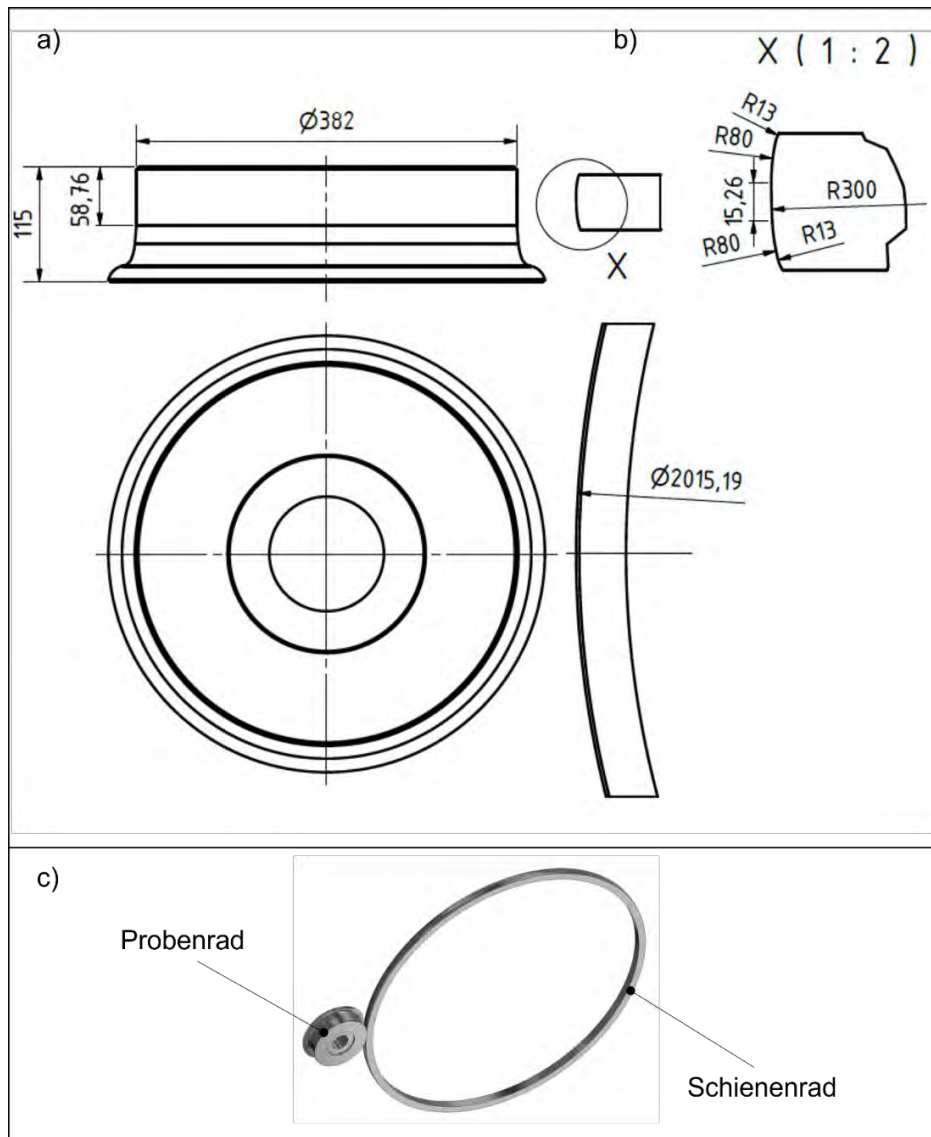
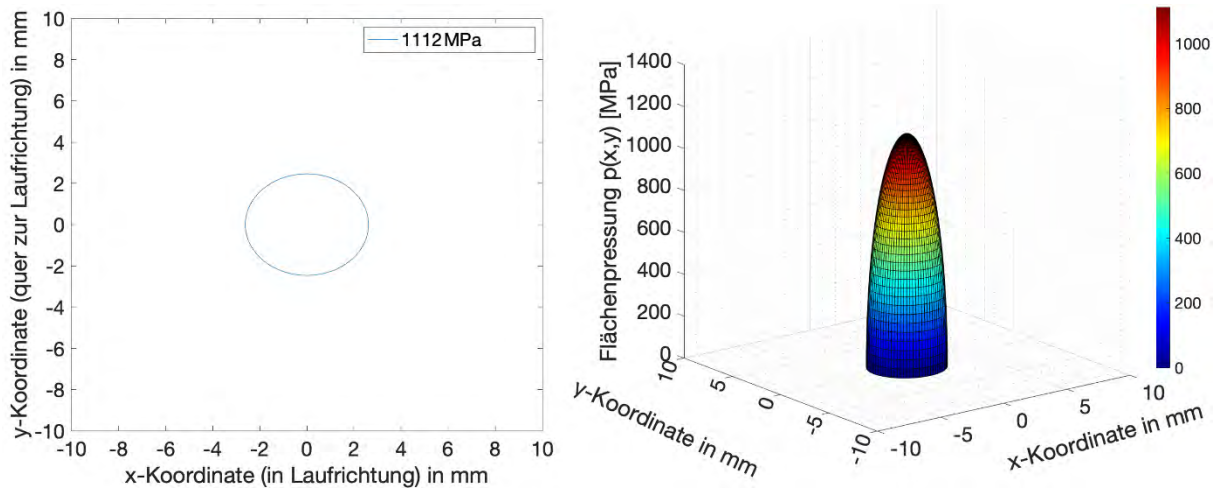


Abbildung 31: Probengeometrie beim Rad-Schiene-Teststand
(a) Probenrad; (b) Schienenrad; (c) 3D-Modell

Die Berechnung wurde mit den Formeln aus Kapitel 3.3 für den Punktkontakt durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Berührungsellipse mit den Halbachsen $a = 2,62\text{ mm}$ und $b = 2,46\text{ mm}$, siehe Abbildung 32. Das entspricht einer Kontaktfläche von $A_{\text{Hertz}} = 20,2\text{ mm}^2$. In

der Abbildung 32 ist ebenfalls der Verlauf der Flächenpressung über der Kontaktfläche dargestellt. Die maximale Flächenpressung bei $x = 0$ und $y = 0$ beträgt $p_{max.Hertz} = 1112 \text{ N/mm}^2$. Abbildung 33 zeigt die Verläufe der Hauptspannungen an der Oberfläche ($z = 0$). Aufgrund der Annahme, dass das elastische Verhalten beider Kontaktkörper ident ist, gelten die dargestellten Spannungsverläufe für beide Körper gleichermaßen.



**Abbildung 32: Rad-Schiene-Teststand: Analytisch – Kontaktfläche (links);
Flächenpressung (rechts)**

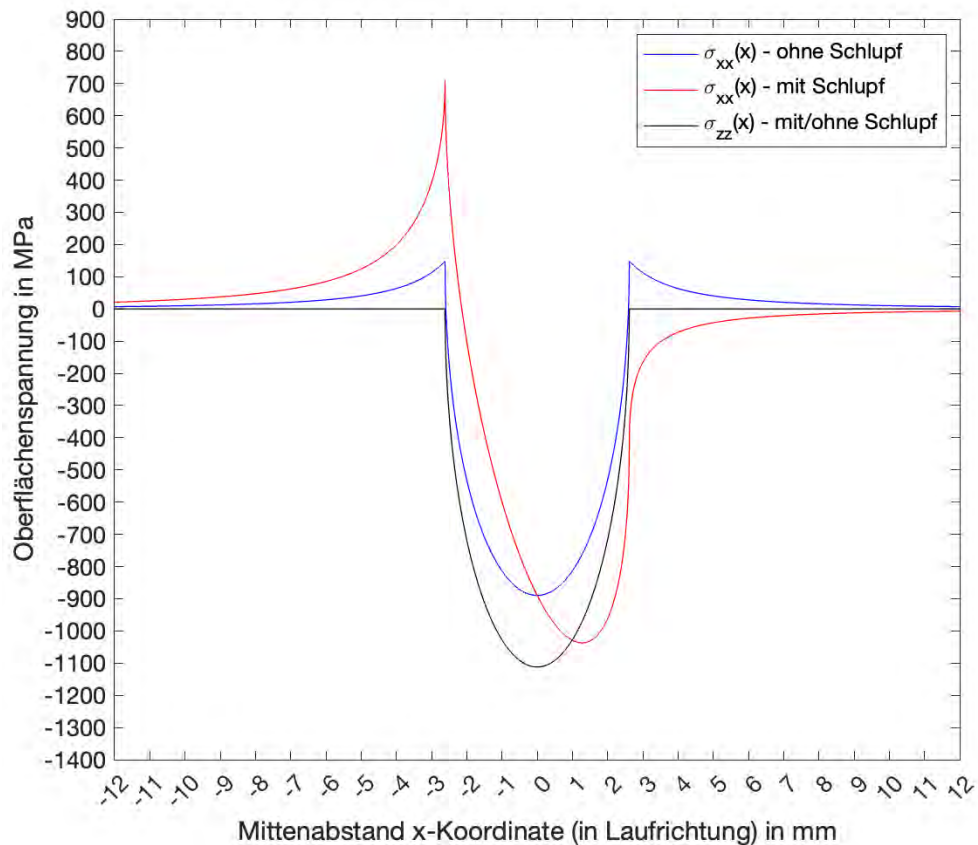


Abbildung 33: Rad-Schiene-Teststand: Analytisch – Oberflächenspannungen

Die Hauptnormalspannung $\sigma_{xx}(x)$ ist innerhalb des Kontaktbandes negativ. Selbst bei einem reibungsfreien Kontakt (ohne Schlupf) wirkt am Rand des Kontaktbandes eine im Betrag positive Zugspannung von $\sigma_{xx}(x) = 148 \text{ N/mm}^2$. Bei Schlupf vergrößert sich der Betrag der Zugspannung auf $\sigma_{xx}(x) = 712 \text{ N/mm}^2$. Außerhalb des Kontaktbandes nähern sich beide Verläufe (mit und ohne Schlupf) asymptotisch dem Wert Null an. Die Spannung $\sigma_{zz}(x)$ entspricht der negativen Hertzschen Flächenpressung und wird Null beim Verlassen des Kontaktbandes. Die höchste Druckspannung σ_{xx} liegt aufgrund des Schlupfes etwas außerhalb der Mitte und ist mit $\sigma_{xx} = -1037 \text{ N/mm}^2$ höher als ohne Schlupf.

Im Anschluss wird die tatsächlich auftretende Kontaktsituation mithilfe der FE-Simulation untersucht, siehe Abbildung 34. Die FE-Simulation ergibt bei einer aufgebracht Radlast von $F_R = 15 \text{ kN}$ eine maximal auftretende Flächenpressung von $p_{max,FE} = 1234 \text{ N/mm}^2$. Die Berührgeometrie entspricht aufgrund der unterschiedlichen Radien im Berührungspunkt keiner klaren Ellipse und weist eine Kontaktfläche von $A_{FE} = 22,2 \text{ mm}^2$ auf.

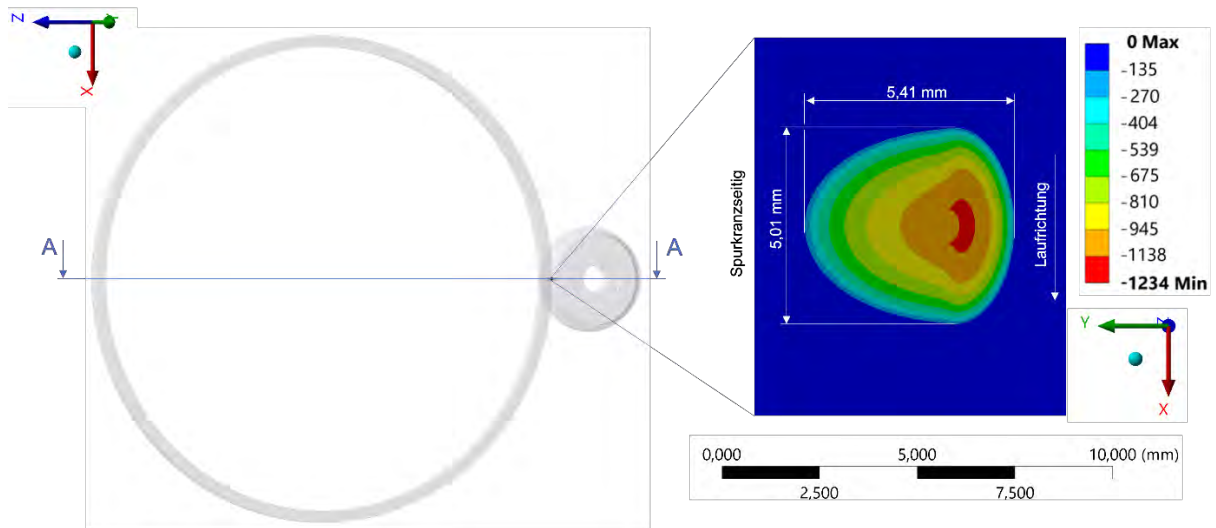


Abbildung 34: Rad-Schiene-Teststand: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche

Weiters wurde im Schnitt A-A durch die Symmetrieachse die maximale von Mises-Vergleichsspannung σ_v ausgewertet, siehe Abbildung 35. Diese beträgt maximal 707 N/mm^2 knapp unter der Kontaktfläche.

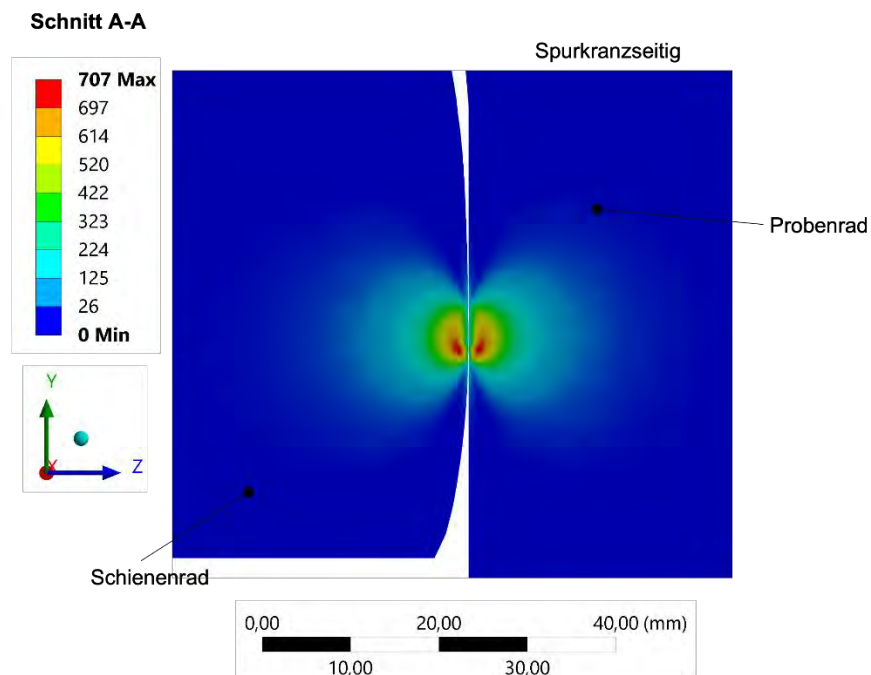


Abbildung 35: Rad-Schiene-Teststand: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (YZ-Ebene)

In Tabelle 17 erfolgt die Gegenüberstellung der erhaltenen Ergebnisse aus der analytischen Berechnung und der FE-Simulation mit einer Radlast $F_R = 15 \text{ kN}$. Außerdem ist die

Abweichung der analytischen Berechnung bezogen auf die numerischen Ergebnisse angegeben. Die Berechnung der maximalen Flächenpressung p_{max} stimmt sehr gut mit der FE-Analyse überein. Hier besteht nur eine Abweichung von 2,3 %. Bei der Kontaktfläche ist hingegen eine größere Abweichung von 40,4 %, aufgrund der getroffenen Vereinfachung vorhanden.

Bezeichnung	Einheit	Analytisch	FEA
Kontaktfläche A	mm ²	31 (+40,4%)	22
max. Flächenpressung p_{max}	N/mm ²	1206 (-2,3%)	1234
max. Vergleichsspannung $\sigma_{V,max}$	N/mm ²	-	707

Tabelle 17: Rad-Schiene-Teststand: Gegenüberstellung der Ergebnisse

7.2.3. Rad-Schiene-Kontakt im Feld

Die Feldversuche stellten das letzte Glied der entwickelten Prüfkette dar. Für die Berechnung und Simulation der auftretenden Belastungen wurden die Informationen aus der Feldanalyse, siehe Tabelle 13, herangezogen. Die Geometrie der simulierten Schiene basiert auf dem 1:40 geneigten Schienenprofil *UIC 60E1*⁹¹. Die Lauffläche des Rades entspricht dem *UIC-ORE-Einheitsprofil S1002*⁹² und hat einen Messkreisdurchmesser von $d_0 = 1150 \text{ mm}$. Alle relevanten Angaben für die Berechnung und Simulation sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

⁹¹ DIN EN 13674-1 - 2011-04: Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1

⁹² DIN EN 15302:2011-01: Bahnanwendungen – Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität

Bezeichnung	Einheit	Rad	Schiene
Werkstoff	-	ER9	R260
E-Modul	N/mm ²	210000	210000
Querkontraktionszahl	-	0,3	0,3
Radius	mm	575	∞
Profilradius	mm	-	177 ^[a]
Radlast	N	110 000	

[a] gewählter Ersatzradius für die Berechnung nach Hertz

Tabelle 18: Feld: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung

Zur Abschätzung der auftretenden Kontaktspannungen im Feld wurde zunächst ein vereinfachtes Modell verwendet. Es besteht aus zwei gekreuzten Zylindern mit einem Radradius von $d_{\text{Rad}} = 575 \text{ mm}$ und einem Schienenradius von $d_{\text{Schiene}} = 177 \text{ mm}$ und weist einen punktförmigen Kontakt auf. Verschiedene Lastfälle zeigen, wie sich die maximale Flächenpressung und Kontaktfläche in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft ändert, siehe Abbildung 36. Die untersuchten Radlasten betragen 70 kN bis 150 kN , welchen den üblichen Belastungen im Feld entsprechen. Bei einer Radlast von 110 kN ergibt sich eine maximale Flächenpressung von $p_{\text{max.Hertz}} = 1407 \text{ N/mm}^2$ und eine Kontaktfläche von $A_{\text{Hertz}} = 117 \text{ mm}^2$. Der Verlauf der Flächenpressung ist in Abbildung 36 unten dargestellt.

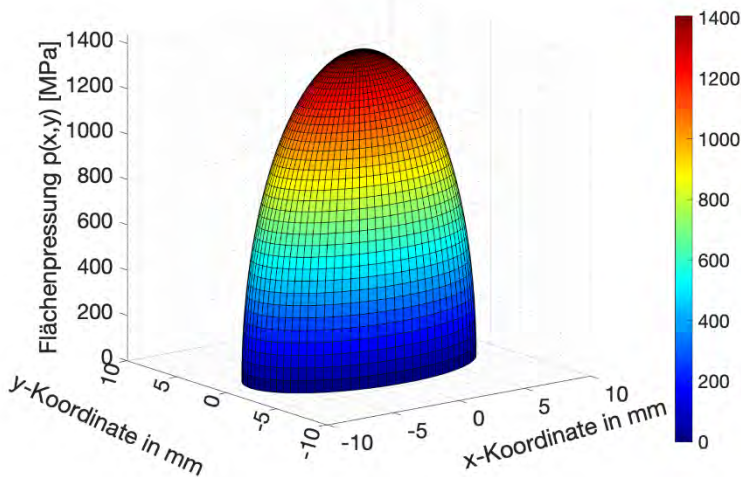
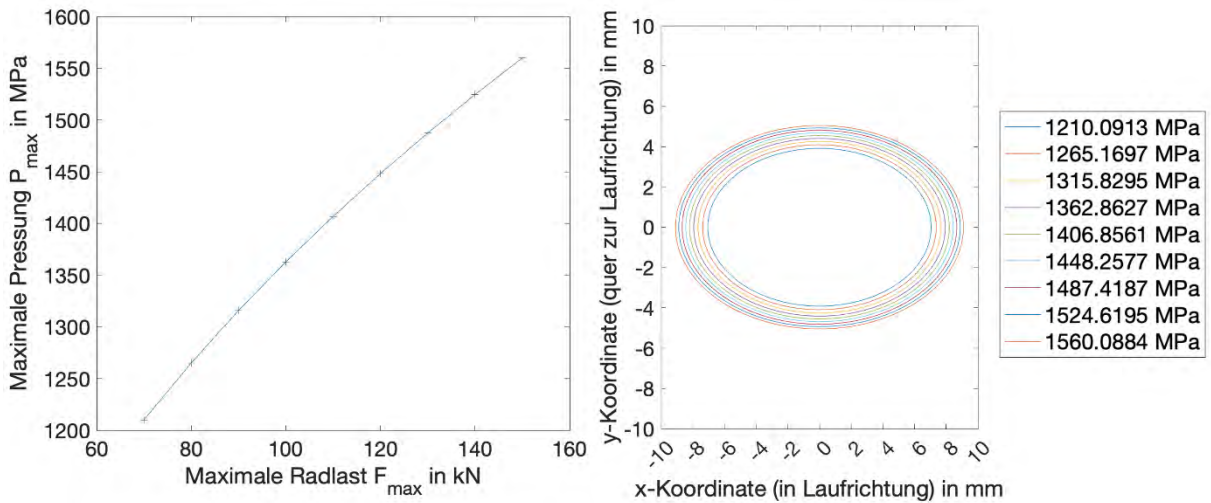


Abbildung 36: Feld: Analytisch – Maximale Flächenpressungen (links) und Kontaktflächen bei unterschiedlicher Belastung (rechts); Verlauf der Flächenpressung bei 110 kN Radlast (unten)

Abbildung 37 zeigt die Verläufe der Hauptspannungen an der Oberfläche ($z = 0$) bei 110 kN Radlast. Aufgrund der Annahme, dass das elastische Verhalten beider Kontaktkörper ident ist, gelten die dargestellten Spannungsverläufe für beide Körper gleichermaßen. Wie auch bei den anderen Punktkontakten ist die Hauptnormalspannung $\sigma_{xx}(x)$ innerhalb des Kontaktbandes negativ und am Rand des Kontaktbandes herrscht bei keinem Schlupf eine positive Zugspannung von $\sigma_{xx}(x) = 188 \text{ N/mm}^2$. Bei Schlupf vergrößert sich der Betrag der Zugspannung auf $\sigma_{xx}(x) = 900 \text{ N/mm}^2$. Außerhalb des Kontaktbandes nähern sich beide Verläufe (mit und ohne Schlupf) asymptotisch dem Wert Null an. Die Spannung $\sigma_{zz}(x)$ entspricht der negativen Hertzschen Flächenpressung und wird Null beim Verlassen des Kontaktbandes. Die höchste Druckspannung σ_{xx} liegt aufgrund des Schlupfes etwas außerhalb der Mitte und ist mit $\sigma_{xx} = -1312 \text{ N/mm}^2$ höher als ohne Schlupf.

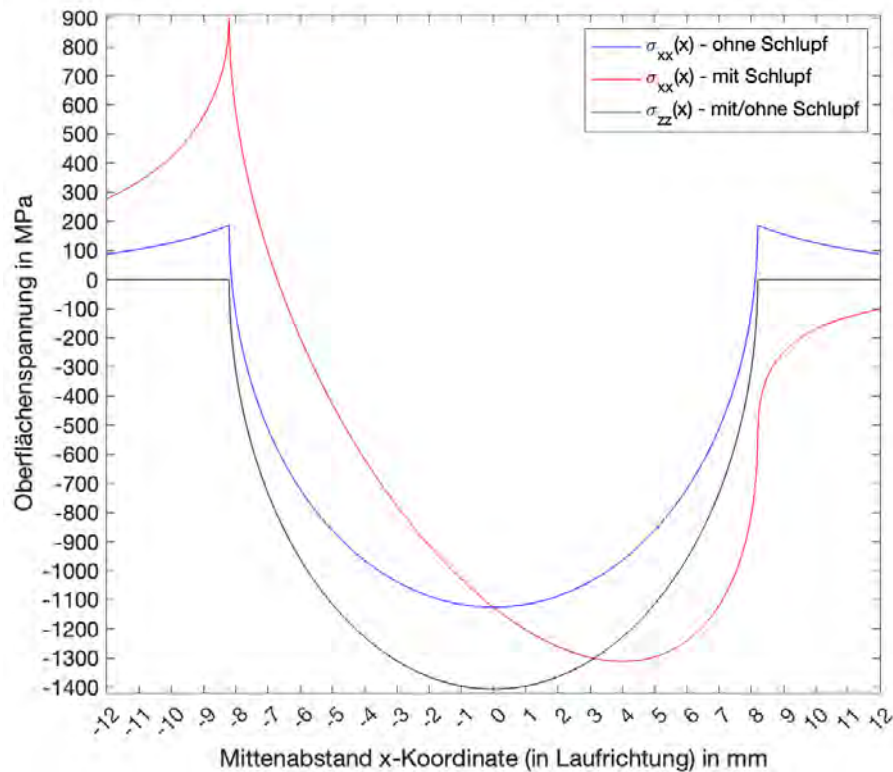


Abbildung 37: Feld: Analytisch – Oberflächenspannungen

Der reale Kontakt entspricht nicht dem idealisierten Kontaktmodell (gekreuzte Zylinder). Das Rad des Schienenfahrzeuges ist leicht kegelförmig und kann lateral an unterschiedlichen Stellen auf der Schiene aufliegen, was zu einer Änderung der Pressungsverhältnisse führt. Für eine mittige Lage des Radsatzes im geraden Gleis wurde der Abstand zwischen der Schnittachse der Schienenmittelebene und der Messkreisebene des Rades mit $u = 0,59 \text{ mm}$ festgelegt.

Die FE-Simulation ergab bei einer aufgebrauchten Radlast von $F_R = 110 \text{ kN}$ eine maximal auftretende Flächenpressung von $p_{max.FE} = 1451 \text{ N/mm}^2$, siehe Abbildung 38. Je weiter sich der Spurkranz Richtung Schienenkopf bewegt, desto höher werden die wirkenden Kontaktspannungen. Die Berührgeometrie entspricht einer glockenähnlichen Form und weist eine Kontaktfläche von $A_{FE} = 169 \text{ mm}^2$ auf.

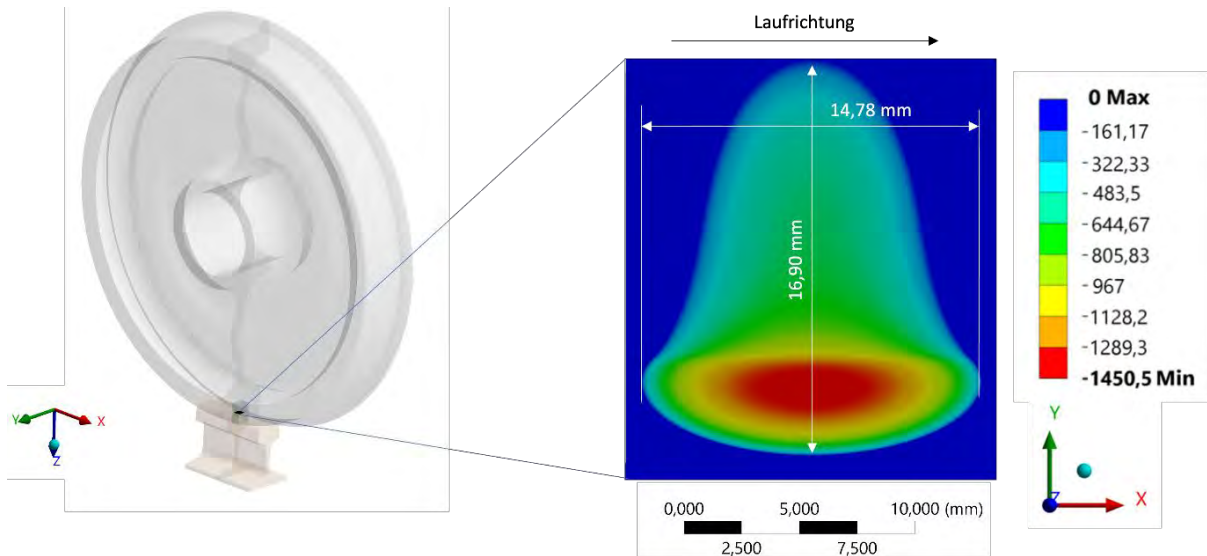


Abbildung 38: Feld: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche

Weiters wurde im Schnitt durch die Symmetrieachse die maximale von Mises-Vergleichsspannung σ_v ausgewertet, siehe Abbildung 39. Diese beträgt 814 N/mm^2 und liegt knapp unter der Kontaktoberfläche.

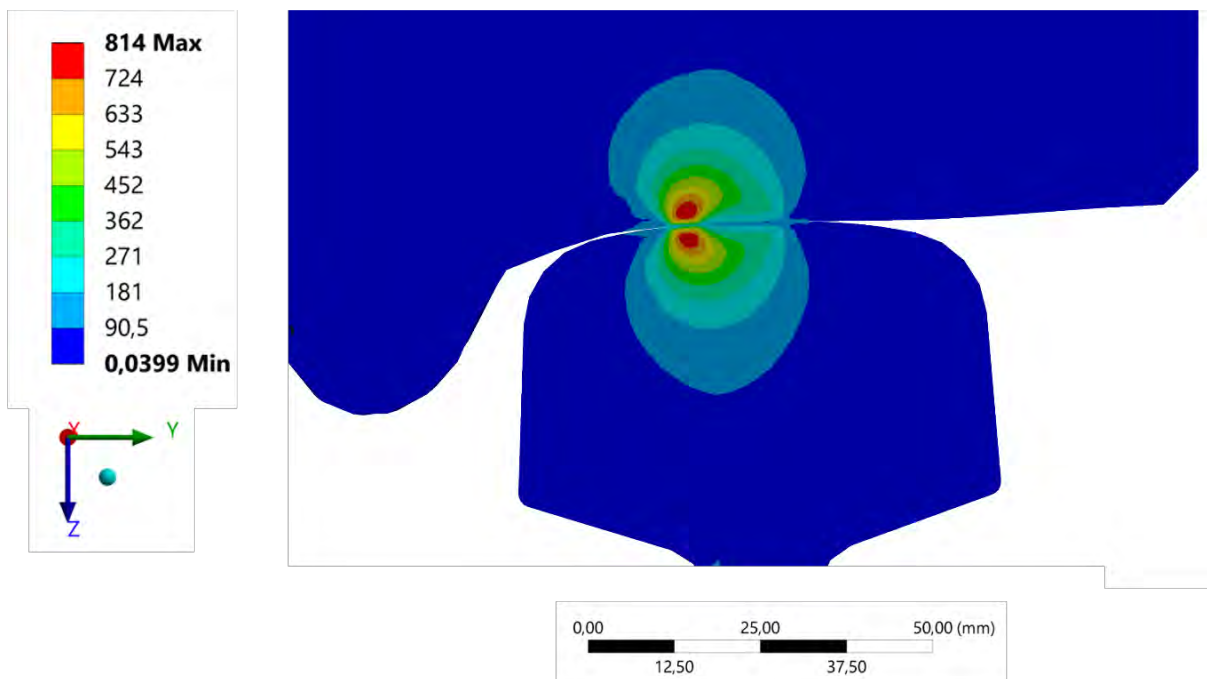


Abbildung 39: Feld: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (YZ-Ebene)

In Tabelle 19 erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der analytischen Berechnung und der FE-Analyse bei einer Radlast $F_R = 110 \text{ kN}$. Außerdem ist die Abweichung der analytischen Berechnung bezogen auf die numerischen Ergebnisse angegeben. Die

Berechnung der maximalen Flächenpressung p_{max} stimmt gut mit der FE-Simulation überein. Die Abweichungen von 3 % bei der maximalen Flächenpressung und 30,8 % bei der Kontaktfläche entstanden durch die vereinfachte analytische Modellberechnung.

Bezeichnung	Einheit	Analytisch	FEA
Kontaktfläche A	mm ²	117 (-30,8%)	170
max. Flächenpressung p_{max}	N/mm ²	1407 (-3%)	1451
max. Vergleichsspannung $\sigma_{V,max}$	N/mm ²	-	814

Tabelle 19: Feld: Gegenüberstellung der Ergebnisse

7.2.4. Vergleich von Realsystem mit Modellsystemen

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der Kontaktanalyse an dem Zweischeiben-Tribometer und dem Rad-Schiene-Teststand mit jenen im Feld verglichen. Die Hertzschen Berechnungen im Rad-Schiene-Teststand weichen von der Realität ab, da bei den Berechnungen Vereinfachungen bezüglich der Geometrie getroffen wurden. In Tabelle 20 erfolgt daher die Gegenüberstellung aller Ergebnisse aus den FE-Simulationen. Neben den Werten ist die prozentuale Abweichung im Vergleich zu den realen Feldbedingungen berechnet und in Klammer angegeben. Das primäre Ziel war, eine ähnliche Flächenpressung wie im Feld an jedem Teststand zu erzielen. Dabei musste jedoch sichergestellt werden, dass kein zu hoher Verschleiß, sowie keine Oberflächenbeschädigung auftraten.

Bezeichnung	Einheit	Hochlast-ZST	Rad-Schiene-Teststand	Feld
FEA max. Pressung	N/mm ²	849	1234	1451
FEA Kontaktfläche	mm ²	2,7	22,2	169,5
FE Zugspannungsspitze bei Schlupf und $\mu=0,3$	N/mm ²	527	712	900
FEA Vergleichsspannung	N/mm ²	500 ^[a]	707	814

[a] ohne Kanteneffekt

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den FE-Simulationen

Die Kontaktfläche am Hochlast-ZST ist $A_{FE} = 2,72 \text{ mm}^2$ um $1,31 \text{ mm}^2$. Aufgrund des auftretenden Kanteneffekts war die maximal aufbringbare Radlast mit $F_R = 1890 \text{ N}$ begrenzt. Die maximalen Flächenpressungen ist ca. 849 N/mm^2 .

Der Rad-Schiene-Teststand ermöglicht Versuchsbedingungen, die dem Feld am ehesten entsprechen. Mithilfe des Teststandes konnte die Kontaktfläche weiter vergrößert und die maximale Flächenpressung erhöht werden. Es zeichneten sich jedoch unvermeidbare Unterschiede zu den Feldbedingungen ab. Die Probenradgeometrie wich durch eine zylindrische Lauffläche von DIN EN 13674-1⁹² ab. Dadurch war ein schnelleres Abdrehen des Probenrades direkt am Teststand möglich. Das Probenrad hatte einen Durchmesser von $d_{Prob} = 382 \text{ mm}$. Die Räder eines Schienenfahrzeuges im Feld können dagegen Durchmesser von über einen Meter aufweisen. Am Teststand kam ein sogenanntes Schienenrad mit einem Durchmesser von $d_{Schiene} = 1993 \text{ mm}$ zum Einsatz. Das Schienenradprofil war ident mit einer 1:40 geneigten Schiene des Typs 60E1⁹¹, jedoch handelte es sich geometriebedingt nicht um eine „gerade“ Schiene.

Wie in Kapitel 7.2.2 und 7.2.3 näher erläutert wird, wurde in Anlehnung an die Arbeit von Zechner¹ eine Radlast von $F_R = 110 \text{ kN}$ aufgebracht. Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Zugspannungen an der Oberfläche der Probekörper bei Kontaktende (712 N/mm^2 bei $\mu = 0,3$) trotz geringerer Flächenpressungen etwas geringer sind als die Oberflächenspannungen im Feld (900 N/mm^2 bei $\mu = 0,3$). Aufgrund der steilen Spannungsgradienten konnte am Teststand keine größere Radlast aufgebracht werden, ohne größeren Verschleiß und Oberflächenschäden zu verursachen.

Die gefundenen Konfigurationen der Teststände stellen einen Kompromiss zwischen Kontaktfläche, maximaler Flächenpressung und dem Vermeiden von Verschleiß und Oberflächenschäden dar. Die Abweichungen bezüglich der Größendifferenz der Kontaktflächen zwischen Feld, Rad-Schiene-Teststand und Zweischeiben-Tribometern ist für die Aufbringungsmenge an SKKM bedeutend. Für die experimentellen Versuche ist darauf zu achten, dass in Abhängigkeit von der Größe der ermittelten Kontaktflächen (Hochlast-ZST < Rad-Schiene-Teststand < Feld) entsprechend SKKM aufgetragen wird, da die Menge an SKKM im Kontakt den Reibungskoeffizienten wesentlich beeinflusst.

