

Modellierung der Adhäsionsfläche im Rad-Schiene-Kontakt unter Einsatz von reibwertverbessernden Mitteln

Amir Moshiri-Kahak, B. Eng., Fachhochschule Aachen, Aachen
Prof. Dr. Raphael Pfaff, Fachhochschule Aachen, Aachen
Dipl.-Ing. Markus Gäbel, NOWE GmbH, Elze
Alexander Reich, NOWE GmbH, Elze

1 Einführung

Die Nutzung von reibwertverbessernden Mitteln im Rad-Schiene-Kontakt ist in vielen Betriebsszenarien notwendig. Der effiziente Einsatz dieser Streumittel ist, von doppeltem Nutzen, da sowohl die Ver- als auch die Entsorgung aufwändig sind. Weiterhin verursachen im Vollbahnbereich zu große eingebrachte Streumittelmengen Sicherheitsprobleme aufgrund der Nichtdetektierbarkeit der Fahrzeuge durch Gleisstromkreise. Es ist daher nötig und sinnvoll, den Einsatz von Streumitteln dem Bedarf anzupassen und alternative Streumittel in Betracht zu ziehen. Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen von Streumitteln auf die Adhäsionsfläche im Rad-Schiene-Kontakt und soll damit die Machbarkeit einer analytischen Modellbildung ihrer Effektivität zeigen.

Die Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes der Schienenfahrzeuge ist Gegenstand der Forschung nahezu seit Aufnahme des Eisenbahnbetriebs. Der Fokus der Forschung lag dabei zunächst auf Effekten in der Fahrdynamik der Schienenfahrzeuge. Das zugrundeliegende Problem wurde erstmals von Carter [1] unter Einschränkung auf Zylinderrollen über eine Ebene gelöst. Drei Jahrzehnte später lösten de Pater und Johnson [5] lösten das kugelförmige Kontaktproblem, unter Verwendung der Lösung von Hertz zur Beschreibung der Form und Größe der Kontaktfläche sowie der Druckverteilung. Weitere Näherungslösungen für die elliptische Kontaktsituation wurden von Vermeulen und Johnson [4] sowie Haines und Ollerton [3] präsentiert.

Kalker nutzte, im Unterschied zu den bisher bestehenden analytischen Lösungen, eine numerische Simulation, hierzu entwickelt er das Programm CONTACT [6]. Dieses Programm ist weit verbreitet und wird auch heute häufig für das Rad-Schiene-Kontaktproblem benutzt. Für den Bereich der Fahrdynamiksimulation, wo sich externe Kontaktparameter häufig verändern, ist CONTACT wegen seiner hohen Rechenintensität nur bedingt geeignet.

Um dies zu überwinden, schlug Kalker eine im Gegensatz zur sogenannten exakten Theorie angenäherte elastische Verformung vor, implementiert im weitverbreiteten FASTSIM-Algorithmus [7]. Eine Vergleich der Verfahren wird in [8] dargestellt.

Später wurde das Rad-Schiene-Kontaktproblem mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gelöst, wie beispielsweise in [2].

Allen dargestellten Verfahren ist gemein, dass für die Modellbildung in der Regel zum einen die Homogenität der Kontaktpartner angenommen wird und zum anderen (bspw. in CONTACT und FASTSIM) der relative Schlupf als nicht signifikant angenommen wird. Weiterhin ist der Reibwert zwischen den Kontaktpartnern häufig als Eingabewert angenommen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes für nichthomogene Kontaktflächen, dies ermöglicht die Vorhersage der reibwertverbessernden Wirkung für eingebrachte Streumittel. Da das Einbringen dieser Mittel in der Regel im Traktions- oder Bremsfall erfolgt, wird die Einschränkung auf geringen relativen Schlupf der Kontaktpartner ebenfalls fallengelassen.

2 Modellierung der Kontaktfläche

Um die grundsätzliche Machbarkeit der Vorhersage der Wirksamkeit von Streumitteln überprüfen zu können, wird zunächst eine Kontaktellipse nach Hertz angenommen. Diese Kontaktellipse wird wie bei [9] in diskrete Elemente zerlegt und für die jeweiligen Elemente der Anpressdruck unter Berücksichtigung einer Hysterese zwischen Ein- und Ausfederung bestimmt.

