

Untersuchung der Interaktion zwischen Reibleistung im Rad-Schiene-Kontakt und der durch Streulichtmessungen charakterisierten Radoberflächentopographie

Schneider, Patrick¹, Stratmann, Ina¹, Rakowitsch, Martin¹, Schindler, Christian¹

¹Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS), RWTH Aachen University, Seffenter Weg 8, 52074 Aachen

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Aufsatz wurde das winkelaufgelöste Streulichtmessverfahren zur kontinuierlichen berührungslosen Charakterisierung der Radoberfläche während Bremsungen an einem Rollprüfstand eingesetzt. Als Kenngröße des Oberflächenzustandes dient die Varianz des an der Oberfläche gestreuten Lichts, welche mit den Oberflächenflankenwinkeln korreliert. Aus der Möglichkeit der kontinuierlichen Charakterisierung der Oberfläche wurde eine Versuchsdurchführung mit angeschlossenem Berechnungsverfahren zur Beobachtung temporärer Änderungen der Oberflächentopographie abhängig von den auftretenden Effekten im Rad-Schiene-Kontakt entwickelt. In den durchgeführten Bremsversuchen wurde mittels dieser Methoden eine Unterscheidung zwischen globalen und temporären Oberflächenänderungen vorgenommen. Während einer globalen Abnahme der Streulichtvarianz konnten lokale Anstiege bei hohen Reibleistungen beobachtet werden. Die Analyse der Oberflächenveränderung in Zusammenhang mit der Reibleistung deutet an, dass der Oberflächenzustand sich abhängig von den dominierenden Verschleißmechanismen im Kontakt der beiden Reibpartner ändert. Zudem können erste Ergebnisse zur Interaktion der Kraftschluss-Schlupf-Beziehung mit dem Oberflächenzustand präsentiert werden.

Keywords: Rad-Schiene-Kontakt, Oberflächentopographie, Streulichtmessung

1. Motivation

Im Betrieb überträgt die Oberfläche von Eisenbahnrädern, durch unterschiedlichste Gegebenheiten und Anforderungen beeinflusst, Kräfte zwischen Rad und Schiene. Hierbei führt der aus den Relativbewegungen zwischen den beiden Kontaktpartnern resultierende Materialabtrag zu Änderungen der Radoberflächenstruktur, welche selbst wiederum maßgeblich die aus den Relativgeschwindigkeiten resultierenden, übertragbaren Kräfte beeinflusst. Dass sich die Oberflächenbeschaffenheit an Schiene und Rad im Betrieb ändern, ist aus Feldmessungen bekannt. So haben Untersuchungen von LUNDMARK et al. [1] ergeben, dass sich das arithmetische Mittel der Rautiefe R_a bei einer regelmäßigen Messung der Oberflächenrauheit an Fahrzeugrädern nach einer Laufleistung von ca. 200 km nicht mehr wesentlich ändert, unabhängig von der Ausgangsrautiefe. Dass sich die Rauheit der Radoberfläche in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene ändert und damit auch der Kraftschluss beeinflusst wird, wurde von VIERECK [2] anhand von Prüfstandversuchen dargelegt. Festgestellt wurde eine Glättung der Oberfläche bei Mikroschlüpfen sowie geringen Makroschlüpfen und eine Aufrauung bei höheren Makroschlüpfen mit einhergehender Erhöhung des Kraftschlusses. Quantitative Untersuchungen wurden dazu nicht durchgeführt.

Im Zuge der angegangenen Versuche soll untersucht werden, inwiefern sich das Prinzip der Streulichtmessung zur kontinuierlichen Überwachung der Radoberflächenbeschaffenheit während kontrollierter Bremsversuche an einem Rollprüfstand eignet. Dabei soll auch betrachtet werden, ob sich Änderungen in den durch die Streulichtmessung gewonnen Kennwerte auf die Kraftübertragung zwischen dem Rad und der Schiene auswirken.