7.3. Beschreibung der Laborexperimente

Um die Laborergebnisse der unterschiedlichen Modellsysteme besser zu analysieren und zu vergleichen, werden zunächst die benötigten experimentellen Grundlagen zu den Tribometern und dem Teststand beschrieben, welche die Aufbauten, Geometrien und Werkstoffe der

Proben, Methoden zur Reproduzierbarkeit der Versuche, die Versuchsabläufe selbst und die angewendeten Berechnungen für die benötigten tribologischen Kennwerte umfassen.

7.3.1. Hochlast-Zweischeiben-Tribometer

Am Hochlast-Zweischeiben-Tribometer wurden Versuche mit Linienkontakt durchgeführt. Es können Radlasten bis 20 kN aufgebracht und Scheiben mit einem Durchmesser von bis zu 200 mm verwendet werden, siehe Tabelle 14. Der Aufbau und das Funktionsprinzip des Hochlast-ZST ist in Abbildung 40 dargestellt. Für die Kraftübertragung waren Probekörper 1 und Probekörper 2 formschlüssig über eine Passfeder mit der jeweiligen Antriebswelle verbunden. Probekörper 1 wird folgend nur mehr als Schienenrad und Probekörper 2 als Probenrad bezeichnet. Mittels verschieden langen Distanzhülsen wurde die Position des Probenrades bezogen auf das Schienenrad verändert. Dadurch waren mehrere Laufspuren am Schienenrad möglich, was eine Reduzierung der Probenvorbereitung ermöglichte.

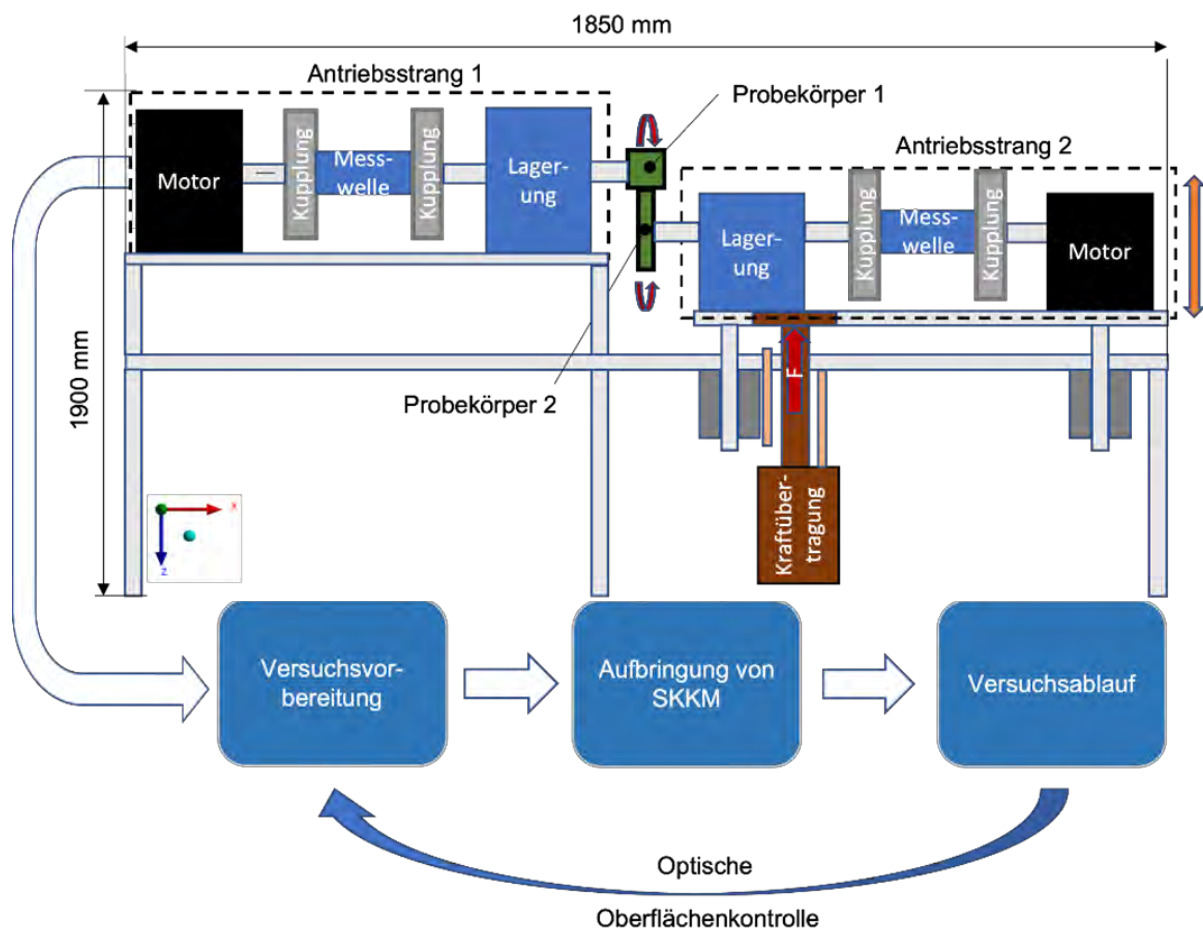


Abbildung 40: Hochlast-ZST bei AC²T und Arbeitsschritte

Antriebsstrang 1 auf der linken Seite war mit dem Gestell fest verbunden. Antriebsstrang 2 war auf einem in z-Richtung beweglichen Tisch montiert.

Die Hubführung und somit auch die seitliche Abstützung der eingebrachten Kräfte erfolgte mit luftgelagerten Säulen, damit eine vernachlässigbare kleine Reibung bei der Kraftaufbringung im Vergleich zu mechanischen Lagern auftritt. Die Kraft wurde vertikal über einen pneumatischen doppelwirkenden Zylinder, welcher am unteren Gestell montiert war, eingeleitet. Der Zylinderkolben war fest mit dem beweglichen Tisch verbunden. Das Probenrad wurde bei einem ausgefahrenen Zylinderkolben mit einer definierten Radlast auf das Schienenrad gedrückt. Aufgrund der gewählten Probekörpergeometrie war ein Linienkontakt vorhanden. Über unabhängig operierende Motoren wurden die Wellen einzeln angetrieben und je nach Probekörperdurchmesser konnte die Umfangsgeschwindigkeit berechnet werden. Die entstandenen Reibkräfte an den Probekörpern wurden mit je einer Drehmomentmesswelle pro Seite gemessen. Die Messwellen waren mit den Antriebswellen über hochpräzise Metallbalgkupplungen verbunden. Durch die fest verbauten Inkrementalgeber beider Antriebsmotoren wurden die Drehzahlen der Antriebswellen kontinuierlich aufgezeichnet. Für eine präzise Radlast wurde die tatsächlich wirkende Kraft im Kontakt mittels einer Kraftmessdose gemessen und das System darauf kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte mehrmals pro Versuchsserie, um eine genaue Kraftaufbringung sicherzustellen.

Für die Versuche am Hochlast-ZST standen folgende Betriebsparameterbereiche zur Verfügung:

- Scheibenbreite: bis 30 *mm*
- Scheibendurchmesser: 50 bis 200 *mm*
- Drehzahlbereich: -6000 *U/min* bis 6000 *U/min*
- Kontaktkraft: bis 20 *kN*

Am Teststand wurden folgende Daten mit einer Messfrequenz von 10 *Hz* aufgezeichnet:

- Kalibrierte Radlast: F_R
- Drehmoment Messwelle Probenrad: $M_{\text{Prob_gemessen}}$
- Drehmoment Messwelle Schienenrad: $M_{\text{Schiene_gemessen}}$
- Drehzahl Welle Probenrad: n_{Prob}
- Drehzahl Welle Schienenrad: n_{Schiene}

Für eine genaue Dokumentation der Umgebungsbedingungen wurde ein *Testo Klimalogger 174H* für die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Laborraum verwendet. Für jeden Versuch wurden folgende Daten dokumentiert:

- Relative Luftfeuchtigkeit
- Temperatur der Probekörper vor/nach dem Versuch
- Reinigung, optische Beurteilung des Kontaktbandes
- Breite des Kontaktbandes
- Aufgebrachte Menge an SKKM
- Probenraddurchmesser: d_{Prob}
- Schienenraddurchmesser: $d_{Schiene}$

Um den Einfluss der verschiedenen SKKM richtig beurteilen zu können, wurden aus den aufgezeichneten Daten folgende Größen ermittelt:

- Reibungskoeffizient
- Schlupf
- Korrekturmoment

Für die Versuchsserien am Hochlast-ZST sollten die Werkstoffe der Probekörper möglichst mit denen in der Realität eingesetzten Werkstoffen übereinstimmen. Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen dazu die chemische Zusammensetzung, Härte und Zugfestigkeit des Radwerkstoffs „ER9“ und des Schienenwerkstoffs „R260“, die weitverbreiteten Einsatz finden. Sowohl der Radwerkstoff „ER9“ als auch der Schienenwerkstoff „R260“ sind perlitische Stähle.

Stahlsorte		Massenanteil in Masse%						Härte	Zugfestigkeit R_m
Gefügetyp	Bezeichnung	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	HBW	MPa
Perlitischer Stahl	ER9	0,6	0,4	0,8	0,3	0,3	0,3	Mind. 255	900 - 1050

Tabelle 21: Auszug der chemischen Zusammensetzung, Härte und Mindestzugfestigkeit des Radwerkstoffs „ER9“ nach DIN EN 13262:2020⁹³

⁹³ DIN EN 13262:2020-12, Bahnanwendungen-Radsätze und Drehgestelle-Räder-Produktanforderungen, 2020

Stahlsorte		Massenanteil in Masse%				Härte	Zugfestigkeit R_m
Gefügetyp	Bezeichnung	C	Mn	Cr	Si	HBW	MPa
Perlitischer Stahl	R260	0,60 - 0,82	0,65 - 1,25	≤0,15	0,15 - 0,58	260 - 300	Mind. 880

Tabelle 22: Auszug der chemischen Zusammensetzung, Härte und Mindestzugfestigkeit des Schienenwerkstoffs „R260“ nach EN 13674-1:2011:2017⁹⁴

Um die Werkstoffkennwerte von „ER9“ und „R260“ zu erreichen, wurden beide Probekörper aus einem echten Rad- und Schienenstück gefertigt, siehe Abbildung 41. Die vorgefertigten Proben wurden vor der Endfertigung wärmebehandelt, um die Härte der Realteile an der Kontaktfläche zu erhalten.

Dabei konnte ein Durchmesser von 130 mm beim Probenrad und ein Durchmesser von 64 mm beim Schienenrad erzielt werden. Im Laufe der Versuche verringerte sich der tatsächliche Durchmesser beider Scheiben, da die Probekörper aufgrund von Verschleißerscheinungen nachgedreht wurden.

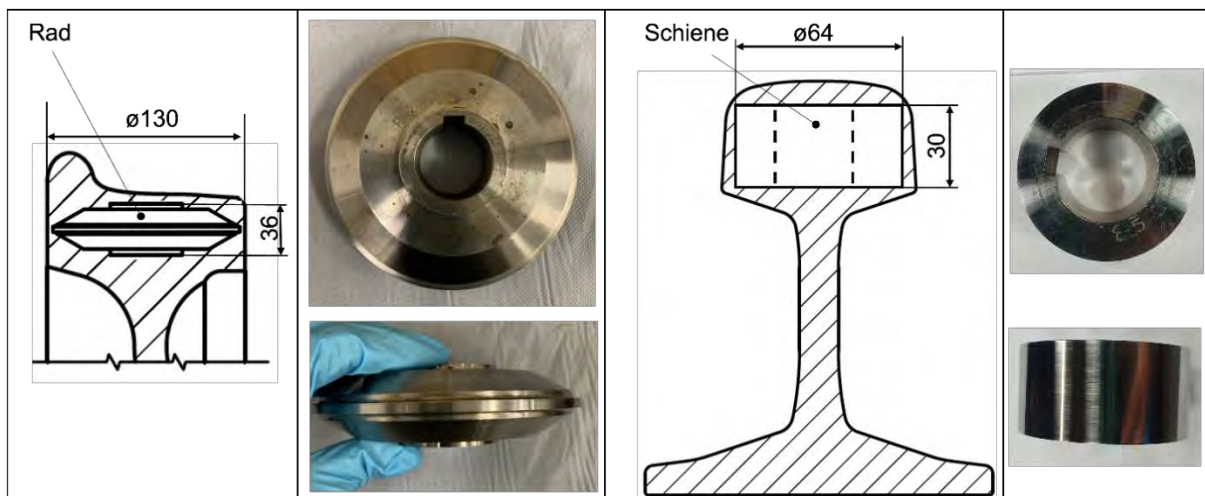


Abbildung 41: Hochlast-ZST: Probenrad gefertigt aus einem Schienenfahrzeug-Rad (links); Schienenrad gefertigt aus einer realen Schiene (Rechts)

Alle Proben- und Schienenräder wurden von AC²T mit den selben Dreh- und Schleifprozessen hergestellt. Nach der Vorfertigung der Proben wurde ein Wärmeprozess zur Homogenisierung durchgeführt. Eine Härteprüfung nach Vickers zeigte, dass Härtewerte im Bereich von 332 HV1 bis 341 HV1 am Probenrad (ER9), und Härtewerte im Bereich von 285 HV1 am Schienenrad (R260) vorlagen. Für den Vergleich der Reibungskoeffizienten kann durch die

⁹⁴ DIN EN 13674-1:2017-07, Bahnanwendungen-Oberbau-Schienen, Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m

Verwendung der realen Werkstoffe der Werkstoffeinfluss als äußerst niedrig eingestuft werden.

Für bestmögliche Voraussetzungen wurden beide Probekörper zu Beginn mit Ethanol gereinigt. Nach der Montage wurde die Rundheit beider Probekörper gemessen, um die Lage zu überprüfen. Dadurch war eine bessere Beurteilung des Laufverhaltens möglich. Bei einer zu großen Rundheitsabweichung wurde ein Neuabdrehen der Probekörper veranlasst.

Aufgrund der Breite des Schienenrades ($b = 30 \text{ mm}$) hatten mehrere Kontaktsuren nebeneinander Platz und es konnten mehrere Versuche auf einem Schienenrad durchgeführt werden. Die Lage der Kontaktsur wurde durch die Positionierung der Probekörper mittels verschiedener Distanzhülsen bestimmt. Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Messergebnissen zu erreichen, wurde für jeden Versuch die gleiche Versuchsvorbereitung durchgeführt.

Am Hochlast-ZST wurden die Versuchsproben eingefahren, um einen bestimmten Oberflächenzustand bzw. Reibungskoeffizienten zu erreichen.

Für die Versuche wurde eine fixe Drehzahl des Schienenrades mit 100 U/min festgelegt. Während der Einlaufphase wurden die Probekörper teilweise mit einem Schlupf von 2% betrieben, um auch Auswirkungen des Schlupfs auf Oberflächenänderungen zu berücksichtigen. Die Umlaufgeschwindigkeiten des Proben- und Schienenrades zu Beginn der Versuche wurden über die 25 und 26 berechnet.

$$v_{\text{Prob}} = \frac{n_{\text{Prob}} \cdot \pi \cdot d_{\text{Prob}}}{30 \cdot 2} \quad 25$$

$$v_{\text{Schiene}} = \frac{-v_{\text{Prob}} \cdot \left(\frac{\text{Schlupf}}{200\%} - 1\right)}{\left(\frac{\text{Schlupf}}{200\%} + 1\right)} \quad 26$$

Erste Versuche bei trockenen Kontaktbedingungen am Hochlast-ZST zeigten, dass bei einem aufgebrauchten Schlupf von 2% Reibungskoeffizienten im Bereich von etwa $\mu_{2\%} = 0,50 - 0,58$ erreicht wurden, siehe Abbildung 42. Eingefahrene Probenpaare haben bereits nach 50 U Reibungskoeffizienten μ über $0,45$ aufgewiesen und blieben anschließend im Bereich von $0,45$ bis $0,58$. Neue Probenpaare starteten mit einem sehr niedrigen Reibungskoeffizienten und benötigten etwa $200 - 250 \text{ U}$, bis ein konstanter Reibungskoeffizient (mit einer gewissen Schwankungsbreite) im trockenen Referenzbereich erreicht wurde. Die Probekörper mussten daher eine gewisse Anzahl an Umdrehungen eingefahren werden, bis sich eine konstante Kontaktbandbreite eingestellt hat.

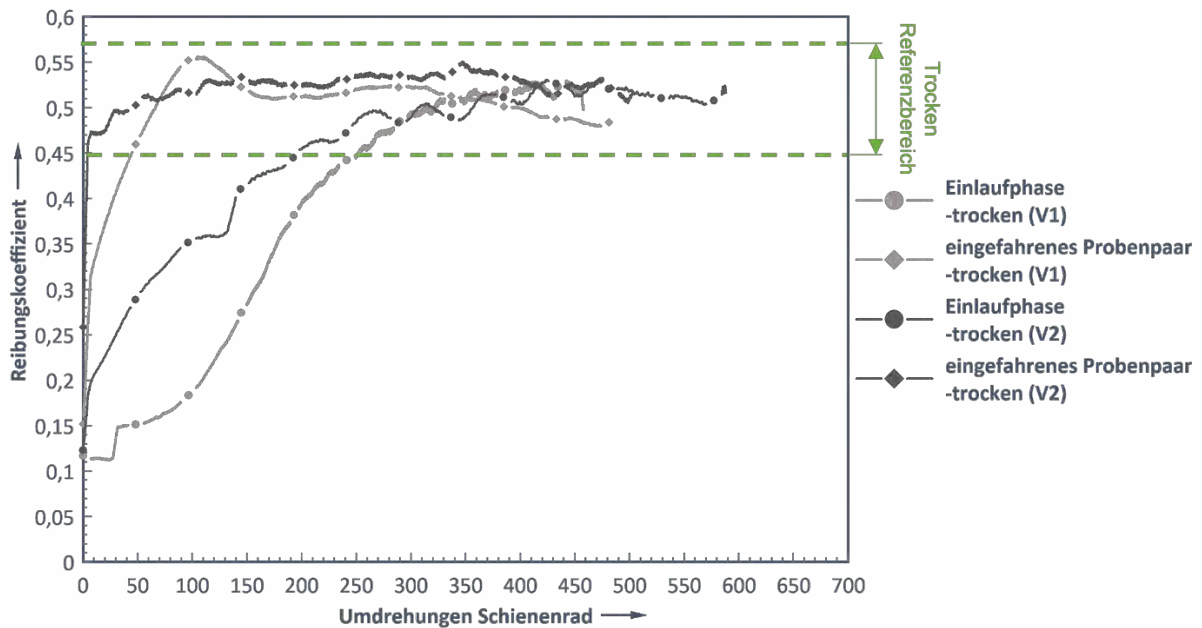


Abbildung 42: Hochlast-ZST: Trocken – Verlauf des Reibungskoeffizienten

Nach verschiedenen experimentell erprobten Einlaufsetups wurde folgende Herangehensweise beim Einfahren der Proben etabliert:

- 1) Die Drehzahl des Schienenrades wurde für den gesamten Einlaufvorgang mit 100 U/min festgelegt.
- 2) Nach dem Aufbringen einer Radlast von $F_R = 1890 \text{ N}$ wurden die Proben 100 U lang ohne Schlupf betrieben.
- 3) Anschließend wurde der Schlupf auf 2% erhöht. Ab diesem Zeitpunkt zeigen die Messergebnisse, siehe Abbildung 42, dass der Reibungskoeffizient schnell anstieg. Optisch war deutlich eine Veränderung der Oberflächentopografie zu erkennen. Durch den aufgebrauchten Schlupf wurde sowohl das Schienenrad als auch das Probenrad aufgeraut. Der Schlupf wurde so lange aufrecht gehalten, bis sich eine konstante Reibkennzahl im Bereich von $\mu_{2\%} = 0,5 - 0,58$ eingestellt hat. Der gesamte Einlaufvorgang bei konstanten Kontaktbedingungen benötigte etwa 400 U . Die entstandene Kontaktspur am Schienenrad ist in
- 4) Abbildung 43 dargestellt.
- 5) Je nach Probe variierte die benötigte Anzahl an Umdrehungen leicht. Am Ende der Einlaufphase blieb die Breite des Kontaktbandes nahezu konstant bei $b = 4 \text{ mm}$.

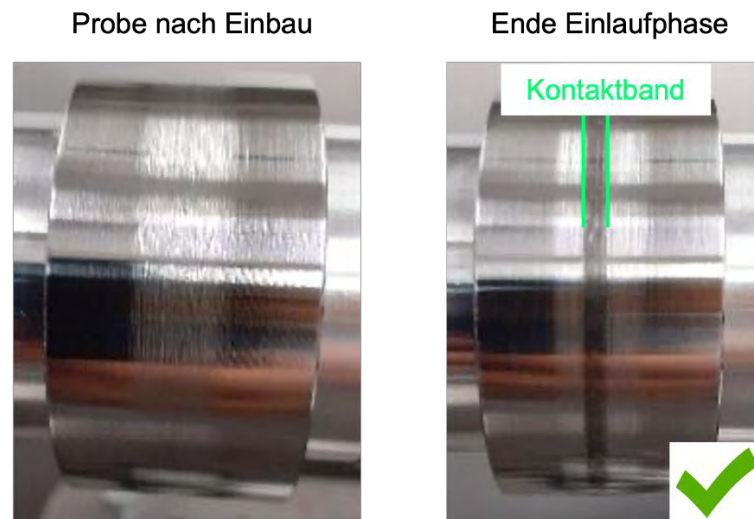


Abbildung 43: Hochlast-ZST: Einlaufvorgang

6) Optische Kontrolle des Kontaktbandes: Bei Rattermarken wurden keine weiteren Versuche durchgeführt. Die Probekörper wurden daraufhin neu abgedreht.

Für die Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit nach der Einlaufphase wurde auf das Proben- und Schienenrad im Bereich des Kontaktbandes ein Zwei-Komponenten-Gemisch aufgetragen. Mithilfe eines optischen 3D-Messsystems konnte die Oberflächentopografie der Probekörper über das ausgehärtete Gemisch bestimmt werden, siehe Abbildung 44.

Dabei sind im Kontaktband des Schienenrades keine großen Veränderungen an der Oberfläche gegenüber einer frisch abgedrehten Oberfläche zu erkennen. Ein Einebnen von Rauigkeitsspitzen wurde beobachtet. Auch das Probenrad weist eine glatte Oberfläche auf. Nach einem Versuch mit SKKM sind am Schienenrad deutlich die Auswirkungen des Kanteneffekts am Rand des Kontaktbandes zu erkennen. In diesem Gebiet wurde die Oberfläche am meisten beansprucht. Die Kontaktoberfläche des Probenrades zeigt nach einem Versuch ebenfalls Veränderungen bzgl. der Oberflächentopografie.

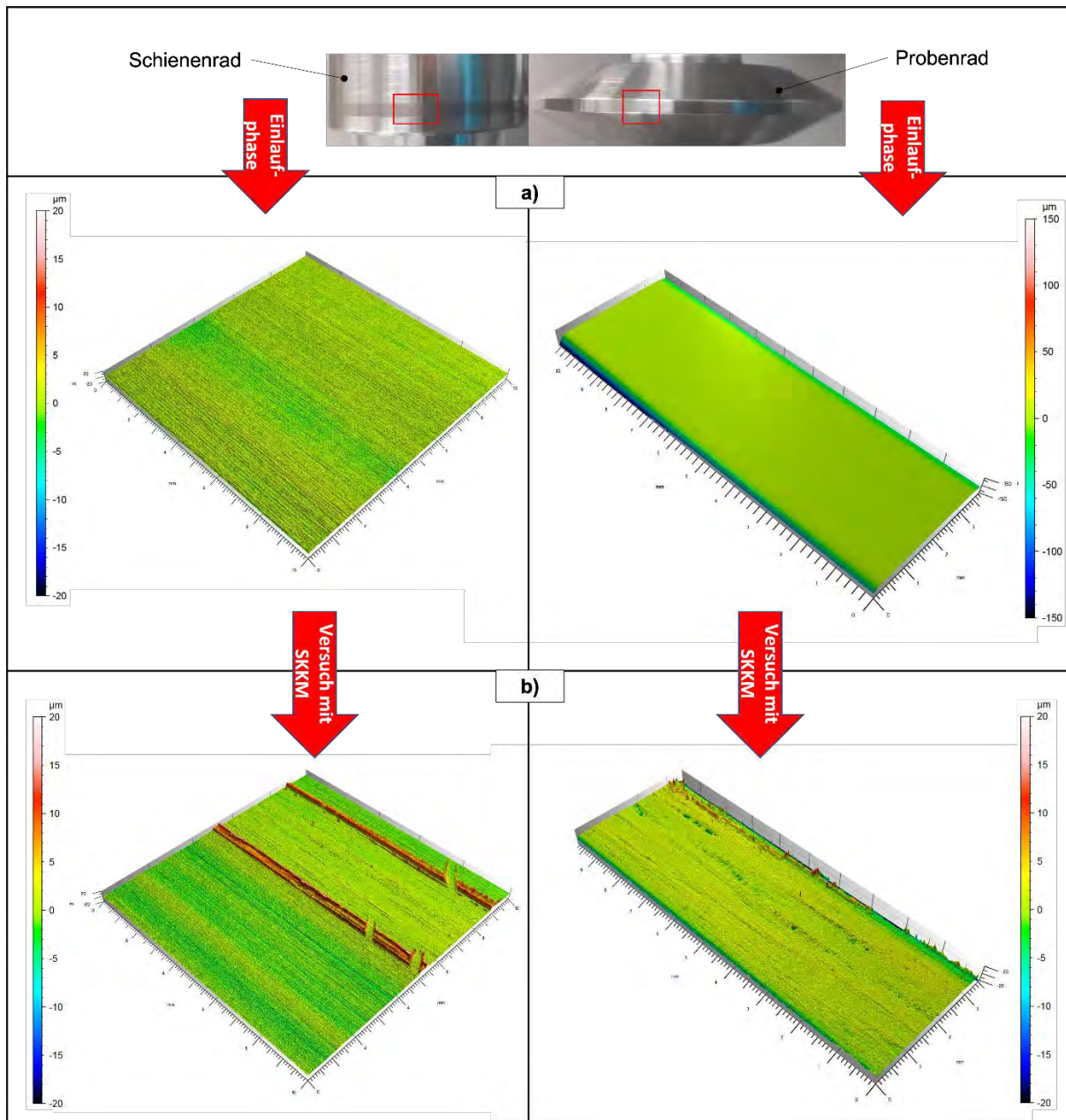


Abbildung 44: Hochlast-ZST: (a) Oberflächentopografie nach der Einlaufphase; (b) Oberflächentopografie nach einem Versuch mit SKKM

Nach dem Einlaufversuch und der Aufbringung des SKKM wurden die Versuche mit SKKM durchgeführt. Zuerst wurden die Probekörper mit einer Radlast von 1890 N kontaktiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Kontaktpunkt der Probekörper nicht auf einem der davor applizierten Tropfen lag. Dann wurde die Drehzahl für das Schienenrad eingegeben. Das Probenrad wurde über das Schienenrad 100 U angetrieben, um das SKKM über das Kontaktband zu verteilen. Der dabei gemessene Reibungskoeffizient liegt bei zirka 0,02, siehe Abbildung 45.

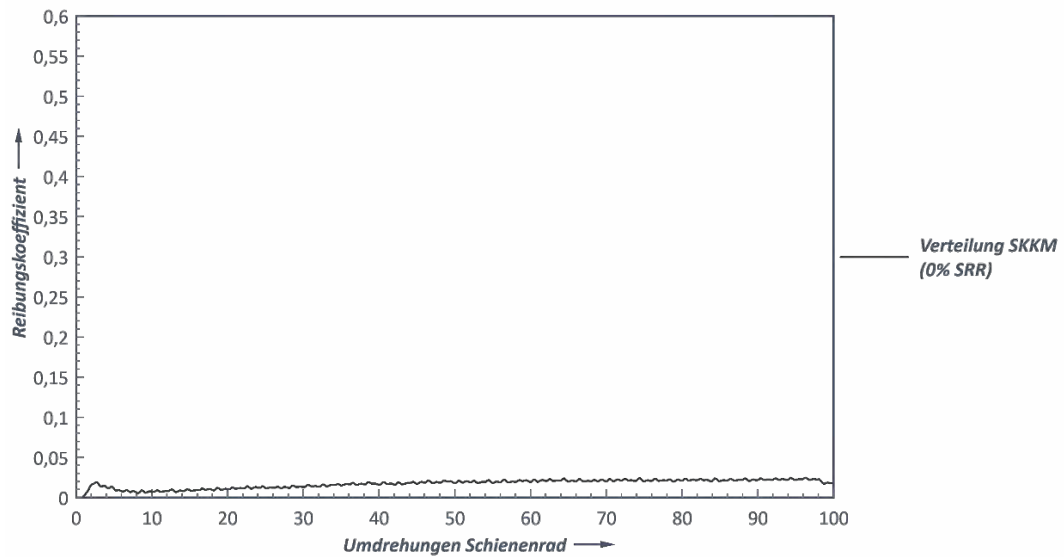


Abbildung 45: Hochlast-ZST: Verteilung des SKKM – charakteristischer Verlauf (0 % SRR)

Nach der Verteilungsphase wurde ein Schlupf von 2 % eingestellt. Dabei wurde die Antriebswelle des Probenrades konstant verzögert. Die genaue Drehzahl des Probenrades war von den abgemessenen Probenkörperdurchmessern abhängig. Die Drehzahlen, der Schlupf und die Radlast wurden während des gesamten Versuchs konstant gehalten. Der Versuch galt als beendet, wenn ein Reibungskoeffizient μ von mindestens 0,45 oder höher erreicht worden ist. Ab diesem Zeitpunkt wurde der im Zuge dieser Arbeit relevante Bereich für den Einfluss von SKKM auf den Reibungskoeffizienten verlassen. Abbildung 46 zeigt einen charakteristischen Verlauf des Reibungskoeffizienten während eines Versuchs mit SKKM. Beim Erreichen von $\mu = 0,45$ bis 0,48 wurde der Versuch beendet.

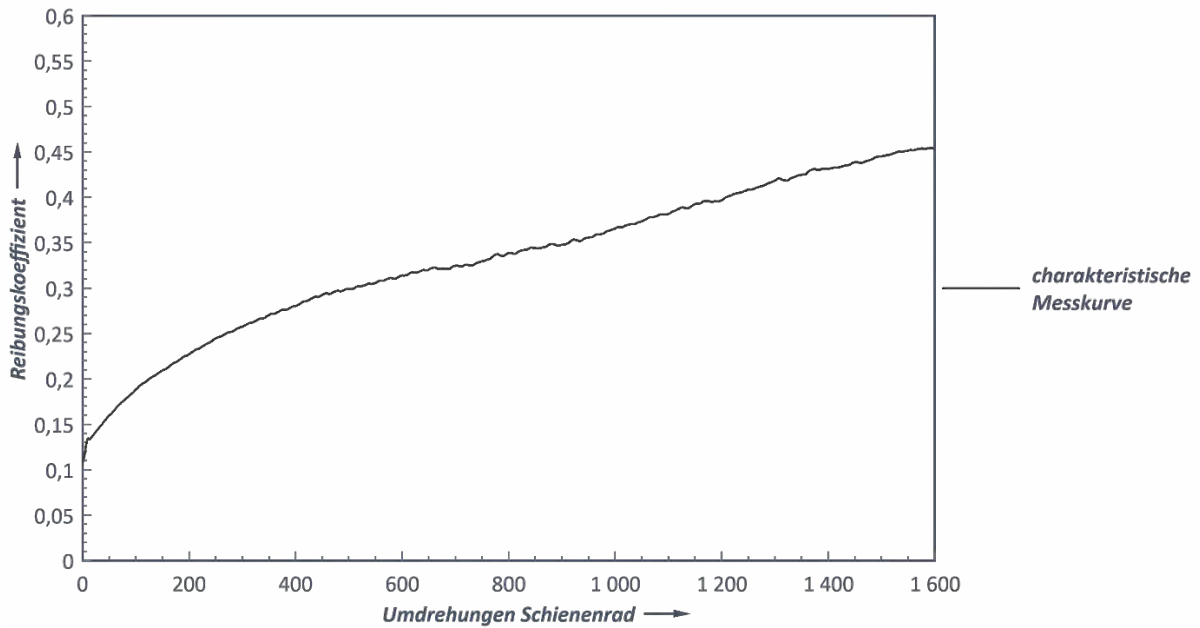


Abbildung 46: Hochlast-ZST: Reibungskoeffizient bei einem Versuch mit SKKM – charakteristische Messkurve (2 % SRR)

In Tabelle 23 sind alle relevanten Testparameter nochmals zusammengefasst.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Durchmesser Probenrad	mm	130
Durchmesser Schienenrad	mm	64
Breite des Kontaktbandes	mm	4
Umfangsgeschwindigkeit	m/s	~0,33
Radlast	N	1890
Kontaktform	-	Linienkontakt
Max. Flächenpressung	N/mm ²	849
Schlupf	%	2
Reibungskoeffizient für Versuchende	-	min. 0,4

Tabelle 23: Hochlast-ZST – Testparameter

Nach der Einlaufphase (den ersten 100 U mit 0 % Schlupf) und auch nach dem Versuch ist eine Verdrängung des SKKM ersichtlich, siehe Abbildung 47.

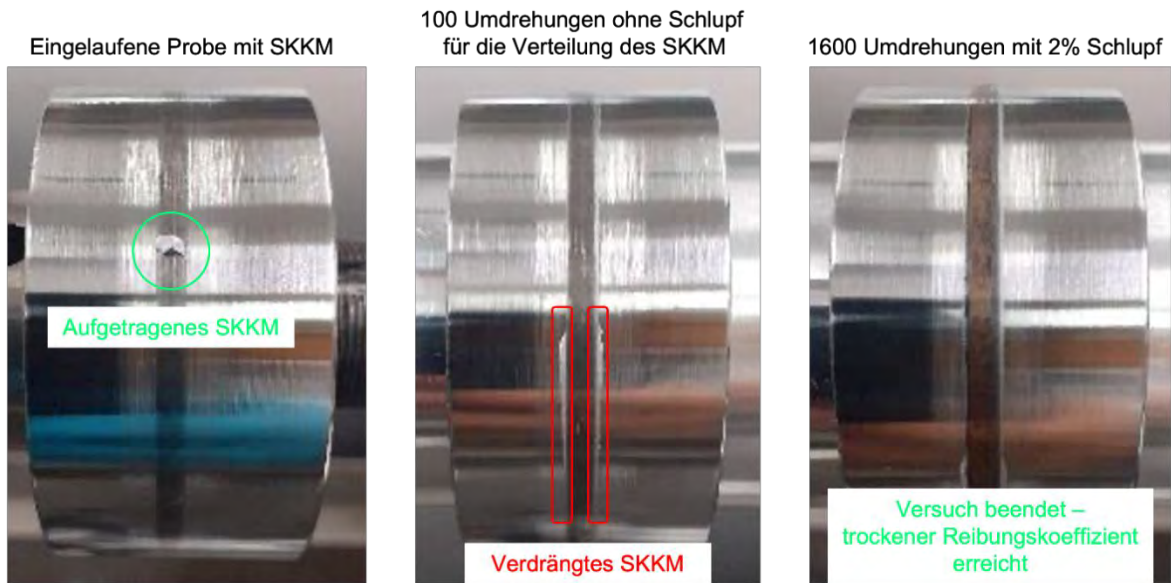


Abbildung 47: Hochlast-ZST: Versuchsdurchführung mit SKKM

Am Hochlast-ZST wurde eine Testzelle entwickelt, um Versuche mit Wasser und Heiz- bzw. Kühlversuche durchzuführen.

Bei den Versuchen mit Wasser wurde für die gesamte Versuchsdauer ein konstanter Sprühnebel primär auf das Schienenrad aufgebracht, siehe Abbildung 48 links. Der Sprühnebel wurde so eingestellt, dass sich ein Wasserkeil vor dem Kontakt aufbauen konnte, so wie dies auch im Feld bei Regen zu beobachten ist, siehe Abbildung 48 rechts.



