

Ermüdung-Minimierung und Reibungsmodifikation im Rad-Schiene-Kontakt

Beitragende

Andrea Arcifa, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf.
Rowena Crockett, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf.
Nicholas D. Spencer, ETH Zürich, Leopold-Ruzicka-Weg 4, 8093 Zürich
Franziska Zbinden, SBB, Hilfikerstrasse 3, 3000 Bern 65
Urs Schönholzer, SBB, Hilfikerstrasse 3, 3000 Bern 65

Inhaltsverzeichnis.

1	<i>Einführung</i>	2
2	<i>Laborexperimente mit Schienenkopfkonditioniermittel</i>	4
2.1	<i>Mini-Traktionsmaschine (MTM)</i>	4
2.2	<i>Twin-disk Experimente</i>	7
2.3	<i>Chemische Analyse der Twin-Disk Scheiben</i>	10
3	<i>Feldversuche 1: Anhaltwegmessungen</i>	10
4	<i>Feldversuche 2: Probenentnahme in Gasel 2024.</i>	12
4.1	<i>Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (ToF-SIMS) zur detektieren von anorganische Bestandteile des Konditionierers.</i>	14
4.2	<i>Infrarotspektroskopie (IR) zur detektieren von organische Bestandteile des Konditionierers.</i>	15
4.3	<i>Kapillarelektrophorese zur detektieren von organsichen und anorganische Bestandteile des Konditionierers</i>	16
5	<i>Schlussfolgerungen</i>	16
5.1	<i>Labor Untersuchungen: MTM und Twin Disk.</i>	16
5.2	<i>Feldversuche</i>	18
6	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	19
7	<i>Referenzen</i>	20

1 Einführung

Eine zwischen Radlaufläche und Schienenkopf eingesetzte Konditionierung, soll die Reibung wie in Abbildung 1 dargestellt in einem optimalen Bereich halten.

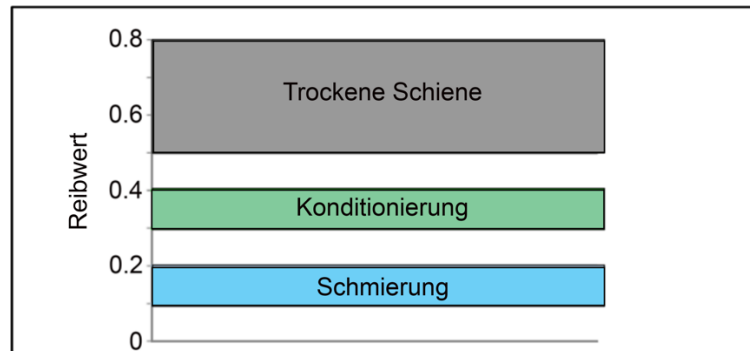


Abbildung 1. Typische Reibwerte für Schmierung, Konditionierung und trockene Schiene. Ein Konditioniermittel ist so zu konzipieren, dass ein konstanter Reibwerte im mittleren Bereich erreicht wird [1].

Der in Abbildung 1 angegebene Reibwert einer "trockenen Schiene" ist repräsentativ für einen schweren, von Adhäsion dominierten Reibungsmechanismus. Gegenstücke aus Stahl weisen, wenn sie frei von Verunreinigungen oder Drittkörpern sind, unter ausreichend anspruchsvollen Bedingungen einen Reibungskoeffizienten (Reibwert) $> 0,5$ auf. Verunreinigungen können den Reibungskoeffizienten verringern. Zudem können Veränderungen des Verschleiss- und Reibungsmechanismus beobachtet werden, wenn die Betriebsbedingungen geändert werden [2].

Ziel dieses Projekts war es, zu untersuchen, ob der Einsatz eines Schienenkopfkonditioniermittels zu einer Reduktion von Verschleiss und Rollkontaktermüdung führt. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verringerung des Reibungskoeffizienten in einen Bereich, in dem nur elastische Verformungen auftreten, im Gegensatz zu plastischen Verformungen, zu einer Verringerung der Rissbildung führt [1], [3]. Diese Verringerung führt jedoch nicht zu einer Verringerungsrate der Rissausbreitung bei bestehenden Rissen (Abb. 2).

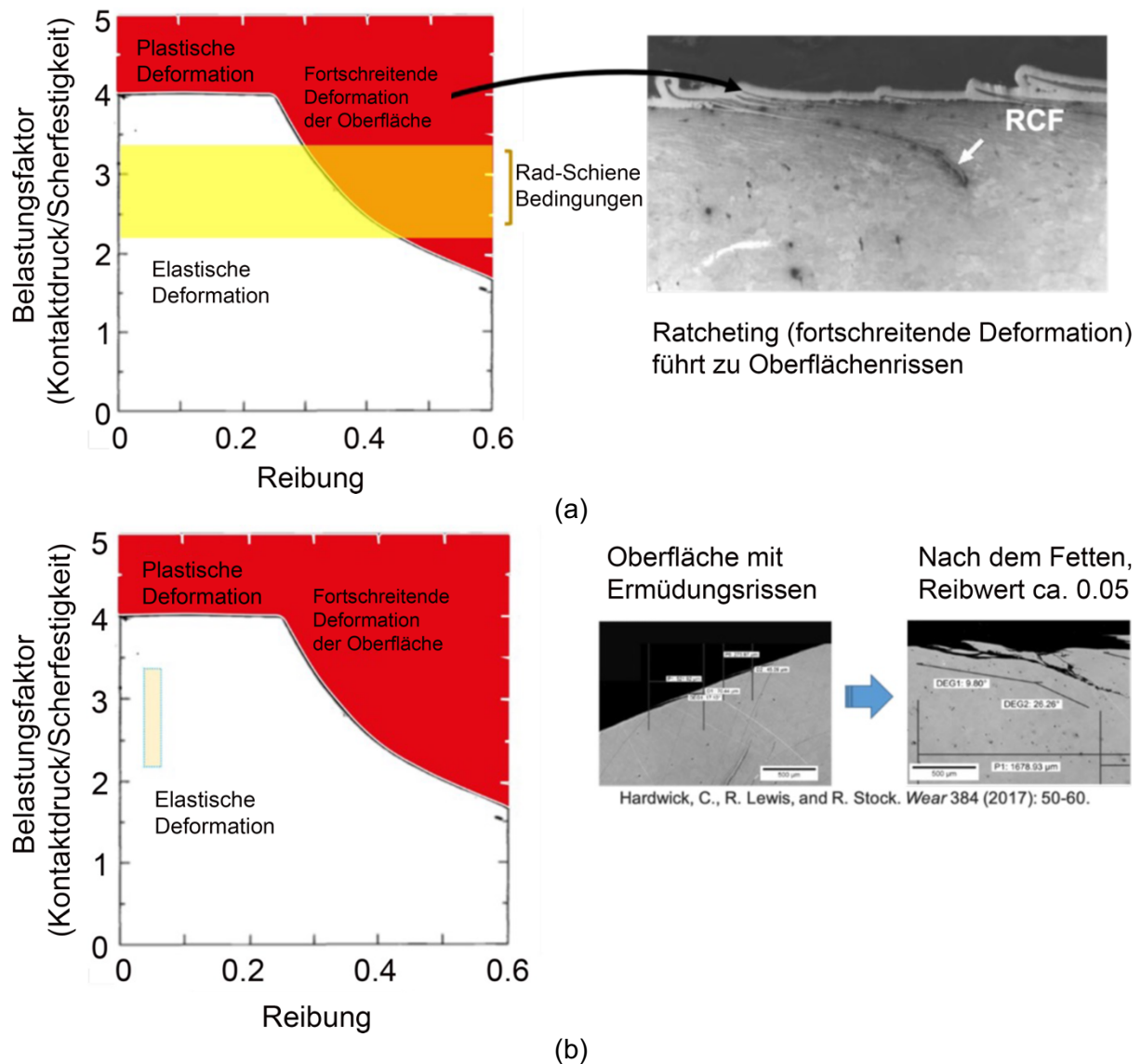


Abbildung 2. Beispiele aus der Literatur für den Einfluss der Reibung auf die Ermüdung [3]. (a) Die Experimente wurden im Deformationszustand (Ratcheting) mit Reibungskoeffizienten von etwa 0,6 durchgeführt, was trockenen, unkonditionierten Bedingungen entspricht. (b) Der Reibungskoeffizient zwischen den sich berührenden Substraten wurde mit einer Schienenkopfkonditionierung auf Ölbasis verringert. Die Ausbreitung bereits vorhandener Risse wurde durch das Vorhandensein von Schienenkopfkonditionierung nicht reduziert, sondern möglicherweise durch den Flüssigkeitsdruck im Riss begünstigt.

Dieser Unterschied zwischen Rissbildung und -ausbreitung ist auf die unterschiedlichen Antriebskräfte zurückzuführen, die auf die Oberflächen wirken (Abb. 3).

