

Auf der Suche nach einem stabilen Kraftschluss Rad/Schiene beim Bremsen der Züge

Wenn es Herbst wird, fallen die Blätter von den Bäumen. An den Bahnböschungen und ihrer näheren Umgebung befindet sich Vegetation. Die Blätter fallen auf den Eisenbahn-Oberbau (Bild 1). Bei der Zugfahrt gelangen beim Bremsen Blätter teilweise in die Kontaktfläche Rad/Schiene. Dem Lokführer ist diese Sachlage bekannt. Er beginnt frühzeitig mit dem Bremsen, da sich der Anhaltweg des Zuges verlängern kann.

Auf der zu befahrenden Strecke verändern sich die Umweltbedingungen an der Rad/Schiene Aufstandsfläche tageszeitlich und örtlich und damit die Größe des verfügbaren Kraftschlusses. An jedem Rad können weiter unterschiedliche Kontakt-Bedingungen Rad/Schiene für die Bremskraftübertragung Rad/Schiene vorliegen.

Der Bahnbetrieb erfordert einen stabilen Anhalteweg mit hoher Treffsicherheit unter allen möglichen Umweltbedingungen und das auch unabhängig von der Zuglänge. Antiblockier-Einrichtungen (Gleitschutz-Einrichtungen) an jedem Radsatz eines Schienenfahrzeugs verbessern den verminderten Kraftschluss

Rad/Schiene durch eine besondere Regelungstechnik mittels Veränderung des Bremszylinderdruckes.

Die Auslegung der Bremsen der Schienenfahrzeuge erfordert Vorgaben zum Kraftschluss Rad/Schiene in den europäischen technischen Spezifikationen für Schienenfahrzeuge. So besagt die TSI LOC & PAS [1], dass der Kraftschluss einen bestimmten Grenzwert bei der Auslegung der Bremsen nicht überschreiten darf. Dieser ist von der Anzahl der Radsätze des Zuges abhängig. Je größer diese ist, desto höher darf der Grenzwert des Kraftschlusses genutzt werden (Bild 2). Damit wird in der TSI vorausgesetzt, dass das Einzel-Fahrzeug mindestens mit der gleichen Anzahl von Radsätzen im Zug eingesetzt wird, wie es bei der Auslegung festgelegt wurde.

Der Kraftschluss Rad/Schiene ist in der TSI bis zu einer Geschwindigkeit von 250 km/h konstant und fällt dann linear bis 350 km/h ab. Physikalisch ist dieser idealisierte Verlauf schwer zu begründen, besonders der Knick bei 250 km/h im Kraftschlussverlauf.



Bild 1: Laub im Gleis

(Fotos Jaenichen)

Dieser idealisierte Verlauf ermöglicht jedoch eine einfache Auslegung der Bremsen unter Beachtung des vorgegebenen Grenzwertes des Kraftschlusses Rad/Schiene. Er führt zu vertretbaren Anhaltewegen unter Beachtung der herkömmlichen Signalbremswege. Wenn - wie bereits gesagt - der Kraftschluss in der Praxis niedriger als der für die Auslegung verwendete ist, soll der Gleitschutz besonders bei Hochausnutzung des Grenzwertes des Kraftschlusses wirksam werden. Der Lokführer hat auf die lokal an den Radsätzen wirkenden Gleitschutz-Einrichtungen keinen Einfluss. Er kann auf den Regelmechanismus nicht eingreifen.

Gleitschutzanlagen sollen etwa gleiche Auswirkungen auf den Anhalteweg haben DIN EN 15595 enthält Vorgaben für ihre Entwicklung und Prüfung [2].

Gleitschutzanlagen werden vor der Zulassung im Bahnbetrieb hinsichtlich ihres Regelalgorithmus überprüft, um ihre Wirksamkeit auf den Anhalteweg zu erkunden. Wie bereits festgestellt, gibt es keine stabilen Umweltbedingungen an der Kontaktfläche Rad/Schiene. Deshalb werden für die Prüfung besondere Prüfbedingungen für den Gleiszustand vorgege-

ben. Es sind definierte künstlich niedrige Kraftschlüsse Rad/Schiene zu erzeugen. Die weiteren äußeren Versuchsbedingungen bleiben weitestgehend unbeachtet. So gibt es u. a. keine Aussagen über die Makro- und Mikrogeometrie der Kontaktflächen Rad/Schiene und das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs bei der Versuchsdurchführung. In der Praxis haben sich die von der UIC zugelassenen Gleitschutzanlagen bewährt. Sie sind ein wichtiges Bauteil, den Kraftschluss Rad/Schiene zu verbessern.