Abbildung 48: Hochlast-ZST – Wasseraufbringung (links), Wasserkeil vor dem Kontakt bei reduziertem Sprühnebel (rechts)

Im Rahmen des Projektes „SafeRail“ wurde ebenfalls der Einfluss der Temperatur auf die Wirkung von SKKM untersucht. Die Analyse des Tribosystems „Rad-Schiene“ bei realen Gegebenheiten (Tabelle 13) hat gezeigt, dass Schienen und Weichen im Sommer durch das

Einwirken von Sonnenstrahlen Oberflächentemperaturen bis zu +70 °C erreichen können. Für eine Simulation von winterlichen Bedingungen waren Versuchstemperaturen bei -20 °C am Hochlast-ZST geplant. Ob eine Temperaturveränderung Auswirkungen auf den Reibungskoeffizienten oder die Ergiebigkeit der SKKM hat, sollen Hitze- und Kälteversuche am Tribometer zeigen.

Für die Durchführung der Versuche wurde eine Methode zur Erwärmung der Proben entwickelt, siehe Abbildung 49. Mithilfe eines Heißluftföhns wurde das Schienenrad und die dazugehörige Antriebswelle auf +60 °C erwärmt. Über die Temperatursteuerung des Heißluftföhns konnte die Oberflächentemperatur des Schienenrades während des Versuchs konstant gehalten werden. Das Probenrad wurde indes dabei von einem seitlich platzierten Föhn gekühlt und hatte eine Temperatur von etwa 35 °C.

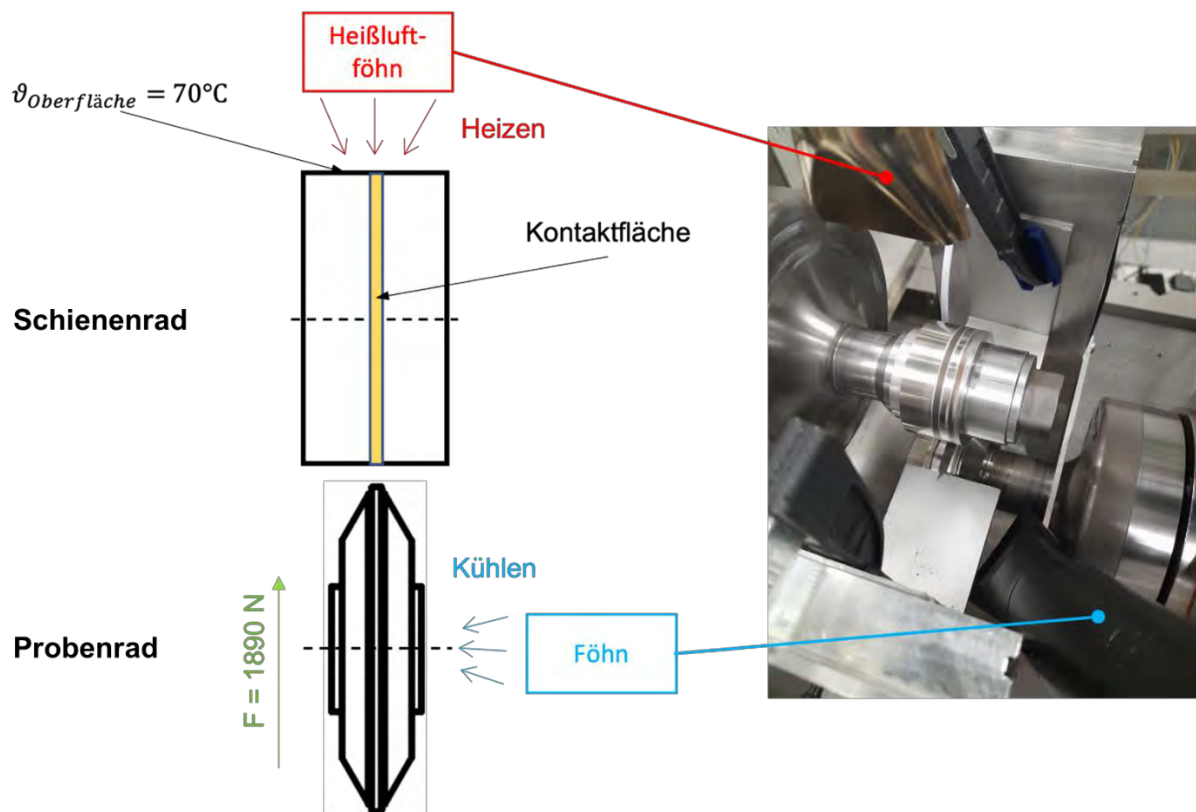


Abbildung 49: Hochlast-ZST – Aufbau Hitzeversuch

Für die Simulation von winterlichen Bedingungen wird nachfolgend eine Kühlmethode aufgezeigt, mit der Versuche bis -20 °C am Hochlast-ZST realisierbar sind. Für die Ausführung der Versuche müssen folgende zwei Punkte beachtet werden:

- Um ein Vereisen der Proben zu verhindern, darf beim Abkühlen der Proben und während des Versuches die Luftfeuchtigkeit einen Wert von etwa 9 % nicht übersteigen.
- Als Kältemittel soll Sauerstoff und/oder Stickstoff eingesetzt werden. Andernfalls können chemische Beeinflussungen zwischen dem Umgebungsmedium und den SKKM nicht ausgeschlossen werden.

Das Erreichen und Halten solch niedriger Temperaturen stellt eine besondere Herausforderung dar, zumal das SKKM aufgetragen werden muss und nicht von der Kontaktfläche verstrichen werden darf.

Für die allgemeine Versuchsdurchführung am Hochlast-ZST wurde aus Sicherheitsgründen eine Gehäusebox konstruiert und gefertigt. Durch eine Modifizierung der Gehäusebox konnte ein beinahe abgetrenntes und geschlossenes System für die Kälteversuche realisiert werden, siehe Abbildung 50. Die in Orange gekennzeichneten Teile wurden aus Styrodurplatten gefertigt. Die Platten konnten leicht an die benötigte Geometrie angepasst werden und bieten eine deutlich bessere Wärmeisolierung als Aluminium oder Stahl. Im Vergleich zu Styroporplatten weist Styrodur eine wesentlich geringere Wasseraufnahme auf. Für einen geringeren Luftaustausch mit der Umgebung, somit der Unterbindung von Eisbildung, wurden alle kleinen Öffnungen abgedeckt.

Der Versuchsablauf der Kühlversuche setzte sich primär aus drei Schritten zusammen. Die vorgestellte Methode wurde sukzessiv durch experimentelles Testen angepasst und verbessert.

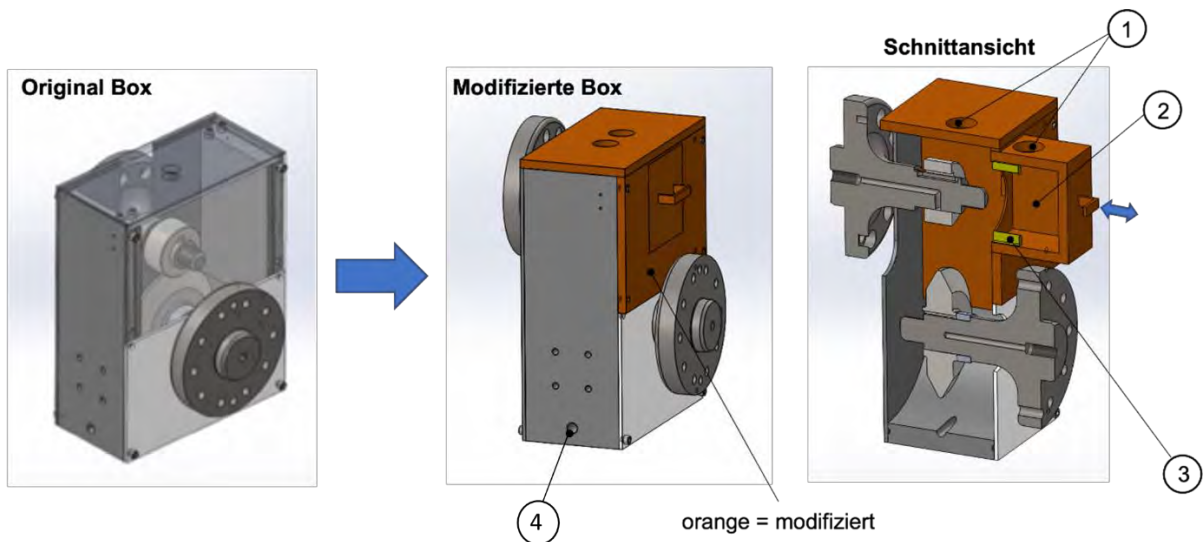
Schritt Eins – Vorbereitung

Als erstes erfolgt der Einbau der Gehäusebox und die standardisierte Aufbringungsweise des SKKM auf dem Schienenrad. Die Probekörper in der Kältekammer (2) befinden sich in eingefahrenem Zustand. Über eine Öffnung an der linken Seite (4) wird die Gehäusebox mit synthetischer Luft gespült (siehe Abbildung 50). Dadurch wurde die Luftfeuchtigkeit in der Gehäusebox unter 9 % gehalten.

Schritt Zwei – Abkühlen des Systems

Nach den Vorbereitungsarbeiten (*Schritt eins*) wird mit dem Abkühlen der Antriebswelle und des darauf aufgesetzten Schienenrads begonnen. Dieser Schritt ist besonders wichtig, damit eine möglichst geringe Wärmeübertragung zwischen der Antriebswelle und der aufgesetzten Scheibe stattfindet. Für das Abkühlen des Systems wird über die Einfüllöffnungen (1) an der

Oberseite Trockeneis in die Kältekammer (2) gefüllt. Die mit der Kältekammer fest verbundenen Führungen (3) schützen dabei das aufgetragene SKKM am Schienenrad vor direktem Kontakt mit dem Trockeneis (siehe Abbildung 50). Nach dem die Kältekammer gefüllt wurde, werden die Einfülllöcher verschlossen. Anschließend wird gewartet, bis sich die Antriebswelle und das Schienenrad auf mindestens -20 °C abgekühlt haben. Danach wird die Kältekammer langsam bis zu einem Anschlag herausgezogen und gesichert. Mit der mit Trockeneis gefüllten Kältekammer entsteht eine Kühlquelle für die Temperaturerhaltung der Luft in der Gehäusebox während eines Versuches. Zusätzlich wird eine Stickstoffflasche angeschlossen. Der durch die Expansion kühle Stickstoff fungiert als zusätzliches Kühlmedium für das Schienenrad.



**Abbildung 50: Hochlast-ZST – Gehäusebox für Kälteversuche;
(1) Einfüllöffnungen, (2) Kältekammer, (3) Führungen der Kältekammer,
(4) Zufuhr von Spülgas**

Schritt Drei – Versuchsdurchführung

Nach einer Kontrolle der geforderten Temperatur und Luftfeuchtigkeit kann mit der Versuchsdurchführung gestartet werden.

Abbildung 51 zeigt die modifizierte Gehäusebox am Teststand aufgebaut und ein vereistes Schienenrad nach einem Probekühlversuch bei normalen Umgebungsbedingungen bei über 30 % Luftfeuchtigkeit.

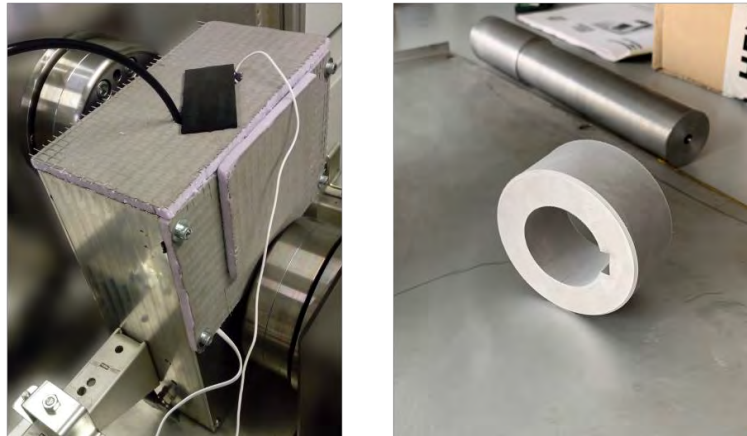


Abbildung 51: Modifizierte Gehäusebox (links) und vereistes Schienenrad (rechts)

7.3.2. Rad-Schiene-Teststand

Der Rad-Schiene-Teststand wurde an der TU Wien entworfen, um das Laufverhalten von Kranlaufräder genauer zu betrachten. Im Zuge des Forschungsprojekts wurde die Geometrie des kleinen Rades an ein S1002-Profil⁹² angepasst. Das zweite, größere Rad bestand aus einer zu einem Kreisring gebogenen Schiene mit einem Durchmesser von 1993 *mm*, welches auf einem großen Rad aufgezogen wurde (Pressverbindung). Auf dem Kreisring wurde die Kopfform basierend auf einer 1:40 geneigten 49E1-Schiene⁹¹ gefertigt.

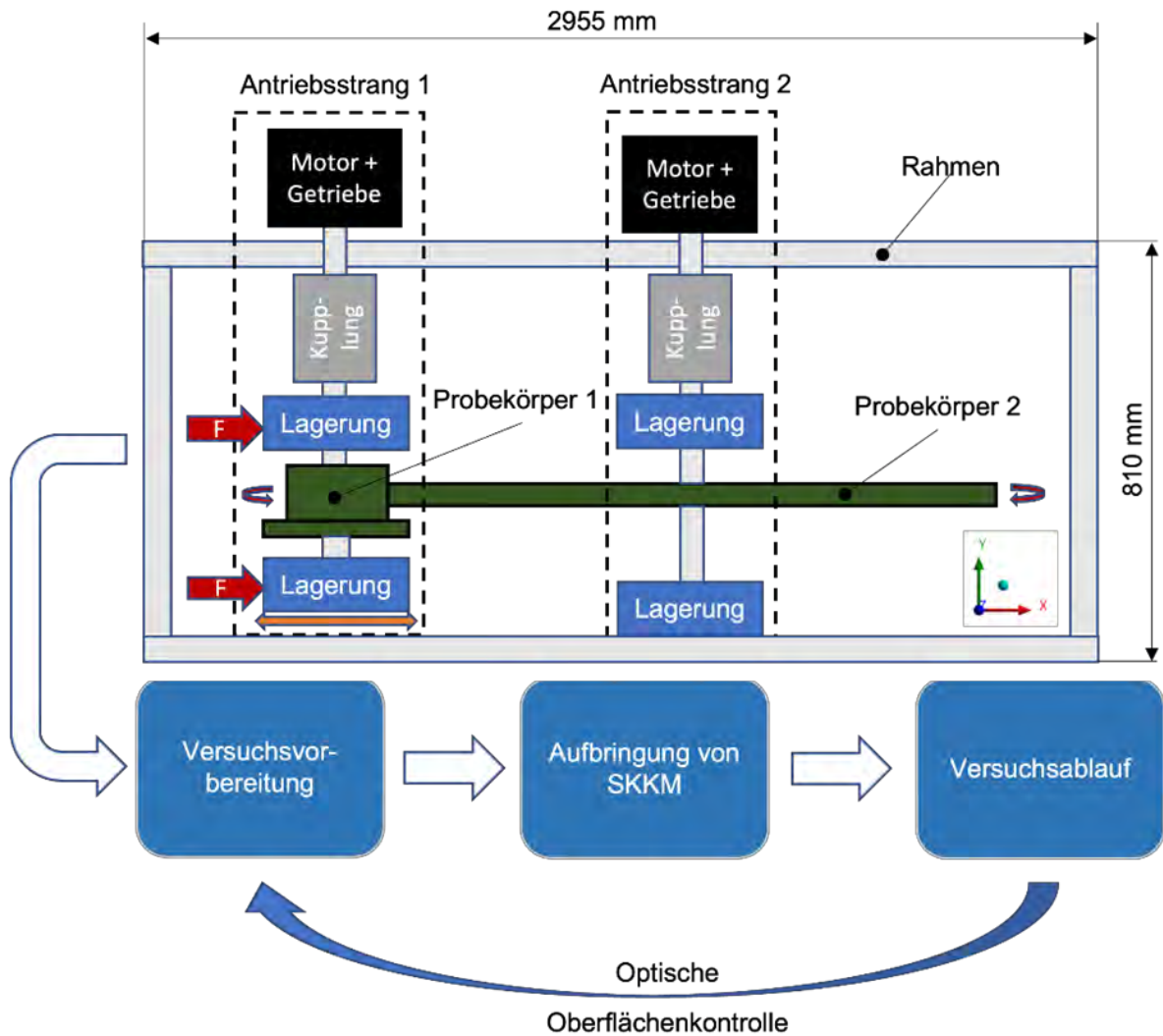


Abbildung 52: Rad-Schiene-Teststand an der TU Wien und Arbeitsschritte

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise des Rad-Schiene-Teststandes erläutert, siehe Abbildung 52. Für genauere Informationen und den eingebauten Komponenten wird z.B. auf die Arbeit von Malouvier⁹⁵ verwiesen. Das kleine Rad (Probekörper 1), welches folgend als Probenrad bezeichnet wird und das große Rad (Probekörper 2), welches folgend nur noch als Schienenrad bezeichnet wird, wurden über einzeln ansteuerbare Motoren angetrieben. Über eingebaute Inkrementalgeber in jedem Motor konnten die zurückgelegten Umdrehungen für jede Messung erfasst und aufgezeichnet werden. Für die Bestimmung der absoluten Winkelposition des Probenrades ist ein Absolutwertgeber direkt am Probenrad verbaut.

⁹⁵ P. Malouvier, Bericht Inbetriebnahme Laufradprüfstand, Technische Universität Wien, 2016

Über zwei Hydraulikzylinder kann eine Radlast bis 200 kN aufgebracht werden. Dabei wird das in der x-Achse verschiebbare Probenrad gegen das festsitzende Schienenrad gedrückt. Für die Regelung der Radialkraft wird der Hydraulikdruck mittels Drucksensoren gemessen und die Kraft über die Querschnittsfläche der Zylinder bestimmt. Der Teststand verfügt ebenfalls eine Möglichkeit Axialkräfte aufzubringen, diese Funktion wurde jedoch im Zuge des Projekts nicht benötigt. Alle Zylinder werden über ein Hydraulikaggregat mit Drucksensoren, Druckspeichern und Ventilblock mit Öl versorgt. Die jeweils auftretenden Momente je Seite werden mithilfe von Kraftaufnehmern an der Drehmomentstütze des Schienenradantriebs und an der Drehmomentstütze des Probenradantriebs gemessen.

Im Zuge des Projekts wurde der Teststand mit einem automatischen 2-Achs-Kreuztisch und einem Querschlitzen einer Drehmaschine ausgerüstet. Diese Adaptionen ermöglichten die Nachbearbeitung beide Räder direkt am Teststand.

Die Signale der Sensoren wurden von der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und LabVIEW verarbeitet. Die Steuerung erfolgte über einen angeschlossenen PC, wo auch alle relevanten Systemdaten zur Überwachung des Teststandes übersichtlich dargestellt sind. Durch die indirekte Vorgabe unterschiedlicher Drehzahlen wurde der gewünschte Schlupf eingestellt. Durch die Zu- bzw. Wegnahme der Leistung je Antrieb wurde während des Betriebs auf Roll- und Schlupfbetrieb hin- und hergeschaltet werden.

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mithilfe von LabVIEW mit einer Abtastrate von 100 Hz:

- Radlast: F_R
- Drehmoment Probenrad: M_{Prob}
- Drehmoment Schienenrad: $M_{Schiene}$
- Winkel (Position) Probenrad: φ_{Prob}
- Winkel (Position) Schienenrad: $\varphi_{Schiene}$

Für die genaue Dokumentation der vorherrschenden Umgebungsbedingungen wurde das Hygrometer *testo 608-H1* für die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit eingesetzt, der neben dem Teststand platziert wurde. Für jeden Versuch wurden folgende Daten dokumentiert:

- Relative Luftfeuchtigkeit
- Umgebungstemperatur
- Reinigung, optische Beurteilung des Kontaktbandes
- Breite des Kontaktbandes
- Aufgebrachte Menge an SKKM
- Probenraddurchmesser: d_{Prob}
- Schienenraddurchmesser: $d_{Schiene}$

Um den Einfluss der verschiedenen SKKM auf das Reibverhalten richtig zu beurteilen, wurden aus den aufgezeichneten Daten folgende Größen berechnet:

- Reibungskoeffizient
- Schlupf

Im Zuge eines Vorprojektes von Zechner¹ wurde eine Methode für die Reproduzierbarkeit von Versuchen am Rad-Schiene-Teststand entwickelt. Die Versuche haben gezeigt, dass bei einem S1002-Radprofil⁹² und einem 49E1-Schienenprofil⁹¹ (Neigung 1:40) mit einer Belastung von $F_R = 15 - 25 \text{ kN}$ und einem durchgehenden Schlupf von 2 % sehr großer Verschleiß bzw. Oberflächenbeschädigungen entstanden sind, siehe Abbildung 53. Die Auswirkungen decken sich mit den Schlussfolgerungen aus den Berechnungsergebnissen. Daher wurde die Belastung reduziert und kein durchgehender Schlupf gefahren. Dadurch waren mehrere Versuche bei möglichst gleichen Bedingungen möglich und stellten einen guten Kompromiss zwischen Vergleich- und Reproduzierbarkeit dar.

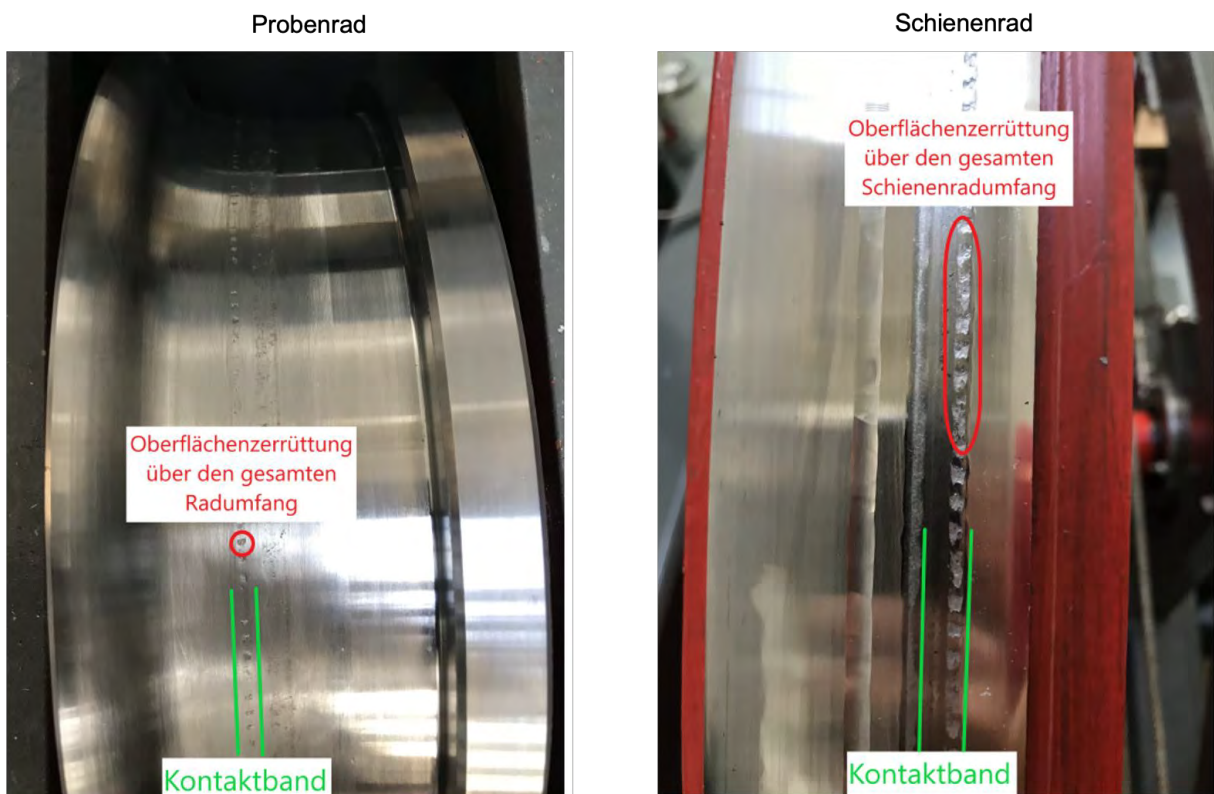


Abbildung 53: Oberflächenschäden nach Dauerversuchen am Rad-Schiene-Teststand⁹²

Abbildung 31 in Kapitel 7.2.2 zeigt die Anpassung des S1002-Radprofils⁹² an eine zylindrische Oberfläche mit den wichtigsten Abmessungen. Mithilfe der beiden Abdrehvorrichtungen – eine

für das Schienenrad und eine für das Probenrad – konnten die Probekörper bei Verschleißerscheinungen an der Oberfläche ohne Ein-/Ausbauarbeiten direkt am Teststand nachgedreht werden. Bei beiden Rädern ist nach dem Abdrehen von einem Oberflächenmittenrauwert im Bereich von $R_a = 1 - 2 \mu\text{m}$ auszugehen, dies entspricht der spanenden Bearbeitung des Plan-/Längsdrehens.

Als Werkstoff ist am Probenrad der legierte Vergütungsstahl 34CrNiMo6 mit einer Härte im Bereich von 240 bis 265 *HB* laut Prüfprotokoll zum Einsatz gekommen. Der Härtegrad des Probenrads ist somit ähnlich zu den Härtewerten der Räder ER7 im Feld, siehe Tabelle 21. Das zu einem Kreisring gebogene Schienenrad hingegen war aus dem Schienenstahl R260 und entspricht dem im Feld eingesetzten Werkstoff, siehe Tabelle 22.

Damit möglich auftretende plastische Deformationen im Kontaktbereich vor den eigentlichen Messungen stattfinden konnten, wurde eine Einlaufphase nach dem Abdrehen beider Scheiben definiert. Dabei wurde der Teststand eine gewisse Anzahl an Umdrehungen eingefahren, bis sich ein konstanter Reibungskoeffizient und eine nahezu konstantes Kontaktband eingestellt hat. Grundsätzlich wurde zwischen zwei Phasen unterschieden:

- In Phase 1 wurden bei einer Radlast von $F_R = 15 \text{ kN}$ und 0 % Schlupf die neu profilierten Räder 6.000 *U* mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 4,3 *m/s* eingefahren. Dabei wurde das Schienenrad über das Probenrad angetrieben. Nach 6.000 *U* resultierte ein Kontaktband mit einer Breite von $\sim 5,5 \text{ mm}$, was gut im Bereich der FE-Simulation ($\sim 5,4 \text{ mm}$) liegt.
- In Phase 2 des Einfahrvorganges wurden die Räder anschließend mit gleicher Belastung und Umfangsgeschwindigkeit 6000 *U* betrieben. Um mögliche Auswirkungen des Schlupfes auf Oberflächenänderungen zu berücksichtigen, wurde von Beginn an bis 3.500 *U* alle 500 *U* ein Schlupf von 0,2 % für eine Dauer von 50 *U* aufgebracht. Anschließend wurden alle weiteren 500 *U* ein Schlupf von 2 % aufgebracht bis 6.000 *U* erreicht worden sind. Optisch konnte man mit steigender Anzahl der Zyklen mit 2 % Schlupf ein Aufräuen der Oberflächen von Proben- und Schienenrad erkennen.

Abbildung 54 zeigt den gerade beschriebenen Einlaufvorgang im Bereich von 2.400 bis 5.800 *U*. Am Ende der Einlaufphase wurde bei trockenen Kontaktbedingungen und 2 % Schlupf ein Reibungskoeffizient μ von etwa 0,38 bis 0,40 erreicht. Dieser Wert diente als Referenzwert für spätere Vergleiche.

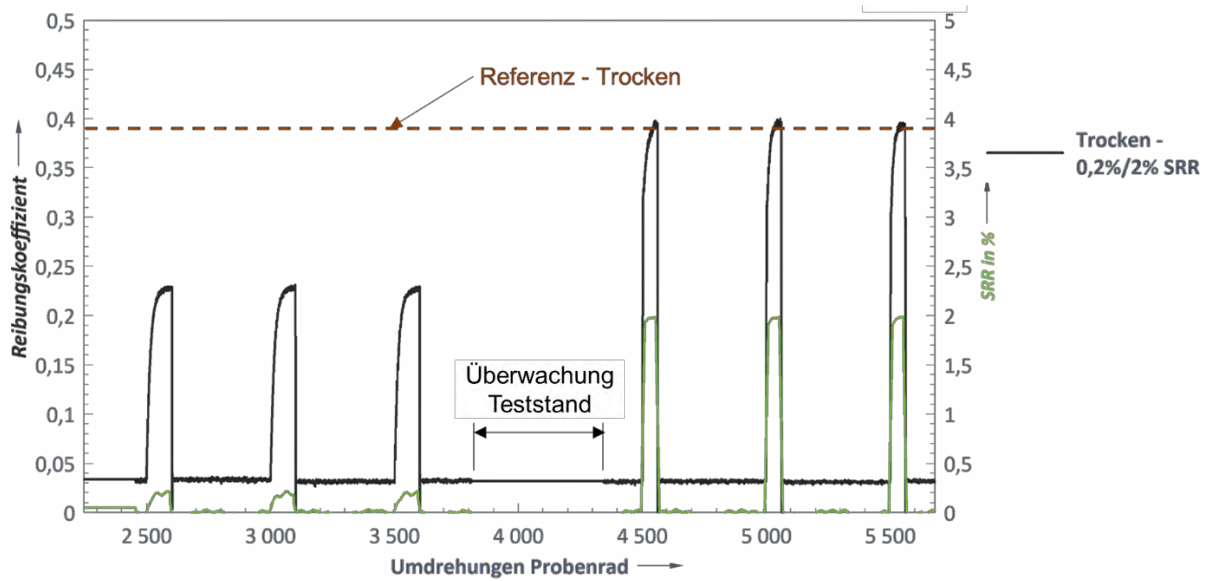


Abbildung 54: Rad-Schiene-Teststand: Trocken – Referenz

Nach dem Einfahren hatten beide Räder im Kontaktband, optisch bewertet, ungefähr dieselbe Oberflächenstruktur. Eine leichte Verbreiterung des Kontaktbandes wurde gemessen (ca. +0,2 mm). Wie bereits bei den Zweischeiben-Tribometern wurde für die Ermittlung der neu entstandenen Oberflächenbeschaffenheit im Kontaktband ein Zwei-Komponenten-Gemisch auf die Räder aufgetragen, siehe Abbildung 55.



Abbildung 55: Rad-Schiene-Teststand: Abdruck Probenrad

Über die Negativform des Abdrucks wurde mithilfe eines optischen 3D-Messsystems der Mittenrauwert quer zur Lauffläche vermessen und die Oberflächentopografie bestimmt. Nach

Auswertung des Probenrades, siehe Abbildung 56, wurde im Bereich 1 ein Mittenrauheit von $R_a = 1,2 \mu\text{m}$ festgestellt, welcher den Bereich außerhalb des Kontaktbandes widerspiegelt, wo die entstandenen Riefen durch das Nachdrehen des Probenrades sichtbar sind. Legt man den Fokus auf die Kontaktzone, so zeigt der grün gefärbte Bereich am Rande des Kontaktbandes eine glatte gleichmäßige Oberfläche. In der Mitte des Kontaktbandes (Bereich 2) sind Kuppen in unterschiedlichen Größen zu erkennen. Das Messprogramm hat hier eine Mittenrauheit von $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ ermittelt.

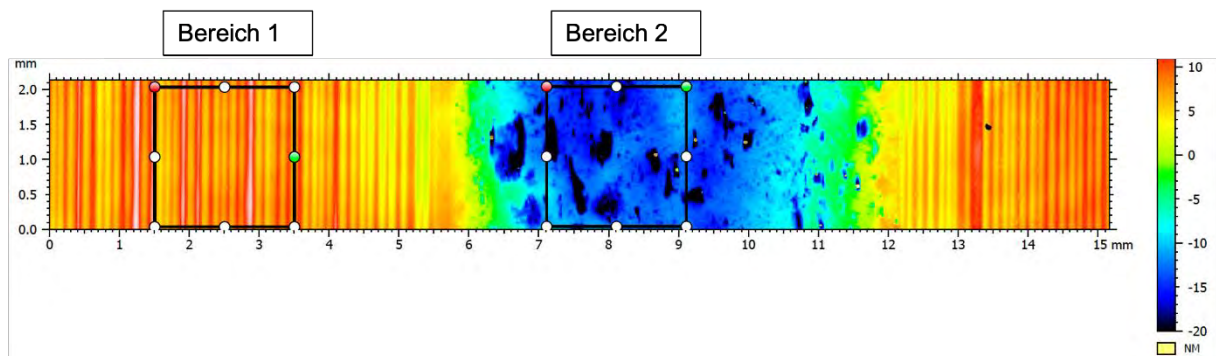


Abbildung 56: Oberflächenanalyse Probenrad

Die ersten Untersuchungen von SKKM mittels Aufsprühens haben gezeigt, dass am Rad-Schiene-Teststand der TU Wien der Verschleiß am Schienen- und Probenrad bei einem durchgehenden Schlupf von 2 % problematisch war, was am Feld deutlich geringer ist. Die aufgetretenen Schäden werden damit begründet, dass im Feld einem Triebdrehgestell mit gewissem Schlupf bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen in der Regel mehrere Laufdrehgestelle (je nach Zugfolge) folgen, die über die Schienen rollen. Nur beim Bremsen treten bei Laufdrehgestellen bestimmte Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Rad und Schiene auf. Zudem wird nicht ständig angetrieben oder gebremst, es kommt auch zu Phasen mit konstanter Geschwindigkeit, in denen nahezu kein Schlupf übertragen wird. Durch die zwischenzeitlich reinen Überrollungen werden Rad und Schiene im Kontaktbereich hinsichtlich Oberflächenspannungen weniger stark belastet.

Diese Erkenntnisse führten zu folgender Vorgehensweise bei Versuchen mit SKKM am Rad-Schiene-Teststand:

- Der Reibungskoeffizient wurde nur an bestimmten Punkten über die Anzahl der Überrollungen des Probenrades aufgenommen.
- Die ersten 50 U umfassten systembedingt für die Beschleunigung auf die Solldrehzahl „reines Rollen“.
- Nach 50 U wurde ein Schlupf von 2 % über 50 U lang eingestellt und danach wieder in reines Rollen überführt.

- Die nachfolgenden Messungen mit 2 % Schlupf wurden in Abständen von 500 U durchgeführt. Die Messintervalle wiesen eine Länge von 50 U auf.
- Eine Radlast von $F_R = 15 \text{ kN}$ wurde festgelegt.
- Die Versuche wurden spätestens nach 3.000 U bzw. 3.500 U beendet.
- Alle Versuche wurden mit 90 % der möglichen Antriebsleistung des Probenrades durchgeführt. Damit sollten Überhitzungen an den Antriebsmotoren verhindert werden. Daraus hat sich eine Probenraddrehzahl von 215 U/min ergeben, was einer Umfangsgeschwindigkeit von 4,3 m/s entspricht.

Alle Messdaten wurden über die gesamte Versuchsdauer dokumentiert. Der Reibungskoeffizient wurde in den Bereichen mit 2 % Schlupf ausgewertet. In Tabelle 24 sind alle relevanten Testparameter zusammengefasst.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Durchmesser Probenrad	mm	384
Durchmesser Schienenrad	mm	1993
Breite des Kontaktbandes	mm	~ 5,5 - 6,5
Umfangsgeschwindigkeit	m/s	~4,32
Anpresskraft	N	15 000
Kontaktform	-	Punktkontakt
Max. Flächenpressung	N/mm^2	1234
Schlupf	%	2
Umdrehungen bis Versuchsende	-	3000 - 3500

Tabelle 24: Rad-Schiene-Teststand – Testparameter

Bei den Versuchen mit Wasser wurde dieses über einen Sprühnebel mithilfe einer seitlich angebrachten Sprüheinrichtung, siehe Abbildung 57, aufgebracht.