2. Oberflächencharakterisierung mittels winkelaufgelöstem Streulichtmessverfahren

Bei dem in der VDA-Empfehlung 2009 [3] beschriebenen, winkelaufgelösten Streulichtmessverfahren handelt es sich um eine Messtechnik, mit der Oberflächen berührunglos und kontinuierlich erfasst werden. Dazu wird die zu untersuchende Oberfläche senkrecht durch eine Leuchtdiode beleuchtet, siehe Abbildung 1. Für den Messbereich α wird das an der Oberfläche unter dem Winkel φ reflektierte Licht durch eine Optik (O) auf eine Aneinanderreihung von Fotodioden umgelenkt, die als lineare Detektoren dienen (A). Die Fotodioden erfassen die Intensität $I_{\varphi'}$ des um den Winkel φ gestreuten Lichts, sodass mit $H(\varphi')$ eine Häufigkeitsverteilung des Streulichtes erfasst wird. Die

Verteilung enthält Informationen über die Mikrostruktur des Messflecks (P) sowie den Verkippungswinkel δ der Oberfläche. Um diese zu extrahieren, werden aus der Verteilung verschiedene Kennwerte berechnet, wie die mittlere Lage der Streuwinkelverteilung M , die Varianz der Streuwinkelverteilung A_q sowie die Gesamtintensität des reflektierten Lichts I . [3]

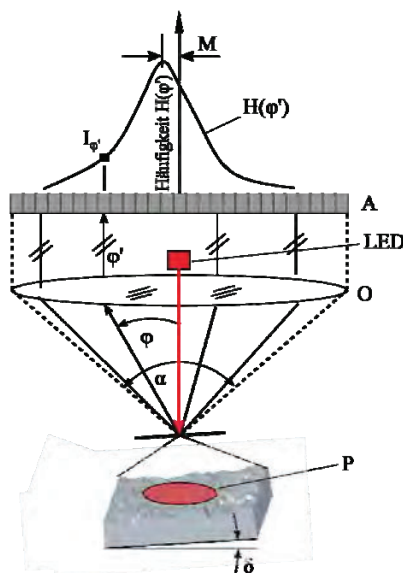


Abbildung 1: Prinzipsskizze der Streulichtmessung in Anlehnung an [3]

Oberflächen mit einer hohen Streulichtvarianz A_q weisen unregelmäßigere Topographien und große Flankenwinkel auf. Dementsprechend haben Oberflächen mit einem geringen A_q -Wert regelmäßiger Topographien und geringere Flankenwinkel. Die Streulichtvarianz A_q korreliert mit der Rautiefe R_z , wenngleich sie nicht ineinander umgerechnet werden können [3].

3. Funktionsweise des Einzelradrollprüfstandes

Zur Durchführung der Bremsungen wird auf den in Abbildung 2 schematisch dargestellten Einzelradrollprüfstand des IFS zurückgegriffen. Das Fahrzeugrad stützt sich auf einer Treibscheibe ab, deren Mantelfläche mit dem Schienenprofil 60E1 unter Beachtung der 1:40-Schieneneneinbauneigung versehen ist. Eine Luftfeder prägt die erforderliche Radaufstandskraft auf. Zur Simulation eines Bremsvorgangs beschleunigt der Motor zunächst die Treibscheibe samt Schwungmasse und Rad auf die Ausgangsgeschwindigkeit. Zur Bremsung wird eine an der Radwelle montierte, druckluftbetriebene Scheibenbremseinrichtung verwendet. Während der Bremsung dissipiert die Bremse die in der

Schwungmasse gespeicherte kinetische Energie, wobei die Leistung über den Rad-Schiene-Kontakt zur Radwelle geführt wird.

Bei der Bremsung wird der Bremszylinderdruck über die in Abbildung 2 gezeigte Pneumatik eingestellt. Das erste 2/2-Wegeventil ermöglicht den Druckaufbau, solange der Mindestschlupfwert - Halteschlupf genannt - noch nicht erreicht ist. Ist dieser Grenzwert überschritten, schließt das Ventil und hält den Druck konstant. Kommt es während der Bremsung zur Überschreitung eines festgelegten Grenzschlupfes, öffnet sich das Gleitschutzventil und entlüftet den Bremszylinder, bis der Schlupf unterhalb des maximal zulässigen Schlupfes liegt. Diese Art der Regelung erlaubt es nicht, den Schlupf in engen Grenzen zu halten.