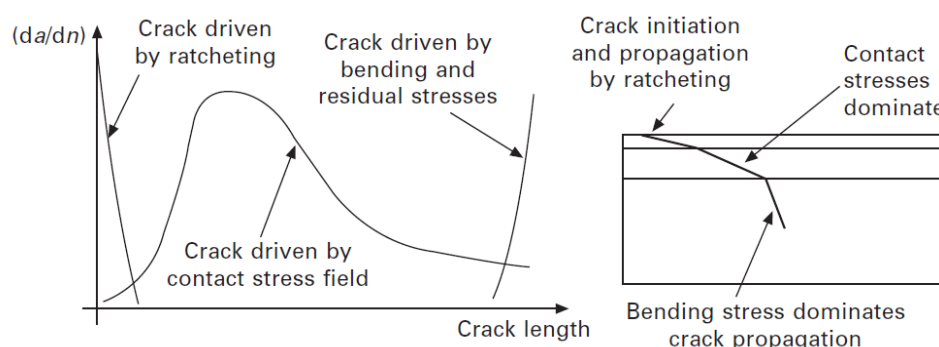


Abbildung 3. Die Rissbildung wird durch die Deformation angetrieben, die durch die Verwendung einer Schienenkopfkonditionierung verringert wird. Die Rissausbreitung ist eine Folge des Spannungsfeldes im Kontakt und bleibt auch nach der Konditionierung gleich [3].

Im Rahmen des Projekts wurde drei kommerziell erhältliche Produkte analysiert - zwei ölbasierte und ein wasserbasiertes Produkt. Einige der Analysen wurde mit allen Produkten, andere nur mit einem oder zwei der Produkte durchgeführt.

2 Laborexperimente mit Schienenkopfkonditioniermittel

2.1 Mini-Traktionsmaschine (MTM)

Zu Beginn des Projekts waren wir an einer «Round Robin» Studie beteiligt, die den Einsatz der Mini-Traktionsmaschine zur Analyse von Schienenkopfkonditioniermittel prüfte. Bei diesem Test drehen sich die obere Kugel und die untere Scheibe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Abb. 4). Dieser Unterschied führt zu einem Gleit-Roll-Verhältnis. Die Ergebnisse der Round Robin Studie war nicht eindeutig, der Vollständigkeit halber werden die Ergebnisse aber trotzdem aufgeführt.

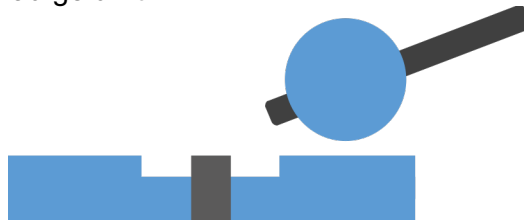


Abbildung 4. Darstellung des Kontakts im MTM. Die Kugel und die Scheibe (beide aus Stahl AISI 52100) drehen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so dass sich in den hier beschriebenen Versuchen ein Gleit-Roll-Verhältnis von 5 % ergibt. Die Belastung betrug 50N und die Temperatur lag bei 30°C. Alle drei Produkten wurden mit dieser Methode untersucht.

Bei diesem Test kommt es zwar unter bestimmten Bedingungen zur Rissbildung, es gab aber keine Anzeichen für eine Rissausbreitung (Abb. 5). Dieser Test wurde daher nur zur Beurteilung des Reibungsverhaltens der Produkte verwendet.

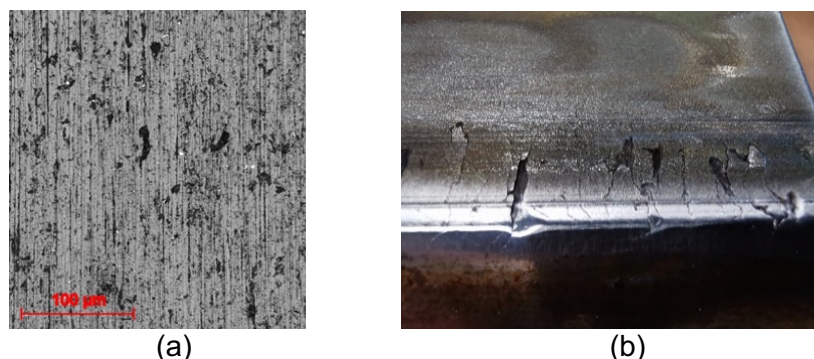


Abbildung 5. (a) Beim MTM wurde nur eine sehr geringe Ermüdung festgestellt. (b) Zum Vergleich: das Ausmass der Ermüdung an der Schiene.

Auf dem MTM-Prüfstand wurden alle drei Produkte analysiert. Von den beiden ölbasierten Produkt zeigte einer die Tendenz, innerhalb weniger Tage auszubluten, während das zweite ölbasierte Produkt während der gesamten Projektdauer stabil blieb. Die Stabilität der ölbasierten Produkte wurde bei den MTM-Messungen deutlich (Abb. 6). Zu Beginn wurde eine dünne Schicht (0,1 mL) auf die Scheibe aufgetragen und Messungen mit steigenden und

fallenden Geschwindigkeiten durchgeführt. Abbildung 6 zeigt das Reibungsverhalten der beiden ölbasierten Produkte.

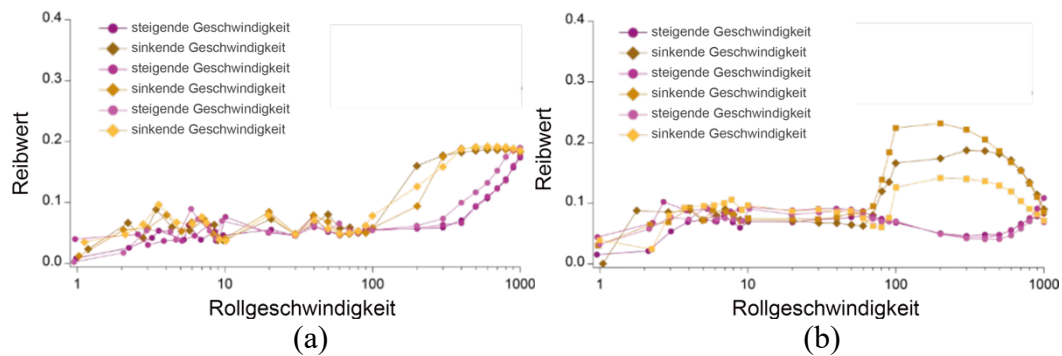


Abbildung 6. Reibungskoeffizienten bei zunehmender und abnehmender Geschwindigkeit, jeweils dreimal wiederholt, für (a) das Produkt auf Ölbasis, das zum Ausbluten neigt, und (b) für das stabile Produkt auf Ölbasis [4].

Die Hysterese, die bei hohen Geschwindigkeiten bei beiden Schienenkopfkonditionierung auftritt, ist nicht ungewöhnlich [5]. Der Unterschied in der Größe der Hysterese ist aber interessant. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die festen und flüssigen Bestandteile aus dem Kontakt verdrängt. Wenn die Geschwindigkeit abnimmt, bewegt sich die Flüssigkeit zurück in den Kontakt (Abb. 7). Die Flüssigkeit trennt sich leichter von den festen Bestandteilen für das auslaufende Schienenkopfkonditionierung, wodurch der Eindruck einer besseren Schmierung in diesem Bereich entsteht.

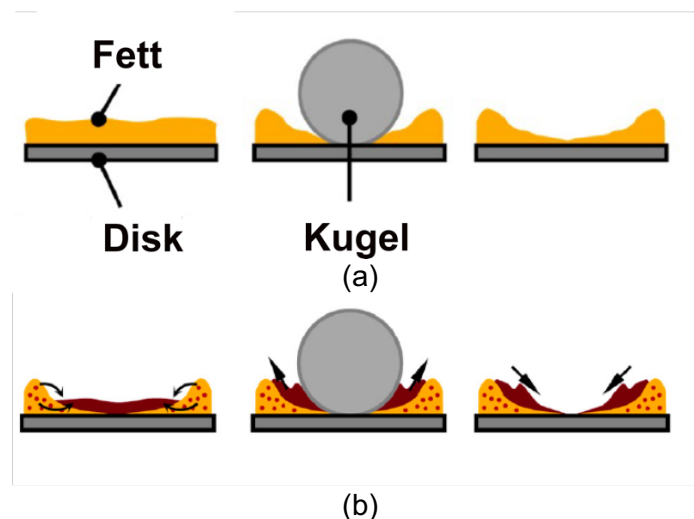


Abbildung 7. a) Die festen und flüssigen Bestandteile der Schienenkopfkonditionierung werden während der Phase der zunehmenden Geschwindigkeit aus dem Kontakt gedrückt. (b) Die Geschwindigkeit, mit der die flüssige Komponente während der Geschwindigkeitsreduzierung in den Kontakt zurücksickert, korreliert mit der Leichtigkeit, mit der die Schienenkopfkonditionierung ausläuft [6].

Wenn sich die flüssigen und festen Bestandteile trennen, wirkt sich dies negativ auf das Verschleissverhalten aus. Das bedeutet, dass die Schienenkopfkonditionierung mit der geringeren Reibung weniger Verschleisschutz beim Gleiten bietet (Abb. 8). In beiden Fällen

wären die Reibungskoeffizienten in den MTM-Tests als zu niedrig für den Rad-Schiene-Kontakt anzusehen.