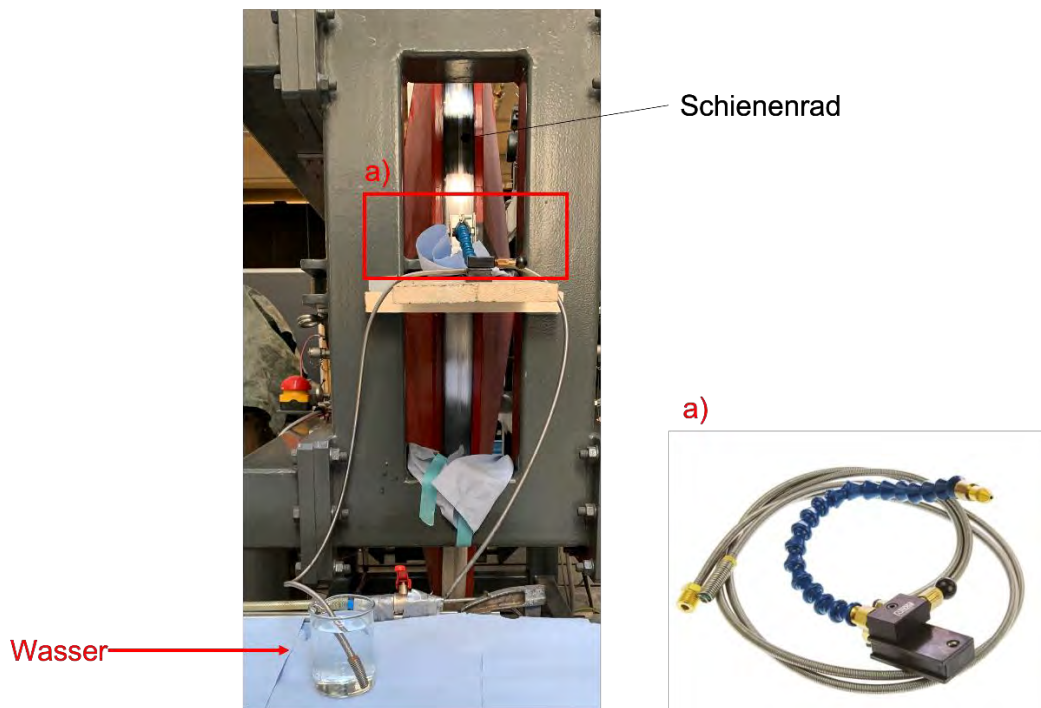


Abbildung 57: Wasserapplikation mittels Sprüheinrichtung (a) auf Schienenrad

7.3.3. Aufbringung von SKKM

Im Rahmen dieses Projektes wurden Aufbringungsmethoden der SKKM für das Hochlast-Zweischeiben-Tribometer, Rad-Schiene-Teststand und für die Feldversuche mit den folgenden Zielen entworfen:

- gleichmäßige Aufbringungsmethode
- Dokumentation der aufgetragenen Menge möglich
- Simulation einer Aufbringungsmethode, wie sie aktuell seitens der ÖBB über Applikationsleisten (Kapitel 3.4.2.1) eingesetzt wird (punktuelle Aufbringung)

Die punktweise Aufbringung von SKKM am Zweischeiben-Tribometer erfolgte mit einem Kunststoff-Spatel. Diese Aufbringungsmethode mit dem Kunststoff-Spatel war am Rad-Schiene-Teststand nahezu ident. Je nach aufgetragener Menge unterschied sich die Anzahl an Aufbringungspunkten von zwei bis vier pro Versuch. Mögliche Abweichungen bei den Verläufen der Reibungskoeffizienten könnten auch auf eine Ungenauigkeit der applizierten Menge hindeuten. Erste Vorversuche zeigten, dass eine Verdünnung des SKKM vorteilhaft war. Zu diesem Zweck wurde Petrolether 40 – 60 °C (Siedebereich 40 – 60 °C) als Lösemittel ausgewählt, das die Wirkung der SKKM nicht beeinflussen und vor Beginn des Versuches vollständig verdampfen sollte. Um ein vorzeitiges Entweichen des Petrolethers zu unterbinden, wurden die Mischungen in einer Glasflasche gelagert. Zwecks Aufbringens einer

repräsentativen Probe des SKKM-Lösemittel-Gemischs wurde dieses unmittelbar vor Aufbringen auf den jeweiligen Probekörper homogenisiert.

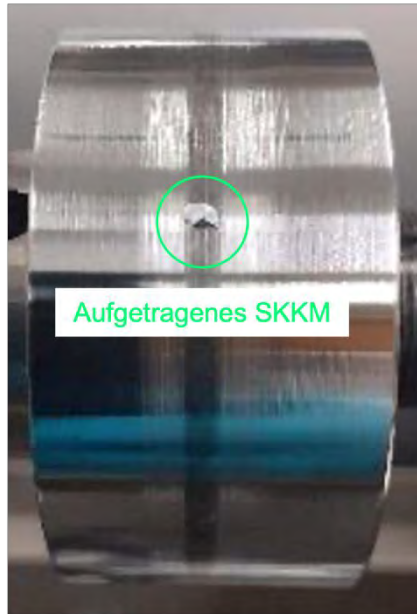


Abbildung 58: Aufbringung von SKKM am Hochlast-ZST (rechts)

Am Rad-Schienen-Teststand wurden zwei Aufbringungsverfahren entwickelt. Die erste Prozedur war identisch mit jener beim Zweischeiben-Tribometer. An zwei Punkten (180 ° versetzt) wurde das SKKM auf einen definierten Bereich mit der Länge von jeweils 30 mm und der Breite der Kontaktspur auf das Schienenrad aufgetragen, siehe Abbildung 59.



Abbildung 59: Applikation von SKKM am Schienenrad

Im Feld wird die Aufbringung des SKKM punktuell durchgeführt und durch die Räder weiter verteilt. Dadurch stellt sich nach zirka 2 bis 3 Wochen ein kontinuierlicher Schmierfilm auf der Schiene ein. Dies soll auch am Rad-Schienen-Teststand realisiert werden. Die zweite Prozedur ist demgemäß ein kontinuierliches Aufsprühen von SKKM auf den ganzen Umfang der Schiene mittels Sprühvorrichtung, siehe Abbildung 60.



Abbildung 60: Sprühvorrichtung für den Rad-Schiene-Teststand und Feldversuche
 (1) magnetischer Ventilblock, (2) Ein/Aus-Schalter, (3) Druckluftversorgung,
 (4) Saugleitung, (5) Zuleitung, (6) verstellbare Düse

Dabei handelt es sich um eine mit Kaltdruckluft betätigte Kühlmittelsprühvorrichtung (1/4 Zoll, 2 Schläuche, 340 mm flexibler Schlauch), die im Allgemeinen zum Kühlmitteltransport beim Bohren und Schneiden verwendet wird. Die Vorrichtung besteht aus einem magnetischen Ventilblock (1) mit einem Ein/Aus-Schalter (2). Bei Betätigung des Schalters wird über die Druckluftversorgung (3) und den innersten Schlauch der Zuleitung (5) die Vorrichtung mit Druck beaufschlagt. Durch die verstellbare Düse (6) liegt durch den sogenannten Venturi-Effekt ein Unterdruck an der Saugleitung (4) an. Das SKKM wird dadurch angesaugt und über den äußeren Schlauch der Zuleitung zur Düse gefördert, anschließend mit der Luft vermischt und in den Kontaktbereich gesprüht.

SKKM haben eine höhere Viskosität und können daher nicht mit einfachen Mitteln durch die Sprühvorrichtung angesaugt, transportiert und versprüht werden. Als Alternative wurde eine Verdünnung der SKKM mit Lösemittel in Betracht gezogen, um das rheologische Verhalten zu verändern, d. h. die Viskosität zu reduzieren, und somit ein Aufsprühen des SKKM zu ermöglichen. Das Lösemittel darf dabei die Wirkung der SKKM nicht beeinflussen und soll vor Beginn des Versuches vollständig verdampfen. Zur Verdünnung der SKKM fiel die Wahl auf Petrolether 40 – 60 °C (Siedebereich 40 – 60 °C). Um ein vorzeitiges Entweichen des Petrolethers zu unterbinden, wurden die Mischungen in einer Glasflasche gelagert. Zwecks

Aufbringens einer repräsentativen Probe des SKKM-Lösemittel-Gemischs wurde dieses unmittelbar vor Aufbringen auf den jeweiligen Probekörper homogenisiert.

Am Linearteststand bei AC²T wurde kontrolliert, ob mit der Sprühvorrichtung das SKKM gleichmäßig entlang einer Strecke aufgesprüht werden kann. Dazu wurde das SKKM auf eine linear bewegte, weiße Platte gesprüht. Bei Betätigung der Sprühvorrichtung bzw. in den ersten Sekunden ist noch eine unregelmäßige Verteilung zu erkennen, da das SKKM angesaugt wird. Ist die Ansaugleitung einmal mit SKKM gefüllt, wird dieses konstant auf die Fläche gesprüht. Es stellt sich ein nahezu gleichmäßiges Band mit SKKM ein (siehe Abbildung 61). Aufgrund dieser Erkenntnis wird bei den Versuchen am Rad-Schiene-Teststand zu Beginn bei Betätigung der Sprühvorrichtung eine Abdeckung zwischen Düse und Schienenrad vorgehalten, bis die erwähnten Anfangsschwankungen nicht mehr auftreten. Danach wird die Abdeckung entfernt, der Umfang des Schienenrades konditioniert und die Sprühvorrichtung nach einer Umdrehung des Schienenrades abgeschaltet.



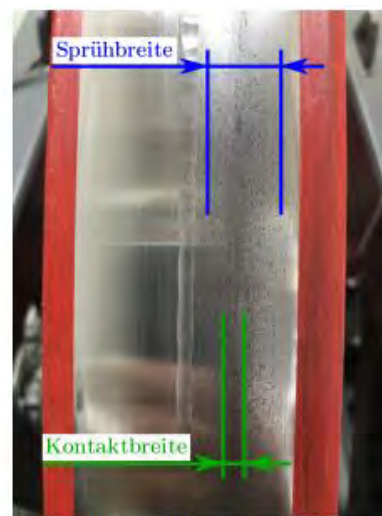
Abbildung 61: Sprühversuche am Linearteststand

Die Sprühvorrichtung wurde an der Seite, an der sich auch die Abdrehvorrichtung für das Schienenrad befindet, mittels einer Schraubzwinde am Rad-Schiene-Teststand befestigt (siehe Abbildung 62 a). Die Düse wurde so eingestellt, dass sie radial mit einem Abstand von 55 mm auf die Schienenoberfläche zeigt. In Abbildung 62 b ist das dazugehörige Sprühbild dargestellt. Das SKKM benetzt dabei das Schienenrad innerhalb und außerhalb des Kontaktbands. Um die Menge an SKKM im Kontaktband zu kontrollieren und damit auch einen besseren Vergleich zwischen den Rad-Schiene-Teststand der TU Wien und dem Zweischeiben-Tribometer von AC²T zu erhalten, wurde eine Blende an den Düsenkopf geschraubt (siehe Abbildung 62 c). In die Blende wurde eine 100 mm lange Nut (5 mm Breite) gefräst. Diese befindet sich im Abstand von 50 mm zur Düse. In Abbildung 62 d ist das

dazugehörige Sprühbild dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich damit nahezu das gesamte aufgetragene SKKM im Kontaktband befindet. Vor dem Aufsprühen wird die Radlast zwischen Probe- und Schienenrad weggenommen, sodass kein Kontakt zwischen den Rädern besteht. Damit kommt das Probenrad erst zu Versuchsbeginn mit dem aufgetragenen SKKM in Kontakt. Die Aufsprühbreite entspricht der Spurbreite während des Versuches. Die Reinigung des Probe- und Schienenrades nach jedem Versuch erfolgt mithilfe von in Ethanol getränkten Tüchern. Dabei wird mindestens drei Mal mit sauberem Papier über dieselbe Stelle gewischt, bis an den Tüchern optisch keine Verfärbung durch das vorangegangene SKKM zu erkennen ist.



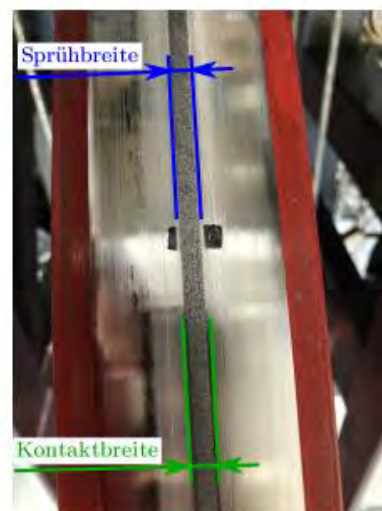
(a) Sprühvorrichtung ohne Blende



(b) Sprühbild ohne Blende



(c) Sprühvorrichtung mit Blende



(d) Sprühbild mit Blende

Abbildung 62: Sprühbilder der Aufsprühvorrichtung:
a) Sprühvorrichtung ohne Blende, b) Sprühbild ohne Blende,
c) Sprühvorrichtung mit Blende, d) Sprühbild mit Blende

7.4. Ergebnisse der Laborexperimente

7.4.1. Auswahl der SKKM

Die Auswahl der SKKM für die tribometrischen Laborexperimente erfolgte einerseits anhand der Kriterien des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens. Andererseits sollte eine gute Differenzierbarkeit zwischen den Produkten vorliegen, um die Anwendbarkeit der entwickelten Methoden auf verschiedene Produkte feststellen zu können. Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von drei SKKM bildeten daher folgende Aspekte:

- SKKM A schied nach den Untersuchungen zur Toxizität im mehrstufigen Beurteilungsverfahren aus.
- SKKM B ist das Referenzprodukt im Projekt.
- SKKM C ist SKKM B sehr ähnlich und wurde daher nicht weiter untersucht.
- SKKM D wurde trotz des hohen Metallanteils für die Laborexperimente ausgewählt, um eine Differenzierbarkeit der Produkte bezüglich der Zusammensetzung zu zeigen.
- SKKM E hat in den Stufen 1 und 2 des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens ein gutes Ranking gezeigt und wurde daher für die Laborexperimente ausgewählt.

In der Versuchsmatrix für die Laborexperimente am Tribometer und am Rad-Schiene-Teststand wurden daher folgende drei SKKM berücksichtigt:

- **SKKM B**
- **SKKM D**
- **SKKM E**

7.4.2. Hochlast-Zweischeiben-Tribometer

Mit den Untersuchungen am Hochlast-ZST als Kategorie V der Prüfkette wurde das Ziel verfolgt, das Reibverhalten ausgewählter SKKM zu bestimmen. Konkret wurde anhand der Messergebnisse der Einfluss von SKKM B, SKKM D und SKKM E auf das Reibverhalten im tribologischen Kontakt bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen beurteilt.

Die Versuchsmatrix am Hochlast-ZST in Tabelle 25 dargestellt, wobei die SKKM mit wenigen Ausnahmen in Petrolether verdünnt auf das Schienenrad aufgebracht wurden.

Der Reibungskoeffizient ergibt sich aus dem bekannten Raddurchmesser des Probenrades im Kontaktbereich d_{Prob} der eingestellten Radlast F_R und dem korrigierten Drehmoment des Probenrades M_{Prob} über das Coulombsche Reibungsgesetz nach Gleichung 27:

$$\mu = \frac{2 \cdot M_{Prob}}{d_{Prob} \cdot F_R} \quad 27$$

Der Schlupf wurde nach den Gleichungen 22 berechnet. Als Referenz wurde der Reibungskoeffizient bei trockenen Kontaktbedingungen herangezogen, der im Zuge des Einfahrens bestimmt wurde, siehe Kapitel 7.3.1. Dadurch ist eine Beurteilung möglich, inwiefern der Reibungskoeffizient durch die unterschiedliche Konditionierung durch SKKM und Umgebungsbedingungen beeinflusst wird.

Neben der Variation der SKKM-Menge (8 und 12 *mg*) wurden Versuche mit unterschiedlichem Schlupf (2 und 15 %), Normalkraft (1890 *N* und 2660 *N*), Temperatur (-20, -10, 23 und 60 °C) und Feuchtegrad (trocken, nass) durchgeführt. Als Referenz für das Verhalten von SKKM in Kombination mit Wasser wurden zunächst zwei Reibungskoeffizient-Messungen bei nassen Kontaktbedingungen jedoch ohne SKKM durchgeführt. Mit einer Ausnahme wurden zwei bis drei Wiederholversuche für jede Versuchsparameterkonfiguration bei möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt. Gewisse Abweichungen waren jedoch nicht auszuschließen, wie beispielsweise unterschiedliche Oberflächentopografien, Geometrieabweichungen, Abweichungen von den definierten Mengen sowie dem Tribometer zugrunde liegenden Ungenauigkeiten.

Probekörper- zustand	SKKM	Menge	Schlupf	Temperatur	Radlast	Umfangs- geschwindigkeit Probenrad	Versuchs- zahl
trocken	-	-	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B ^{a)}	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM D ^{a)}	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM E ^{a)}	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM B	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM D	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM E	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B	8 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM E	8 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B	12 mg	2%	23 °C	2660 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM D	12 mg	2%	23 °C	2660 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM E	12 mg	2%	23 °C	2660 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B	12 mg	15%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM D	12 mg	15%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM E	12 mg	15%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
trocken	SKKM B	12 mg	2%	60 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM D	12 mg	2%	60 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM E	12 mg	2%	60 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B	12 mg	2%	-10 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM D	12 mg	2%	-10 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM E	12 mg	2%	-10 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
trocken	SKKM B	12 mg	2%	-20 °C	1890 N	~0,33 m/s	1
nass	-	-	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
nass	SKKM B	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	3
nass	SKKM D	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2
nass	SKKM D	12 mg	2%	23 °C	1890 N	~0,33 m/s	2

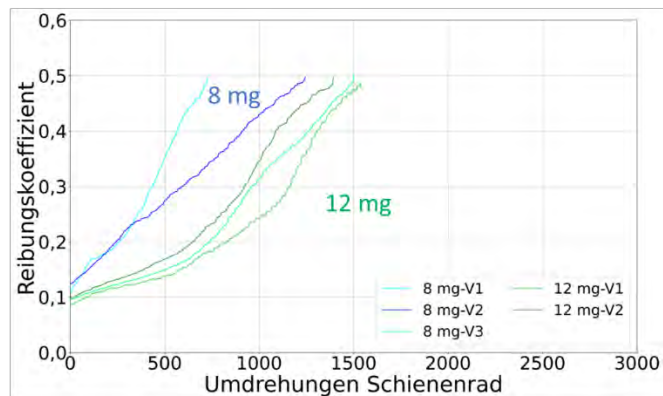
a) unverdünnt

**Tabelle 25: Hochlast-ZST – Versuchsmatrix;
SKKM B, SKKM D und SKKM E**

Als Referenz wurde im Rahmen des Einfahrens eine Reibungskoeffizient-Messung bei trockenen nicht konditionierten Kontaktbedingungen durchgeführt, siehe Kapitel 7.3.1. Dadurch ist eine Beurteilung möglich, inwiefern der Reibungskoeffizient durch die jeweilige Konditionierung beeinflusst wird. Im Anschluss folgten die Messungen mit konditioniertem Kontakt. Jeder Versuch wurde mit einem nachgedrehten Probekörperpaar durchgeführt. Während eines Versuches, insbesondere einem mit langer Versuchsdauer, zeigte sich eine leichte Änderung der Oberflächentopografie beider Probekörper. U.a. ist aus diesem Grund

eine gewisse Streuung bei den Wiederholungsversuchen zu erkennen. Die Breite der Kontaktfläche ist aufgrund der gewählten Probekörpergeometrie nahezu ident geblieben. Der Einfluss der Menge wurde für SKKM B und SKKM E bestimmt, siehe Abbildung 63. Durch die Reduzierung von 12 auf 8 mg (6 auf 4 Tropfen à 2 mg) wurde die Ergiebigkeit reduziert. Jedoch zeigen beide SKKM im Vergleich zueinander die gleichen Tendenzen: SKKM E zeigt auch mit 8 mg einen geringeren Reibungskoeffizienten und höhere Ergiebigkeit als SKKM B.

a) SKKM B



b) SKKM E

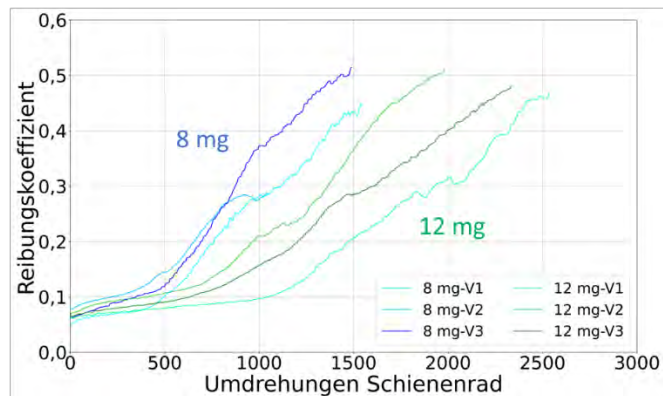


Abbildung 63: Variation der SKKM-Menge: Vergleich zwischen 8 und 12 mg SKKM, a) SKKM B, b) SKKM E

Der Einfluss der Normalkraft bzw. der Pressung auf das Reibungsverhalten wurde für SKKM E ermittelt, siehe Abbildung 64. Die Normalkraft wurde von 1890 N auf 2660 N erhöht, was eine Zunahme der Pressung von 850 MPa auf 1200 MPa entsprach. Bei SKKM E wurde eine geringere Ergiebigkeit bei höherer Pressung festgestellt. Dies deckt sich mit den Erfahrungen mit geschmierten Kontakten, wonach höhere Pressungen bei sonst gleichen Bedingungen das Hinausdrücken des Schmierstoffs aus dem Tribokontakt bewirken und aufgrund des resultierenden dünneren Schmierfilms eine höhere Reibung auftritt.

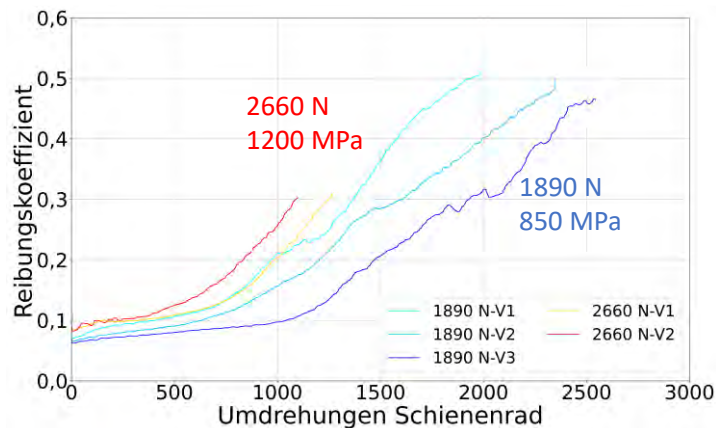


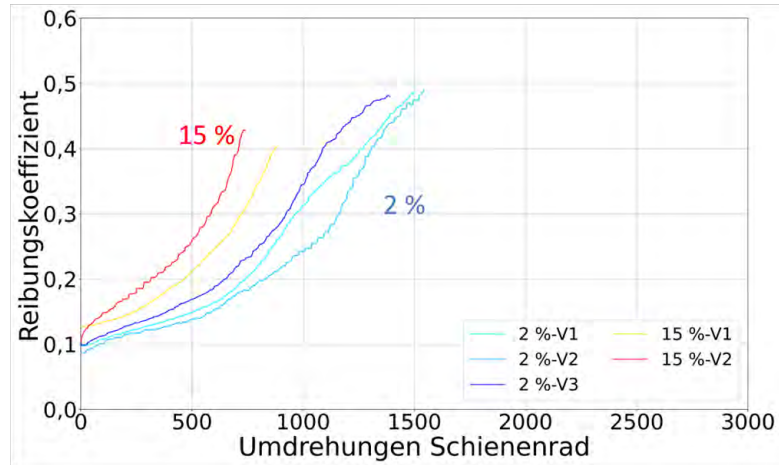
Abbildung 64: Variation der Pressung: Vergleich zwischen 850 MPa und 1200 MPa bei SKKM E

Bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen tritt ein deutlich höherer Schlupf als bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf. Der Einfluss des Schlupfes (2 und 15 %) auf den Verlauf des Reibungskoeffizienten für SKKM B, SKKM D und SKKM E ist in Abbildung 65 dargestellt. Bei allen ausgewählten SKKM ist die Ergiebigkeit deutlich verringert, wenn ein höherer Schlupf vorliegt. Wenn ein Reibungskoeffizient von 0,30 als Grenzwert für die Ergiebigkeit angenommen wird, ist etwa eine Halbierung der Ergiebigkeit bzw. Umdrehungen bis zum Erreichen des Grenzwertes festzustellen. Der für SKKM E typische knickartige Anstieg des Reibungskoeffizienten ist bei 15 % Schlupf noch deutlicher ausgeprägt als bei 2 %.

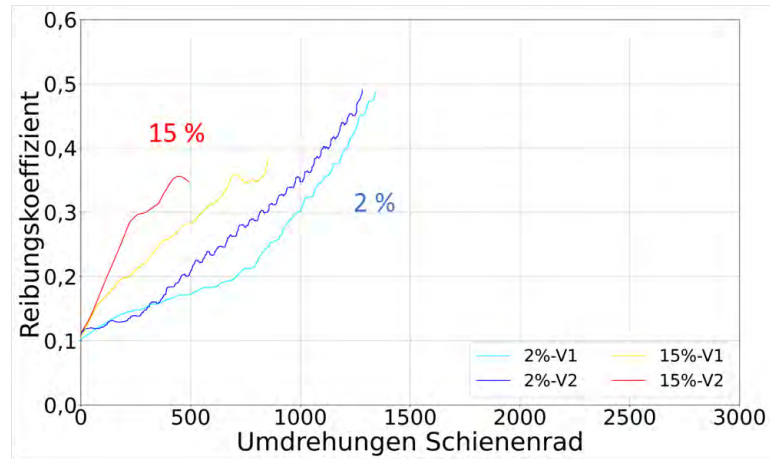
Die Jahreszeiten bedingen Schwankungen der Umgebungstemperatur. Dies bedeutet, dass die Schiene im Sommer eine Temperatur bis zu 70 °C und im Winter bis zu -20 °C annehmen kann, siehe Tabelle 13. Dadurch ändern sich die rheologischen Eigenschaften von SKKM: bei tieferen Temperaturen ist eine deutliche Zunahme der Viskosität festzustellen, wohingegen bei höheren Temperaturen eine Abnahme der Viskosität auftritt. Das Wissen um den Einfluss von Temperaturschwankungen auf das tribologische Verhalten von SKKM im Rad-Schiene-Kontakt ist daher unerlässlich. In Abbildung 66 sind die Versuche von -20 °C bis +60 °C für die drei ausgewählten SKKM gegenübergestellt.

Die Viskositätsreduktion der SKKM durch höhere Temperaturen bedingt eine raschere Verdrängung des SKKM aus dem Rad-Schiene-Kontakt. Dies geht mit einer Reduktion der Ergiebigkeit einher, welche etwa einer Halbierung von 23 °C auf 60 °C entspricht. Bei tieferen Temperaturen bewirkt die höhere Viskosität des SKKM ein deutlich längeres Verbleiben im Kontakt. Bei den untersuchten tieferen Temperaturen von -10 °C und -20 °C verblieb der Reibungskoeffizient auf konstant niedrigem Niveau für die gesamte Versuchsdauer.

a) SKKM B



b) SKKM D



c) SKKM E

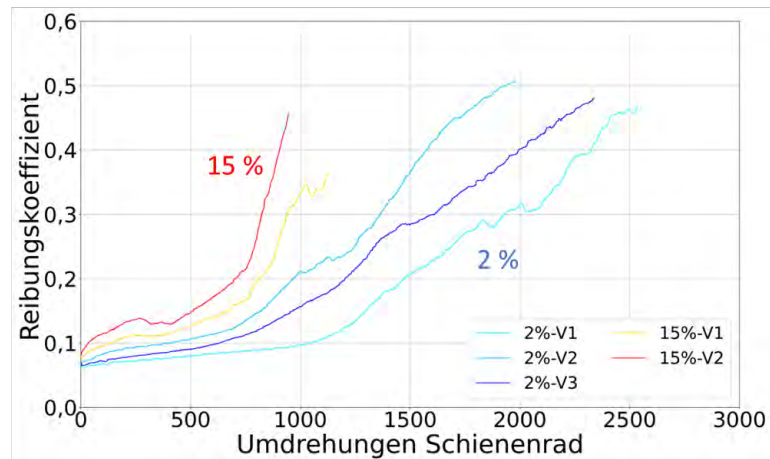
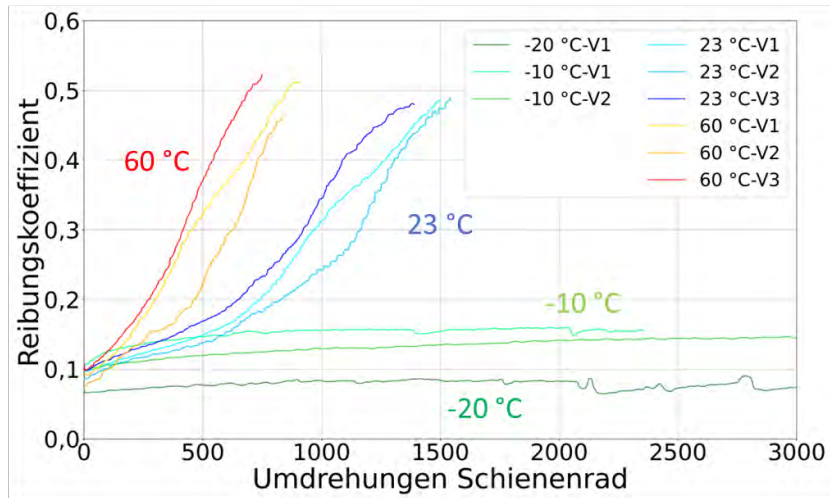
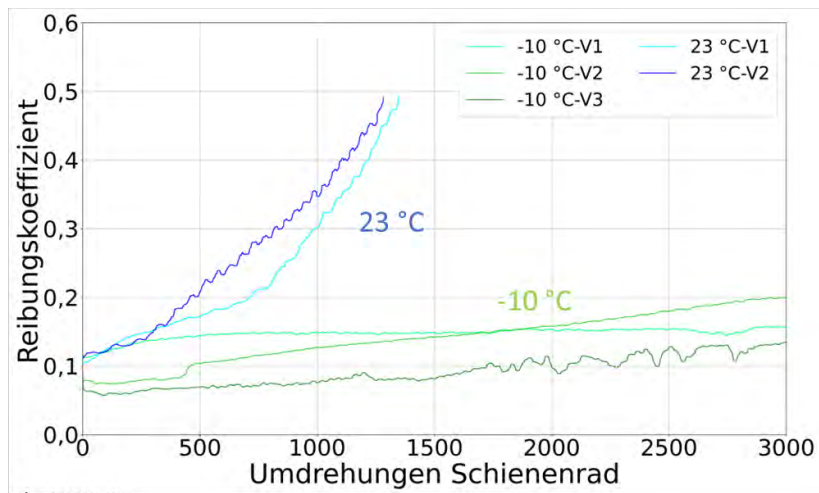


Abbildung 65: Variation des Schlupfes: Vergleich zwischen 2 und 15 % Schlupf, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E

a) SKKM B



b) SKKM D



c) SKKM E

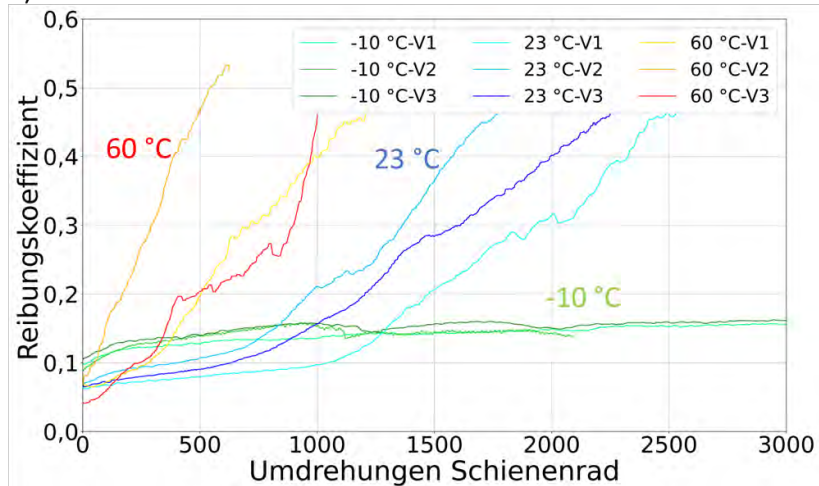


Abbildung 66: Variation der Temperatur: Vergleich zwischen -20, -10, 23 und 60 °C, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E

Des Weiteren wurden die Auswirkungen von Wasser untersucht. Als Referenz wurden zwei Reibungskoeffizient-Messungen bei nassen nicht konditionierten Kontaktbedingungen durchgeführt, siehe Abbildung 67. Durch den Wasserfilm an der Probekörper-Oberfläche liegt der Reibungskoeffizient ohne SKKM bei einem Wert von $\mu \sim 0,30$ und somit deutlich niedriger als im trockenen Zustand ($\mu = 0,45$). Als Referenzwert für den Kontakt im nassen Zustand wurde $\mu = 0,27$ angenommen.