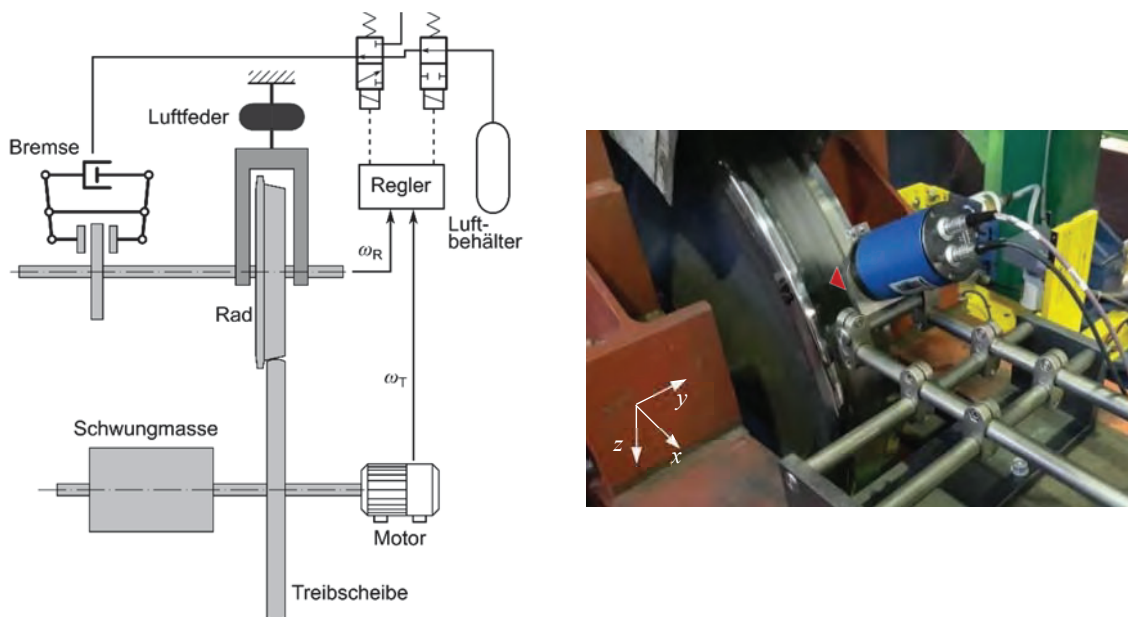


Abbildung 2: Prinzipskizze des Einzelradrollprüfstands (links) und Rollprüfstand mit integriertem Sensor zur Streulichtmessung (rechts)

Während der Bremsvorgänge wird die Radoberfläche kontinuierlich auf der Spur der Kontaktfläche mit dem Streulichtsensor OS500 des Herstellers *OptoSurf GmbH* überwacht, siehe Abbildung 2. Die Anordnung ist so gewählt, dass das in der x,z -Ebene reflektierte Streulicht erfasst wird.

4. Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung wird zuerst der Oberflächenzustand des Rades über den gesamten Umfang im Bereich der Kontaktfläche erfasst. Da das Rad dabei nicht von der Treibscheibe abgehoben werden kann, wird die Radaufstandskraft durch Entlüften der

Luftfeder minimiert, um etwaige Einflüsse des Rad-Schiene-Kontaktes auf die Oberflächencharakterisierung möglichst klein zu halten. Zusätzlich wird mit 2 km/h eine geringe Radumfangsgeschwindigkeit für die Abtastung gewählt. Anschließend wird der Prüfstand auf eine Geschwindigkeit von 30 km/h beschleunigt und mittels Druckluftbremse abgebremst. Dabei liegen ausschließlich trockene Kontaktbedingungen vor und die Streulichtmessung ist fortwährend aktiv. Zudem werden die Umfangsgeschwindigkeiten von Treibscheibe und Rad aufgenommen, sowie die Längskraftschlusskraft gemessen. Nach der durchgeführten Bremsung erfolgt eine neue Radoberflächenabtastung unter den bereits genannten Bedingungen.

Der beschriebene Versuchsdurchlauf wird mit verschiedenen Radaufstandskräften wiederholt, um einen möglichst großen Parameterraum hinsichtlich Schlupf und Reibleistung zu gewährleisten.