Bild 3: Flachstelle auf der Radoberfläche

Güterwagen besitzen in der Regel keinen Gleitschutz. In der TSI WAG [3] wird ein Grenzkraftschluss von 0,12 für die Abbremsung der Räder mit Grauguss-Bremssohlen bei

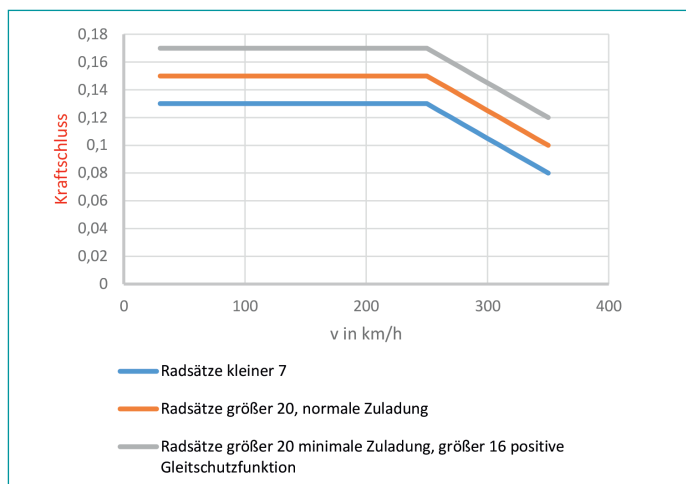


Bild 2: Grenzkraftschluss Rad/Schiene nach TSI LOC & PAS

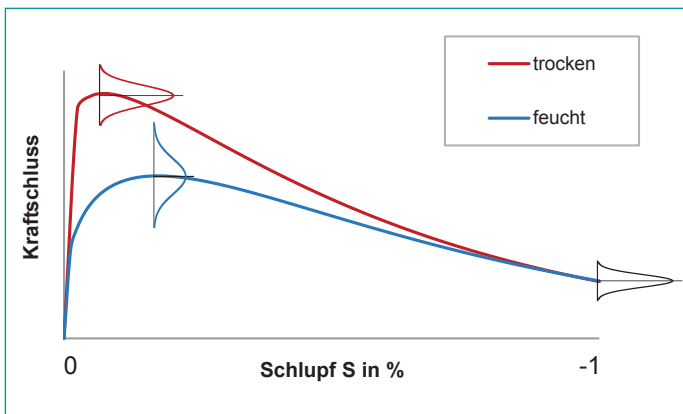


Bild 4: Kraftschluss Rad/Schiene bei trocken und feuchten Schienenoberflächen-Zustand

Klotzbremse vorgegeben. Werden für die Klotzbremse Kompositionsbremssohlen oder Scheibenbremsen verwendet, dann beträgt der Grenzkraftschluss Rad/Schiene 0,11. Der Kraftschluss ist hierbei ein konstanter geschwindigkeitsunabhängiger Wert, der von keinem Parameter z. B. der Radsatzlast abhängt. Auch das ist wiederum eine vereinfachte Annahme, um mit überschaubaren Mitteln die Bremsanlagen der Güterwagen auszulegen.

Für den Einsatz von Kompositionsbremssohlen an Fahrzeugen ist eine UIC Zulassung jedes Fabrikats erforderlich. Dabei muss überprüft werden, dass der Abrieb des Bremssohlenmaterials, der sich auf die Schiene absetzen kann, nicht zu einer Kraftschlussverschlechterung Rad/Schiene führt.

Dieser Zustand kommt besonders dann zur Wirkung, wenn immer an der gleichen Stelle gebremst wird, was der Verfasser selbst beobachten konnte. Reibungsmodifikatoren aus dem Konglomerat der Bremssohlen können ein Bestandteil des Schmutzfilms auf der Schienenkopfoberfläche werden.