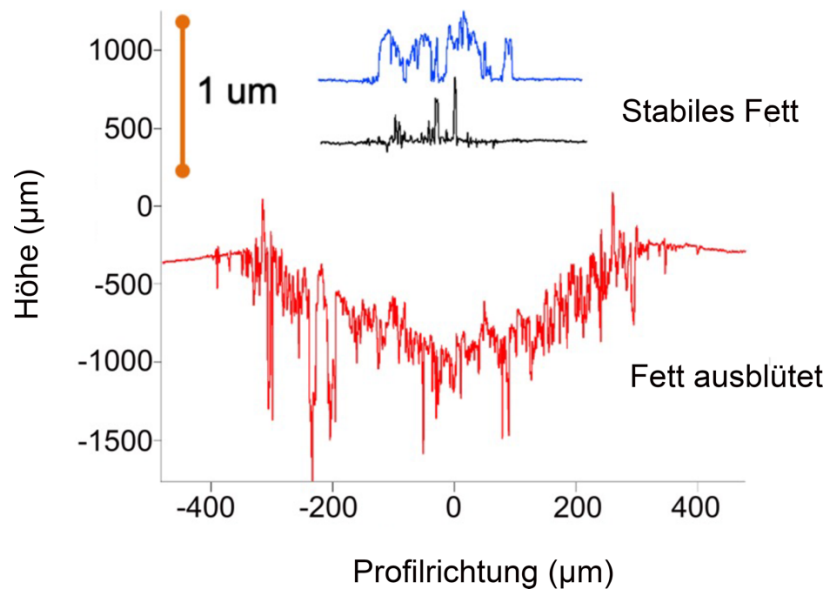


Abbildung 8. Profile der Verschleisspuren nach Messungen mit den beiden ölasierten Produkten. Die Spur auf der Scheibe nach den Messungen mit der stabilen Schienenkopfkonditionierung zeigt die Zunahme von Material (schwarze und blaue Linien, beide Messungen sind mit gleichem Fett). Dies ist höchstwahrscheinlich auf eine Reaktion der Verschleisschutzadditive mit der Oberfläche während des Gleitens zurückzuführen. Es gibt während der Messung neben eine Roll-Komponente auch eine Gleit-Komponente [7]. Das Profil der Verschleissspur, die mit dem zum Auslaufen neigende Schienenkopfkonditionierung erzeugt wurde (rot), zeigte einen für einen geschmierten Kontakt überraschend hohen Verschleiss.

Das wasserbasierte Produkt zeigte im MTM ein zu den ölasierten Produkten sehr unterschiedliches Reibungsverhalten, das stark von der gewählten Applikationsmethode abhängig war. Bei der ersten Applikationsmethode wurde unmittelbar vor Versuchsbeginn ein Tropfen des Produkts (0,1 mL) auf die Scheibe aufgebracht. Das Aufbringen des Produkts und die Messung wurde dreimal bei konstanter Geschwindigkeit wiederholt (Abb. 9). Der Reibungskoeffizient ist anfangs niedrig, steigt aber fast auf das Niveau des Gleitens von Stahl gegen Stahl (0,6) an.

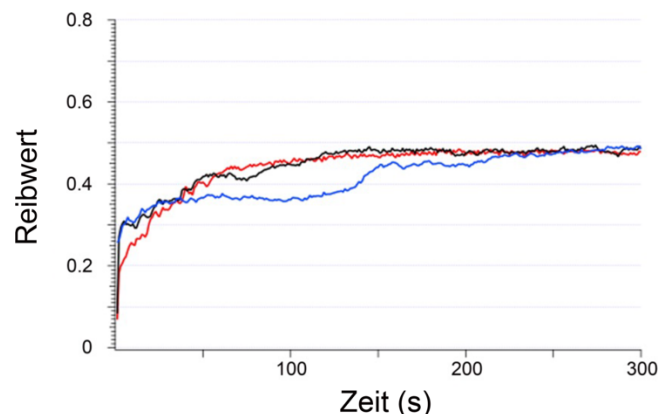


Abbildung 9. MTM-Daten für eine dünne Schicht des wasserbasierten Produkts, gemessen mit einem Gleit-Roll-Verhältnis von 5 % bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 1 m/s und einer Last von 10 N.

In einem nächsten Schritt (Applikationsmethode zwei) wurde das Produkt auf die Oberfläche aufgetragen und mit einem Luftstrom getrocknet. Die Reproduzierbarkeit dieses Versuchs war im Vergleich zur ersten Auftragsmethode schlecht, daher wurde er viermal wiederholt (Abb. 10).

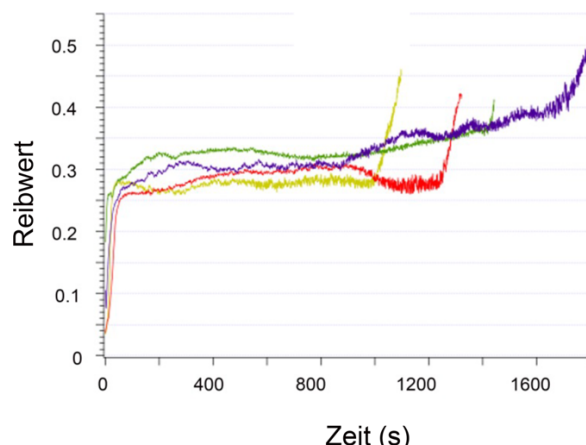


Abbildung 10. MTM-Daten für eine getrocknete Schicht des wasserbasierten Produkts, gemessen mit einem Gleit-Roll-Verhältnis von 5 % bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 1 m/s und einer Last von 10 N.

Die Ergebnisse der Messungen an der getrockneten Konditioniermittelschicht zeigen eine Anfangsphase, in der der Reibungskoeffizient für den Rad-Schiene-Kontakt mit 0,25 bis 0,35 als gut bezeichnet werden kann. Bei allen vier Messungen versagte die Schienenkopfkonditionierung jedoch plötzlich und der Reibungskoeffizient stieg auf den für einen ungeschmierten Kontakt von Stahl gegen Stahl erwarteten Wert an. Es ist möglich, dass die Schwankungen in der Zeit bis zum Versagen des Konditioniermittels den Fehler beim Auftragen kleiner Mengen der Schienenkopfkonditionierung widerspiegeln.

2.2 Twin-disk Experimente

Um den Kontakt zwischen Rad und Schiene genauer zu simulieren, wurden Twin-Disk Tests durchgeführt. Bei diesem Versuch rotieren zwei Scheiben aus Rad- und Schienenstahl gegeneinander. Dabei können kleinere Gleit-Roll-Verhältnisse und höhere Belastungen als bei der MTM erreicht werden (Abb. 11).



Abbildung 11. Die Versuche wurden am Institut für Werkstoffsystemtechnik Thurgau (WITg) auf einer Twin-Disk Anlage mit einem Druck von 1 GPa, einer Geschwindigkeit von 1,00 m/s auf der Radseite (Radstahl ER7 grade, Lucchini SR) und 0,99 m/s auf der Schienenseite (Schienenstahl R260, Voestalpine) (SRR = 1%) durchgeführt.

Das Produkt auf Ölbasis, das zum Ausbluten neigt, wurde mit dieser Technik nicht untersucht. Das wasserbasierte und das stabile ölbasierte Schienenkopfkonditioniermittel wurden auf Reibungsverhalten und Ermüdung untersucht (Abb. 12).

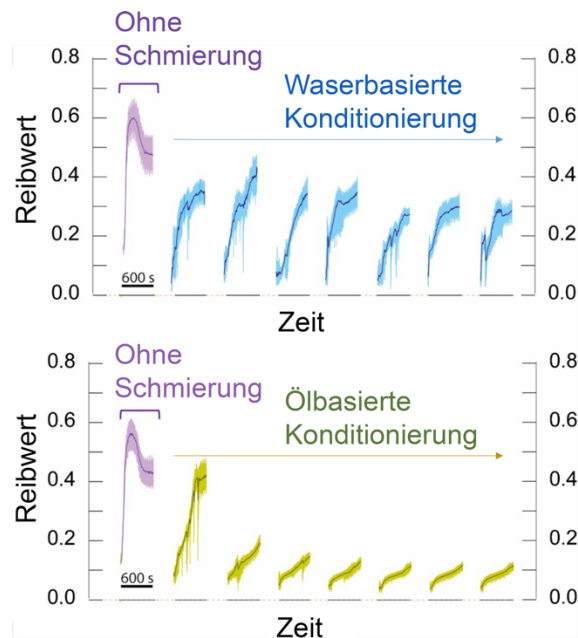


Abbildung 12. Mit einem Twin-Disk Gerät gemessene Reibungskoeffizienten. Das wasserbasierte Produkt wird mit dem stabilen Öl-basierten Konditionierung verglichen. In beiden Fällen wird eine kurze Phase ohne Konditionierungsmittel gemessen. Die Schienenkopfkonditionierung auf Wasserbasis wurde hinzugefügt und getrocknet, während die Schienenkopfkonditionierung auf Ölbasis einfach in der gleichen Menge (0.1 mL) vor jede Messung auf die Oberflächen aufgetragen wurde. Alle Messungen wurden für 600 s (3780 Durchgänge) durchgeführt. Es gibt keine Abbruchkriterien da die Kraftsensoren ausreichend stark sind für solche Bedingungen.