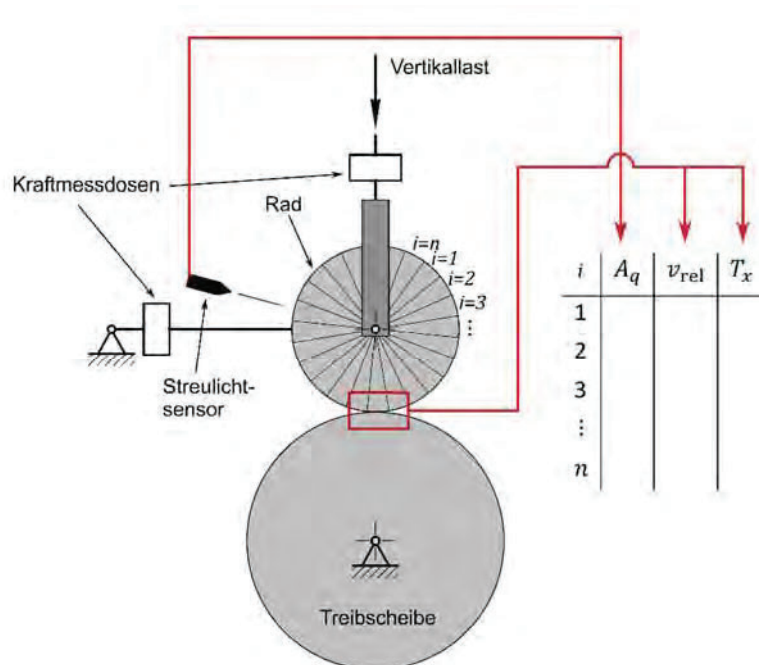


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Rollprüfstandes mit Segmentierung des Rades

Für die Versuchsauswertung wird das Rad gemäß Abbildung 3 in 5°-Segmente aufgeteilt, damit die Zuordnung der gemessenen Oberflächenkennwerte zu den aufgetretenen Kontaktbedingungen nach jeder Überwälzung ermöglicht wird und etwaige Wechselwirkungen erkannt werden können. Zur Erfassung der Kontaktbedingungen wird der Schlupf gemäß

$$s = \frac{\omega_R \cdot r_R - \omega_T \cdot r_T}{\omega_T \cdot r_T}$$

berechnet. ω beschreibt die Winkelgeschwindigkeit von Rad (Index R) und Treibscheibe (Index T) während r für den Radius steht. Die in der Kontaktfläche übertragene Reibleistung folgt dem Produkt aus Längskraftschlusskraft T_x und Relativgeschwindigkeit zwischen Rad und Treibscheibe:

$$P = T_x \cdot (\omega_R \cdot r_R - \omega_T \cdot r_T)$$

Für jedes Radsegment wird die Streulichtvarianz, der Schlupf und die Reibleistung gemittelt.

5. Versuchsergebnisse

Ergebnisse eines Versuchsdurchlaufes sind in Abbildung 4 gezeigt. Dargestellt sind die Umfangsgeschwindigkeiten von Rad und Treibscheibe (oben) zu dem synchron aufgenommenen Verlauf der Streulichtvarianz A_q . In der linken Spalte von Abbildung 4 ist der gesamte Messschrieb des durchgeführten Versuchs gezeigt. In diesem ist ersichtlich, dass durch den durchgeführten Bremsprozess eine Abnahme der Streulichtvarianz auftritt, feststellbar durch die vor und nach der Bremsung durchgeführten Oberflächencharakterisierungen. Die rechte Spalte der Abbildung zeigt eine Detailansicht der reinen Bremsung an. Es ist erkennbar, dass während der globalen Abnahme der Varianz A_q zu Zeitpunkten temporärer hoher Relativgeschwindigkeiten zwischen Rad und Treibscheibe dennoch Erhöhungen der Streulichtvarianz vorliegen.

Die mehrmalige Wiederholung des Bremsversuchs bei gleichzeitiger Erhöhung der Radaufstandskraft und der Vergleich der Oberflächen vor und nach der Bremsung zeigt, dass sich die mittlere Streulichtvarianz weiter verringert, siehe Abbildung 5.

Aus der Berechnung der Reibleistung und dem Vergleich zwischen den Streulichtkennwerten vor und nach einzelnen Überrollungen, lässt sich der in Abbildung 6 gezeigte Zusammenhang aufstellen. Jeder Punkt steht für die gemittelte Änderung der Streulichtvarianz innerhalb eines Radsegments, kodiert über die Farbe, während einer Überrollung für alle während der Bremsungen auftretenden Überrollungen. Die Farbinintensität beschreibt dabei den Betrag der Änderung von A_q , wobei hohe Farbinintensitäten hohe Änderungen bedeuten.