Für einen stabilen Kraftschluss unter allen Umwelt- und Be-

triebsbedingungen benötigen wir Grundkenntnisse zum tribologischen Verhalten der Bremskraftübertragung zwischen Rad/Schiene. Zum weiteren Verständnis der Problematik wird nun das Rad als Einzelelement des Fahrzeugs bei der Bremskraftübertragung betrachtet.

Mechanismus der Bremskraftübertragung

Das rollende Rad führt eine translatorische und eine rotatorische Bewegung aus. Vereinfacht man die Berührungsfäche Rad/Schiene zu einem Berührungspunkt, so befindet sich das Rad im Berührungspunkt in relativer Ruhe, da in dem Aufstandspunkt die Trans- und die Rotationsgeschwindigkeit identisch sind.

Wird eine Bremskraft im Fahrzeug erzeugt, die über das Rad auf die Schiene zu übertragen ist, vermindert sich die Rotationsgeschwindigkeit des Rades durch das zu übertragende Bremsmoment, das der Fahrtrichtung entgegenwirkt, gegenüber dem ungebremsten rollenden Rad. Es entsteht eine Differenzgeschwindigkeit Δv zwischen Translationsgeschwindigkeit des Fahrzeugs v_T und Rotationsgeschwindigkeit des gebremsten Rades v_R am Aufstandspunkt. Diese Differenzgeschwindigkeit ist

die Schlupfgeschwindigkeit des Rades. Der Schlupf ist eine normierte Größe mit $s = \Delta v / v_T = (v_R - v_T) / v_T$.

Der Schlupf ist eine sich beim Bremsvorgang verändernde Größe und wird von vielen Einflussfaktoren beeinflusst, auf die noch näher einzugehen ist.

Liegen ungünstige Übertragungsbedingungen der Bremskraft auf die Schiene in der Kontaktfläche Rad/Schiene vor, so erhöht sich die Schlupfgeschwindigkeit. Im Grenzfall blockiert das Rad und gleitet auf der Schiene (Schlupf $s = -1$). Es verursacht Materialabtragungen an den Reibpartnern, die am Rad zu Flachstellen führt. Der Oberbau wird durch Flachstellen beim Fahrzeuglauf stärker beansprucht. Zusätzlich entstehen besondere Flachstellengeräusche. Sie sind also möglichst zu vermeiden. Trotzdem treten sie vereinzelt an Radsätzen auf (Bild 3).

Die Ursache für den Bremschlupf ist die kraftschlüssige Verbindung zwischen Rad/Schiene. Bei einer kraftschlüssigen Verbindung kann nur eine begrenzte Kraft oder ein begrenztes Moment auf die Schiene übertragen werden. Der Bremschlupf ist eine Größe, die von den tribologischen

Vorgängen in der Kontaktfläche abhängt. Die Kontaktfläche Rad/Schiene ist etwa 1 cm^2 groß und hat die Bremskräfte auf die Schiene zu übertragen. Dabei wird modellmäßig davon ausgegangen, dass die Kontaktfläche in ein Gebiet der Adhäsion und in ein Gebiet des Gleitens befindet, deren Ursache die wirkenden Tangentialkräfte sind. Mit Zunahme der Bremskräfte vermindert sich das Adhäsionsgebiet der Kontaktfläche und bei Blockierung des Rades findet nur noch Gleitreibung in der Kontaktfläche Rad/Schiene statt.

Neben der idealen trockenen Kontaktfläche können sich in der Kontaktfläche Zwischenschichten unterschiedlicher Dicke und Zusammensetzung ausbilden. Eine mögliche Zwischenschicht ist ein Wasserfilm, der den verfügbaren Kraftschluss vermindert (Bild 4) [4].