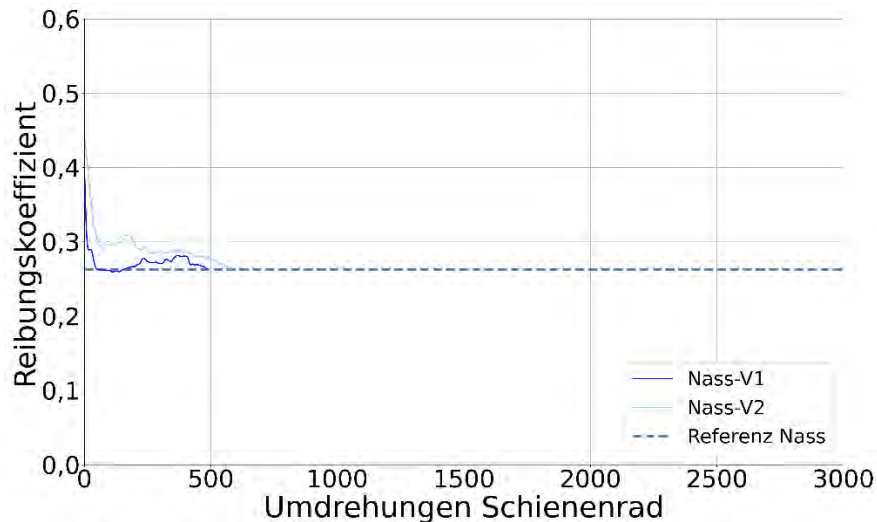
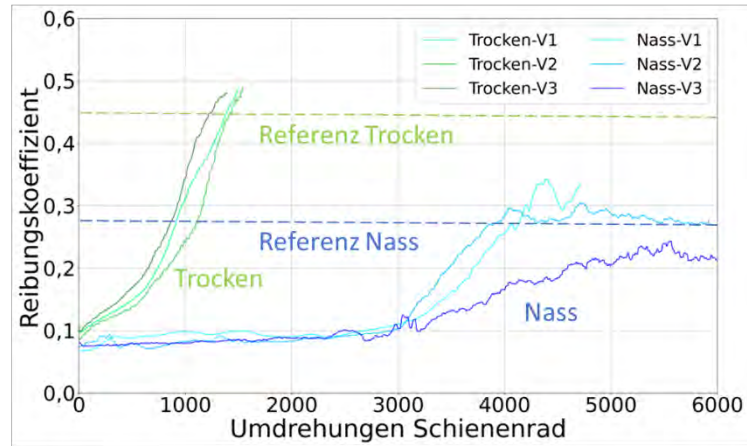


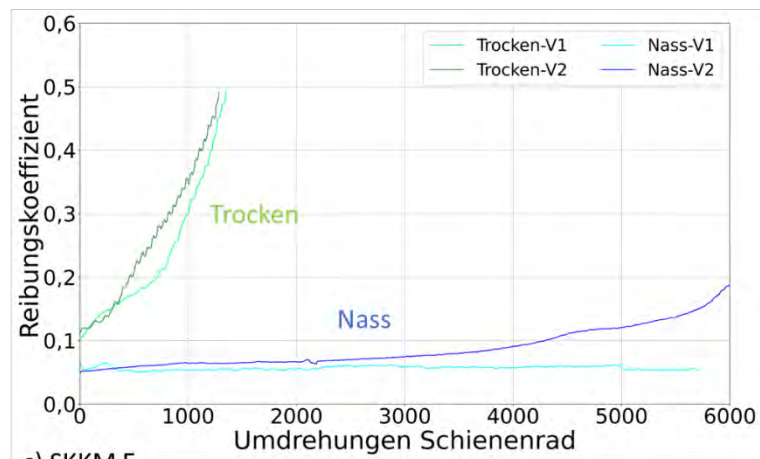
Abbildung 67: Referenzversuche mit Wasser

Alle Versuche mit SKKM B, SKKM D und SKKM E in Kombination mit Wasser zeigen zu Beginn einen Reibungskoeffizienten von $\mu \sim 0,10$, siehe Abbildung 68. Dieses niedrige Niveau wird mit SKKM B über eine Versuchsdauer von 3.000 U gehalten, bei den beiden anderen SKKM verbleibt dieses Niveau über die gesamte Versuchsdauer. Die Ergiebigkeit bis zum Erreichen des Referenzwertes $\mu = 0,27$ ist bei SKKM B deutlich höher als im trockenen Zustand mit einem Referenzwert von $\mu = 0,45$ (etwa 1.700 U versus 4.000 U). Mit SKKM D und SKKM E wird der Referenzwert innerhalb der Versuchsdauer nicht erreicht. Die Messergebnisse zeigen, dass SKKM in Kombination mit Wasser zu einem deutlich niedrigeren Reibungskoeffizienten führen, als wenn entweder SKKM oder Wasser im Kontakt vorhanden sind. Dies stellt ein Sicherheitsproblem dar, da u.U. auf konditionierten Streckenabschnitten bei Regenfall die Bremsweglängen nicht mehr eingehalten werden können.

a) SKKM B



b) SKKM D



c) SKKM E

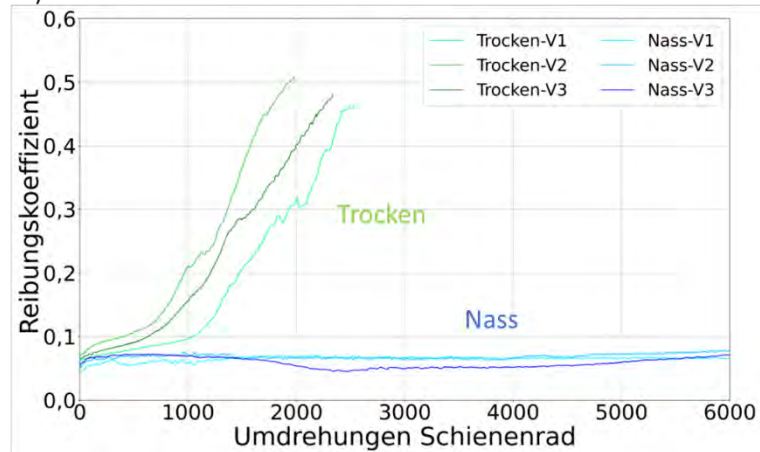


Abbildung 68: Vergleich zwischen trockenen und nassen Bedingungen, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E

Abbildung 69 zeigt abschließend den Vergleich der SKKM bei sonst gleichen Versuchsbedingungen. SKKM E ist durch einen stets niedrigeren Reibungskoeffizienten als SKKM B und SKKM D gekennzeichnet. Der Referenzwert für den trockenen Kontakt wird von SKKM E nach etwa 2.000 U erreicht, für die beiden anderen SKKM nach etwa 1.200 U . SKKM B und SKKM D zeigen schon beim Start höhere Reibungskoeffizienten und dann einen steileren Anstieg des Reibungskoeffizienten als SKKM E. Die Unterschiede zwischen SKKM B und SKKM D sind gering.

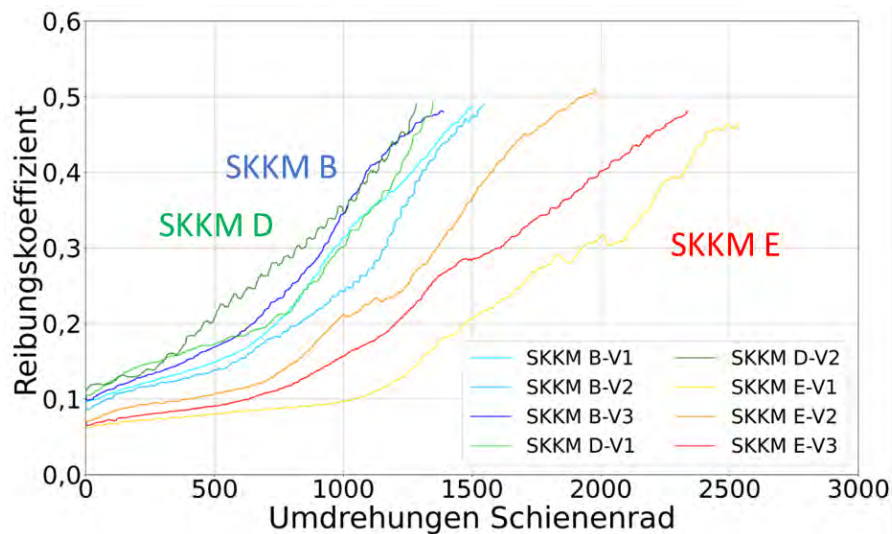


Abbildung 69: Vergleich der SKKM bei 12 mg und Raumtemperatur; SKKM B, SKKM D und SKKM E

Aus Sicherheitsgründen soll der Reibungskoeffizient im Feld einen Wert von $\mu = 0,15$ nicht unterschreiten. Daher werden die SKKM auf Basis der Versuchsergebnisse nach einem möglichst hohen Reibungskoeffizienten bei Versuchsbeginn gereiht:

SKKM B ~ SKKM D > SKKM E

Alternativ kann ein Ranking nach dem Kriterium der Ergiebigkeit erstellt werden (SKKM mit der höchsten Ergiebigkeit zuerst):

SKKM E > SKKM B ~ SKKM D

7.4.3. Rad-Schiene-Teststand

Der Rad-Schiene-Teststand als Kategorie III der Prüfkette stellt das Bindeglied zwischen dem Zweischeiben-Tribometer und den Feldversuchen dar. Die experimentellen Untersuchungen am Rad-Schiene-Teststand hatten das Ziel, die Ergebnisse am Zweischeiben-Tribometer zu validieren. Die Versuchsdurchführung ist im Kapitel 7.3.2 beschrieben. Zur Bewertung des Reibungsverhaltens wurden die auftretenden Reibungskoeffizienten während der Phasen mit 2 % Schlupf herangezogen. Anhand der Messergebnisse wurde der Einfluss von drei SKKM und zwei Aufbringungsmethoden (Aufsprühen und Spatel siehe Kapitel 7.3.3) anhand des Reibungskoeffizienten-Verlaufs beurteilt.

Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 26 abgebildet. Der Reibungskoeffizient und der Schlupf berechneten sich am Rad-Schiene-Teststand wie für das Zweischeiben-Tribometer nach Gleichung 22 und 27.

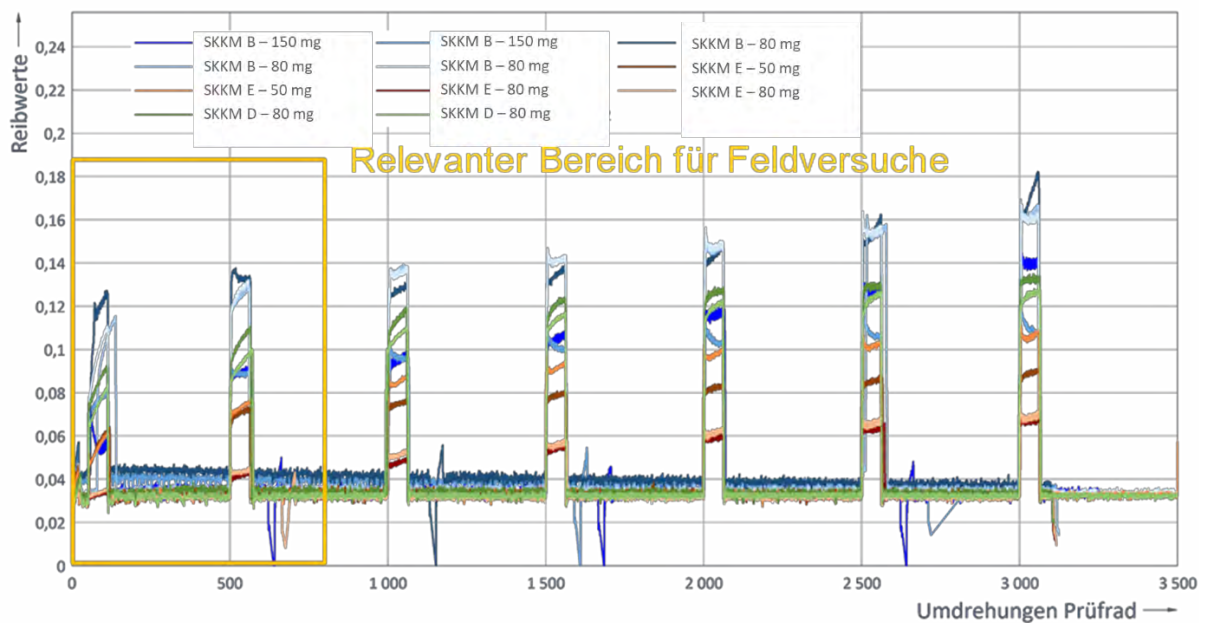
Probekörper- zustand	SKKM	Menge	Aufbringungs- art	Schlupf bei			Radlast	Umfangs- geschwindigkeit Probenrad in m/s	Versuchs- zahl
				Messung	Temperatur				
trocken	SKKM B	150 mg	Aufsprühen	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	2	
trocken	SKKM B	80 mg	Aufsprühen	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	3	
trocken	SKKM D	80 mg	Aufsprühen	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	2	
trocken	SKKM E	80 mg	Aufsprühen	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	2	
trocken	SKKM E	50 mg	Aufsprühen	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	2	
trocken	SKKM B ^{a)}	40 mg	Spatel	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	1	
trocken	SKKM B ^{a)}	30 mg	Spatel	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	2	
trocken	SKKM B ^{a)}	20 mg	Spatel	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	3	
trocken	SKKM D ^{a)}	20 mg	Spatel	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	4	
trocken	SKKM E ^{a)}	20 mg	Spatel	2%	25 - 26,5°C	15 kN	~4,32 m/s	3	

^{a)} unverdünnt

**Tabelle 26: Rad-Schiene-Teststand – Versuchsmatrix;
SKKM B, SKKM D und SKKM E**

Durch das Aufsprühen soll eine gleichmäßige Verteilung des SKKM auf dem Schienenrad erreicht werden. Dieser Zustand stellt sich im Feld bei wiederholter SKKM-Aufbringung nach zirka 2 bis 3 Wochen ein. Abbildung 70 zeigt die Messergebnisse mit SKKM B, SKKM D und SKKM E, welche jeweils durch Aufsprühen von 50 bis 150 mg SKKM auf den Schienenradumfang aufgetragen wurden. Der Reibungskoeffizient wurde in insgesamt 7 Phasen mit 2 % Schlupf ausgewertet. Die ersten beiden Phasen mit 2 % Schlupf sind in Abbildung 71 dargestellt. Bei einer Menge von 80 mg SKKM zeigt SKKM B (ca. 0,10) in der ersten Phase der höchste Reibungskoeffizient, gefolgt von SKKM D (ca. 0,08) und SKKM E (ca. 0,05). Mit jeder weiteren Phase war eine Zunahme der Reibungskoeffizienten zu beobachten, jedoch übersteigen die Messwerte nicht 0,18 bis zum Ende der Versuche. Der für den Feldeinsatz bzw. die Feldversuche relevante Bereich ist zu Beginn der Versuche zu

finden. Dies ist darin begründet, dass erwartungsgemäß unmittelbar nach Aufbringen von SKKM auf die Schiene und im Bereich der Aufbringungsanlage die größte Menge SKKM zu finden ist, somit zu diesem Zeitpunkt und in diesem Bereich der niedrigste Reibungskoeffizient auftritt. Erst durch Überrollungen durch Züge wird das SKKM entlang der Schiene verteilt und aus dem Kontakt verdrängt, einhergehend mit der Zunahme des Reibungskoeffizienten. Der Mengeneinfluss ist bei SKKM B und SKKM E ebenso deutlich erkennbar, wonach der Reibungskoeffizient bei geringeren SKKM-Mengen höher ausfällt. Die SKKM-Menge ist daher eine entscheidende Stellgröße im Feldeinsatz.



**Abbildung 70: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen:
Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge;
SKKM B, SKKM D und SKKM E**

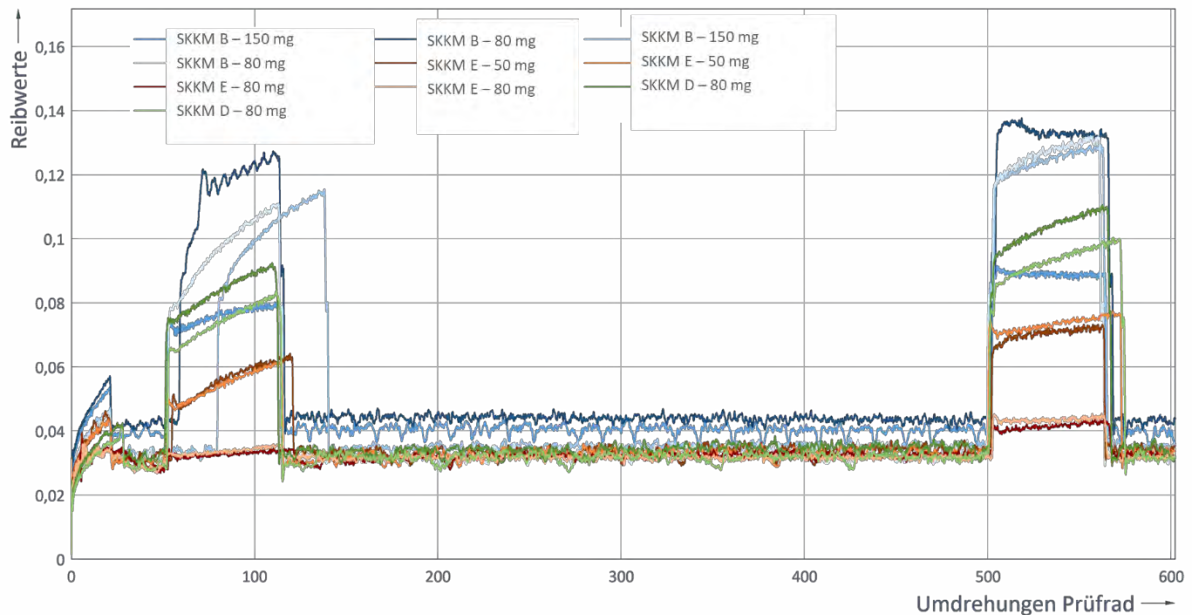
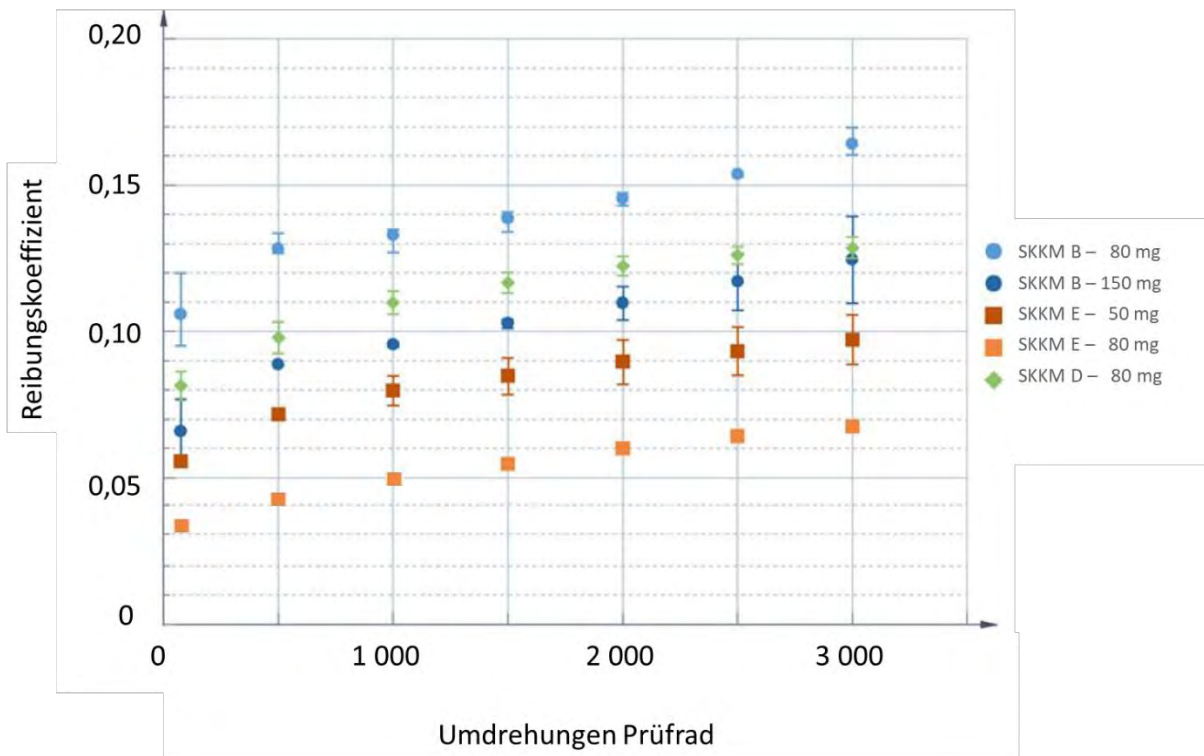


Abbildung 71: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge, erste und zweite Phase mit 2 % Schlupf aus Abbildung 70; SKKM B, SKKM D und SKKM E

Zur besseren Darstellung der Messergebnisse sind die Mittelwerte und Streubereiche der Reibungskoeffizienten in Abbildung 72 ausgewiesen. Die ausgewerteten Messergebnisse zeigen, dass die Tendenzen am Zweiseiben-Tribometer und dem Rad-Schiene-Teststand generell übereinstimmen: SKKM E zeigt von Beginn an den geringsten Reibungskoeffizienten und bis zum Ende des Versuchslaufs die größte Ergiebigkeit, wenngleich der Referenzwert des trockenen nicht konditionierten Kontakts während des Versuchs am Rad-Schiene-Teststand nicht erreicht wurde. SKKM B und SKKM D zeigen einander ähnliche Verläufe mit einem deutlich höheren Reibungskoeffizienten als SKKM E. Bei den Versuchen am Zweiseiben-Tribometer sind die Verläufe der Reibungskoeffizienten der beiden SKKM sehr ähnlich. Am Rad-Schiene-Teststand zeigt hingegen SKKM B einen höheren Reibungskoeffizienten als SKKM D.



**Abbildung 72: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen:
Gegenüberstellung der Mittelwerte bei 2 % Schlupf;
SKKM B, SKKM D und SKKM E**

Zwecks Vergleichs der Aufbringungsmethoden wurden Versuche mit einer Spatel zur SKKM-Aufbringung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse des gesamten Versuchs (7 Phasen mit 2 % Schlupf) sind in Abbildung 73 dargestellt, die beiden ersten Phasen in Abbildung 74 vergrößert gezeigt.

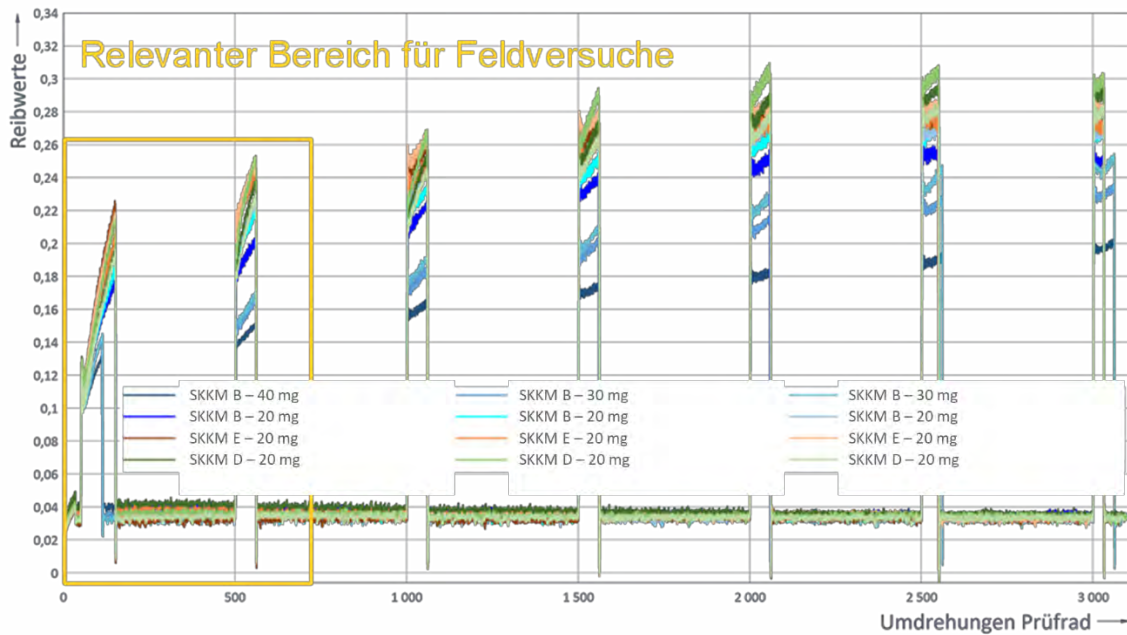


Abbildung 73: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung der SKKM mit Spatel: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge; SKKM B, SKKM D und SKKM E

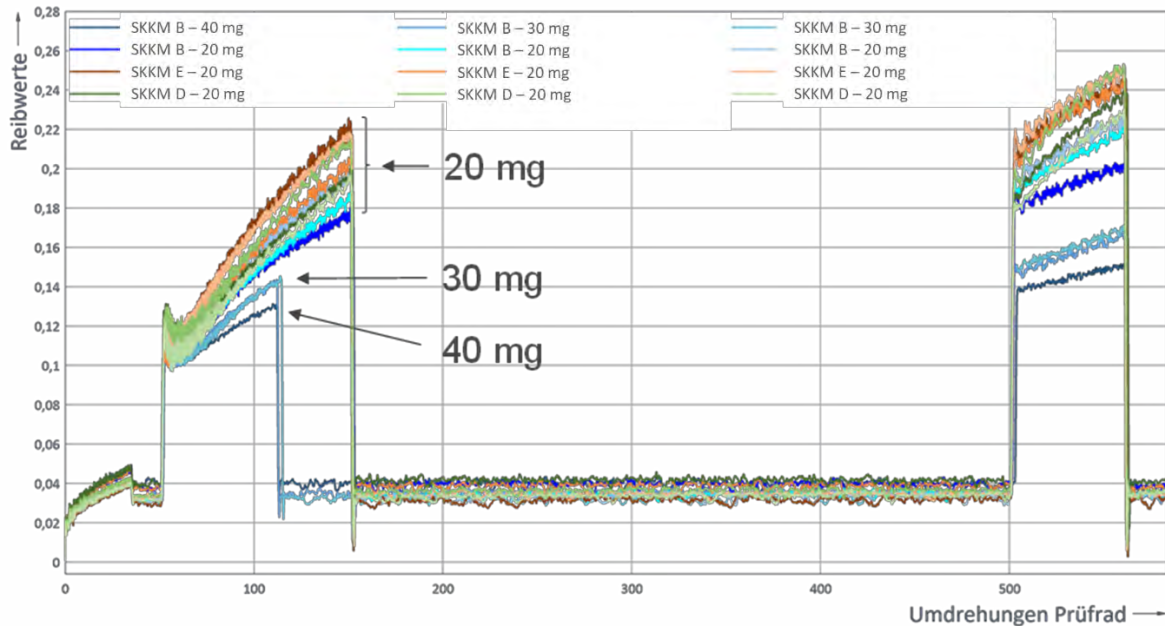


Abbildung 74: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung der SKKM mit Spatel: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge, erste und zweite Phase mit 2 % Schlupf aus Abbildung 73; SKKM B, SKKM D und SKKM E

Durch das Aufbringen mit Spatel wird die Reihung der SKKM umgedreht. SKKM E führte zum höchsten und SKKM B zum niedrigsten Reibungskoeffizienten. Dies kann damit begründet

werden, dass die im Kontakt befindliche Menge des SKKM bei dieser Aufbringungsmethode unterschiedlich zu jener durch Aufsprühen ist. Demgemäß würde SKKM E bei der punktuellen Aufbringung mit Spatel deutlich stärker verdrängt als SKKM B.

Um dies zu verifizieren, wurde die Verteilung des SKKM E bei einem Versuch dokumentiert. Nach Applikation des SKKM wurde die Radlast von $F_R = 15 \text{ kN}$ aufgebracht und das Schienenrad eine Umdrehung mit geringster Drehzahl gedreht. Die dabei entstandenen Abdrücke (AD) nach der ersten Umdrehung vom Schienenrad auf das Probenrad (AD 1) sowie wieder zurück auf das Schienenrad (AD 2 bis AD 5) sind Abbildung 75 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bereits bei der ersten Überrollung (AD1) der Großteil des aufgetragenen SKKM aus dem Kontakt gedrückt wurde. Im Falle der weiteren Überrollungen wurde das SKKM überwiegend außerhalb der Kontaktzone auf das Schienenrad übertragen. Überdies ist eine leichte Verdunkelung im Kontaktband, insbesondere bei den ersten Abdrücken, zu erkennen. Bei Abdruck 5 (AD 5) sind nur noch vereinzelt kleine Tropfen des SKKM sichtbar.

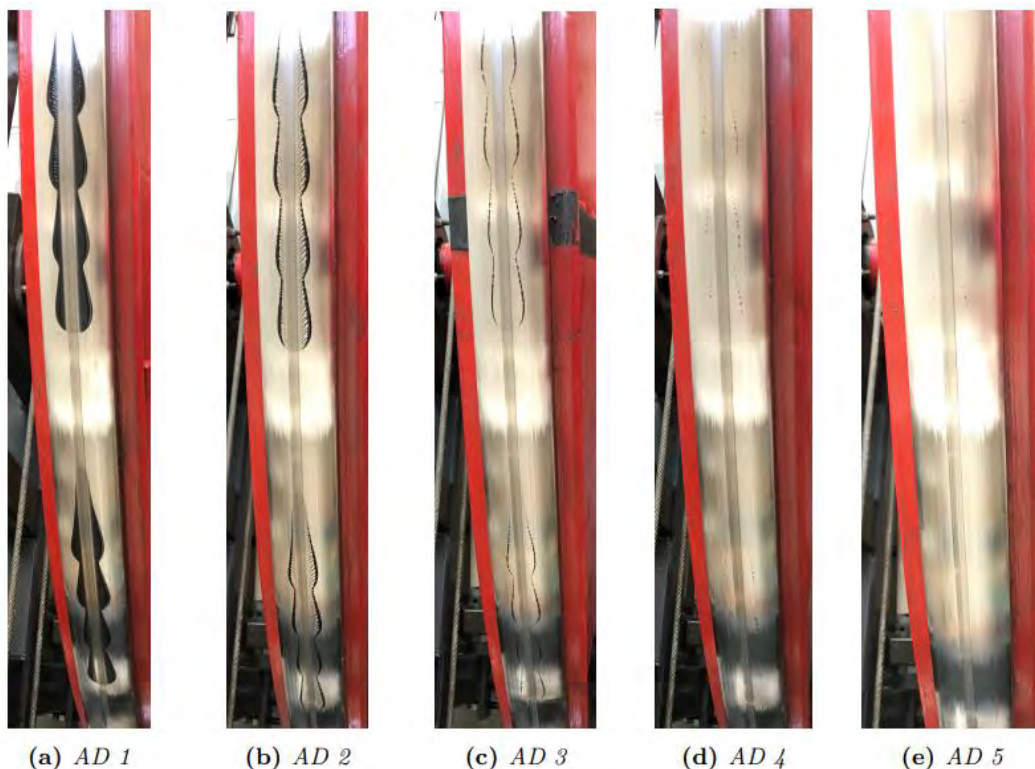


Abbildung 75: Verdrängung des mit Spatel aufgetragenen SKKM E nach 1 Umdrehung des Schienenrads und 5 Überrollungen des Probenrads

Die punktuelle Aufbringung von SKKM auf einer sonst nicht konditionierten Schiene stellt im praktischen Einsatz eher die Ausnahme dar (bei Inbetriebnahme der Konditionieranlage, nach längerem Regen, etc.). Der übliche Zustand betrifft einen Schienenabschnitt, der wiederholt mit SKKM beaufschlagt wird. Daher ist vom einem mehr oder minder durchgehenden SKKM-

Film bei regulärem Betrieb auszugehen. Hinsichtlich Aufbringung von SKKM beim Rad-Schiene-Teststand sollte daher, sofern keine speziellen Szenarien abgebildet werden sollen, dem Aufsprühen zwecks eines gleichmäßigen SKKM-Films der Vorrang eingeräumt werden.

7.4.4. Zusammenfassung

Für die Beurteilung des Reibungskoeffizienten-Verlaufs von drei SKKM bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen wurden zwei Labormethoden entwickelt. Der Hochlast- Zweischeiben-Tribometer repräsentieren die Kategorie V der Prüfkette. Als Bindeglied zwischen Zweischeiben-Tribometer und Feldversuch wurde der Rad-Schiene-Teststand als Kategorie III der Prüfkette herangezogen.

Am Zweischeiben-Tribometer wurden SKKM B, SKKM D und SKKM E zunächst bei an sich moderaten Versuchsbedingungen, im Wesentlichen trockener Kontakt, geringer Schlupf und Raumtemperatur, charakterisiert. SKKM B und SKKM D zeigen ähnliche Reibungskoeffizienten-Verläufe und weisen bereits zu Beginn einen höheren Reibungskoeffizienten von etwa $\mu = 0,10$ auf. Den durchweg niedrigsten Reibungskoeffizienten von allen SKKM einhergehend mit der höchsten Ergiebigkeit weist SKKM E auf.

Bei der Reduzierung der SKKM-Menge wird der Reibungskoeffizient zu Versuchsbeginn kaum erhöht, die Ergiebigkeit jedoch deutlich reduziert, ohne die Reihung der SKKM zu verändern. Die Erhöhung der Pressung geht mit einer verringerten Ergiebigkeit bzw. rascherem Anstieg des Reibungskoeffizienten einher, was auf die raschere Verdrängung des SKKM aus dem Kontakt zurückgeführt werden kann.

Ein höherer Schlupf von 15 % bewirkt etwa eine Halbierung der Ergiebigkeit bzw. Halbierung der Laufzeit bis zum Erreichen eines weitgehend trockenen Kontakts bei den drei SKKM gegenüber einem Schlupf von 2 %.

Temperaturänderungen bewirken signifikante Änderungen des rheologischen Verhaltens der SKKM. Folglich wurde bei einer höheren Temperatur von 60°C ein rascherer Anstieg des Reibungskoeffizienten, also eine reduzierte Ergiebigkeit, festgestellt. Bei tieferen Temperaturen (-10 und -20 °C) kann der Reibungskoeffizient zu Beginn den Wert von $\mu = 0,10$ geringfügig unterschreiten, wobei SKKM D zu Beginn geringere Reibungskoeffizienten als SKKM B und SKKM E aufweist. Erst nach deutlich längerer Laufzeit steigt der Reibungskoeffizient über $\mu = 0,15$. Der Referenzwert für den trockenen nicht konditionierten Kontakt wird bei tieferen Temperaturen mit keinem SKKM während der gesamten Versuchsdauer erreicht.

Das Reibungsverhalten von SKKM bei Anwesenheit von Wasser ähnelt jenem bei tiefen Temperaturen. Die Zugabe von Wasser bewirkt eine signifikante Reduktion des

Reibungskoeffizienten auf $\mu \sim 0,10$. SKKM D weist zu Beginn geringere Reibungskoeffizienten als SKKM B und SKKM E auf. Der Referenzwert für den nassen nicht konditionierten Kontakt wird in Kombination mit Wasser während der gesamten Versuchsdauer nur von SKKM B erreicht.

Die Versuche am Rad-Schiene-Teststand bestätigen größtenteils die am Zweiseiben-Tribometer erzielten Ergebnisse. SKKM B zeigte den höchsten Reibungskoeffizienten zu Beginn, das Niveau des Reibungskoeffizienten verblieb ebenfalls höher als bei den anderen SKKM. Mit SKKM E wurden die niedrigsten Reibungskoeffizienten über die gesamte Versuchsdauer gemessen. SKKM D lag zwischen SKKM B und SKKM E, jedoch näher bei SKKM B. Wenn die SKKM-Aufbringung punktuell durch einen Spatel erfolgte, wurde eine Umkehrung des Rankings der SKKM festgestellt, was auf die unterschiedliche Verteilung auf dem Schienenrad und die Verdrängung des SKKM aus dem Kontakt gegenüber dem Aufsprühen zurückgeführt wurde.

Die mit dem Hochlast-Zweiseiben-Tribometer in Stufe 3 des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens erzielten Ergebnisse lassen hinsichtlich Reibungskoeffizienten zu Beginn, wenngleich der Mindestwert von $\mu = 0,15$ unterschritten wurde, folgendes Ranking zu (SKKM mit höchstem Reibungskoeffizienten zuerst):

SKKM B ~ SKKM D > SKKM E

Hinsichtlich Ergiebigkeit wurde folgendes Ranking gefunden (SKKM mit höchster Ergiebigkeit zuerst):

SKKM E > SKKM B ~ SKKM D

Da SKKM D bereits in Stufe 1 hinsichtlich Umweltverträglichkeit aufgefallen ist und für die anschließende Validierung anhand von Felddaten eine Differenzierung der SKKM erwünscht war, wurden für die Feldversuche die Produkte SKKM B und SKKM E ausgewählt.

8. FELDVERSUCHE – STUFE 4

Teile in diesem Kapitel wurden der Masterarbeit von Philipp Andreas Stadlmair² entnommen.

8.1. Beschreibung der Durchführung

Die ÖBB hat im Rahmen des Projekts bremstechnische Prüfungen mit einem Triebfahrzeug zur Bestimmung von Bremsweglängen auf unterschiedlich konditionierten Schienen durchgeführt. Die Organisation der Feldversuche mit den dafür benötigten Materialien (Reinigungsequipment, SKKM, etc.) und die Durchführung erfolgten in Zusammenarbeit mit AC²T und mit der Unterstützung des Betriebsstandorts der ÖBB, an dem die Feldversuche durchgeführt wurden (siehe Abbildung 76). Die ÖBB hat dabei das Triebfahrzeug (siehe Abbildung 77) mit speziell aufgerüsteter Messtechnik, die abgesperrten Gleise, ein Hilfsfahrzeug sowie Fahr- und Streckensicherungspersonal zur Verfügung gestellt. Die Versuche im Sommer wurden vom 11.08.2021 bis 13.08.2021 am Zentralverschiebebahnhof Wien-Kledering an Gleis 391 und G392, siehe Abbildung 76, durchgeführt. Weiters haben Versuche im Winter an den gleichen Gleisen am Zentralverschiebebahnhof Wien-Kledering vom 03.01.2022 bis 05.01.2022 stattgefunden.

In den folgenden Abschnitten wird auf das Test- und Messequipment, die Versuchsvorbereitung und die Versuchsdurchführung näher eingegangen. Die Feldversuche im Winter waren in diesen Punkten nahezu ident zu den Versuchen im Sommer. Weitere Informationen sind den Prüfberichten der ÖBB – Nessler, Prüfbericht M1752⁹⁶ und Nessler, Prüfbericht M1758⁹⁷ – zu entnehmen.

⁹⁶ G. Nessler, Prüfbericht M1752, Wien: ÖBB Produktion GmbH - Maschinentechnische Messgruppe, 2021.

⁹⁷ G. Nessler, Prüfbericht M1758, Wien: ÖBB Produktion GmbH - Maschinentechnische Messgruppe, 2022.