Das Produkt auf Wasserbasis wurde aufgetragen und trocknete vor Beginn des Versuchs, um einen Vergleich mit der MTM zu ermöglichen. Wie bei den MTM-Messungen ergab das öl-basierte Konditionierungsmittel Reibungskoeffizienten, die für den Rad-Schiene-Kontakt als zu niedrig anzusehen sind, während das wasserbasierte Produkt Werte im gewünschten Bereich aufwies (Abb. 12).

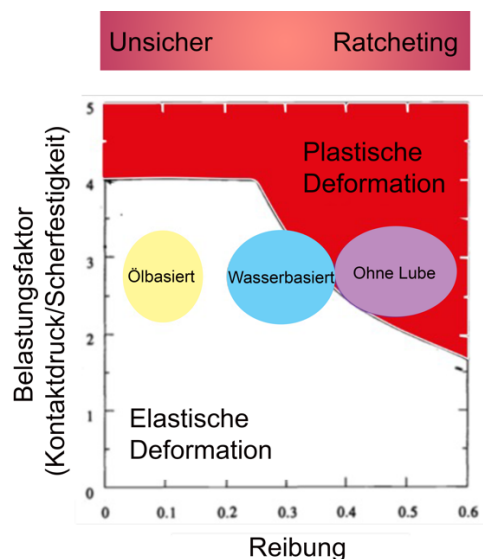
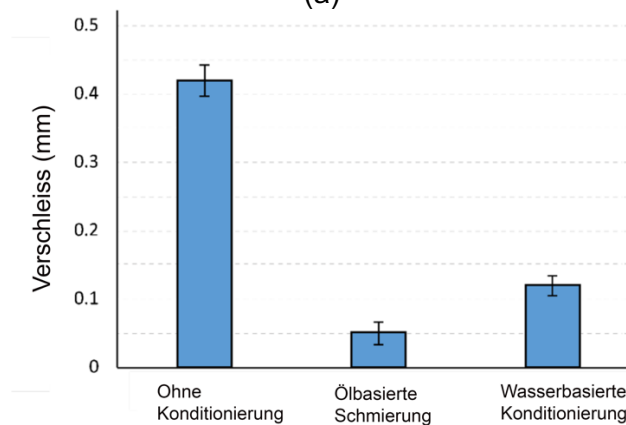


Abbildung 13. Der Reibungskoeffizient für die öl-basierten Schienenkopfkonditionierung lag in einem Bereich, der allgemein als unsicher beschrieben wird, während das wasserbasierte Konditionierungsmittel Reibungskoeffizienten im gewünschten Bereich ergab.

Nach einem vollständigen Test wurden die beiden Scheiben entfernt und auf Veränderungen untersucht. Nach 70 Minuten ohne Konditionierung ist eine deutliche plastische Verformung an der Oberfläche der Scheibe zu erkennen. Bei einer Konditionierung auf Öl- oder Wasserbasis tritt diese plastische Verformung nicht auf (Abb. 14). Der Verschleiss wird ermittelt, indem die Veränderung des Durchmessers beider Scheiben nach allen Zyklen gemessen und addiert wird. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verschleissreduktion durch die Zugabe von Schienenkopfkonditionierung und einen etwas besseren Schutz durch das ölbasierte Produkt als durch das wasserbasierte Produkt.



(a)



(b)

Abbildung 14. (a) Bilder nach der Prüfung der im Twin-Disk Versuch verwendeten Scheiben. Ohne Schienenkopfkonditionierung ist eine deutliche plastische Verformung der Oberfläche zu erkennen, während die beiden konditionierten Scheiben keine Verformung aufweisen. (b) Die Verschleissdaten für die drei Tests zeigen einen starken Rückgang des Verschleisses infolge der Konditionierung, wobei die ölbasierte Schienenkopfkonditionierung den besten Verschleisschutz bietet.

Bei beiden Versuchen mit Konditioniermittel kam es zu einer vernachlässigbaren Rissbildung an der Scheibe, während ohne Konditioniermittel ein Ratcheting-Effekt [8] und eine Rissbildung an der Oberfläche zu beobachten war (Abb. 15).



Abbildung 15. Die mikroskopischen Aufnahmen der drei Proben zeigen einen wirksamen Schutz vor Ermüdung durch den Einsatz von Konditioniermittel. Hier wird Rad- gegen Schienenstahl verwendet.

2.3 Chemische Analyse der Twin-Disk Scheiben

Die festen Bestandteile des wasserbasierten Konditioniermittels sind unter anderen Molybdändisulfid (MoS_2), Talkum ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), und Hydroxypropyl-Zellulose. Die ersten zwei werden allgemein eine stabilisierende Wirkung auf die Reibung zugeschrieben. Molybdändisulfid wird häufig zur Minimierung der Reibung eingesetzt, insbesondere in Motorölen.

In der gegenwärtig verfügbaren Literatur zum Reibungsmanagement im Rad-Schiene-Kontakt wird allgemein angenommen, dass solche anorganischen Komponenten für die Stabilisierung der Reibung in einem optimalen Bereich verantwortlich sind [1]. Andererseits wird über die chemische Analyse des konditionierten Drittkörpers im Allgemeinen nicht berichtet.

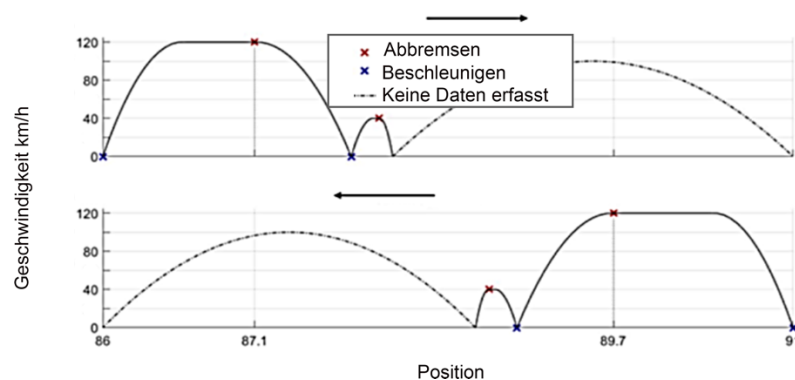
Nach den Tests mit dem Twin-Disk Gerät und den wasserbasierten Schienenkopfkonditionierung wurden die Scheiben einer chemischen Analyse mittels XPS unterzogen. Dabei wurden keine signifikanten Signale für MoS_2 oder Talkum festgestellt, die beide als Bestandteile des Konditioniermittels bekannt sind. Raman-Spektroskopie zeigte das Vorhandensein von organischem Material, das aber zu stark zersetzt war, um identifiziert werden zu können.

Aus diesen Analysen lässt sich schließen, dass die beobachtete Verringerung der Ermüdung nicht auf die Bildung einer Schutzschicht aus festen Komponenten zurückzuführen ist. Es ist möglich, dass die organische Komponente im Kontakt abgebaut wird, um eine schützende amorphe Kohlenstoffschicht zu bilden.

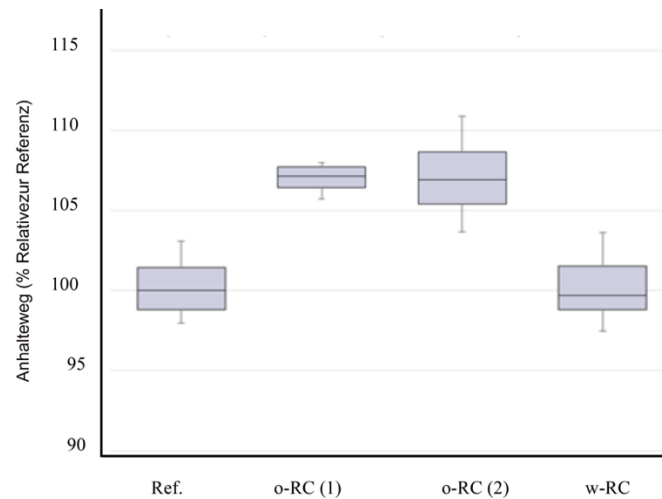
Fazit?

3 Feldversuche 1: Anhaltwegmessungen

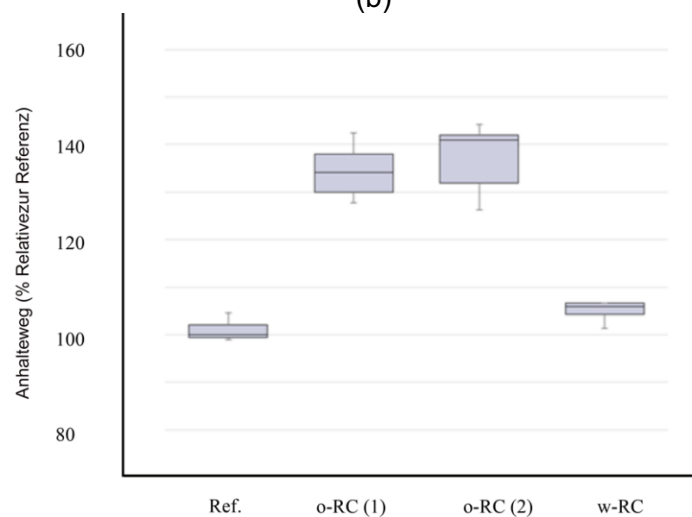
Eine erste Reihe von Feldversuchen wurde auf einem geraden Streckenabschnitt durchgeführt. Die Versuche sind in Referenz 9 ausführlich beschrieben [9]. Alle drei Produkte wurden vom Zug auf die Strecke aufgetragen und ihr Einfluss auf den Anhalteweg wurde gemessen (Abb. 16). Die Anwendung der beiden ölbasierten Konditioniermittel führte zu einer Verlängerung des Bremswegs, während das wasserbasierte Konditioniermittel dies nicht tat.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 16. a) Prüfbedingungen für die Bremsleistung der pneumatischen und elektrodynamischen Bremse. Ausgangsgeschwindigkeit: 40km/h, 115km/h oder 120km/h. Applikationsmenge: Hub von 300 mm³, Sprühdauer 8s. b) Pneumatische Bremse, Ausgangsgeschwindigkeit 120 km/h (Reisezugwagen mit Scheibenbremsen). Der Referenzwert gibt den Anhalteweg an, wenn kein Konditioniermittel appliziert wurde. w-RC ist ein Konditioniermittel auf Wasserbasis und o-RC(1) und o-RC(2) sind zwei Konditioniermittel auf Ölbasis. c) Anhalteweg bei elektrodynamischer Bremsung und Ausgangsgeschwindigkeit 115 km/h. Der Vergleich zeigt die Ergebnisse des Anhaltewegs ohne Konditionierung sowie mit Konditionierung.