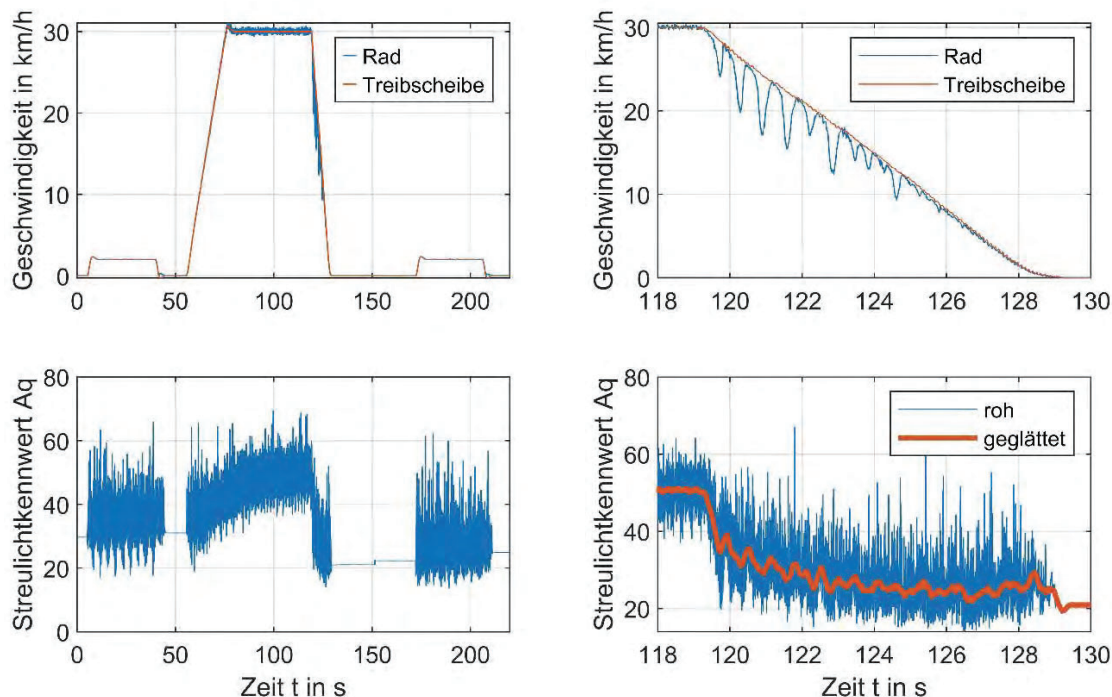


Abbildung 4: Aufgezeichnete Geschwindigkeiten von Rad und Treibscheibe (oben) sowie Streulichtmessung (unten), in Gesamtübersicht (linke Spalte) und im Detail während der Bremsung (rechts Spalte)

Während bei großen eingehenden Streulichtvarianzen eine Abnahme der Aq-Werte (türkis) bei niedrigen Reibleistungen festzustellen ist, kommt es bei niedrigeren Aq-Werten und niedriger Reibleistung zu Steigerungen der Aq-Werte (magenta). Der Übergang zwischen Steigerung und Verringerung der Aq-Werte verläuft hierbei annähernd in Form einer von den eingehenden Streulichtkennwerten abhängigen, abnehmenden Geraden, wie im unteren Teil der Abbildung bei Reibleistungen von unter ca. 2000 W zu sehen ist. Mit Steigerung der übertragenen Reibleistung über diesen Wert verläuft der Verhaltensübergang in Form einer steigenden Geraden. Dies lässt die Vermutung zu, dass hier eine Änderung des Verschleißverhaltens auftritt, welche die Variation der Oberflächentopographie beeinflusst. Nach gängigen Verschleißmodellen wie bspw. dem Reibenergieäquivalenzmodell nach KRAUSE und POLL [4] oder dem Gleitwegmodell nach ARCHARD [5] verändern sich die dominanten Verschleißmechanismen abhängig von den auftretenden Belastungen im Rad-Schiene-Kontakt. Mit einem Wechsel der auftretenden Verschleißmechanismen ist somit anzunehmen, dass sich auch die Oberflächentopographie verändert. Die dementsprechend resultierende Art und Weise des Materialabtrags hinterlässt somit andersartige Strukturen an der Oberfläche, welche mittels der Streulichtmessung detektiert werden sollen.