Die Kontaktfläche ist beim gebremsten Rad eine veränderliche Größe, also die Aufstandsellipse ist in ihren Abmessungen und nicht stabil. Gleiches trifft für die Rauigkeit in der Aufstandsfläche auf, da in jedem Moment eine andere Mikrogeometrie vorliegt. Wenn nun noch Zwischenschichten, eben das Laub oder Industriestaub usw. hinzu kommen, sind

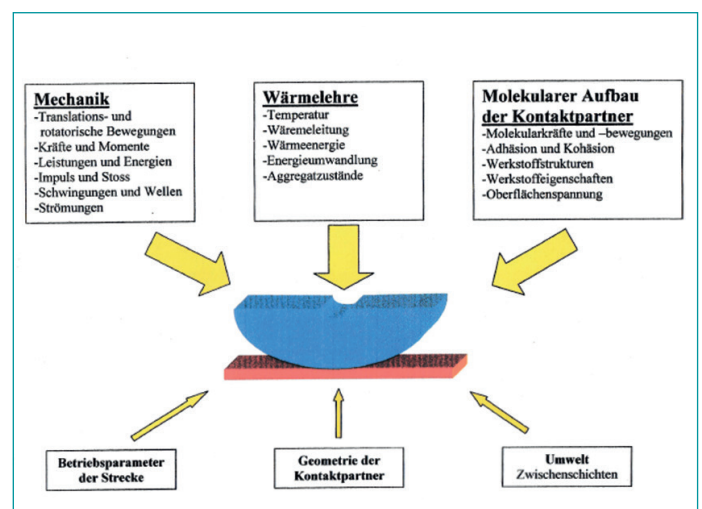


Bild 5: Physikalische Größen im Rad/Schiene Kontakt

die tribologischen Vorgänge in der Kontaktfläche durch den Schmierfilm noch viel komplizierter zu beschreiben. Dabei beeinflusst u.a. die chemische Zusammensetzung der Fremdschicht und ihre momentane Schichthöhe die Höhe des Kraftschlusses. Jeder momentaner Zustand führt zu anderen Kontaktverhältnissen in der Aufstandsfläche bei der Ausbildung der Tangentialkräfte für die Übertragung der im Fahrzeug erzeugten Bremskräfte in der Wechselwirkung mit der Schiene.

Zukunftsvision in der Forschung

Dieser hier kurz angerissene Komplex der tribologischen Vorgänge in der Kontaktfläche besitzt noch viele dunkle Flächen in der Erkenntnistheorie. Die tribologischen Vorgänge in der Kontaktfläche sind sehr komplex und weitestgehend unbekannt. Besonders wirken drei Wissensgebiete als physikalische Größen im Rad/Schiene Kontakt. Das sind die Mechanik, Wärmelehre und die molekulare Wechselwirkung. Zu jedem genannten Gebiet der Physik sind einige Merkmale im Bild 5 zusammengestellt. Sie verdeutlichen die Kompliziertheit der Problematik.

Bild 6 zeigt eine weitere Darstellung des tribologischen Wirkmechanismus der Bremskraftübertragung aus einer anderen Betrachtungsweise, ohne dabei auf die speziellen Werkstoffeigenschaften der Partner einzugehen. Schließlich werden drei Methoden zur Verbesserung der Bremskraftübertragung bei ungünstigen Kraftschlussbedingungen im Bild 6 genannt.

Es bedarf eines hohen Aufwandes, um in dieses Wissensgebiet weiter einzudringen. Nur das Zusammenspiel zwischen Experiment und theoretischen

Untersuchungen wird zu einem weiteren Erkenntnisgewinn führen. Deshalb bedarf es verstärkt der angewandten Grundlagenforschung auf dem Gebiet des Phänomens des stochastisch vorliegenden Kraftschlusses an den Rädern eines Zuges bei der Bremskraftübertragung.

Mit der intensiveren Erkundung des Kraftschlusses in Deutschland beschäftigt man sich in den 30iger Jahren des vorigen Jahrhunderts in Berlin-Grünwald in der Versuchsanstalt für Bremsen. Versuche von Metzkwow erkundeten die Kraftschluss an einem zweiachsigen Fahrzeug [5]. Seit dieser Zeit sind viele Erkenntnisse dazu gekommen, die aber nicht ausreichen, einen geeigneten Lösungsmechanismus für die Praxis bereit zu stellen.