Während sich die ölbasierten Konditioniermitteln eindeutig negativ auf das Bremsverhalten auswirken, scheint das wasserbasierte Konditioniermittel keine negativen Auswirkungen zu haben. Dies könnte daran liegen, dass es die Oberfläche wirksam schützt, ohne die Reibung zu beeinträchtigen oder aber, dass es vollständig aus dem Kontakt entfernt wird. Um festzustellen, ob das Konditioniermittel auf Wasserbasis einfach aus dem Kontakt herausgedrückt wird, wurden Proben vom Fahrspiegel der Schiene gesammelt, um später zu analysieren, welche Bestandteile des Konditioniermittels auf dem Schienenkopf verbleiben. Auf Zellulose basierendes Filterpapier wurde verwendet, um Rückstände von der Kontaktfläche auf dem Gleis zu sammeln.

Die festen Bestandteile des wasserbasierten Konditioniermittels sind Molybdändisulfid (MoS_2) und Talkum ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Die Analyse des Oberflächenmaterials auf Bestandteile des Konditioniermittels ergab zwar das Vorhandensein von MoS_2 , aber Talk ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) wurde nicht nachgewiesen (Abb. 16). Das heisst Bestandteile der Konditioniermittels konnten nachgewiesen werden, nicht aber der Aufbau eine Schutzschicht mit dem Feststoff Talk. Höchstwahrscheinlich wird das Talkum aus dem Kontakt ausgedrückt.

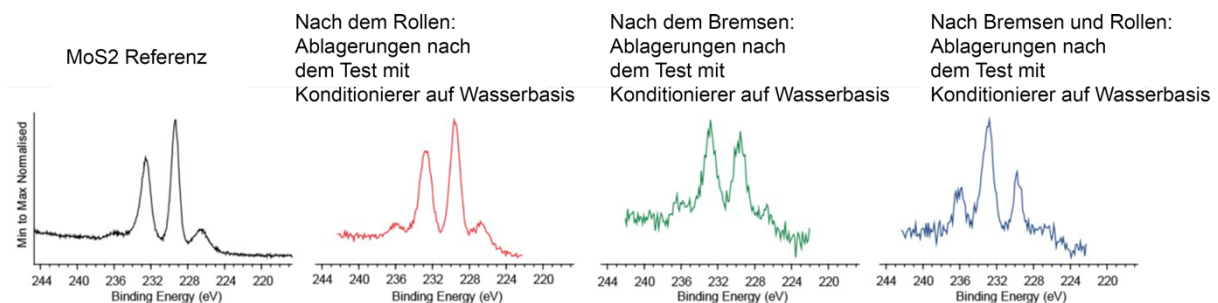


Abbildung 17. Die XPS-Spektren des auf der Schiene verbleibenden Materials. Der Vergleich mit dem Spektrum für MoS_2 zeigt, dass MoS_2 auf der Schiene nachgewiesen werden kann. Die Rückstände nehmen aber ab, wenn ein Zug über den konditionierten Abschnitt einbremste. w-RC: wasserbasierter Schienenkonditionierer.

4 Feldversuche 2: Probenentnahme in Gasel 2024.

Eine zweite Reihe von Feldversuchen wurde in Zusammenarbeit mit der BLS durchgeführt. Ein wasserbasiertes Konditioniermittel wurde von einem Zug aufgebracht und nach der Durchfahrt wurden 7 Proben vom Schienenkopf entnommen. Drei Methoden wurden aus den folgenden Gründen eingesetzt um Material von der Oberfläche zu sammeln:

1. Die klebende Seite eines Aluminiumbandes wurde auf die Schiene geklebt. Damit lassen sich, falls nach der Überfahrt eines Zuges noch vorhanden, Molybdän, Schwefel und Magnesium, Bestandteile des wasserbasierten Konditionierers, nachweisen.
2. Ein Rasiermesser, das vor den Feldversuchen mit einem Sauerstoffplasmareiniger gereinigt worden war, wurde verwendet, um Material von der Schienenoberfläche abzukratzen. Dieses Verfahren war für den Nachweis der Hydroxypropyl-Zellulose geeignet.
3. Die Oberfläche der Schiene wurde mit einem Wattebausch auf einer Fläche von etwa 120 cm² abgewischt. Das Wattepad ermöglichte den Nachweis von Molybdän, Schwefel, Magnesium sowie organischen Säuren auf der Stahloberfläche.



Abbildung 18. (a) Kambly-Zug von BLS mit installierten Sprühdüsen für Konditioniermittel und (b) Position, an der die Proben vom Schienenkopf entnommen wurden (geographische Koordinaten: N 46.898, E 7.4015).

Der Reibungskoeffizient auf der Schiene wurde mit einer Federwaage ermittelt, wie in Abbildung 19 dargestellt. Drei Punkte unter dem Gewicht berühren die Schiene, und der Reibungskoeffizient wird aus der Masse des Klotzes (1 kg) und der mit der Federwaage gemessenen Kraft, die zur Bewegung des Klotzes erforderlich ist, ermittelt.

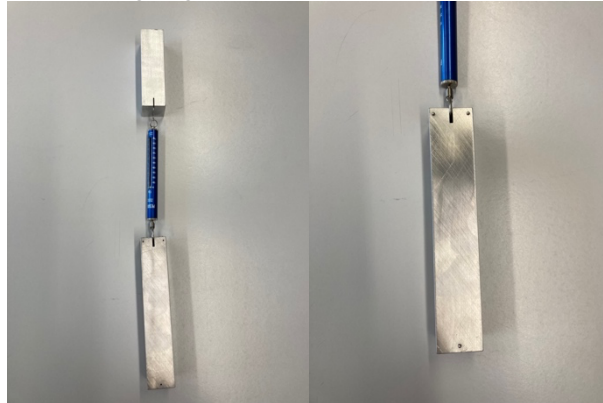


Abbildung 19. Der Aufbau, der zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten auf dem Gleis verwendet wird. Das System besteht aus zwei Stahlblöcken, von denen einer die Schiene an drei Punkten berührt, während der andere dazu dient, den grösseren Block auf dem Schienenkopf entlangzuziehen. Die Reibungskraft wird mit einer Federwaage gemessen.

Die Probennahmen und Reibwertmessungen wurden an zwei Tagen mit ähnlichen Wetterbedingungen durchgeführt (siehe Messprotokoll). Referenzmessungen und Proben wurden ohne Konditionierung am 22.05.2024 gesammelt. Weitere Probennahmen und Reibwertmessungen wurden am 28.05.2024 mit Applikation der Konditionierung durchgeführt. Der Reibwert bei der Referenzmessung war 0.6, ähnlich wie in Labor. Die weitere Reibwert-Messungen während der Konditionierung zeigten Werte von $0.25 - 0.3 \pm 0.5$.

Messprotokoll

Tabelle 1. Ankommende und abfahrende Züge in Gasel durch die Prüfstelle (Abb. 17). Die Züge, die zu den fettgedruckten Zeiten fahren, schmierten das Gleis mit dem wasserbasierten Fett.

	Ab Gasel richtung Schwarzenburg	Richtung Gasel Ab Schwarzenburg	
Anfang	11:51	12:06	
	12:21	12:36	
	12:51	13:06	
	13:21	13:36	
	13:51	14:06	Ende

22.5.2024: Referenzmessungen

Von Meteoschweiz:

Temperatur	16 °C
Atmosphärischer Luftdruck	950 hPa
Luftfeuchtigkeit	65%

Reibungskoeffizient bei der Referenz Messung (Ohne Konditionierung) 0.6 ± 0.1 .

28.05.24: Messungen mit Konditionierer

Von Meteoschweiz:

Temperatur	14 °C
Atmosphärischer Luftdruck	957 hPa
Luftfeuchtigkeit	67%

Am 22.5.2024 wurden mit einer Rasierklinge, einem Wattebausch und einem Aluminiumstreifen Referenzproben von der Strecke genommen. Diese Methoden hatten sich zuvor als die bestmöglichen Bedingungen für den Nachweis von Schmierstoffbestandteilen erwiesen. Der Reibungskoeffizient wurde mit $0,6 \pm 0,1$ bestimmt.