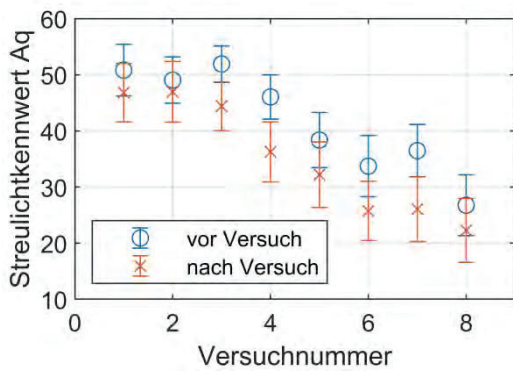


Abbildung 5: Entwicklung des über den Radumfang gemittelten Wertes A_q über mehrere Bremsungen mit zugehöriger Standardabweichung

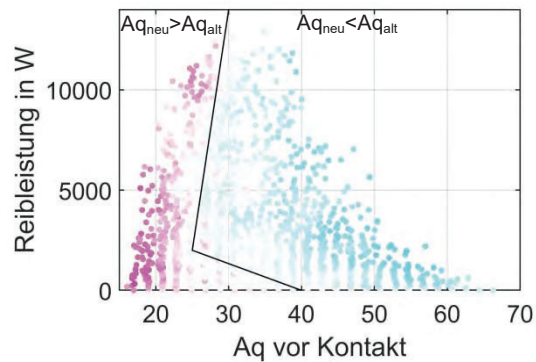


Abbildung 6: Änderung des Streulichtkennwertes A_q nach einer Überrollung

Bezüglich der auftretenden Relation zwischen Kraftschluss und Schlupf wird zum derzeitigen Stand der Untersuchungen zunächst zwischen höheren und geringeren Streulichtkennwerten unterschieden. Die über das abrollende Radsegment gemittelten Kraftschluss- sowie Schlupfwerte aus allen ausgewerteten Versuchen werden den jeweiligen Bereichen der Streulichtvarianz zugeordnet. Aus der so resultierenden Sammlung von Datenpunkten werden jeweils die Mittelwerte über Kraftschluss und Schlupf in definierten Schlupfklassen errechnet, woraus sich die in Abbildung 7 gezeigten Kraftschluss-Schlupf-Kurven mit dazugehörigen Standardabweichungen ergeben. Es lässt sich die Tendenz identifizieren, dass bei höherer Streulichtvarianz (blaue Kurve) die Kraftschluss-Schlupf-Kurve bereits bei niedrigeren Schlupfwerten das Optimum erreicht. Somit kann aus den zum derzeitigen Stand der Untersuchungen vorliegenden Daten die Annahme bestätigt werden, dass der Verlauf der Kraftschlussbeiwerte durch die Änderung der Oberflächentopographie beeinflusst wird.

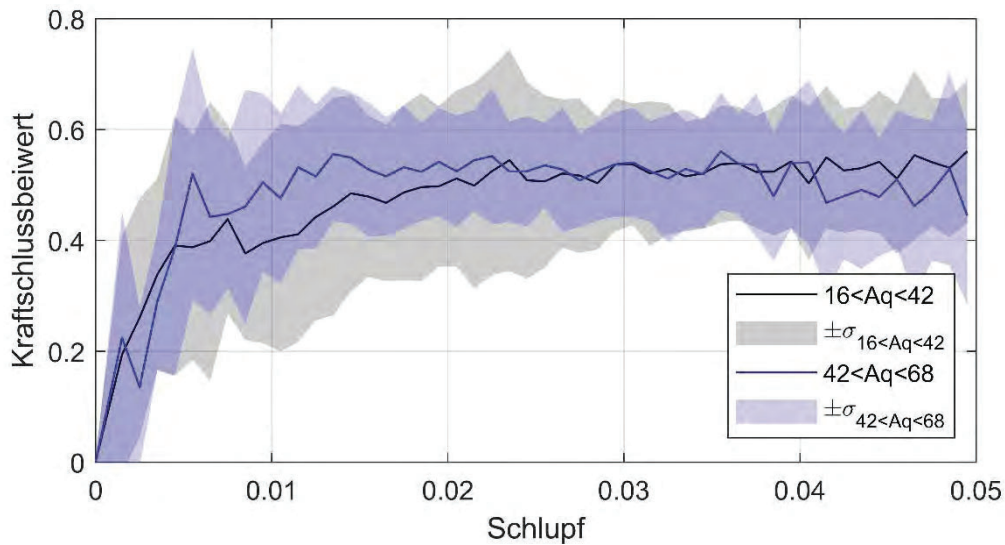


Abbildung 7: Kraftschlusskurven für hohe und niedrige Streulichtvarianz mit eingefärbter Standardabweichung der Messpunkte