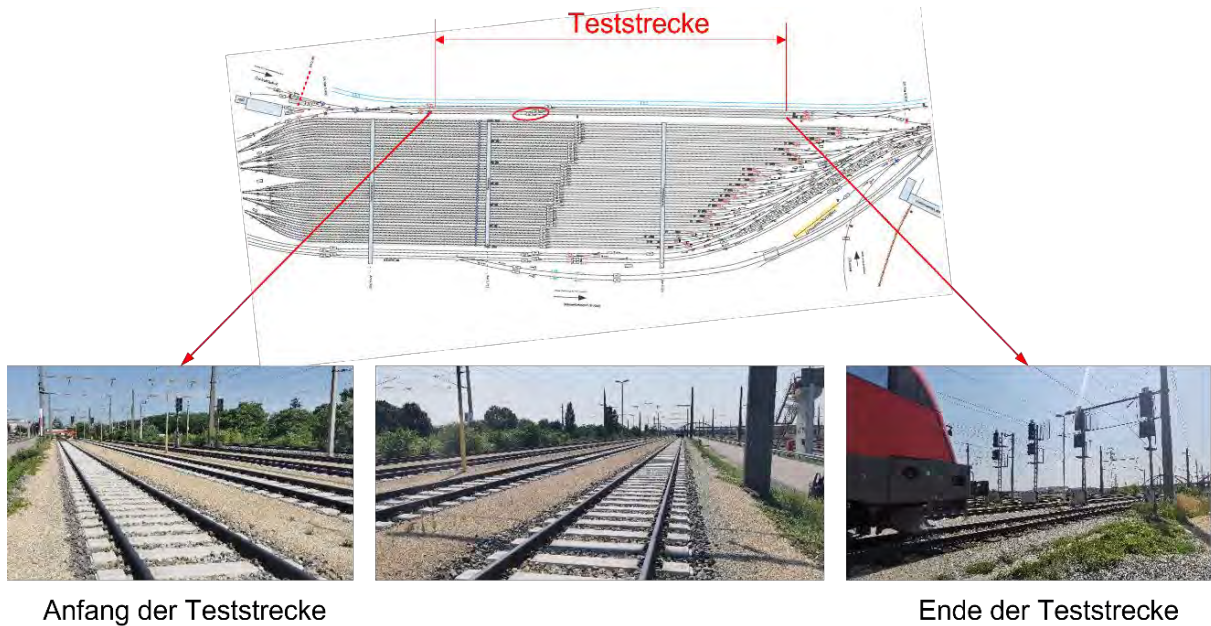


Abbildung 76: Teststrecke am Zentralverschiebebahnhof Wien-Kledering

8.1.1. Test- und Messequipment

Bei dem Triebfahrzeug handelte es sich um eine elektrische Universallokomotive ES64U2 („Taurus 2“) der Baureihe 1116 mit der Nummer 264 (Hersteller: Siemens), siehe Abbildung 77. Dieses Triebfahrzeug wurde im Sommer als auch im Winter für die Feldversuche eingesetzt.



Abbildung 77: Triebfahrzeug für die Feldversuche im Sommer und Winter

Das Triebfahrzeug hatte eine Achsfolge von *Bo´Bo´*; die Räder waren aus dem Radwerkstoff ER9⁹³ und mit dem Profil S1002⁹³ ausgeführt. Angaben zum Raddurchmesser, Dienstgewicht und weiteren Fahrzeugdaten sind in Tabelle 27 als Auszug aus dem Triebfahrzeugdatenblatt der ÖBB in den Prüfberichten^{96,97} angeführt. Bei den Versuchen wurde mit der elektrodynamischen Bremse (ED-Bremse) des Triebfahrzeugs gebremst.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Fahrzeugtyp	-	1116
Fahrzeugmasse	t	88
Radsatzanordnung	-	Bo´Bo´
Raddurchmesser (neu/abgenutzt)	mm	1150/1070
Anfahrzugkraft	kN	300
max. Bremskraft der ED-Bremse	kN	240
Länge über Puffer	m	19,28
zugelassene Höchstgeschwindigkeit	km/h	230

Tabelle 27: Auszug aus dem Triebfahrzeugdatenblatt^{96,97}

Die Teststrecken haben einem modernen Gleis mit Betonschwellen mit einer Länge von jeweils 750 m entsprochen (siehe Abbildung 76). Damit konnten zwei Teststrecken hintereinander pro Gleis angeordnet werden; insgesamt standen somit vier Teststrecken zur Verfügung. Womöglich auftretende Bogenlaufkräfte waren aufgrund des geraden Gleises (Gleisbogenradius > 5000 m) zu vernachlässigen. Die Gleise waren aus dem Standard-Schienenwerkstoff R260⁹¹ hergestellt und mit dem Schienenprofil 49E1⁹¹ ausgeführt. Die Einbauneigung betrug an der Teststrecke 1:40 und das Gefälle max. -2,5 %.

Insgesamt sind vier Stück 1000 Hz PZB-Magneten im Sommer, siehe Abbildung 78, und vier Stück 2000 Hz PZB-Magneten im Winter an definierten Punkten im Gleis verlegt worden, die den Beginn des Bremsbereichs gekennzeichnet haben. Die Positionen wurden über ein Streckenmessrad ausgemessen. Nach Überfahren eines Magneten mit 1000 Hz wurde nach einer system-bedingten Zeitspanne von maximal 4 Sekunden eine fahrzeugseitige Schnellbremsung ausgelöst und das Triebfahrzeug bis zum Stillstand gebremst. Bei den Magneten mit 2000 Hz gab es die Verzögerung von bis zu 4 Sekunden nicht, wodurch die Teststrecke etwas kürzer wurde. Die eigentliche Teststrecke entspricht dem Gleisabschnitt unmittelbar nach den PZB-Magneten.



Abbildung 78: 1000 Hz PZB-Magnet

Der zurückgelegte Weg und die Geschwindigkeit sind bei den Versuchen über ein Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) gemessen worden. Angebrachte Beschleunigungsaufnehmer haben die eingeleiteten Bremsverzögerungen aufgezeichnet. Im Folgenden werden die wichtigsten, im Triebfahrzeug verbauten Messgeräte, aufgelistet, die zum Teil zusätzlich zum Standard-Equipment am Fahrzeug angebracht worden sind:

Quantum Messverstärker M-QUAX-02 für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Messsignale.

GNSS V-GPS-02 zur Erfassung der Position (Weg) und der Geschwindigkeit.

Ausgangselektronik Fahrzeug (ED-Bremse) NM-TRACO-02 und Aufnahmesoftware „Bremstechnische Prüfung 3.1“: Alle Feldversuche wurden mit der ED-Bremse durchgeführt. Wie bereits in Kapitel 3.4.3.5 ausgeführt, hat *Zbinden*³³ gezeigt, dass bei dieser Bremsmethode der Einfluss von SKKM auf den Bremsweg am größten ist und den kritischen Fall einer Bremsung darstellt. Aus dem Schwerpunktsatz (Gleichung 28) und dem Coulombschen Reibungsgesetz (Gleichung 29) zeigt sich, dass die maximale Bremsverzögerung $a_{v,max}$ unabhängig von der Fahrzeugmasse ist (Gleichung 30). Die maximale Bremsverzögerung wird durch den Reibungskoeffizienten μ zwischen Rad und Schiene begrenzt.

$$m \cdot a_v = F_v \quad 28$$

$$F_{v,max} \leq \mu \cdot F_G \quad 29$$

$$a_{v,max} = \frac{F_{v,max}}{m} = \frac{\mu \cdot F_G}{m} = \frac{\mu \cdot m \cdot g}{m} = \mu \cdot g \quad 30$$

Für den im Forschungsprojekt definierten minimal erforderlichen Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,15$ ergibt das eine maximale Bremsverzögerung von $a_{v,max} = 1,47 \text{ m/s}^2$. Um das

Triebfahrzeug mit dieser Bremsverzögerung abzubremesen, wurde mithilfe der Software eine maximale Bremskraft vorgegeben. Die erforderliche Bremskraft kann mithilfe von Gleichung 31 berechnet werden. Gleichung 32 zeigt, dass der Trägheitskoeffizient der Schwungmasse θ die äquivalente Masse der rotierenden Teile m_{rot} beschreibt. Durch die Berücksichtigung von $\theta = 1,09$ (entnommen aus dem ÖBB-Prüfbericht^{96,97}) ergibt sich für die ED-Bremse des Triebfahrzeugs eine vorgegebene Bremskraft von $F_{ED-Bremse} = 141 \text{ kN}$. Demgemäß wurde die ED-Bremse für die Feldversuche auf 140 kN programmiert.

$$F_{ED-Bremse} = m \cdot a_V \cdot \theta \quad 31$$

$$\theta = 1 + \frac{m_{rot}}{m} \quad 32$$

Für den Bremsvorgang bedeutet das, wenn der Reibungskoeffizient über den Minimalwert von $\mu = 0,15$ liegt, erfolgt die Bremsung nach einer rampenförmigen Erhöhung der Bremskraft mit konstanten 140 kN . Liegt, zum Beispiel aufgrund des eingesetzten SKKM, der Reibungskoeffizient μ unter $0,15$, kann die vorgegebene Bremskraft nicht vollständig über den Rad-Schiene-Kontakt übertragen werden. Dadurch nimmt die Raddrehzahlen ab bis es blockiert. Jedoch wird der Gleitschutz des Triebfahrzeuges aktiviert, um ein Blockieren der Räder zu verhindern.

Anemometer M-KLIMA-01 zur Messung der vorhandenen Umgebungs- und Schienentemperaturen sowie der Windgeschwindigkeiten. Vereinzelt Angaben zu den Witterungen sind bei den jeweiligen Versuchen angeführt.

Beschleunigungsaufnehmer M-BA-60-01: Bei den Versuchen haben die gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten (v_{Mess}) geringfügig von der angegebenen Soll-Geschwindigkeit (v_{Soll}) abgewichen. Die Fahrzeuggeschwindigkeiten wurde deswegen nach UIC 544-1 Anlage F - Versuchsdurchführung⁴⁸ korrigiert. Die Korrektur des Bremswegs, siehe Gleichung 33, berücksichtigt ebenfalls den Trägheitskoeffizienten der „Schwungmassen“ $\theta = 1,09 \%$ und den mittleren äquivalenten Streckenwiderstand i'_m , siehe Gleichung 34, mit der mittleren Neigung $i_m = -2,5 \%$. Der mittlere Bogenwiderstand w_{B0} kann aufgrund des Bogenradius $> 5000 \text{ m}$ mit 0 N/kN angenommen werden⁴⁸.

$$s_{korr} = \frac{3,933 \cdot \rho \cdot v_{Soll}^2}{3,933 \cdot \rho \cdot v_{Mess}^2 - i'_m \cdot s_{Mess}} \cdot s_{Mess} \quad 33$$

$$i'_m = i_m + w_{B0} \quad 34$$

8.1.2. Versuchsvorbereitung

Vor der Bestimmung der Bremsweglängen wurden folgende vorbereitende Schritte durchgeführt:

Bestimmung der Oberflächentopografie

Wie für Tribometer und Teststand wurde im Feld ein Abdruck von der Schienenoberkante eines geraden Gleises genommen und die Oberflächentopografie mithilfe eines 3D-Mikroskops vermessen (siehe Abbildung 79). Über den Bereich des Kontaktbandes (roter Bereich) ist eine weitgehend gleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit zu erkennen. Einzelne Fehlstellen sind bei größerer Auflösung erkennbar.

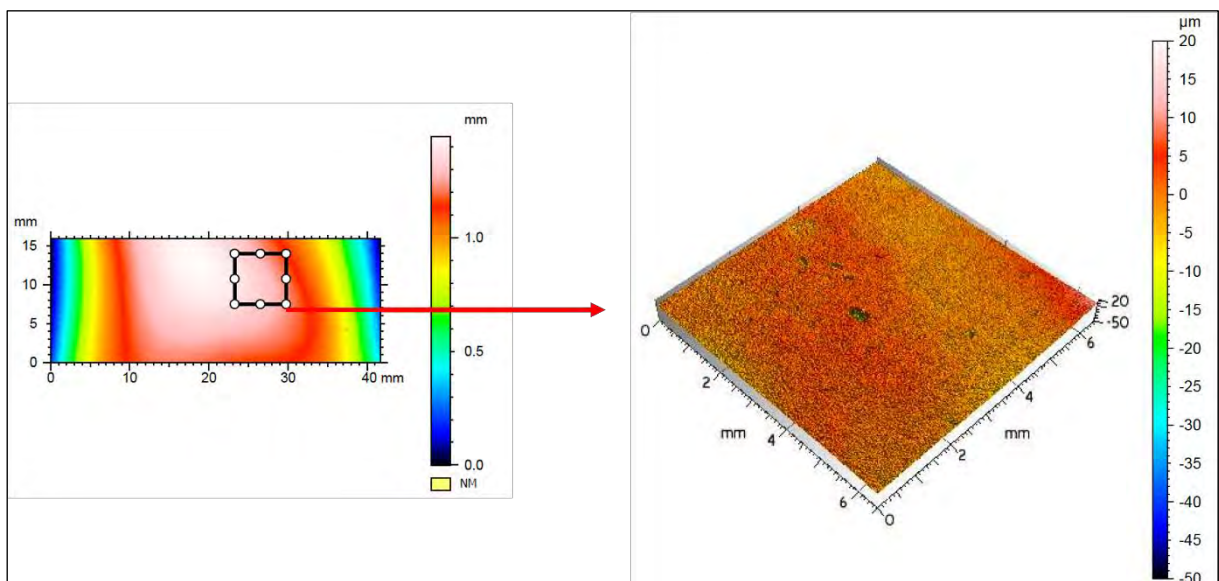


Abbildung 79: Oberflächentopografie einer befahrenen Schiene (links) und vergrößerter Bereich des Kontaktbandes (rechts)

Reinigung

Bis auf Bremswegtests jeweils zu Beginn der Feldversuche im Sommer und Winter wurden sorgfältige Reinigungen der acht Räder des Triebfahrzeuges als auch der vier Teststrecken durchgeführt, um annähernd dieselben Startbedingungen herzustellen. Für eine gründliche Reinigung wurden die Schienen vor den Versuchen einmalig mit einem Hochdruckreiniger gereinigt, um Schmutz und andere Verunreinigungen zu entfernen. Anschließend erfolgte eine Reinigung mit Ethanol getränkten Putztüchern, um Rückstände der aufgetragenen SKKM bestmöglich zu entfernen.

Aufbringung des SKKM

In Abstimmung mit der ÖBB wurden im Zuge der Feldversuche zwei unterschiedliche Aufbringungs-methoden angewendet:

1. Punktuelle Aufbringung von SKKM entsprechend der erstmaligen Aufbringung von SKKM auf einer nicht konditionierten Schiene
2. Aufbringung von SKKM mittels einer Sprühvorrichtung entsprechend einer gleichmäßig konditionierten Strecke

Es wurde die Annahme getroffen, dass das Aufsprühen des SKKM dem oben beschriebenen Zustand nach mehreren Wochen entspricht. Damit konnten innerhalb kürzester Zeit (zwei Messtage) zahlreiche Einflussfaktoren untersucht werden. Aufgrund dieser Vorgehensweise werden jedoch mögliche Unterschiede zwischen den SKKM bei der Aufbringung durch SKKM-Anlagen und Weiterverteilung des SKKM durch Züge nicht berücksichtigt.

Bei der punktuellen Aufbringung wurde das SKKM unverdünnt auf die Schienenoberkante aufgetragen. Die Menge und Auftragsform der SKKM richtete sich dabei auf derzeitig eingesetzte Schienenkopfkonditionieranlagen. Die genaue Funktionsweise dieser Anlagen wurde in Kapitel 3.4.2.1 beschrieben. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation wurde vor den PZB-Magneten an insgesamt 16 Stellen (8 je Schiene) SKKM zu je $0,2 \text{ cm}^3$ aufgetragen. Abbildung 80 zeigt dazu die Aufbringung von SKKM B an drei von insgesamt 16 Auftragsstellen. Nach der ersten Bremsmessfahrt ist deutlich das Kontaktband zwischen dem Rad des Schienenfahrzeugs und der Schiene zu erkennen. Aufgrund der möglichen lateralen Verschiebung der Radsätze verschob sich bei der zweiten Bremsmessfahrt das Kontaktband etwas und es wurde weiteres SKKM von den Applikationsstellen aufgenommen.

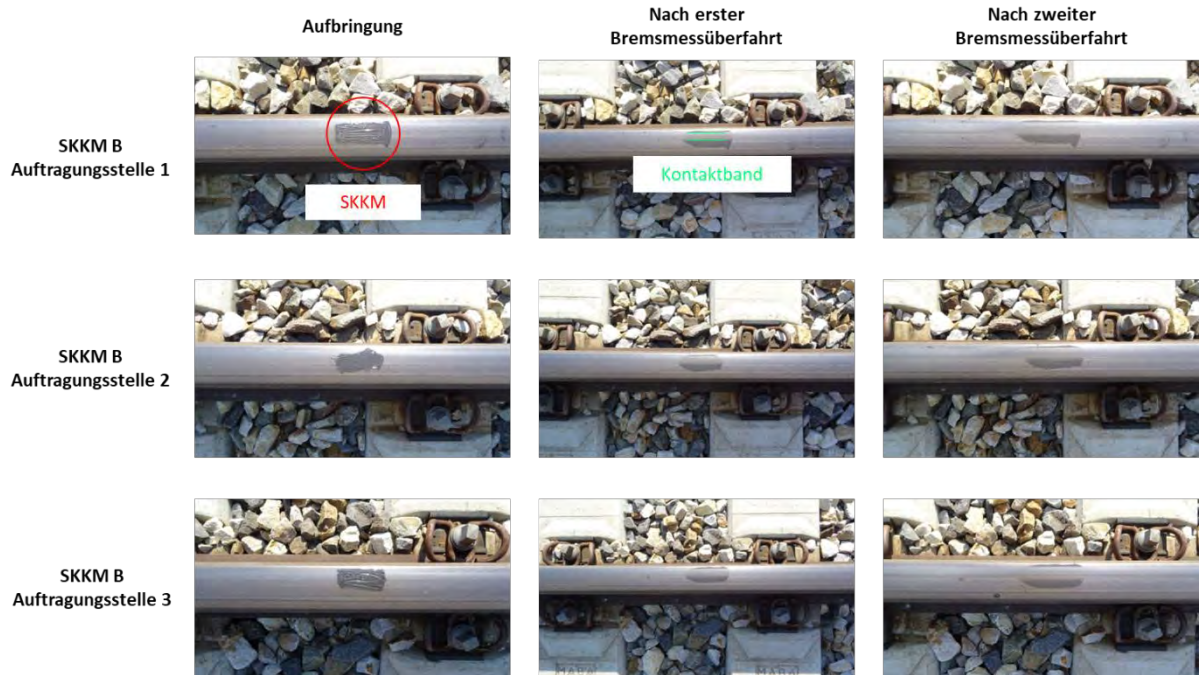


Abbildung 80: Punktuell aufgebracht SKKM auf der Schienenoberkante mit Aufnahmen vor und nach der ersten und zweiten Bremsmessfahrt

Bei der zweiten Aufbringungsmethode wurde bei AC²T ein Sprühsystem inklusive Vorrichtung und Blende entwickelt (siehe Abbildung 81). Als Sprüheinheit kam ein pneumatischer Zerstäuber der Marke FS FITTINGSTORE zum Einsatz. Für die bessere Aufbringung kontrollierter Mengen wurden die SKKM mit Lösemittel (Petrolether 40 – 60 °C) verdünnt.



Abbildung 81: Sprühvorrichtung (Ansicht von vorne)

Die Blende stellte sicher, dass das SKKM nur auf die Schienenoberkante und möglichst im Kontaktbereich aufgesprüht wurde. Das Sprühsystem wurde auf dem zur Verfügung gestellten Hilfsfahrzeug montiert (siehe Abbildung 81). Zur Bestimmung der aufgetragenen Menge wurden drei Vergleichsmessungen pro Gleisseite durchgeführt. Dabei wurde das SKKM 10 *Sekunden* lang in eine Petrischale gesprüht und nach dem Verdampfen des Lösemittels abgewogen. Über Feineinstellungen am Durchflussventil konnte die gleiche Aufbringungsmenge pro Gleis eingestellt werden. Das SKKM wurde abschließend bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit mit einer Bandbreite von etwa 60 *mm* aufgetragen. Die Aufbringungsmenge konnte überdies über die Fahrgeschwindigkeit reguliert werden.

8.1.3. Versuchsablauf

Nach Abschluss der Versuchsvorbereitung wurden die Bremsmessfahrten gestartet. Die Bremsmessfahrten wurden in einem nicht konditionierten Gleisabschnitt gestartet. Das Triebfahrzeug beschleunigte dabei auf die vorgegebene Ausgangsnennengeschwindigkeit von $v_{\text{Feld}} = 40 \text{ km/h}$. Diese Geschwindigkeit wurde so lange konstant gehalten, bis die PZB-Magneten passiert wurden, wobei kurz vor dem Bremsensatzpunkt der Antrieb der Elektrolokomotive abgeschaltet wurde. Nach dem Passieren des Bremsensatzpunktes wurde die fahrzeugseitige Schnellbremsung über die ED-Bremse eingeleitet, bis das Triebfahrzeug zum Stillstand kam. Die Bremsmessfahrten setzten sich ausfolgenden Teilen zusammen:

- 1) Beschleunigungsphase
- 2) Phase mit konstanter Geschwindigkeit
- 3) Bremsphase

Abbildung 82 zeigt die Phasen der Bremsmessfahrten bei den punktuell aufgetragenen SKKM-Versuchen und Abbildung 83 die Phasen der Bremsmessfahrten bei den Versuchen mit aufgesprühtem SKKM.

Pro Versuch, d.h. je spezifisch konditionierter Schienen, wurden drei bis zehn Bremsmessfahrten durchgeführt. Damit konnte festgestellt werden, ob mehr SKKM aus dem Kontaktbereich befördert wird und ob sich daher die Bremswege bei wiederholtem Überfahren der Messstrecke ändern. Zwischen den Bremsmessfahrten eines Versuches wurde weder SKKM aufgetragen noch fand eine Reinigung der Schienen bzw. Räder statt. Nach jeder Bremsmessfahrt kehrte das Triebfahrzeug an den Beginn des Beschleunigungsbereichs zurück. Hierbei wurde mit geringer Geschwindigkeit über die konditionierte Strecke gefahren.



Abbildung 82: Drei Phasen einer Bremsmessfahrt bei punktueller Aufbringung von SKKM ⁹⁸



Abbildung 83. Drei Phasen einer Bremsmessfahrt bei Aufbringung von SKKM durch Sprühen ⁹⁸

Für den Versuch mit SKKM-B und punktueller Auftragung werden die gemessenen Größen einer Bremsmessfahrten in Abbildung 84 dargestellt. Dies zeigt eine beispielhafte Aufnahme der Messdaten. Im Diagramm ganz oben ist der Verlauf der Geschwindigkeiten (km/h) über die Messdauer (s) dargestellt. Angegeben sind die Radumfangsgeschwindigkeiten der vier vorhandenen Achsen (rot, grün, blau, orange) und die Geschwindigkeit des Triebfahrzeuges (violett). Eine weitere grüne Kennlinie zeigt einen Sprung zum Zeitpunkt $0 s$, der die Einleitung der Bremsung durch den PZB-Magneten beschreibt. Die Bremsung erfolgte bei der Ausgangsnenngeschwindigkeit von $v_{nom} = 40 km/h$ bis das Schienenfahrzeug zum Stillstand kommt. Im mittleren Diagramm ist der zeitliche Verlauf der Beschleunigung (m/s^2) und im unteren Diagramm jener der elektrodynamischen Bremskraft (kN) abzulesen. Die Bremskraft der ED-Bremse steigt ab dem Zeitpunkt der Bremsseinleitung rampenförmig innerhalb von 4 Sekunden, auf die eingestellte Bremskraft von $(-140 kN)$. Der Zusammenhang zwischen Bremskraft und Bremsverzögerung wurde bereits anhand der Gleichung 31 gezeigt. Die Bremsverzögerung steigt auf den maximalen Wert von $1,47 m/s^2$ an. Aufgrund der Tatsache,

⁹⁸ Bildquelle: Railjet: <https://www.oebb.at/de/reiseplanung-services/im-zug/unsere-zuege/railjet>

dass die Umfangsgeschwindigkeiten der Räder der Fahrzeuggeschwindigkeit folgen, kann geschlossen werden, dass die maximale Bremskraft über den Rad-Schiene-Kontakt bei diesem Versuch übertragen werden konnte, ohne dass es zum Blockieren der Räder kam. Der Gleitschutz ist daher über der gesamten Bremsmessfahrt deaktiviert geblieben. Der maximal vorhandene Reibungskoeffizient kann nicht aus den Diagrammen abgelesen werden.

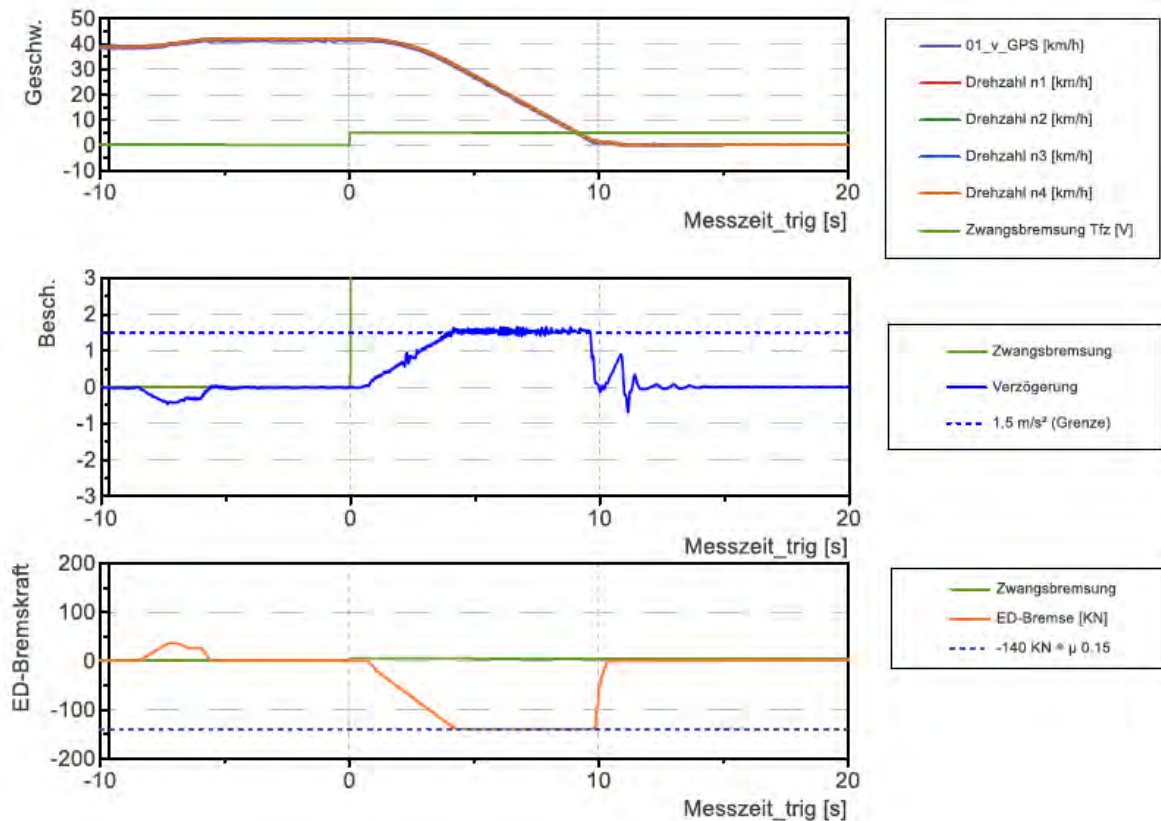


Abbildung 84: Gemessene Größen einer Bremsmessfahrt am Beispiel SKKM-B mit punktueller Auftragung, Bremsmessfahrt 1

Im Sommer herrschte an beiden Testtagen heißes und trockenes Wetter. Die Temperaturen bewegten sich im Bereich von 24 °C bis 33 °C. In der Nacht vor dem ersten Tag gingen vereinzelte Regenschauer nieder. Im Winter herrschte durchwegs trockenes, bewölktes, kühles Wetter bei vereinzelten Regenschauern. Die Temperaturen lagen um 7 °C. Genaue Angaben zu den Witterungen liegen in den Prüfberichten^{96,97} der ÖBB vor.

8.1.4. Versuche mit Wasser

Für die Versuche mit Wasser war eine Bewässerung der Schienen notwendig. Dafür wurde das Hilfsfahrzeug mit Wassertanks beladen. Ein mit den Tanks verbundenes Sprühsystem,

welches sich am hinteren Ende des Hilfsfahrzeugs befand, sprühte Wasser auf die darunter liegenden Schienen, siehe Abbildung 85. Bei den Versuchen mit SKKM in Kombination mit Wasser wurde das SKKM auf die Schienenoberkanten aufgesprüht. Im Anschluss wurden die Schienen bei der gleichen Fahrt mit den dahinter liegenden Wassersprühdüsen befeuchtet. Dabei wurde zirka 0,4 L Wasser pro Meter pro Schiene aufgebracht.

Aufgrund der Erwärmung der Schienen im Sommer wurden Versuche mit Wasser nur im Winter durchgeführt.



Abbildung 85: Besprühung der Schienen mit Wasser

8.1.5. Versuche mit Laub

Aufgrund von praktischen Erfahrungen wird durch Verschmutzung mit Laub der Reibungskoeffizient deutlich herabgesetzt und der Bremsweg dadurch deutlich verlängert. Daher wurden Bremsmessfahrten nach Auflegen von Laub durchgeführt. Es wurde dabei gehäckseltes Laub gleichmäßig auf die Schiene aufgelegt, siehe Abbildung 86. Im Herbst (Oktober 2021) wurden zwei Typen von Laub (Walnuss, Weichsel) gesammelt. Das trockene Laub wurde in einer Lagerhalle bei einer Luftfeuchtigkeit von ~30 bis 40 % in Säcken bis zu den Winterfeldversuchen gelagert. Zwei Wochen vor den Winterfeldversuchen wurde das Laub gehäcksel, damit die kleineren Laubteile gleichmäßiger auf die Schienen gelegt werden konnten. Auf die Schienen wurden zirka 8 g/m Laub, welches zuvor mit einer vergleichbaren Menge an Wasser gemischt worden war, aufgelegt.

Nach den Versuchen mit Laub wurden zusätzliche Versuche mit SKKM durchgeführt:

- Aufbringung von SKKM auf die laubverschmutzte Schiene
- Aufsprühen von SKKM und nachträgliche Aufbringung von Laub auf der Schiene
 - Nach 4 Bremsmessfahrten setzte Regen ein, daher wurde zusätzlich der Gesamteinfluss von SKKM, Laub und Regen getestet.



Abbildung 86: Auflegen von Laub auf die Schiene ⁹⁹

8.1.6. Versuche mit nachträglicher Besandung

Aus der praktischen Erfahrung erhöht die Besandung der Schiene durch das Triebfahrzeug die Traktion. Deshalb wurden Bremsmessfahrten nach Aufbringung von SKKM und anschließender Besandung durchgeführt.

8.2. Ergebnisse

Die durchgeführten Feldversuche – entsprechend der Kategorie I der Prüfkette – wurde das Ziel verfolgt, das Reibverhalten ausgewählter SKKM zu bestimmen. dienten der Feststellung einer etwaigen Bremswegverlängerung bzw. Unterschreitung eines Reibungskoeffizienten von 0,15 während des Bremsvorganges. Weiters sollen die Messergebnisse aufzeigen, ob dasselbe Ranking der SKKM wie am Tribometer gezeigt werden kann.

In der Versuchsmatrix in Tabelle 28 sind alle Versuche im Feld mit den jeweiligen Testparametern zusammengefasst. Alle Messergebnisse wurden aus den Prüfberichten M1752 ⁹⁶ und M1758 ⁹⁷ von *Nessl* entnommen. Die Anzahl der zu untersuchenden SKKM wurde bei den Feldversuchen von drei auf zwei reduziert, um die Komplexität und den Umfang der Versuche zu verringern. In Absprache mit der ÖBB wurden SKKM B und SKKM E für die Versuche ausgewählt.

⁹⁹ Bildquelle ÖBB Herr Dinhobl

Bemerkung	Schienen-zustand	Kondition-ierung	Menge	Radlast	Geschwindig-keit	Anzahl der Bremsmessfahrten	Jahres-zeit
ungereinigt	trocken	-	-	110 kN	11,11 m/s	4	Sommer
ungereinigt	trocken	-	-	110 kN	11,11 m/s	4	Winter
aufgesprüht	trocken	SKKM B	80 mg/m	110 kN	11,11 m/s	4	Sommer
aufgesprüht	trocken	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	4	Sommer
aufgesprüht	trocken	SKKM E	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	4	Sommer
aufgesprüht	trocken	SKKM B	80 mg/m	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
aufgesprüht	trocken	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
aufgesprüht	trocken	SKKM E	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
16 Punkte	trocken	SKKM B ^{a)}	0,2 cm ³	110 kN	11,11 m/s	8	Sommer
aufgesprüht	nass	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
Laub	trocken	-	-	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
aufgesprüht	trocken	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	10	Winter
nach Laubtest							
aufgesprüht	trocken	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	4	Winter
plus Laub							
aufgesprüht	trocken	SKKM B	40 mg/m	110 kN	11,11 m/s	6	Winter
plus Laub, plus Regen							

Tabelle 28: Feldversuche – Versuchsmatrix

Als Referenz wurden Reibungskoeffizient-Messungen bei trockenen Kontaktbedingungen herangezogen, um die Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene im nicht konditionierten Zustand vor der erstmaligen Reinigung zu dokumentieren. Die erhaltenen Referenzwerte ermöglichten eine Beurteilung, inwiefern sich der Reibungskoeffizient bei unterschiedlicher Konditionierung ändert.

Anschließend erfolgten Versuche mit SKKM B und SKKM E mit unterschiedlichen Aufbringungsmengen und einer unterschiedlichen Aufbringungsmethode, siehe Kapitel 8.1.3. Zwischen den Versuchen wurden die Räder nach dem in Kapitel 9.1.2 erläuterten Verfahren gereinigt.

8.2.1. Bremswege

In diesem Abschnitt werden die Bremswege von Sommer- und Winterversuchen zusammengefasst. Die Ergebnisse sind den Prüfberichten M1752⁹⁶ und M1758⁹⁷ entnommen, die detaillierte Auswertung der einzelnen Bremsversuche ist daher in den Prüfberichten zu finden. Dort sind weitere Informationen zur Außen- und Schienentemperatur, der Witterung, der Windgeschwindigkeit, sowie die gemessenen Ausgangsgeschwindigkeiten (v_{Mess}) und die gemessenen Bremswege (s_{Mess}) angegeben.

Pro Versuchskonfiguration wurden drei bis zehn Bremsmessfahrten durchgeführt. Zwischen diesen Bremsmessfahrten wurde weder SKKM aufgetragen noch fand eine Reinigung der Schienen bzw. Räder statt. Alle nachfolgend dargestellten Bremswege entsprechen den korrigierten Bremswegen nach Gleichung 33. Die Bremswege der unterschiedlichen Versuchsvarianten im Sommer als auch im Winter sind in Tabelle 29 und Tabelle 30 dargestellt.

Sommerversuche						
	Anzahl der Messfahrten	Versuchsvarianten				
		Trocken, Ausgangszustand	SKKM B mit 80 mg/m	SKKM B mit 40 mg/m	SKKM E mit 40 mg/m	SKKM B mit 8+8 Punkte
Bremswege der Messfahrten	Kontrolle		63	64	63	65
	1	63	76	77	75	64
	2	61	70	64	70	63
	3	64	66	65	64	64
	4	64	63	64	64	65
	5	64				65
	6					65
	7					64
	8					66
	9					
10						

Tabelle 29: Bremswege bei den Versuchsvarianten im Sommer 2021, Bremswege in (m)

Winterversuche												
	Anzahl der Messfahrten	Versuchsvarianten										
		Trocken, Ausgangszustand	SKKM B mit 80 mg/m	SKKM B mit 40 mg/m	SKKM E mit 40 mg/m	Laub	SKKM B mit 40 mg/m nach Laubtest	SKKM B mit 40 mg/m plus Laub	SKKM B mit 40 mg/m plus Laub plus Regen	Nasse Schiene	SKKM B mit 40 mg/m plus Wasser	SKKM B mit 40 mg/m, nachträglich Besandung
Bremswege der Messfahrten	Kontrolle		63							62		62
	1	63	147	95	123	160	134	142		81	100	63
	2	61	108	74	98		104	105		62	73	61
	3	62	99	66	70	97	82	88		62	65	62
	4	62	87	66	66	84	79	84		61	65	61
	5	61	82	64	63	80	75		96	63	63	62
	6		86	63	63	75	74		103	61	62	
	7		77	62	62	74	69		141		63	
	8		75	62	62	74	73		125		63	
	9		75	63	61	71	68		103		62	
10		74	62	61	71	66		92		61		

Tabelle 30: Bremswege bei den Versuchsvarianten im Winter 2022, Bremswege in (m)

Der durchschnittliche Bremsweg beträgt bei trockenen Kontaktbedingungen etwa 62,5 m und wurde als Referenzwert für die Versuche mit SKKM herangezogen.