Sieben Probensätze wurden am 28.05.24 entnommen, und der Reibungskoeffizient wurde vor der Probenentnahme gemessen.

Probe 1. Der Zug, der Gasel um **11.51 Uhr** verliess, schmierte das Gleis. Die ersten Messungen wurden mit dem folgenden Zug durchgeführt, der um 12:06 Uhr in Gasel ankam. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

Probe 2. Nach dem Zug, der Gasel um 12:21 Uhr verlässt. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

Probe 3. Nach dem Schmierzug, Ankunft in Gasel um **12:36 Uhr**. Reibungskoeffizient $0,25 \pm 0,05$.

Probe 4. Nach dem Zug, der Gasel um 12:51 Uhr verlässt. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

Probe 5. Nach dem Zug mit Ankunft in Gasel um 13:06 Uhr. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

Probe 6. Nach dem Schmierzug, der Gasel um **13:21 Uhr** verlässt. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

Probe 7. Nach dem Zug mit Ankunft in Gasel um 13:36 Uhr. Reibungskoeffizient $0,3 \pm 0,05$.

4.1 Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (ToF-SIMS) zur detektieren von anorganische Bestandteile des Konditionierers.

ToF-SIMS wird zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der obersten Schicht einer Oberfläche verwendet. Es handelt sich um eine sehr empfindliche Technik, mit der organische und anorganische Stoffe auf der Oberfläche nachgewiesen werden können. Mit dieser Methode wurde das Aluminiumband auf Bestandteile des Produkts untersucht. Molybdän, Molybdänsulfid, Silizium und Magnesium sind die Stoffe, die mit dieser Technik voraussichtlich identifiziert werden können. Von diesen Bestandteilen wurde nur Silizium nachgewiesen, das jedoch in ähnlicher Menge auch in der Referenzprobe vorhanden war (Abb. 20).

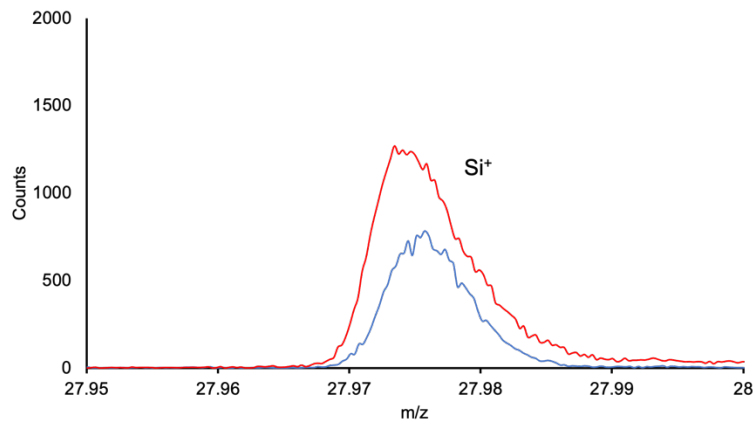


Abbildung 20. dem Silizium zugeordneter Peak im Massenspektrum der Referenzprobe (Blau) und einer nach der Konditionierung der Spur entnommenen Probe (Rot).

Es wurde erwartet, dass diese hochempfindliche Technik Komponenten des Talkums auf der Gleisoberfläche nach dem Auftragen des Konditionierers erkennen würde. Dies war jedoch nicht der Fall.

4.2 Infrarotspektroskopie (IR) zur detektieren von organische Bestandteile des Konditionierers.

Die Infrarotspektroskopie ist besonders geeignet, um organische Bestandteile zu identifizieren. Das eingesetzte Produkt enthält ein langes Polysaccharid namens Hydroxypropylcellulose, das möglicherweise als Verdickungsmittel vorhanden ist. Dieses wurde aus dem Produkt extrahiert, um es mit den sieben mit Rasierklingen entnommenen Proben mittels IR zu vergleichen. Nur die IR-Spektren der Proben 3 und 7 (siehe Anhang) enthielten Peaks, die auf Polysaccharid zurückgeführt werden konnten (Abb. 21).

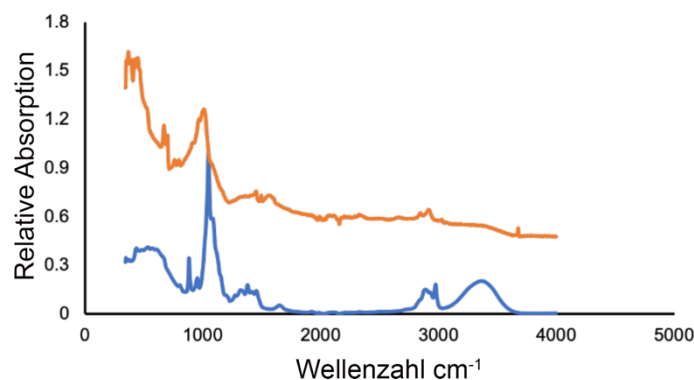


Abbildung 21. Infrarotspektren der Hydroxypropyl-Zellulose aus dem wässrigen Schienenkopfkonditionierung (blau) und Probe 7, aufgenommen nach dem Zug, der dem Zug folgt, der die Konditionierung aufbringt (orange). Die Spektren sind horizontal auf den Peak bei ca. 1050 cm^{-1} normalisiert und zur besseren Übersichtlichkeit vertikal versetzt.

Das Spektrum von Probe 7 (aufgenommen nach dem Zug, der dem Zug folgt, der die Konditionierung aufbringt) ist schwächer und weist nicht die Auflösung auf wie das des Produkts, jedoch zeigt der Peak bei 1050 cm^{-1} auf das Vorhandensein von Polysaccharid (Abb. 21). Mit dieser Technik konnte festgestellt werden, dass sich die Hydroxypropylcellulose aus dem Konditionierer auf der Oberfläche absetzte und nach dem Durchfahren des Zuges dort verblieb.

4.3 Kapillarelektrophorese zur detektieren von organischen und anorganische Bestandteile des Konditionierers

Mit dem Wattepad wurde Material von einer Fläche von etwa 120 cm² entfernt. Die Proben wurden in mehreren Schritten mit entionisiertem Wasser aus der Watte extrahiert. Das extrahierte Material wurde dann mittels Kapillarelektrophorese auf Anionen- und Kationenkonzentrationen (in mg/L) untersucht. Von den Kationen wurde in allen Proben nur Natrium nachgewiesen. Dabei handelt es sich um eine übliche Verunreinigung. Die in den von der konditionierten Schiene entnommenen Proben gefundene Menge wich nicht wesentlich von der Referenzmessung ab.

Tabelle 2. Mittels Elektrophorese nachgewiesene Anionen. Bromid, Fluorid und Phosphat wurden in keiner der Proben nachgewiesen. Proben 1, 3, und 6 wurden direkt nach der Konditionierung genommen.

Probe No..	Chlorid Cl ⁻ mg/L	Sulfat SO ₄ ²⁻ mg/L	Nitrat NO ₃ ⁻ mg/L	Format HCOO ⁻ mg/L	Acetat CH ₃ COO ⁻ mg/L	Propionat C ₂ H ₅ COO ⁻ mg/L
1	2.056	1.324	0.266	0.9213	0.1672	0.09
2	1.537	1.229	0.365	1.879	0.7119	n.d.
3	1.563	1.197	0.442	1.735	0.7686	n.d.
4	1.412	1.138	0.187	1.495	0.6890	n.d.
5	1.633	0.164	0.309	1.903	0.8181	n.d.
6	1.543	1.157	0.1568	1.817	0.7632	n.d.
7	1.668	1.134	n.d.	1.811	0.6606	n.d.
Referenz	1.415	1.229	0.0859	n.d.	n.d.	n.d.

[n.d. = nicht detektiert (<0.1 mg/L)]

In Tabelle 2 ist der einzige signifikante Unterschied zwischen den Proben und der Referenz das Vorhandensein von Format, Acetat und, in Probe 1, Propionat. Daraus ist zu sehen das sind mögliche Abbauprodukte der Hydroxypropylcellulose im Produkt detektierbar sind.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Labor Untersuchungen: MTM und Twin Disk.

Das MTM wurde im Rahmen einer Round-Robin-Untersuchung eingesetzt, um die Verwendbarkeit dieses Geräts für das Screening von Schienenkopfkonditionierern zu prüfen. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Labors funktionierte bei den ölbasierten Konditionierern gut, jedoch waren die Reibungskoeffizienten des wasserbasierten Produkts unter den Bedingungen der Ringversuche zu hoch für den Kraftsensor.

Bei dieser Testmethode zeigte sich immer wieder, dass der Reibungskoeffizient bei den ölbasierten Konditionierern viel niedriger war als für eine ausreichende Traktion erforderlich. Ausserdem gab es große Unterschiede beim Verschleisschutz, den die Konditionierer boten. Dieser Unterschied wurde grösstenteils auf die unterschiedliche Stabilität der Öle zurückgeführt, wobei das eine wesentlich stärker ausblutet als das andere. Dies bedeutet, dass sich die Ölbasis leicht von der festen Komponente des Konditionierers trennt. Dies kann besonders problematisch sein, wenn die Trennung während der Lagerung vor der Anwendung erfolgt, da dann eine geringere Menge der festen, verschleisshemmenden Komponente auf die Stahloberfläche aufgebracht wird.