6. Zusammenfassung und Ausblick

In den durchgeführten Versuchen konnte beobachtet werden, dass sich die Streulichtvarianz und damit die Radoberflächentopographie durch die auftretenden Kraftschlussbedingungen ändern. Abhängig von dem in den Kontakt eingehenden Oberflächenzustand sowie der abgesetzten Reibleistung können Bereiche der Oberflächenänderung identifiziert werden. Der Einfluss der Oberflächentopographie auf die Kraftschluss-Schlupf-Beziehung wurde untersucht und erste Tendenzen in der Veränderung der maßgeblichen Charakteristika festgestellt.

In weiterführenden Untersuchungen sollen weitere Parameter mit betrachtet werden. Hierzu zählt die auftretende Kontaktfläche und die Flächenpressung, abgeleitet durch versuchsbegleitend vermessene Rad- und Treibscheibenprofile, sowie der rechnerische und der gemessene Materialabtrag in Korrelation zu den auftretenden Oberflächentopographieänderungen. Des Weiteren soll der Einfluss auf den Kraftschluss umfassend unter Miteinbeziehung weiterer Parametervariationen untersucht werden. Diese Versuche sollen durch detaillierte Vermessung der Oberflächen - bspw. mittels konfokaler Laser-mikroskopie - begleitet werden.

7. Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 441889189.

Literatur

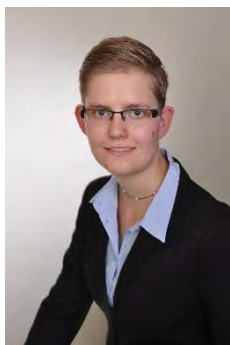
- [1] Lundmark, J.; Höglund, E.; Prakash, B.: Running-in behaviour of rail and wheel contacting surfaces. In: AITC-AIT 2006: 5th International Conference on Tribology; 20 - 22 September 2006, Parma, Italy. 5th International Conference on Tribology, Parma, 20 - 22 September, 2006.
- [2] Viereck, U.: Dynamisches Kraftschlussmodell zur Optimierung von Gleitschutzsystemen, Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Heft 678. VDI-Verl., Düsseldorf, 2008.
- [3] VDA 2009:2010-07: Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit - Winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik, Definition, Kenngrößen und Anwendung.
- [4] Krause, H.; Poll, G.: Wear of wheel-rail surfaces. Wear 113 (1986), Heft 1, S. 103–122.
- [5] Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics 24 (1953), Heft 8, S. 981–988.

Autoren



Schneider, Patrick, M.Sc.

Maschinenbaustudium mit Vertiefung Schienenfahrzeugtechnik an der RWTH Aachen bis 2018. Seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen, tätig im Bereich Fahrzeugdynamik und Radverschleiß.



Stratmann, Ina, M.Sc.

Ausbildung zur Technischen Zeichnerin von 2006 bis 2009 mit anschließender Tätigkeit als Technische Zeichnerin bzw. Konstrukteurin bis 2012. Von 2008 bis 2012 Weiterbildung zur staatlich geprüfter Technikerin. Anschließend bis 2018 Studium des Maschinenbaus mit der Vertiefungsrichtung Konstruktion an der Universität Paderborn. Seit 2018 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen, tätig im Bereich Struktursimulation und Rad-Schiene-Kontakt.



Rakowitsch, Martin, M.Sc.

Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Technischen Universität Darmstadt bis 2018. Seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen, tätig im Bereich Fahrzeugdynamik und Rad-Schiene-Interaktion.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schindler, Christian

Diplomstudium des Maschinenbaus, Vertiefung Kraftfahrwesen, an der RWTH Aachen, bis 1986. 1991 Promotion im Bereich Schienenfahrzeugtechnik an der RWTH Aachen, anschl. in verschiedenen Funktionen in der Schienenfahrzeugindustrie tätig, zuletzt Leiter Technik bei Siemens Light Rail, Krefeld. 2004 bis 2015 Universitätsprofessor für Konstruktionstechnik an der TU Kaiserslautern. Seit 2016 Leiter des Lehrstuhls und Instituts für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (ifs) und Geschäftsführender Direktor des Research Centers Railways (RCR) an der RWTH Aachen, Sprecher der Vereinigung der Universitätsprofessuren des Eisenbahnwesens (VUE).