SKKM B wurden im Feld bei unterschiedlichen Mengen getestet:

- 40 mg/m
- 80 mg/m

Beim direkten Vergleich der Bremswege zwischen den beiden SKKM B und SKKM E für eine aufgebrauchte Menge von 40 mg/m zeigt sich, dass SKKM E im Durchschnitt stets zu einer deutlichen Verlängerung des Bremswegs führt als SKKM B, siehe Abbildung 87.

Bei einer aufgebrauchten Menge von 40 mg/m wird der Bremsweg bei SKKM B von ca. + 50 % und bei SKKM E von ca. + 100 % verlängert (siehe Abbildung 87).

Eine Aufbringungsmenge von 80 mg/m wurde aufgrund der langen Bremswege bei bereits geringerer Aufbringungsmenge bei SKKM E nur für SKKM B untersucht. Hierbei wurde ein Bremsweg bei der ersten Bremsmessfahrt von 147 m gefunden, was einer Erhöhung um ca. + 135 % entspricht (siehe Abbildung 87).

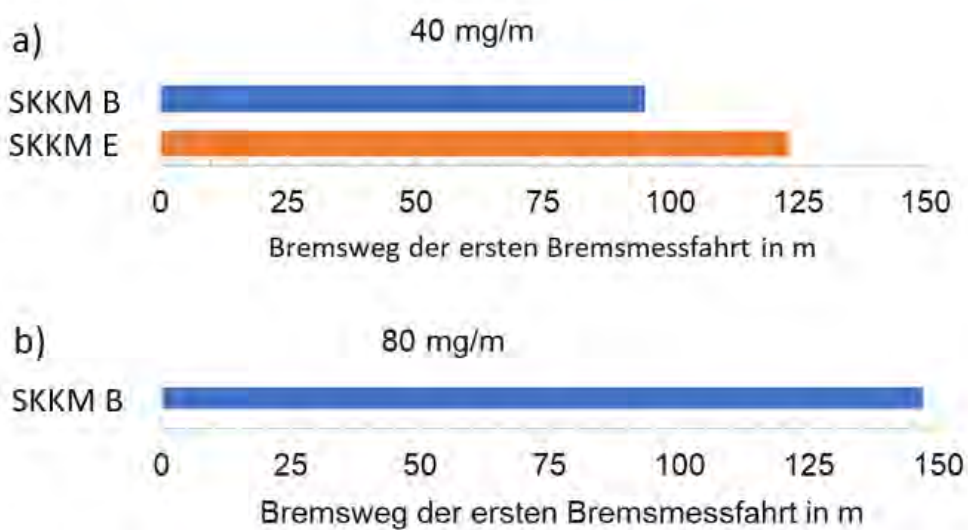


Abbildung 87: Messergebnisse der ersten Bremsmessfahrt
Aufsprühen von a) 40 mg/m und b) 80 mg/m

Bei den Versuchen mit punktueller Auftragung von SKKM B waren keine nachweisbaren Effekte auf den Bremsweg sichtbar (siehe Abbildung 88). Dies wird auf zwei Ursachen zurückgeführt:

- Vermutlich wird beim Überfahren der Applikationsstellen ein großer Teil SKKM aus dem Kontaktband gedrückt bzw. ist nach einer Bremsmessfahrt zu wenig SKKM im Kontaktband, um messbare Auswirkungen auf das Reibverhalten zu verursachen.
- Nach einer bzw. wenigen Bremsmessfahrten war trotz Verteilung des SKKM über die Teststrecke kein durchgehend konditioniertes Kontaktband erkennbar. Demgemäß zeigte ein partiell konditionierter Schienenabschnitt keine Veränderung des Bremswegs.

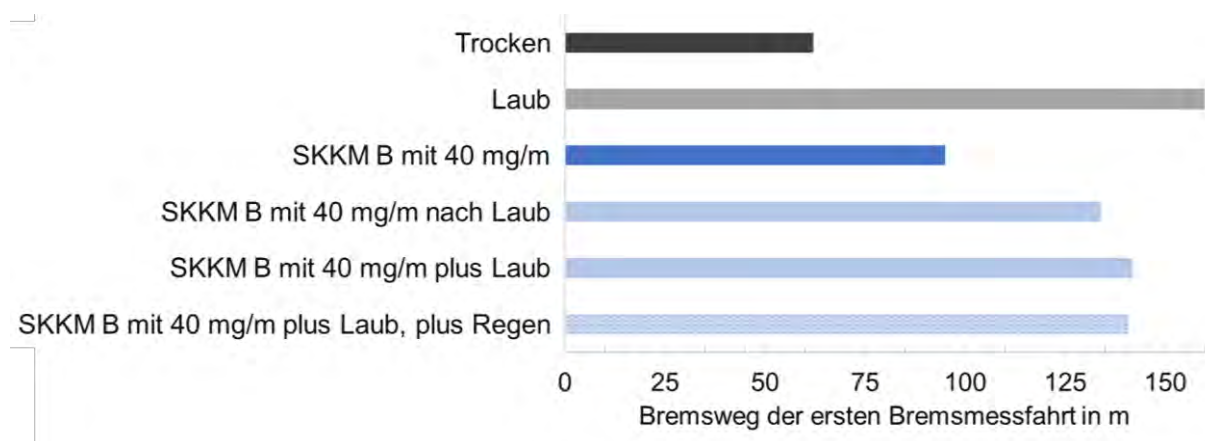


Abbildung 88: Messergebnisse bei punktueller Aufbringung

Aus Erfahrungen bei ÖBB stellen die Verhältnisse im Herbst, insbesondere bei Laubfall, einen kritischen Zustand dar, der zu einer deutlichen Verlängerung des Bremswegs führen kann. Die Bremswegverlängerungen bei der ersten Bremsmessfahrt bei Laub auf der Schiene sind in Abbildung 89 dargestellt. Der Bremsweg bei trockener Fahrbahn (62,5 m) erhöht sich mit Laub um ca. + 155 % auf 160 m. Nach 10 Bremsmessfahrten mit Laub, ohne zu reinigen, wurde SKKM B mit einer Menge von 40 mg/m aufgesprüht. Bei SKKM B 40 mg/m aufgesprüht ohne Laub war der Bremsweg 95 m. Wenn zuvor Laub auf der Strecke war, betrug der Bremsweg 134 m, dies entspricht einer Verlängerung von ca. + 40 % im Vergleich zum Bremsweg mit SKKM B ohne Laub. Im Vergleich zur trockenen Fahrbahn entspricht die Verlängerung sogar ca. + 115 %. Der Einfluss der Laubreite ist nach 10 Bremsmessfahrten und einem nachträglichen Aufsprühen von SKKM noch deutlich messbar. Wird SKKM B mit einer Menge 40 mg/m zuerst aufgebracht und dann mit Laub bedeckt, wird eine Verlängerung des Bremswegs auf 142 m gegenüber SKKM B ohne Laub (95 m) von ca. + 50 % bewirkt. Bei der vierten Bremsmessfahrt betrug der Bremsweg noch 84 m. Nach vier Bremsmessfahrten von dieser Versuchsreihe setzte Regen ein, die weiteren Bremsmessfahrten sind daher im

Versuch „SKKM B mit 40 mg/m plus Laub plus Regen“ dokumentiert. Obwohl bei steigender Anzahl an Bremsmessfahrten der Bremsweg normalerweise sinkt, ist durch die Dauer des Regens der Bremsweg von 84 m bei der ersten Bremsmessfahrt auf 96 m bis zur dritten Bremsmessfahrt auf 141 m gestiegen.

Wenngleich die Bremswege je nach Laubmenge stark variieren können, zeigen die Ergebnisse, dass der Einfluss von Laub signifikant ist.



**Abbildung 89: Messergebnisse im Winter bei Laub
Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B**

Um den Einfluss bei nassen Kontaktbedingungen zu analysieren, wurden Bremsmessfahrten nach Aufsprühen von Wasser auf die Schienen durchgeführt (siehe Abbildung 90). Die Messergebnisse zeigen bei der ersten Bremsmessfahrt keine Verlängerung des Bremswegs zwischen trockenen und nassen Bedingungen. Dies kann begründet werden:

- Das Wasser läuft durch die Schienenkopfgeometrie ($R = 300 \text{ mm}$ bzw. im Übergang $R = 80 \text{ mm}$) schnell ab bzw. verdunstet (insbesondere im Sommer).
- Durch die hohen Pressungen (hohe Achslasten) der Lokomotive wird das Wasser bei einer aufgesprühten Menge von $0,4 \text{ L/m}$ Schiene fast komplett verdrängt.

Bei den nachfolgenden Bremsmessfahrten ist kein Einfluss von Wasser auf dem Bremsweg erkennbar.

Bei einer Kombination von SKKM B mit einer Aufbringungsmenge von 40 mg/m und $0,4 \text{ L/m}$ Wasser pro Schiene wird im Vergleich zur trockenen konditionierten Schiene der Bremsweg um weitere + 10 % verlängert. Anders als bei nassen Kontaktbedingungen ohne SKKM ist bei der zweiten Bremsmessfahrt noch ein Effekt des SKKM B und/oder des Wassers festzustellen. Ab der dritten Bremsmessfahrt ist kein eindeutiger Einfluss mehr auf den Bremsweg auszumachen.

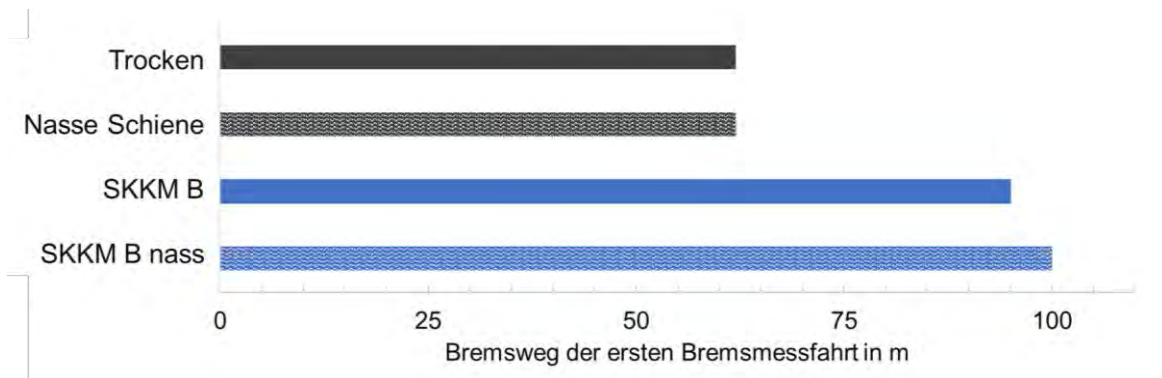


Abbildung 90: Messergebnisse im Winter bei nasser Schiene mit und ohne Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B

Alle Lokomotiven führen Sand mit, um im Bedarfsfall die Traktion durch Schienenbesandung zu erhöhen. Daher wurde ein Versuch durchgeführt (siehe Abbildung 91), bei dem vorher SKKM B mit einer Aufbringungsmenge von 40 mg/m aufgesprüht und nachträglich die Schiene durch die Lokomotive besandet wurde. Durch die Besandung konnte die Verlängerung des Bremswegs durch 40 mg/m SKKM B im Vergleich zum trockenen Zustand rückgängig gemacht werden. Dieses wichtige Ergebnis zeigt, dass bei einer zu hohen Menge an SKKM eine kurzfristige Maßnahme verfügbar ist, um den Bremsweg auf die erforderliche Länge zu reduzieren.

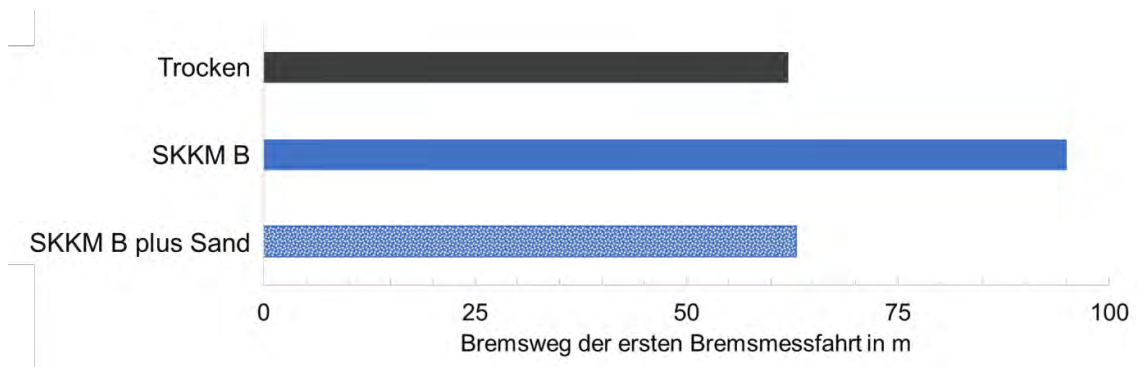


Abbildung 91: Messergebnisse im Winter nach Sanden Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B

8.2.1. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Feldversuche wurden mit einer Lokomotive ohne Waggone, d.h. mit 4 überrollenden Achsen durchgeführt. Dies stellt somit den Worst Case dar, da im Normalfall eine Lokomotive mit Waggonen fährt. Die Waggone tragen durch Bremsen und dies ggf. im noch unkonditionierten Schienenbereich zu einem kürzeren Bremsweg bei.

Da Feldversuche im Sommer und Winter durchgeführt wurden, konnten saisonal bedingte Einflüsse charakterisiert werden.

- Im trockenen nicht konditionierten Kontakt waren die Bremswege bei den Sommer- und Winterversuchen gleich lang. Es gab bei diesen Bedingungen keinen bemerkbaren Temperatureinfluss.
- SKKM B zeigt gegenüber SKKM E bei gleichen Aufbringungsmengen und gleichen Bedingungen geringere Bremswegverlängerungen:
 - Bei 40 *mg/m* sind es ca. 30 %
- Die Bremswegverlängerung mit SKKM ist im Winter deutlich höher als im Sommer.
- Durch Laubfall auf die Schienen kann der Bremsweg deutlich verlängert werden (im Feldversuch bis zu ca. + 150 %). Von einem Einfluss der Laubmenge auf die Bremsweglänge kann ausgegangen werden, wenngleich dieser im Rahmen des Projekts nicht untersucht wurde.
- Durch die verbleibende Verschmutzung der Schiene mit Laub auch nach mehreren Bremsmessfahrten wird der Bremsweg mit erneuter Aufbringung von SKKM gegenüber keiner Laubverschmutzung um + 40 % erhöht. Auch im umgekehrten Fall, wenn die Laubaufbringung nach der SKKM-Aufbringung erfolgt, gibt es eine Bremswegverlängerung von ca. + 50 %.
- Durch die Besandung kann in jedem Fall die Traktion deutlich erhöht werden und gegebenenfalls auch die Traktion der Referenzversuche bei trockener Schiene erreicht werden. Etwaige unerwünschte bzw. sicherheitsgefährdende Kontaktbedingungen beispielsweise durch Laub und höherer SKKM-Menge können mit dieser Maßnahme rasch „neutralisiert“ werden.

9. ÜBERTRAGBARKEIT VON LABORVERSUCHEN AUF FELDVERSUCHE

Auf Basis der Ergebnisse und der Charakterisierungen der unterschiedlichen SKKM am Zweischeiben-Tribometer, des Rad-Schiene-Teststands und der Feldversuche wurde eine Übertragbarkeit zwischen Labor und Feld erarbeitet.

Für einen Vergleich der Messergebnisse werden in Tabelle 31 alle wesentlichen Parameter zu dem Tribometer, Teststand und Feldversuchen festgehalten. Am Zweischeiben-Tribometer wurde eine Kontaktfläche von $2,72 \text{ mm}^2$ erreicht. Diese weicht ebenso wie die auftretende Flächenpressungen von den Bedingungen in der Realität ab. Mithilfe des Rad-Schiene-Teststands mit einer Kontaktfläche von $22,16 \text{ mm}^2$ und einer Flächenpressung von 1234 N/mm^2 wurde diese Lücke zu den realen Bedingungen weitgehend geschlossen. Die unterschiedlichen Kontaktflächen sind für die Aufbringungsmenge an SKKM und deren Verteilung bzw. Verdrängung im Kontakt bedeutend. Daher wurde bei den Laborversuchen je nach Kontaktfläche mehr SKKM aufgetragen, um eine bessere Beurteilung auf das Reibungsverhalten treffen zu können.

Parameter	Einheit	Feldversuch	Rad-Schiene-Teststand	Hochlast ZST
Radlast	N	110000	15000	1890
max. Flächenpressung	N/mm ²	1451	1234	849
Vergleichsspannung	N/mm ²	814	707	500
Kontaktfläche	mm ²	~ 169	~ 22,2	~ 2,7
Geschwindigkeit	m/s	~ 11,11	~ 4,32	~ 0,33
SRR	%	-	2%	2%
Schlupfaufbringung	-	-	50 U Einlauf mit 0% Schlupf, 100 U 2% Schlupf und dann 500 Zyklen 0%	100 U Einlauf mit 0% Schlupf, dann konstant 2% Schlupf
Werkstoff Prüfkörper (Schiene)	-	R260	R260	R260
Werkstoff Prüfkörper (Rad)	-	ER9	34CrNiMo6	ER9
Geometrie Prüfkörper (Schiene)	-	UIC 49 E1	UIC 49 E1	Zylinder
Geometrie Prüfkörper (Rad)	-	S 1002	S 1002, zylindrisch angepasst	Zylinder
Durchmesser Prüfkörper (Schiene)	mm	gerade	ø 1993	ø 130
Durchmesser Prüfkörper (Rad)	mm	ø 1150	ø 382	ø 64
SKKM Aufbringung	-	Sprühen, punktuell	Sprühen ^[a] , punktuell	Punktuell
Temperatur	-	Sommer: 24 - 31 °C Winter: 6 - 8 °C	Raumtemperatur	Raumtemperatur, +70 °C
Witterungen	-	trocken, nass	trocken, nass	trocken, nass

[a] Messdaten aus Literatur

Tabelle 31: Parameterübersicht von Feldversuch, Rad-Schiene-Teststand und Zweischeiben-Tribometer

Mit der umgesetzten Prüfkette wurden die Vorteile der verwendeten Vorrichtungen kombiniert. Die Versuche an den Tribometern waren schnell, leicht und kostengünstig durchführbar. Der Versuchsablauf am Rad-Schiene-Teststand war erwartungsgemäß komplexer, aufwändiger und daher teurer. Andererseits konnten dadurch realitätsnähere Versuchsbedingungen realisiert werden. Mithilfe der Feldversuche wurden wichtige Messergebnisse bei realen Bedingungen gesammelt. Aufgrund des geringeren Organisations- und Zeitbedarfs wurde eine deutlich größere Anzahl von Versuchen am Zweiseiben-Tribometer durchgeführt im Vergleich zum Rad-Schiene-Teststand und den Feldversuchen.

Um eine Aussage über die Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit der SKKM auf das Reibungsverhalten zu erhalten, werden im Folgenden alle relevanten Messergebnisse ohne Witterungseinfluss angeführt und gegenübergestellt. Das Ziel dabei ist herauszufinden, ob Effekte von SKKM auf den Reibungskoeffizienten bereits bei Untersuchungen am Zweiseiben-Tribometer oder am Rad-Schiene-Teststand richtig bewertet und mit den Ergebnissen bei realen Bedingungen korreliert werden können. Die Reihung der SKKM erfolgt auf Basis der erhaltenen Reibungskoeffizienten μ für eine relevante SKKM-Menge zu einem definierten Zeitpunkt während der Versuche. Der erste Rang entspricht dabei dem höchsten Reibungskoeffizienten. Bei mehreren Messreihen wurde ein Mittelwert aus den Messungen zu dem jeweiligen betrachteten Zeitpunkt gebildet (Abbildung 92).

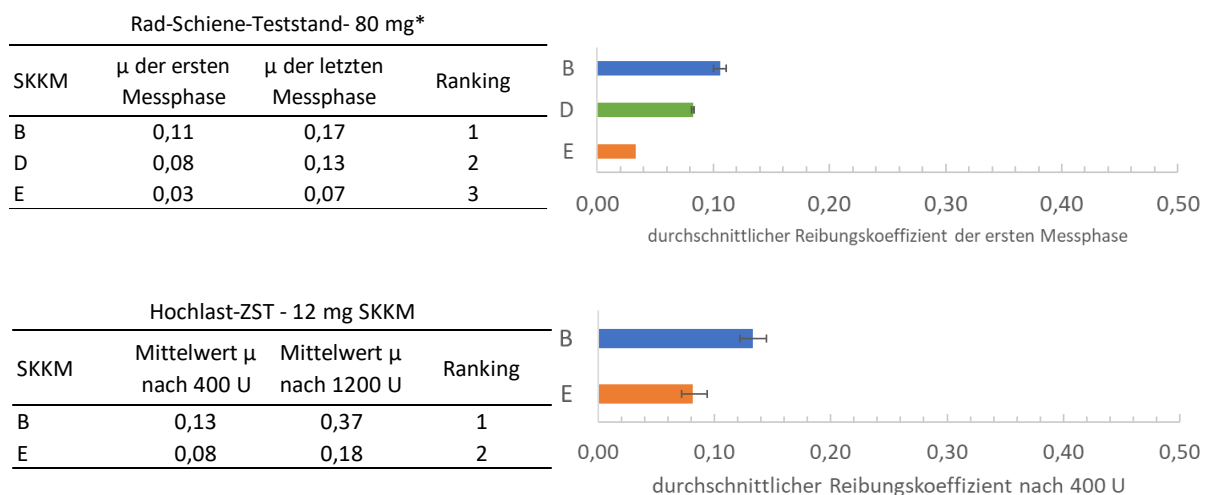


Abbildung 92: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Rad-Schiene-Teststand, Hochlast-ZST

Am Zweiseiben-Tribometer lässt sich anhand der Ergebnisse mit einer Aufbringungsmenge von 6 Tropfen mit je 2 mg (12 mg) eine gute Beurteilung bezüglich der Reihung von SKKM treffen. Die Reihung von SKKM B gefolgt von SKKM E konnte deutlich herausgearbeitet werden.

Am Rad-Schiene-Teststand zeigt die punktuelle Aufbringungsmethode mittels Spatel keine Übereinstimmung mit dem Zweischeiben-Tribometer. Aufgrund der hohen Flächenpressungen am Rad-Schiene-Teststand wurde beobachtet, dass bereits zu Beginn beim Überfahren der mit SKKM applizierten Bereiche sehr viel SKKM aus dem Kontaktband verdrängt wurde. Ebenfalls ist die kontinuierliche Verteilung nicht gegeben. Erfahrungen aus Versuchen mit einem Zweischeiben-Tribometer haben gezeigt, dass bei zu geringer SKKM-Menge im Kontakt die Reproduzierbarkeit und Differenzierbarkeit geringer ausfiel. Aus diesem Grund werden für den Vergleich nur die Versuche, die mittels Aufsprühens durchgeführt wurden, verwendet. Die Reihung der SKKM am Rad-Schiene-Teststand ist SKKM B knapp gefolgt von SKKM D und abschließend SKKM E.

Grundsätzlich kann allen verwendeten Vorrichtungen eine gute Differenzierbarkeit zwischen SKKM B und SKKM E bzw. größeren und kleineren Reibungskoeffizienten attestiert werden. Anhand der Messergebnisse des Zweischeiben-Tribometers und der Aufsprühversuche am Rad-Schiene-Teststand wird erwartet, dass SKKM B zu kürzeren und SKKM E zu längeren Bremswegen führen. Die Ergebnisse der Feldversuche bestätigten die Vorhersage, siehe Abbildung 93.

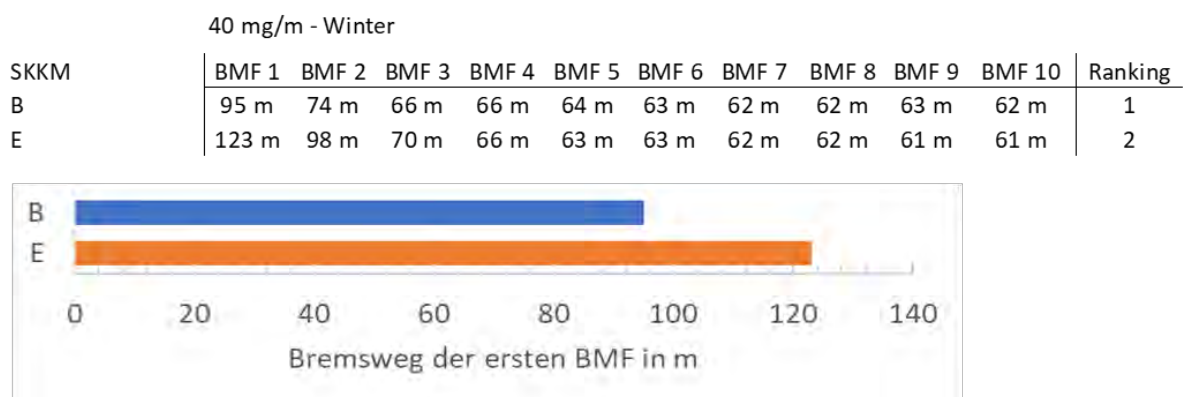


Abbildung 93: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Feldversuche – Bremsweglängen in Abhängigkeit von der Anzahl der Bremsmessfahrten (BMF)

Der Reibungskoeffizient zwischen Rad und Schiene kann über die Bremskraft oder Verzögerung berechnet werden. Die maximale ED-Bremskraft des eingesetzten Triebfahrzeugs wurde mit 140 kN bzw. einer maximalen Verzögerung von 1,5 m/s² begrenzt. Dies entspricht einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,15$. Oberhalb dieses Grenzwerts kann das Triebfahrzeugs mit dem maximalen Wert bremsen und ein höherer Reibungskoeffizient kann dadurch nicht ermittelt werden. Liegt der Reibungskoeffizient unterhalb von $\mu = 0,15$ wird der Gleitschutz als Antischlupfsystem ausgelöst, das die Bremskraft regelt bzw. die Verzögerung der Triebfahrzeugs reduziert. In diesem Bereich kann der Reibungskoeffizient

berechnet werden. Der Sommerfeldversuch mit 80 mg/m SKKM B kann direkt mit dem Reibkraftmessungen am Rad-Schiene-Teststand und Hochlast-ZST verglichen werden (siehe Abbildung 94). Der gemessene Reibungskoeffizient zu Beginn der Bremsmessfahrt von $\mu = \sim 0,08$ liegt im Streubereich der ersten Messphase am Rad-Schiene-Teststand von $\mu = 0,08 - 0,12$. Am Hochlast-ZST nach 200 U wird ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,10 - 0,13$ gemessen, was im oberen Streubereich liegt. Feldversuche mit SKKM E zeigten zu Beginn einen Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,04$, was ebenfalls mit den Testständen gut vergleichen lässt.

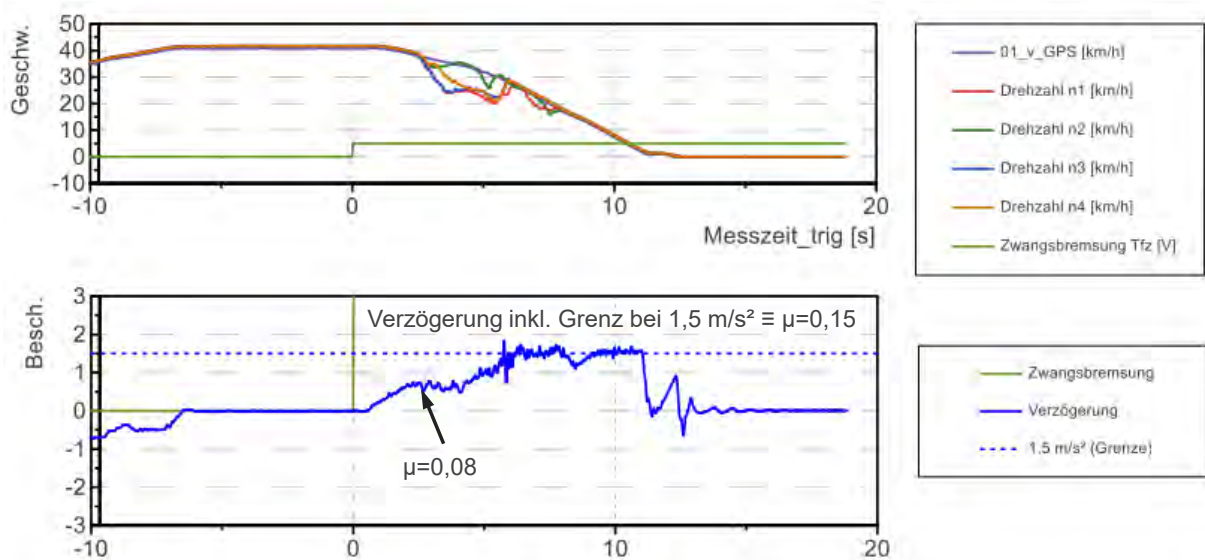


Abbildung 94: Sommerfeldversuch mit 80 mg/m SKKM B – erste Bremsmessfahrt

10. MEHRSTUFIGES BEURTEILUNGSVERFAHREN IN ANWENDUNG

Die Abbildung 95 zeigt die Methoden im Labor und im Feld, welche im mehrstufigen Beurteilungsverfahren angewandt wurden.

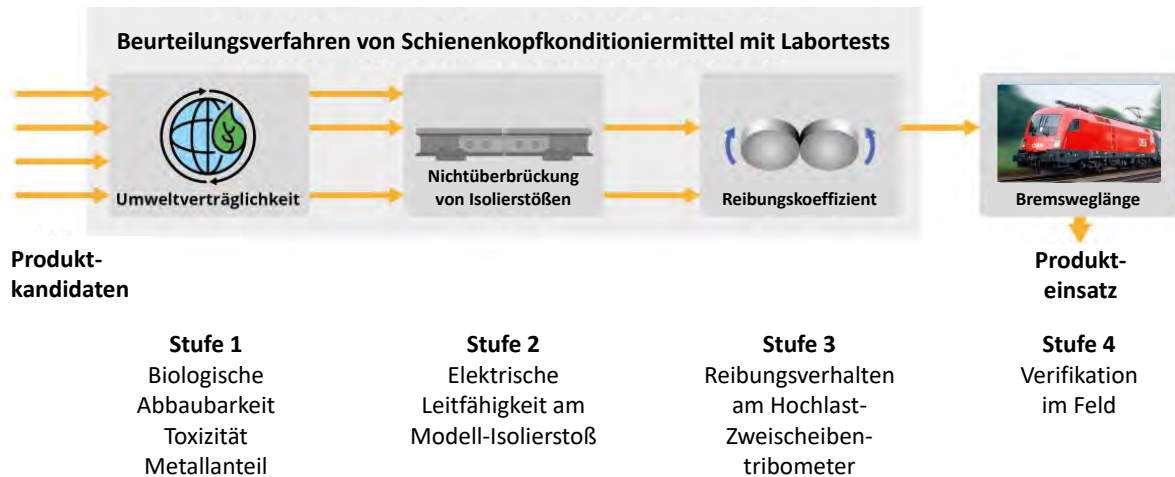


Abbildung 95: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren im Labor und im Feld

Tabelle 32 zeigt die Beurteilung der SKKM auf Basis des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens im Projekt „SafeRail“. Um die Anwendbarkeit der Methoden im Beurteilungsverfahren für unterschiedliche SKKM zu überprüfen, wurde – in Abstimmung mit der ÖBB-Infrastruktur AG – eine hohe Produktdiversität angestrebt und fünf SKKM entsprechend ausgewählt. Die ersten beiden Stufen die Umweltverträglichkeit und die Nichtüberbrückung von Isolierstößen betreffend wurde auf alle fünf SKKM angewandt. Für Stufe 3 und 4 das Reibungsverhalten und Feldversuche betreffend wurde eine Auswahl auf Basis der Ergebnisse in Stufe 1 und 2 vorgenommen.

SKKM A zeigte bei den Toxizitätsuntersuchungen bei den Daphnientest bei der untersuchten *loading rate* von 1000 mg/L eine Daphnienmortalität von 100 % und eine Algenwachstumshemmung von 98 %. Somit zeigte dieses Produkt bei den Toxizitätstests und den Leitfähigkeitsuntersuchungen die schlechtesten Ergebnisse und wurde daher bei weiteren Untersuchungen ab Stufe 3 nicht mehr berücksichtigt.

SKKM B ist das Referenzprodukt im Projekt.

SKKM C weist laut Herstellerangaben nur geringfügige Unterschiede zu SKKM B auf. Um im Projekt „SafeRail“ eine hohe Diversität an SKKM zu untersuchen, wurde SKKM C nach Stufe 1 und 2 nicht weiter untersucht.

Rang	Umweltverträglichkeit*		Nichtüberbrückung von Isolierstößen - el. Leitfähigkeit von SKKM		Reibungskoeffizient am Zweischeiben-tribometer		Bremsweg Feldtest
	Toxizität	biologische Abbaubarkeit					
1	SKKM B	SKKM E	SKKM E	SKKM C	SKKM D	SKKM B	SKKM B
2	SKKM D	SKKM B	-		-		SKKM E
3	SKKM E	-	SKKM B	SKKM D	SKKM E		-
4	SKKM C	-	-		-		-
5	SKKM A	-	SKKM A		-		-

* aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen können Ergebnisse der Untersuchung des Metallanteils nicht veröffentlicht werden

Tabelle 32: Beurteilung der SKKM anhand des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens im Projekt „SafeRail“

SKKM D zeigt den höchsten Metallanteil von allen untersuchten SKKM. Bei der Leitfähigkeitsmessung zeigt es ähnliches Verhalten wie die Referenz SKKM B. Bei den Toxizitätstests belegt es Rang 2. Um bei den Untersuchungen in Stufe 3 eine hohe Produktdiversität zu haben, wurde dieses Produkt trotz des hohen Metallanteils einbezogen. Bei den Hochlast-Zweischeiben-Tribometerversuchen zeigte SKKM D eine geringe Differenzierbarkeit zur Referenz SKKM B, siehe Abbildung 69. SKKM D wurde wegen des hohen Metallanteils nicht bei den Feldversuchen untersucht.

Als Beurteilungskriterium für die Hochlast-Zweischeiben-Tribometerversuchen wurde ein möglichst hoher Reibungskoeffizient bei Versuchsbeginn definiert. Dies hat den Hintergrund, dass Reibungskoeffizienten im Feld größer als 0,15 sein sollten, um die Bremsweglängen aus Sicherheitsgründen einzuhalten. SKKM E zeigte einen niedrigen Reibungskoeffizienten am Tribometer und einen längeren Bremsweg im Feld als die Referenz SKKM B. Somit zeigt das Referenzprodukt SKKM B bei den Feldversuchen das bessere Ergebnis.

Auf Basis der im mehrstufigen Beurteilungsverfahren definierten Kriterien hat SKKM B mit Ausnahme der Stufe 2 bzgl. Nichtüberbrückung von Isolierstößen (Rang 3) und der Untersuchung zur biologischen Abbaubarkeit stets Rang 1 belegt.

11. MÖGLICHE EINFLÜSSE AUF WARTUNG UND INSTANDHALTUNG VON AUFBRINGUNGSANLAGEN

Die Spezifizierung der Einflüsse auf Wartung und Instandhaltung ist Aufgabe der Anlagenhersteller. Daher wurde dieser Abschnitt in Absprache mit ÖBB-Infrastruktur AG von der Projektarbeit ausgenommen.