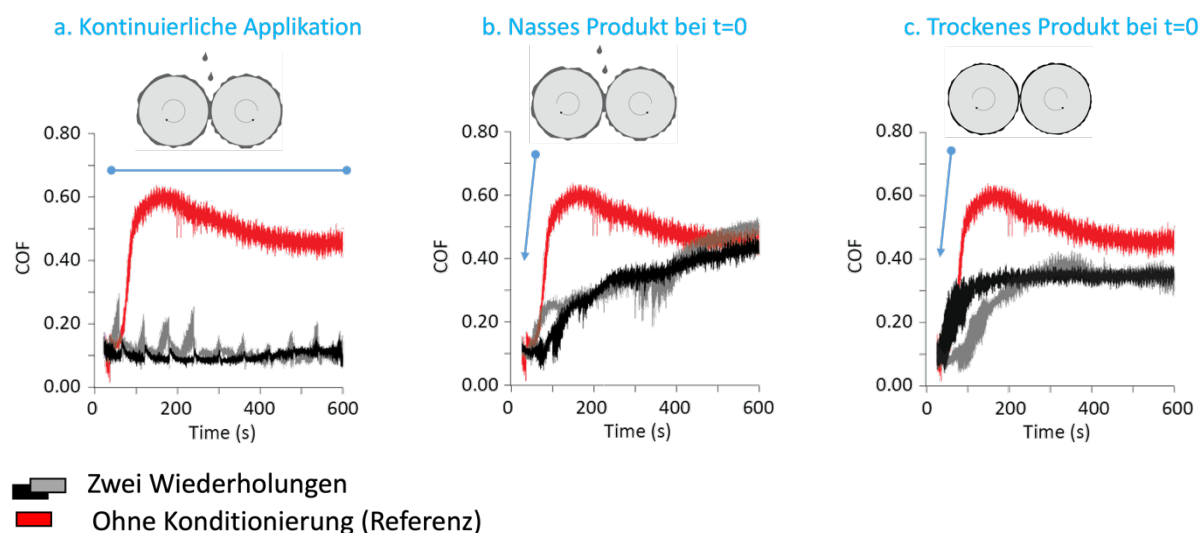
Unter milderen Bedingungen als bei der Round-Robin-Prüfung konnte gezeigt werden, dass die Anwendung des wasserbasierten Konditionierers zu einem Reibungskoeffizienten im gewünschten Bereich führte. Es gab jedoch Hinweise darauf, dass das Anwendungsprotokoll einen erheblichen Einfluss auf das Gleitverhalten an der Rad-Schiene-Schnittstelle hat.

Die geringe Flexibilität der Bedingungen und das Fehlen eindeutiger Ermüdungserscheinungen beim MTM führten zu der Schlussfolgerung, dass der Zweischeibenapparat (der Twin-Disk Versuch) für die Laboruntersuchungen besser geeignet wäre. Der Twin-Disk Versuch ermöglicht die Verwendung von Bedingungen, die näher an denen des Rad-Schiene-Kontakts liegen, d. h. ein hoher Kontaktdruck von etwa 1 GPa und sehr niedrige Gleit-Roll-Verhältnisse von 1 %. Bei der MTM würden solche hohen Kontaktdrücke zu hohen Verschleissraten führen und somit eine mögliche Ermüdung verschleiern. Bei der Twin-Disk Versuch ist das Gleit-Roll-Verhältnis ausreichend niedrig, um solche Verschleissraten zu vermeiden. Ausserdem wurden bei den Twin-Disk Versuchen Rad- gegen Schienenstähle verwendet.

Wie in den Abbildungen 14 und 15 zu sehen ist, konnten nach den Twin-Disk Versuchen ohne Konditionierung plastische Verformungen, Ermüdung und signifikante Veränderungen des Gefüges festgestellt werden. Dies ist vergleichbar mit dem Verhalten, das an der Schiene beobachtet wurde, und zeigt, dass die Methode zuverlässig genutzt werden kann, um Verbesserungen durch die Anwendung von Konditionierungsmitteln zu bewerten. Sowohl die Konditionierung auf Öl- als auch auf Wasserbasis schützte die Oberflächen vor dieser Verformung und der damit verbundenen Ermüdung und Veränderung des Gefüges. Dies kann auf die Verringerung des Reibungskoeffizienten zurückgeführt werden. Verschleissmessungen ergaben, dass der ölbasierte Konditionierer einen etwas besseren Schutz vor Verschleiss bot, die Reibungskoeffizienten lagen jedoch deutlich unter den als optimal angesehenen Werten.

Einzelne 600-s-Messungen des wasserbasierten Konditionierers sind in Abbildung 22 dargestellt. Die kontinuierliche Anwendung des Produkts führt zu ähnlichen Reibungskoeffizienten wie bei den ölbasierten Konditionierern. Das Auftragen eines Tropfens mit anschließender Trocknung führte jedoch zu stabilen, höheren Reibungskoeffizienten, ähnlich denen, die mit dem MTM gemessen wurden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl der wasserbasierte Konditionierer als auch der stabile ölbasierte Konditionierer (kein Ausbluten) die Stahloberflächen in der MTM und der Twin-Disk schützten, jedoch nur das wasserbasierte Produkt zu Reibungskoeffizienten im gewünschten Bereich führte.



A)

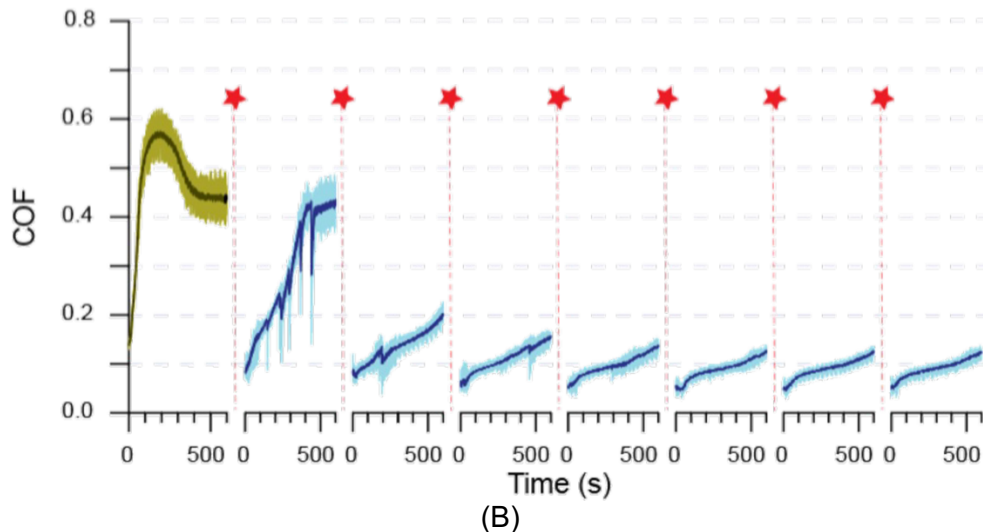


Abbildung 22. Der Einfluss der Anwendung auf das Reibungsverhalten in der Twin-Disk. A) Der Konditionierer auf Wasserbasis kann kontinuierlich, nur zu Beginn des Versuchs oder vor dem Versuch mit anschließender Trocknung zugegeben werden. B) Das Konditioniermittel auf Ölbasis kann aufgrund der hohen Viskosität nur zu Beginn des Versuchs zugegeben werden (durch das Sternchen gekennzeichnet) und trocknet nicht aus, da der Dampfdruck des Basisöls niedrig ist.

5.2 Feldversuche

Bei der ersten Reihe von Feldversuchen ging es in erster Linie darum, die Auswirkungen des Konditionierers auf das Verhalten des Zuges zu vergleichen. Es wurden die Bremswege bestimmt, und es wurde festgestellt, dass die beiden ölbasierten Konditionierer einen deutlich negativen Einfluss auf die Rad-Schiene-Traktion hatten. Die Anwendung des wasserbasierten Konditionierers führte zu keiner oder nur zu einer geringen Veränderung der Traktion. Dies kann auf zwei Weisen interpretiert werden: Entweder wird der Konditionierer aus dem Kontakt verdrängt und hat keine Wirkung oder er interagiert mit den Oberflächen so, dass der Reibungskoeffizient ausreichend hoch bleibt. Da die Produkte auf Ölbasis bei den ersten Feldtests enttäuschende Ergebnisse lieferten, wurden sie nicht weiter untersucht. Eine chemische Analyse wurde daher nicht durchgeführt.

Die Ergebnisse der Anhaltewegmessungen bestätigen, dass die ölbasierten Produkte zu einem zu niedrigen Reibungskoeffizienten führen. Aus diesem Grund wurden die zwei ölbasierten Konditionierer nicht weiter untersucht.

Die zweite Reihe von Tests wurde von der BLS überwacht und diente in erster Linie dazu, die Fahrbarkeit des Zuges mit und ohne den wasserbasierten Konditionierer zu bewerten. Wir nutzten diese Tests, um die Adhäsion des Konditionierers an der Oberfläche und die Veränderungen der Reibung genauer zu untersuchen.