In vielen Ländern wird an Details der Kraftschlussübertragung Rad/Schiene geforscht. Dabei ist das japanische Eisenbahn-Forschungsinstitut RTRI besonders hervorzuheben. Im Geschäftsjahr 2017 /18 wurden 46 Themen zur Rollmaterial-Technologie bearbeitet, u.a. auch zum Kraftschluss Rad/Schiene. Mittels Simulation der tribologischen Vorgänge versucht man die Wirkmechanismus auf den Kraftschluss zu analysieren. Dazu werden wegen der Komplexität Modelle entwickelt, die zur Lösung der Funktionen sehr leistungsfähige Rechner benötigen, um die Zusammenhänge komplex wieder zu spiegeln. Gleichzeitig erfolgen experimentelle Untersuchungen an Modellprüfständen zur Überprüfung der theoretischen Computerergebnisse [6].

Es bedarf weltweit größerer Forschungsaktivitäten zum Phänomen des Kraftschlusses zwischen Rad/Schiene. Die europäische Bahninitiative Shift2Rail beabsichtigt dazu eine gezielte zukunftsweisende Forschung durchzuführen. Im

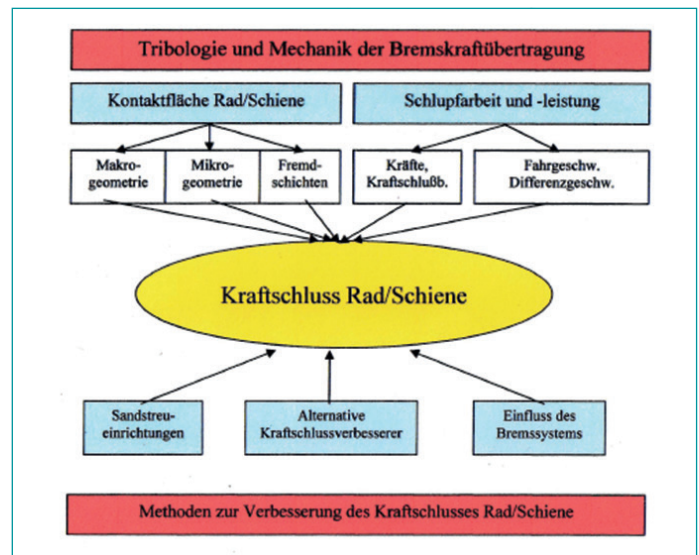


Bild 6: Einflussparameter auf den Kraftschluss Rad/Schiene

Projekt PINTA 2 „Traktion und Bremse“ werden Arbeiten zum optimierten Rad/Schiene Kontakt beim Bremsen durchgeführt [7].

Diese Kenntnisse aus der angewandten Grundlagenforschung werden benötigt, um den Kraftschluss Rad/Schiene weitestgehend unabhängig von den Umweltbedingungen zu machen.

Auch ein zukünftiger automatisierter Zugbetrieb könnte davon profitieren, wenn der Anhalteweg treffsicherer unter allen auftretenden klimatischen Bedingungen eingehalten werden kann.

Dr.-Ing. Dieter Jänichen
Technische Universität Dresden
www.uni-dresden.de

Literaturverzeichnis

[1] Verordnung Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge-Lokomotiven und Personenwagen des Eisenbahnsystems in der europäischen Union“, Amtsblatt L356/228 vom 12.12.2014

[2] DIN EN 15595 Bahnanwendungen – Bremse- Gleitschutz, März 2019

[3] Verordnung Nr. 321/2013 der Kommission vom 13.03.2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge- Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, Amtsblatt L104/1 vom 12.04.2013

[4] Jaenichen, D.: Kraftschluss Rad/Schiene in: Der Eisenbahningenieur 66 [2015], Heft 12, S. 20-24

[5] Metzkwow, B.: Untersuchungen der Haftwertverhältnisse zwischen Rad und Schiene beim Bremsvorgang in: Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 89(1934) Nr. 13

[6] Railway Technical Research Institute (RTRI) Vol. 59, Nov. 2018 S. 229 – 232

[7] <https://cordis.europa.eu/project/id/826054>, Stand 16.04.2020