Die im Laufe des Projektes "SafeRail" erkannten Einflüsse sind im Folgenden dokumentiert: SKKM weisen bei tieferen Temperaturen eine höhere Viskosität auf. Bei Betrieb einer Aufbringungsanlage bei tieferen Temperaturen tritt eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Ablagerung von SKKM-Resten auf den Düsen auf, wodurch ein größeres Potenzial für Verstopfung und Verschmutzung gesehen wird. Allerdings zeigten tribometrische Untersuchungen bei tieferen Temperaturen sehr niedrige Reibungskoeffizienten auf, weswegen empfohlen wird, bei niedrigen Temperaturen auf den Einsatz von SKKM zu verzichten.

Bei der erstmaligen Verwendung von SKKM wird insbesondere im ersten Jahr der Anwendung ein höherer Instandhaltungsaufwand erwartet bzgl.:

- Einstellung hinsichtlich SKKM-Menge
- Reinigung z.B. zur Entfernung von Ablagerungen

Die Empfehlung der Abschaltung der SKKM-Aufbringung bzw. der Mengensteuerung gilt auch für Regen, da die Vermischung von Wasser und SKKM ebenfalls zu niedrigen Reibungskoeffizienten führte.

Da die verschiedenen SKKM bei Regen und tieferen Temperatur unterschiedlichen Einfluss auf die Bremsweglänge haben, sollte mithilfe von Regen- und Temperatursensoren die aufgebrachte Menge an SKKM den Umgebungsbedingungen angepasst werden.

Wie die Ergebnisse gezeigt haben, hat die SKKM-Menge eine große Auswirkung auf den Bremsweg. Daher wird bei einer Wartung eine Kontrolle der Düsen und der Mengeneinstellung empfohlen.

12. AUSARBEITUNG FÜR REGELWERKE UND NORMEN

Ein ausführlicher Vorschlag für Regelwerke und Normen wurde erstellt. Hierbei wurden die im Projekt „SafeRail“ entwickelten Beurteilungsverfahren mit weiteren Quellen zusammengeführt, insbesondere:

- DIN EN 15427-2-1:2022-07 – Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 2-1: Eigenschaften und Merkmale – Spurkranzschmierstoffe ³⁶
- DIN CEN/TS 15427-2-2:2021-03 – Bahnanwendungen – Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene – Teil 2-2: Eigenschaften und Merkmale – Kraftschlussmodifikatoren (technische Spezifikation) ³⁷

Die Ausarbeitung ist in folgende Abschnitte gegliedert:

1. Allgemeines
2. Einsatz der Schienenkopfconditionierung und normative Verweisungen
3. Verwendbarkeit, Einbau
4. Steuerung
5. Wirklänge
6. Schienenkopfconditioniermittel (SKKM)
7. Ersatzteilhaltung
8. Technische Nutzungsdauer
9. Wartung
10. Zulassung der Anlage inkl. SKKM
11. Bewertung
12. Herstellerangaben
13. Verwendete Quellen
14. Finanzierungshinweis und Autoren

In DIN EN 15427-2-1:2022-07 und DIN CEN/TS 15427-2-2:2021-03 finden sich eine Reihe an verbindlichen und optionalen Untersuchungen, die zum Teil auch in die Ausarbeitung integriert wurden. Hinsichtlich Umweltverträglichkeit wird in der Norm und der technischen Spezifikation nur die verbindliche Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit angegeben. Die vorliegende Ausarbeitung geht darüber deutlich hinaus. Für die Zulassung von SKKM wurden im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit zusätzlich zur biologischen Abbaubarkeit Untersuchungen zur Toxizität und des Metallanteils ergänzt. Die Ausarbeitung umfasst des Weiteren die Beurteilung der Nichtüberbrückung von Isolierstößen sowie eine tribologische Beurteilung des Reibungskoeffizienten mittels Zweischeiben-Tribometer nach den im Rahmen des Projekts

erarbeiteten Methoden. Nach positivem Abschluss aller Untersuchungen im Labor entscheidet ÖBB-Infrastruktur AG über eine Betriebserprobung in einem mehrjährigen Versuchszeitraum. Die vollständige Ausarbeitung für Regelwerke und Normen wurde ÖBB-Infrastruktur AG zur Verfügung gestellt.

13. ZUSAMMENFASSUNG

Schienenkopfkonditioniermittel (SKKM) werden überwiegend zur Lärm- und Verschleißreduktion in Gleisbögen eingesetzt. Im Rahmen des Projekts „SafeRail“ wurde ein mehrstufiges Beurteilungsverfahren für SKKM entwickelt, welches die Beurteilung der Umweltverträglichkeit, der Nichtüberbrückung von Isolierstößen des Reibungsverhaltens und somit die Auswirkung auf den Bremsweg, und inkludiert. Während der Projektlaufzeit wurde eine technische Spezifikation³⁷ publiziert, welche allerdings keine verpflichtenden Untersuchungen des Reibungsverhaltens und keine Untersuchung der Nichtüberbrückung von Isolierstößen enthält. Das Reibungsverhalten ist jedoch sicherheitsrelevant, da es bei zu geringen Reibungskoeffizienten beim Bremsvorgang zu einer deutlichen Bremswegverlängerung kommen könnte.

Das gesamte Beurteilungsverfahren ist mehrstufig ausgelegt, dadurch wird erst nach dem positiven Abschluss einer Prüfung das nächste, komplexere Prüfverfahren durchgeführt. Die Ausarbeitung für Regelwerke und Normen wurde ÖBB-Infrastruktur AG zur Verfügung gestellt.



Abbildung 96: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren von SKKM überwiegend als Labortests realisiert

Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von SKKM werden die biologische Abbaubarkeit, die Toxizität und der Metallanteil im SKKM untersucht.

Isolierstöße sind Teil der Sicherungsanlage und für die Lokalisierung von Zügen notwendig. Der Einsatz von SKKM darf nicht zu leitenden Isolierstößen führen. AC2T research GmbH hat hierzu eine Labormethode entwickelt, mit der die Auswirkung von SKKM auf die elektrische Leitfähigkeit bei verschiedenen Bedingungen (Temperatur, Wasser, Salzwasser, Alterung, Elektrodenabstand) untersucht wird. Die Methode wurde mit Feldversuchen verifiziert.

Ein Schwerpunkt des Projektes war die Entwicklung einer Methode zur Beurteilung des Reibungsverhaltens in einem Modelltest mittels eines Tribometers. Hierzu wurden Untersuchungen am Hochlast-Zweischeiben-Tribometer bei verschiedenen Bedingungen (Temperatur, Wasser, Schlupf, Pressung, SKKM-Menge) durchgeführt. Als Zwischenschritt für

die Methodenentwicklung des Modelltests wurden die ausgewählten SKKM am Rad-Schiene-Teststand mit einer größeren Kontaktfläche untersucht.

In aufwendigen Feldversuchen wurde die Korrelation der Ergebnisse am Tribometer und Teststand mit dem Feld anhand von zwei SKKM aufgezeigt. Da die gleichmäßige Verteilung von SKKM durch eine Anlage einen längeren Zeitraum in Anspruch nimmt, wurden bei diesen Feldversuchen neben der punktuellen Aufbringung des SKKM auch eine Aufbringung durch Aufsprühen auf Abschnitten der Teststrecken durchgeführt. Dadurch konnten die Feldversuche mit einem vertretbaren Zeitaufwand umgesetzt werden und der Einfluss von Temperatur, Verschmutzung (Laub), Brems sand und Wasser in Kombination mit SKKM auf den Bremsweg ermittelt werden. Darüber hinaus wurde die SKKM-Menge variiert. Zur Untersuchung des Temperatureinflusses wurden Feldversuche im Sommer und Winter durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Feldversuchen korrelieren mit den Modelltestergebnissen am Hochlast-Zweischeiben-Tribometer, daher können Untersuchungen an diesem Tribometer zur Untersuchung von SKKM eingesetzt und so der Aufwand von Feldversuchen minimiert werden.

Das mehrstufige Beurteilungsverfahren wurde anhand von fünf ausgewählten SKKM entwickelt bzw. verifiziert. Hierbei wurde jeweils für die Umweltverträglichkeit, die Nichtüberbrückung von Isolierstößen, den Reibungskoeffizienten am Zweischeiben-Tribometer und den Bremsweg im Feldversuch ein Ranking erstellt und die Auswahl für die nächste Stufe getroffen. Auf diese Weise wurde die Anzahl der SKKM in Stufe 3 auf drei und in Stufe 4 auf zwei reduziert.

14. REFERENZEN

1. St. Zechner, Untersuchung des Einflusses von Schienenkopfkonditioniermitteln auf den Reibungskoeffizienten am Rad-Schienen-Teststand der TU Wien, Diplomarbeit, Wien 2022.
2. Ph. A. Stadlmair, Auswirkungen unterschiedlicher Schienenkopfkonditioniermittel und Witterungsbedingungen auf den Reibungskoeffizienten mittels neuartiger Modellversuche, Diplomarbeit, Wien 2022
3. H. Czichos und K.-H. Habig, Tribologie Handbuch, 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2020.
4. K. Sommer, H. Rudolf und J. Schöfer, Verschleiß metallischer Werkstoffe, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2014.
5. A. Trausmuth, Oberflächenermüdung von nitrierten, einsatz- und durchgehärteten Werkstoffen, Dissertation, Leoben 2012.
6. D. Muhs, H. Wittel, M. Becker, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003.
7. L. Fendrich, W. Fengler, Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag, 2013.
8. B. Lichtberger, Handbuch Gleis, Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, 2003.
9. C. Esveld, Modern Railway Track, 2. Auflage, MRT-Productions, 2001.
10. H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, 156 – 171, 1881.
11. M. Wisniewski, Elastohydrodynamische Schmierung, Handbuch der Tribologie und Schmierungs-technik Band 9, 1. Auflage, expert Verlag, Renningen 2000.
12. K. L. Johnson, Contact mechanics, Cambridge University Press, 1992.
13. E. W. Deeg, New Algorithms for Calculating Hertzian Stresses, Deformations, and Contact Zone Parameters, AMP Journal of Technology, 2, 14-24, 1992.
14. K. Knothe, S. Stichel, Schienenfahrzeugdynamik, Springer Verlag, 2003.
15. W. Steinhilper, S. Bernd, Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
16. C. Bär, Längspress- und Klebverbindungen unter statischer und wechselnder Torsion, Dresden: Dissertation, 1995.
17. A. Stribersky, Skriptum Schienenfahrzeugbau Vorlesung, Wien: TU Wien, 2019.
18. J. Barber, Contact Mechanics, Springer, 2018.

19. K. Johnson, Contact mechanics, 1. Auflage, Cambridge University Press, reprinted Cambridge 1999.
20. C. Cattaneo, Sul contatto di due corpi elastici distribuzione locale degli sforzi, Rend. dell'Accad. Naz. Dei Lincei, 27, 342 – 348, 1938.
21. G. Hamilton, Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 197, 7 – 14, 1983.
22. M. Freudenberger, S. Krenn, G. Vorlauffer, A. Trausmuth, Rad/Schiene Interaktion – Analyse der Auswirkung von Fahrzeuglasten auf Schienenstöße, Verkehrsinfrastrukturforschung 2016, Ausschreibung VIF 2016, FFG-Projektnummer: 860563, Bericht Jan. 2020.
23. J. Smit, C. K. Liu, Stresses Due to Tangential and Normal Loads on an Elastic Solid With Application to Some Contact Stress Problems, Journal of Applied Mechanics, ASME J, 20, 157 – 166, 1953.
24. C. Gebhardt, Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
25. O. Arias-Cuevas, Z. Li, R. Lewis, E. Gallardo-Hernandez, Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts, Wear, 268, 843 – 551, 2010.
26. G. Havlicek, G. Kartnig, Ermittlung des Längsschlupfes eines angetriebenen Kranrads bei bombiertem Schienenkopf, Logistics Journal, 10, 2017, DOI 10.2195/lj_Proc_havlicek_de_201710_01
27. M. Paces, Sand im Rad/Schiene-Kontakt, TU Wien: Dissertation, 2013.
28. L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick and R. Stock, A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales, Journal of Rail and Rapid Transit, 233, 201 – 210, 2018.
29. L. Wu, X. Yao, J. VanderMarel, X. Lu, J. Cotter, D. T. Eadie, Z. Wen, H. Wang, Effects of curve radius and rail profile on energy saving in heavy haul achieved by application of top of rail friction modifier, Wear, 366, 279 – 286, 2016.
30. D. T. Eadie, D. Elvidge, K. Oldknow, R. Stock, P. Pointner, J. Kalousek, P. Klauser, 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, 1222 - 1230, 2008.

31. M. Harmon, R. Lewis, Review of top of rail friction modifier tribology, Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces, 10, 150 – 162, 2016.
32. S. A. Khan, J. Lundberg, C. Stenström, Carry distance of top-of-rail friction modifiers, Journal of Rail and Rapid Transit, 232, 2418 – 2430, 2018.
33. F. Zbinden, R. Zoller, D. Leibundgut, Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens durch den Einsatz der Schienenkopfkonditionierung, Eurailpress, Ausgabe Mai, 2020.
34. R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, E. Donald, L. Roger, Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application, Wear, 366, 225 – 232, 2016.
35. R. Lewis, R. Dwyer-Joyce, S. Lewis, C. Hardwick, E. Gallardo-Hernandez, Tribology of the Wheel-Rail Contact: The Effect of Third Body Materials, International Journal of Railway Technology, 1, 167 – 194, 2012.
36. EN15427-1-1:2022, Bahnanwendungen - Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene - Teil 1-1: Vorrichtungen und Anwendung - Spurkranzschmierstoffe und EN15427-2-1:2022, Bahnanwendungen - Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene - Teil 2-1: Eigenschaften und Merkmale - Spurkranzschmierstoffe
37. CEN/TS 15427-1-2:2020, Bahnanwendungen - Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene - Teil 1-2: Vorrichtungen und Anwendung - Behandlung der Schienenoberfläche und CEN/TS 15427-2-2:2020, Bahnanwendungen — Reibungsmanagement zwischen Rad und Schiene Teil 2-2: Eigenschaften und Merkmale - Behandlung der Schienenoberfläche
38. P. Weidinger, Rauigkeit im Rad-Schiene System, Leoben: Diplomarbeit, 2008.
39. F. Zbinden, Schienenkopfkonditionierung, 17. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Dresden, Februar 2020.
40. SKF Gruppe, Reibung erfolgreich beherrschen mit automatischen SKF und Lincoln stationären und fahrzeuggebundenen Schmiersystemen, www.skf.com/at/industries/railways/solutions/easyrail-compact, https://www.skf.com/binaries/pub41/Images/0901d19680389a8d-14824DE_tcm_41-160324.pdf, 2014, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022.
41. SKF Gruppe: Stationäre Schienenschmiersysteme für die Schieneninfrastruktur von Vollbahnen – Systeme zur Förderung von Schmier- und Konditioniermittel an die Schiene. [181](https://www.vogel-gruppe.de/fileadmin/user_upload/Schmiertechnik/SKF/Branchen/SKF-</div><div data-bbox=)

- Stationaere%20Schienenschmierung_Vollbahnen_Vogel-W-202-DE-0912_LSP2%2013193%20DE.pdf, 2012, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022.
42. J. Kalousek, K. L. Johnson, An Investigation of Short Pitch Wheel and Rail Corrugations on the Vancouver Mass Transit System, Proc IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 206, 127 – 135, 1992.
 43. M. Harmon, R. Lewis, New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales, Proc IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 235, 191 – 200, 2020.
 44. C. Hardwick, R. Lewis, R. Stock, The effects of friction management materials on rail with pre-existing RCF surface damage, Wear, 384-385, 50 – 60, 2017.
 45. E. Gallardo-Hernandez, R. Lewis, Twin disc assessment of wheel/rail adhesion, Wear, 265, 1309 – 1316, 2008.
 46. H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, Experimental investigation on influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions, Wear, 265, 1504 – 1511, 2008.
 47. W. Zhang, J. Chen, X. Wu, X. Jin, Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig, Wear, 258, 82 – 88, 2002.
 48. UIC 544-1:2014-10, Bremse – Bremsleistung, Oktober 2014.
 49. G. Totten, S. Westbrook, R. Shah, Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing, 2nd edition, ASTM International, 2019.
 50. <https://www.lubcon.com/wp-content/uploads/2017/06/LUBCON-Schmierstoffe-Bahnindustrie-DE.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 51. https://igralub.ch/?page_id=1299, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 52. <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/solidstick4pagepamphlet041218.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 53. <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/solidstick4pagepamphlet041218.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 54. <https://lbfoster.eu/perch/resources/solutions/lbfoster-keltrack-tor-friction-modifier-datasheet.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 55. <https://www.fuchs.com/de/de/produkt/product/150132-tram-silence-00/>. zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 56. <https://www.fuchs.com/at/de/produkt/product/57260-tramlub-ssm-eco/>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.
 57. <https://difacto.eu/products-and-solution/>, zuletzt aufgerufen am 30.Juni 2022.

58. Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich – Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG 1959, StF: BGBl. Nr. 215/1959 (WV), letzte Anpassung BGBl. Nr. 73/2018.
59. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
60. <https://webrigoletto.uba.de/Rigoletto/>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
61. Beschluss (EU) 2018/1702 der Kommission vom 8. November 2018 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Schmierstoffe.
62. Blauer Engel, DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“.
63. Richtlinie UZ 14 „Schmierstoffe“.
64. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.
65. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe.
66. MAK- und BAT-Werte-Liste 2021 – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe.
67. BGBl. II Nr. 156/2021 – Änderung der Grenzwertverordnung 2020 und der Verordnung biologische Arbeitsstoffe.
68. Richtlinie (EU) 2019/983 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit.
69. <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/possible-concern/list>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
70. <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/priority-action>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
71. OECD Series on Testing and Assessment – Guidance Document on Aquatic Toxicity Testing of Difficult Substances and Mixtures.
72. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, Test No. 301: Ready Biodegradability.

73. <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/LuSC-list%20vs%2007012021%2018-1702%20%20without%20track%20changes.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
74. <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/schmierstoffe-hydraulikfluessigkeiten-bis-12-2022>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
75. <https://de.wikipedia.org/wiki/Stage-Gate-Modell>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
76. Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel 3.3.2 und Anhang B „3.2 Stoffbeschränkungen weiterer relevanter Stoffgruppen“
77. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kupfervergiftung>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
78. Umweltbundesamt, Umweltprobenbank des Bundes, Metalle, <https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10039>, zuletzt aufgerufen am 30.06.2022
79. Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel „Zusätzliche Anforderungen an die aquatische Toxizität“.
80. DIN EN 16807 - Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse –Bio-Schmierstoffe –Kriterien und Anforderungen für Bio-Schmierstoffe und biobasierteSchmierstoffe
81. Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel „Zusätzliche Anforderungen an die aquatische Toxizität“.
82. Blauer Engel: DE-UZ 178 Vergabekriterien „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ – Kapitel „Geltungsbereich“
83. R. Weyandt, Bericht-Nr.: 6244912-01-V1 und 6244912-02-V1 von SGS Institut Fresenius GmbH, Test auf leichte biologische Abbaubarkeit, 13.09.2022
84. M. Kretschmar, Berichte Nr. 4264, 4265, 4266, 4267, 4268; Hydrotox GmbH: Prüfung der aquatischen Ökotoxizität eines Schmierstoff-Eluates, 15.06.2021
85. <https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10039>, zuletzt aufgerufen am 22.09.2022
86. <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleisfreimeldeanlage>, zuletzt aufgerufen am 30. Juni 2022.
87. Bildquellen: AC²T und ÖBB
88. Bildquellen AC²T, ÖBB, RTRI Tokio, TU Wien
89. Bildquellen: AC²T, ÖBB, TU Wien

90. ANSYS Mechanical User's Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2013.
91. DIN EN 13674-1 - 2011-04: Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1
92. DIN EN 15302:2011-01: Bahnanwendungen – Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität
93. DIN EN 13262:2020-12, Bahnanwendungen-Radsätze und Drehgestelle-Räder-Produktanforderungen, 2020
94. DIN EN 13674-1:2017-07, Bahnanwendungen-Oberbau-Schienen, Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m
95. P. Malouvier, Bericht Inbetriebnahme Laufradprüfstand, Technische Universität Wien, 2016
96. G. Nessler, Prüfbericht M1752, Wien: ÖBB Produktion GmbH - Maschinentechnische Messgruppe, 2021.
97. G. Nessler, Prüfbericht M1758, Wien: ÖBB Produktion GmbH - Maschinentechnische Messgruppe, 2022.
98. Bildquelle: Railjet: <https://www.oebb.at/de/reiseplanung-services/im-zug/unsere-zuege/railjet>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tribologisches System, modifiziert nach ^{3, 4, 5}	10
Abbildung 2: Verschleißmechanismen, modifiziert nach ^{3, 4, 5}	11
Abbildung 3: Reibungszustände/Reibungsbegriffe eines tribologischen Systems ³	14
Abbildung 4: Einflüsse auf die Werkstoffanstrengung, modifiziert nach ^{4, 5}	17
Abbildung 5: Berührung zweier allseitig gekrümmter Körper. a) Räumliche Ansicht; b) Druckverteilung in der ellipsoidalen Kontaktfläche; c) Hauptkrümmungsebenen. Modifiziert nach ¹⁵	19
Abbildung 6: Kontaktmodell mit Kontaktfläche, modifiziert nach ^{5, 22} : a) Zylinder-Zylinder; b) Zylinder-Ebene	23
Abbildung 7: Normierter Pressungsverlauf Linienkontakt ⁵	24
Abbildung 8: Qualitativer Zusammenhang zwischen Kraftschluss und Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt, modifiziert nach ²⁷	27
Abbildung 9: Applikationsbereich von Schienenkopfkonditionierung und Spurkranzschmierung ³³	29
Abbildung 10: Mögliche Reibungskennlinien ³⁵	30
Abbildung 11: Stationäre Aufbringung des SKKM ⁴⁰ : Links) Anlagenschema, rechts) Applikatorleisten	32
Abbildung 12: Fahrzeugseitige Aufbringung des SKKM Links) Anlagenschema ⁴⁰ , rechts) Sprühen auf das Gleis ³⁹	34
Abbildung 13: Oberflächenbilder nach Versuchen auf einem Zweiseiben-Tribometer bei 1,5 GPa, 1 % Schlupf und 400 U/min. Trocken nach 4000 U (1); Trocken nach 25.000 U (2); Wasser nach 25.000 U (3); SKKM nach 25.000 U (4); SKKM nach 25.000 U; Trocken nach 25.000 U (5); SKKM (Öl-basiert) nach 25.000 U (6); SKKM (Fett-basiert) nach 25.000 U (7); und SKKM (hybrid) nach 25.000 U (8). ⁴⁴	38
Abbildung 14: Reibungskoeffizienten zwei Friction Modifier am Zweiseiben-Tribometer bei 2 % Schlupf ²⁵	39
Abbildung 15: Reibungskoeffizienten von zwei Friction Modifier mit Wasser am Zweiseiben-Tribometer bei 2 % Schlupf ²⁵	40
Abbildung 16: Reibungskoeffizient am Zweiseiben-Tribometer mit 2 % Schlupf, 1500 N/mm ² Flächenpressung und SKKM (links); Reibungskoeffizient am Full-Scale-Teststand mit 2 % Schlupf, 1500 N/mm ² Flächenpressung und SKKM (rechts) ²⁸	41
Abbildung 17: Trockener Kontakt mit Drittkörpermaterialien wie Abrieb und Oxide (a); Kontakt mit Partikel des Reibungsmodifikators (blau) (b); Kontakt mit SKKM (c) ³⁴	45

Abbildung 18: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren von SKKM im Projekt „SafeRail“	56
Abbildung 19: Umwelteinflüsse von SKKM und Umweltverträglichkeit	57
Abbildung 20: Testaufbau zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von SKKM bzw. Nichtüberbrückung von Isolierstößen	67
Abbildung 21: Korrelation der Labormessungen mit Messungen am realen Isolierstoß mit den fünf SKKM mit Widerstandswerten innerhalb des Messbereichs von $< 3 \text{ G}\Omega$	72
Abbildung 22: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren zur Beurteilung von SKKM mit Einbindung der Prüfkette für den Reibungskoeffizienten ⁸⁷	75
Abbildung 23: Zuordnung der tribologischen Messtechnik auf das System „Rad-Schiene“ ⁸⁸	76
Abbildung 24: Vollständige Prüfkette im Projekt „SafeRail“. Modellversuche am Zweischeiben-Tribometer bei AC ² T (links) ⁸⁷ ; Rad-Schiene-Teststand der TU Wien (Mitte) ⁸⁹ , Feldversuche im ÖBB-Schienenetz (rechts) ⁸⁷	79
Abbildung 25: Konvergenzverhalten ⁹⁰ (links, angepasst) und Vernetzungsbeispiel am ZST (rechts)	82
Abbildung 26: Probengeometrie im Hochlast-ZST (a) Probenrad; (b) Schienenrad; (c) 3D-Modell	84
Abbildung 27: Hochlast-ZST: Analytisch – Kontaktfläche (links); Flächenpressung (rechts)	85
Abbildung 28: Hochlast-ZST: Analytisch – Oberflächenspannungen	86
Abbildung 29: Hochlast-ZST: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche	87
Abbildung 30: Hochlast-ZST: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (XY-Ebene)	87
Abbildung 31: Probengeometrie beim Rad-Schiene-Teststand (a) Probenrad; (b) Schienenrad; (c) 3D-Modell	89
Abbildung 32: Rad-Schiene-Teststand: Analytisch – Kontaktfläche (links); Flächenpressung (rechts)	90
Abbildung 33: Rad-Schiene-Teststand: Analytisch – Oberflächenspannungen	91
Abbildung 34: Rad-Schiene-Teststand: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche	92
Abbildung 35: Rad-Schiene-Teststand: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (YZ-Ebene)	92
Abbildung 36: Feld: Analytisch – Maximale Flächenpressungen (links) und Kontaktflächen bei unterschiedlicher Belastung (rechts); Verlauf der Flächenpressung bei 110 kN Radlast (unten)	95
Abbildung 37: Feld: Analytisch – Oberflächenspannungen	96

Abbildung 38: Feld: FE-Simulation – Flächenpressung und Kontaktfläche.....	97
Abbildung 39: Feld: FE-Simulation – von Mises-Vergleichsspannung (YZ-Ebene).....	97
Abbildung 40: Hochlast-ZST bei AC ² T und Arbeitsschritte	100
Abbildung 41: Hochlast-ZST: Probenrad gefertigt aus einem Schienenfahrzeug-Rad (links); Schienenrad gefertigt aus einer realen Schiene (rechts).....	103
Abbildung 42: Hochlast-ZST: Trocken – Verlauf des Reibungskoeffizienten	105
Abbildung 43: Hochlast-ZST: Einlaufvorgang.....	106
Abbildung 44: Hochlast-ZST: (a) Oberflächentopografie nach der Einlaufphase; (b) Oberflächentopografie nach einem Versuch mit SKKM.....	107
Abbildung 45: Hochlast-ZST: Verteilung des SKKM – charakteristischer Verlauf (0 % SRR)	108
Abbildung 46: Hochlast-ZST: Reibungskoeffizient bei einem Versuch mit SKKM – charakteristische Messkurve (2 % SRR).....	109
Abbildung 47: Hochlast-ZST: Versuchsdurchführung mit SKKM	110
Abbildung 48: Hochlast-ZST – Wasseraufbringung (links), Wasserkeil vor dem Kontakt bei reduziertem Sprühnebel (rechts).....	110
Abbildung 49: Hochlast-ZST – Aufbau Hitzeversuch.....	111
Abbildung 50: Hochlast-ZST – Gehäusebox für Kälteversuche; (1) Einfüllöffnungen, (2) Kältekammer, (3) Führungen der Kältekammer, (4) Zufuhr von Spülgas.....	113
Abbildung 51: Modifizierte Gehäusebox (links) und vereistes Schienenrad (rechts).....	114
Abbildung 52: Rad-Schiene-Teststand an der TU Wien und Arbeitsschritte	115
Abbildung 53: Oberflächenschäden nach Dauerversuchen am Rad-Schiene-Teststand ⁹²	117
Abbildung 54: Rad-Schiene-Teststand: Trocken – Referenz.....	119
Abbildung 55: Rad-Schiene-Teststand: Abdruck Probenrad	119
Abbildung 56: Oberflächenanalyse Probenrad	120
Abbildung 57: Wasserapplikation mittels Sprüheinrichtung (a) auf Schienenrad	122
Abbildung 58: Aufbringung von SKKM am Hochlast-ZST (rechts).....	123
Abbildung 59: Applikation von SKKM am Schienenrad	123
Abbildung 60: Sprühvorrichtung für den Rad-Schiene-Teststand und Feldversuche (1) magnetischer Ventilblock, (2) Ein/Aus-Schalter, (3) Druckluftversorgung, (4) Saugleitung, (5) Zuleitung, (6) verstellbare Düse	124
Abbildung 61: Sprühversuche am Linearteststand	125
Abbildung 62: Sprühbilder der Aufsprühvorrichtung: a) Sprühvorrichtung ohne Blende, b) Sprühbild ohne Blende, c) Sprühvorrichtung mit Blende, d) Sprühbild mit Blende.....	126

Abbildung 63: Variation der SKKM-Menge: Vergleich zwischen 8 und 12 mg SKKM, a) SKKM B, b) SKKM E.....	130
Abbildung 64: Variation der Pressung: Vergleich zwischen 850 MPa und 1200 MPa bei SKKM E.....	131
Abbildung 65: Variation des Schlupfes: Vergleich zwischen 2 und 15 % Schlupf, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E.....	132
Abbildung 66: Variation der Temperatur: Vergleich zwischen -20, -10, 23 und 60 °C, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E.....	133
Abbildung 67: Referenzversuche mit Wasser.....	134
Abbildung 68: Vergleich zwischen trockenen und nassen Bedingungen, a) SKKM B, b) SKKM D und c) SKKM E.....	135
Abbildung 69: Vergleich der SKKM bei 12 mg und Raumtemperatur; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	136
Abbildung 70: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	138
Abbildung 71: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge, erste und zweite Phase mit 2 % Schlupf aus Abbildung 70; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	139
Abbildung 72: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung von SKKM durch Aufsprühen: Gegenüberstellung der Mittelwerte bei 2 % Schlupf; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	140
Abbildung 73: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung der SKKM mit Spatel: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	141
Abbildung 74: Rad-Schiene-Teststand bei Aufbringung der SKKM mit Spatel: Vergleich zwischen SKKM und SKKM-Menge, erste und zweite Phase mit 2 % Schlupf aus Abbildung 73; SKKM B, SKKM D und SKKM E.....	141
Abbildung 75: Verdrängung des mit Spatel aufgebrauchten SKKM E nach 1 Umdrehung des Schienenrads und 5 Überrollungen des Probenrads.....	142
Abbildung 76: Teststrecke am Zentralverschiebebahnhof Wien-Kledering.....	146
Abbildung 77: Triebfahrzeug für die Feldversuche im Sommer und Winter.....	146
Abbildung 78: 1000 Hz PZB-Magnet.....	148
Abbildung 79: Oberflächentopografie einer befahrenen Schiene (links) und vergrößerter Bereich des Kontaktbandes (rechts).....	150
Abbildung 80: Punktuell aufgebrauchtes SKKM auf der Schienenoberkante mit Aufnahmen vor und nach der ersten und zweiten Bremsmessfahrt.....	152

Abbildung 81: Sprühvorrichtung (Ansicht von vorne)	152
Abbildung 82: Drei Phasen einer Bremsmessfahrt bei punktueller Aufbringung von SKKM ⁹⁸	154
Abbildung 83. Drei Phasen einer Bremsmessfahrt bei Aufbringung von SKKM durch Sprühen ⁹⁸	154
Abbildung 84: Gemessene Größen einer Bremsmessfahrt am Beispiel SKKM-B mit punktueller Auftragung, Bremsmessfahrt 1	155
Abbildung 85: Besprühung der Schienen mit Wasser	156
Abbildung 86: Auflegen von Laub auf die Schiene ⁹⁹	157
Abbildung 87: Messergebnisse der ersten Bremsmessfahrt Aufsprühen von a) 40 mg/m und b) 80 mg/m	161
Abbildung 88: Messergebnisse bei punktueller Aufbringung	162
Abbildung 89: Messergebnisse im Winter bei Laub Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B.....	163
Abbildung 90: Messergebnisse im Winter bei nasser Schiene mit und ohne Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B	164
Abbildung 91: Messergebnisse im Winter nach Sanden Aufsprühen von 40 mg/m SKKM B	164
Abbildung 92: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Rad-Schiene-Teststand, Hochlast-ZST	168
Abbildung 93: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Feldversuche – Bremsweglängen in Abhängigkeit von der Anzahl der Bremsmessfahrten (BMF)	169
Abbildung 94: Sommerfeldversuch mit 80 mg/m SKKM B – erste Bremsmessfahrt	170
Abbildung 95: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren im Labor und im Feld	171
Abbildung 96: Mehrstufiges Beurteilungsverfahren von SKKM überwiegend als Labortests realisiert	177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reibungskoeffizienten-Größenordnung für die verschiedenen Reibungsarten und Reibungszustände ³	14
Tabelle 2: Einfluss von SKKM auf den Bremsweg ³³	43
Tabelle 3: Einfluss von SKKM auf die Beschleunigungszeit ³³	43
Tabelle 4: Produktübersicht über SKKM	46
Tabelle 5: OECD-Richtlinien, die Prüfmethode bezüglich der aquatischen Toxizität, biologischen Abbaubarkeit und der Bioakkumulation beschreiben	53
Tabelle 6: DIN- und ISO-Normen zur Untersuchung der aquatischen Toxizität	54
Tabelle 7: DIN- und ISO-Normen zur Toxizität und biologischen Abbaubarkeit	55
Tabelle 8: Testergebnisse OECD 301 D mit SKKM, biologische Abbaubarkeit auf Basis des Sauerstoffverbrauchs in % des theoretischen Höchstwerts ⁸³	62
Tabelle 9: Toxizität der SKKM mittels Limittests mit einer loading rate von 1000 mg/L ⁸³	64
Tabelle 10: Nichtüberbrückung von Isolierstößen durch SKKM im Testaufbau bei variierenden Temperaturen und Elektrodenabstand	69
Tabelle 11: Einflussfaktoren auf die Nichtüberbrückung (Isolierwirkung) von SKKM auf Isolierstößen	70
Tabelle 12: Reihung der SKKM nach der Nichtüberbrückung (Isolierwirkung), „Frisch“ umfasst die Variation von Temperatur und Abstand	71
Tabelle 13: Reale Gegebenheiten und Einflussfaktoren auf das Tribosystem „Rad-Schiene“	77
Tabelle 14: Hochlast-ZST: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung	83
Tabelle 15: Hochlast-ZST: Gegenüberstellung der Ergebnisse	88
Tabelle 16: Rad-Schiene-Teststand: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung	88
Tabelle 17: Rad-Schiene-Teststand: Gegenüberstellung der Ergebnisse	93
Tabelle 18: Feld: Angaben zu Werkstoff und Geometrie für die FE-Simulation und analytische Berechnung	94
Tabelle 19: Feld: Gegenüberstellung der Ergebnisse	98
Tabelle 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den FE-Simulationen	98
Tabelle 21: Auszug der chemischen Zusammensetzung, Härte und Mindestzugfestigkeit des Radwerkstoffs „ER9“ nach DIN EN 13262:2020 ⁹³	102

Tabelle 22: Auszug der chemischen Zusammensetzung, Härte und Mindestzugfestigkeit des Schienenwerkstoffs „R260“ nach EN 13674-1:2011:2017 ⁹⁴	103
Tabelle 23: Hochlast-ZST – Testparameter	109
Tabelle 24: Rad-Schiene-Teststand – Testparameter	121
Tabelle 25: Hochlast-ZST – Versuchsmatrix; SKKM B, SKKM D und SKKM E	129
Tabelle 26: Rad-Schiene-Teststand – Versuchsmatrix; SKKM B, SKKM D und SKKM E... ..	137
Tabelle 27: Auszug aus dem Triebfahrzeugdatenblatt ^{96,97}	147
Tabelle 28: Feldversuche – Versuchsmatrix	158
Tabelle 29: Bremswege bei den Versuchsvarianten im Sommer 2021, Bremswege in (m) ..	160
Tabelle 30: Bremswege bei den Versuchsvarianten im Winter 2022, Bremswege in (m) ...	160
Tabelle 31: Parameterübersicht von Feldversuch, Rad-Schiene-Teststand und Zweischeiben-Tribometer	167
Tabelle 32: Beurteilung der SKKM anhand des mehrstufigen Beurteilungsverfahrens im Projekt „SafeRail“	172