Angenommen, jeder Zug hätte die üblichen 7 Kambly-Wagen mit jeweils 4 Radsätzen, dann würde die Position der Konditionierung 28 Mal auf jeder Seite der Strecke passiert nach dem ersten Zug. Nach den nächsten beiden Zügen, die keinen Konditionierer verwenden, wird diese Position insgesamt 84 Mal passiert.

Die Anzahl der Überfahrten ist beim Twin-Disk wesentlich höher, da es sich um einen beschleunigten Test handelt. Diese Beschleunigung ermöglicht es, die plastische Verformung und die Ermüdung innerhalb einer praktischen Zeitspanne zu beobachten. Bei den Bahntests konnten keine Informationen über die plastische Verformung oder Ermüdung gewonnen werden, und eine solche Bewertung erfordert einen wesentlich längeren Zeitraum, insbesondere wenn der Konditionierer funktioniert.

Um das Ausmass der Wechselwirkung der wasserbasierten Konditionierung mit der Stahloberfläche zu bestimmen, wurden Proben von der Strecke genommen. Anschliessende XPS-Messungen dieser Proben zeigten, dass Molybdänsulfid, ein Bestandteil des Konditionierers, nachweisbar war, andere Bestandteile jedoch nicht.

Es wurde auch festgestellt, dass ein Teil des Sulfats zu Molybdänoxid oxidiert war. Dies wurde bei den anderen Versuchen, in Twin-Disk Test und die zweiten Feldversuche (Gasel) nicht festgestellt und ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche Mengen des Produkts verwendet wurden.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde jedoch ein Abfall des Reibungskoeffizienten zwischen Schiene und Tribometer festgestellt. Bei der Referenzmessung wurde ein Wert von 0,6 ermittelt, der typisch für ungeschmierte Stahloberflächen ist. Nach dem Auftragen des Konditionierers sank dieser auf 0,3. Diese Veränderung deutet darauf hin, dass ein Teil oder Teile des Konditionierers auf der Schiene verbleiben. Die Reibungskoeffizienten blieben auch nach den folgenden Zügen gleich, was darauf hindeutet, dass das abgelagerte Material nicht leicht zu entfernen ist. Anorganische Bestandteile wie Natrium oder Silizium Ionen werden üblicherweise in Analysen gefunden, da sie als normale Luftverschmutzung vorhanden sind. Die anorganischen Bestandteile der Konditionierung, die in der üblichen Verschmutzung der Umwelt nicht zu erwarten sind, sind Molybdän und Magnesium. Der erste ist im Reibungsmodifikator Molybdänsulfat enthalten, der zweite in der festen Komponente Talkum.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wird allgemein angenommen, dass eine Schicht aus Zellulose, Talk und Molybdänsulfat mit dem Eisenoxid der Stahloberfläche vermischt und zwischen Rad und Schiene eingeschlossen wird. Beim Austrocknen wird diese Schicht kompakter und sorgt für geringe Reibung und Ermüdungsfestigkeit (Abb. 23).

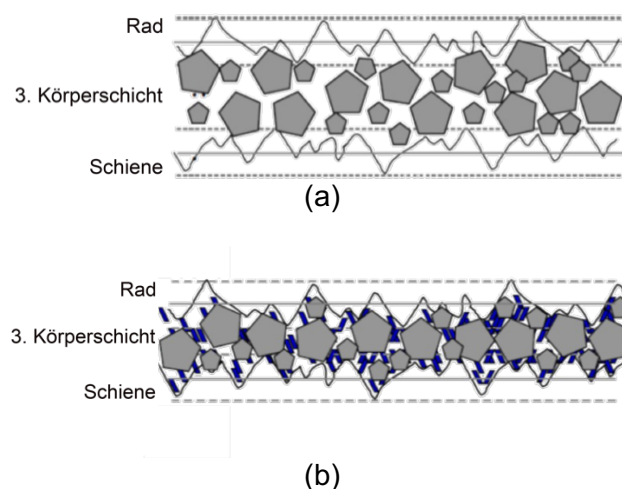


Abbildung 23. Vorgeschlagener Mechanismus für den Oberflächenschutz durch einen wasserbasierten Schienenkopfkonditioniermittel (vgl. COF-G19-01, R. Lewis und B. White, RSSB 23. November 2021, <https://www.rssb.co.uk/research-catalogue/CatalogueItem/COF-G19-01>). a) Talk, Zellulose und Additive werden im Kontakt eingeschlossen. b) Die Flüssigkeit trocknet aus oder wird aus dem Kontakt herausgedrückt, wodurch die Schicht verdichtet wird, um Schutz vor Ermüdung zu bieten.

Bestandteile des Talkums auf den Oberflächen wurden bei keinem der Labor oder Feld-Tests gefunden. Die chemischen Analysen im Anschluss an die zweite Reihe von Feldtests deuten darauf hin, dass die Hydroxypropyl-Zellulose auf der Oberfläche verbleibt und möglicherweise zu den in der Elektrophorese festgestellten organischen Säuren abgebaut wird. Es wurden keine Beweise gefunden, die den in Abbildung 23 dargestellten Mechanismus unterstützen

würden. Die gleichbleibend niedrige Reibung nach der Konditionierung in den Feldversuchen deutet jedoch stark darauf hin, dass Material aus dem Produkt trotz mehrerer Zugüberfahrten auf der Oberfläche verbleibt. Es ist möglich, dass die Oberflächen durch die Verringerung des Reibungskoeffizienten und nicht durch die Bildung einer Schutzschicht vor Ermüdung geschützt werden. In den Versuchen mit dem Twin-disks-gerät führten sowohl die öl- als auch die wasserbasierten Konditionierer zu einer geringeren Reibung und damit zu einer geringeren Ermüdung, wie in Abbildung 13 dargestellt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine gute Korrelation zwischen den Versuchen im Eisenbahnumfeld und den Twin-Disk Versuchen. Dies deutet darauf hin, dass Der Twin-Disk Versuch eine nützliche Technik zur Beurteilung von Schienenkopfkonditionierungsmitteln ist und sie eine gute Grundlage für einen Produktvergleich oder eine Produktqualifikation darstellen. Bei allen Tests, MTM, Twin-Disk im Labor, sowie auch die Anhaltewegmessungen im Feld, schnitt das Schienenkopfkonditionierungsmittel auf Wasserbasis am besten ab. Der Twin-Disk Versuch zeigte, dass der ölbasierte Konditionierer einen etwas besseren Verschleisschutz aufwies. Der Schutz vor Ermüdung war jedoch bei beiden Produkten ähnlich, und die Anwendung des wasserbasierten Konditionierers führte zu einer deutlich besseren Traktion. Daraus lässt sich schliessen, dass die Ergebnisse des Twin-disks-experiments auf den Rad-Schiene-Kontakt übertragbar sind, wenn man den Einfluss des Konditionierers auf Traktion und Ermüdung berücksichtigt.

Anmerkung

Die Twin-Disk-Experimente wurden am Institut für Werkstoffsystemtechnik (WITg) in Thurgau mit Unterstützung von Joachim Strittmatter, Arnulf Hörtnagl und Marc Hiefer durchgeführt.

7 Referenzen

- [1] R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, D. Eadie, and R. Lewis, "Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application," *Wear*, vol. 366–367, pp. 225–232, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.05.028.
- [2] R. Lewis and U. Olofsson, Eds., *Wheel-rail interface handbook*. in Woodhead Publishing in mechanical engineering. Boca Raton, FL Oxford: CRC Press, 2009.
- [3] C. Hardwick, R. Lewis, and R. Stock, "The effects of friction management materials on rail with pre existing rcf surface damage," *Wear*, vol. 384–385, pp. 50–60, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.04.016.
- [4] Interflon, "Das Ausbluten von Fett kann nicht „verarztet“ werden. Also verhindern Sie es!" Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: <https://interflon.com/at/news/ausbluten-von-schmierfett-verhindern>
- [5] G. Calderon-Salmeron, J. Leckner, R. Westbroek, B. Chanamolu, and S. Glavatskih, "Greases for electric vehicle motors: Bearing friction torque under driving cycle conditions and the thickener effect on oil release," *Tribology International*, vol. 198, p. 109777, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109777.
- [6] D. Fischer, H. Mues, G. Jacobs, and A. Stratmann, "Effect of Over Rolling Frequency on the Film Formation in Grease Lubricated EHD Contacts under Starved Conditions," *Lubricants*, vol. 7, no. 2, p. 19, Feb. 2019, doi: 10.3390/lubricants7020019.
- [7] Y. Shimizu and H. A. Spikes, "The Influence of Slide–Roll Ratio on ZDDP Tribofilm Formation," *Tribol Lett*, vol. 64, no. 2, p. 19, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11249-016-0738-z.
- [8] T. Nicák, "Beitrag zur Lebensdauerabschätzung zyklisch beanspruchter Schweißverbindungen im Druckbehälterbau," Universität Dortmund, 2006. Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: <https://eldorado.tu-dortmund.de/server/api/core/bitstreams/6a4e1724-806e-4106-bd79-059714b563f2/content>

- [9] F. Zbinden, R. Zoller, and D. Leibundgut, "Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens durch den Einsatz der Schienenkopfkonditionierung," *Eurailpress*, vol. Mai, p. 52, 2020.