Die einzelnen Säulen im Rad-Schiene-Kontakt werden mit einer linear vom Einlaufpunkt steigenden Spannung entsprechend der wirkenden Traktions- bzw. Bremskraft F_{tb} beaufschlagt, die dazu führt, dass die Säulen sich gegenüber ihrem Ausgangszustand verformen. Im Aufstandspunkt der jeweiligen Säule auf der Schiene wird die Gegenkraft von der Kraftschlusskraft aufgebracht. Abhängig von der für die einzelne Säule bestimmten Druckkraft liegt Haften oder Gleiten vor. Ist die als elastisch angenommene Verformung so groß, dass die Gegenkraft von der Kraftschlusskraft im Aufstandspunkt nicht mehr aufgebracht werden kann, so liegt für diese Säule Gleiten vor. Es zeigt sich, dass aufgrund der linear steigenden Verformung und dem annähernd elliptischen Anpressdruck das Vorliegen von Gleiten für ein Säulenelement dazu führt, dass alle in Rotationsrichtung folgenden Elemente ebenfalls Gleiten, die Adhäsionsfläche im Rad-Schiene-Kontakt nimmt damit eine nahezu elliptische Form an, wie in Abbildung 1 dargestellt.

In dieses Modell der Rad-Schiene-Kontaktfläche kann nun an einzelnen diskreten Elementen ein Zwischenpartikel, z.B. ein Sandkorn, eingebracht werden. Dies geschieht unter Benutzung eines Zufallsgenerators, der die Position der vorher bestimmten Anzahl Streumittelkörnchen definiert. Die Positionen, an der sich die Zwischenpartikel im Aufstandspunkt befinden, können, anstelle einer Kraftschlusskraft, eine von Art und Größe des Partikels abhängige Kraft übertragen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Kraft als fest angenommen. Aufgrund dieser verbesserten Kraftübertragung einzelner Säulen ergibt sich eine stützende Wirkung innerhalb der Kontaktfläche, die diese abhängig von vorliegendem Kraftschluss und Traktionskraft vergrößern kann.

3 Ergebnisse

Der vorgeschlagene Algorithmus erlaubt es, die Adhäsionsfläche auf Grundlage der Hertz'schen Kontaktellipse zu beschreiben, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Form und Größe der Kontaktfläche sind in guter Übereinstimmung mit Darstellungen in der Literatur, z.B. [7].

Ausgehend von dieser Beschreibung der Adhäsionsfläche wird die Vergrößerung des Bereichs, in dem Haftung vorliegt, durch die stützende Wirkung der Streumittelpartikel visualisiert, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Vernetzung der diskreten Elemente quer zur Rollrichtung wurde in dieser Abbildung durch die Verwendung eines zweidimensionalen Gaussfilters angenähert. In dieser Abbildung wird ersichtlich, dass sowohl Partikel, die sich in der ohne Sand bestehenden Haftzone befinden als auch Partikel, die in der Gleitzone zu weit von der Haftzone entfernt sind, nicht im Sinne einer Vergrößerung der Adhäsionsfläche wirksam werden.

Auf die vorgeschlagene Art lässt sich somit die Wirksamkeit der Streumittelmenge abhängig von der Schlupfsituation simulieren sowie seine optimale Einbringung ermitteln. Es lässt sich damit sowohl die Wirksamkeit alternativer reibwertverbessernder Mittel untersuchen als auch die für den vorliegenden Schlupffall optimale Menge an Streumittel bestimmen. Die Vergrößerung der Adhäsionsfläche ist für verschiedene Ausgangsreibwerte in Abbildung 3 dargestellt. Hier lässt sich eine hohe Wirksamkeit des Streumittels für die Fälle $\mu = 0,1$ bzw. $\mu = 0,15$ erkennen,

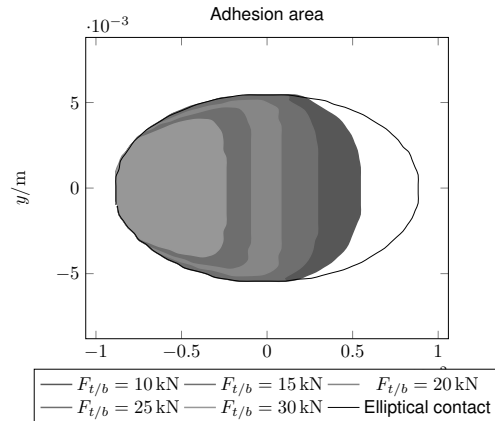


Abbildung 1: Adhäsionsfläche für verschiedene Reibwerte

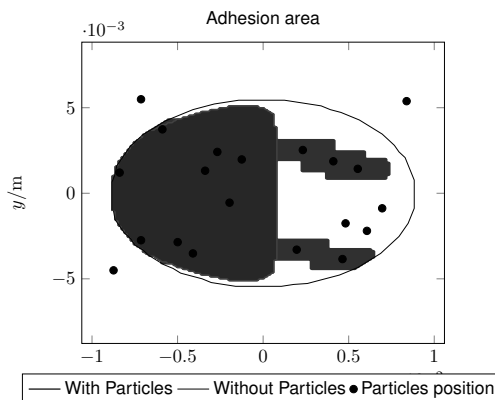


Abbildung 2: Vergrößerung der Adhäsionsfläche mit und ohne Streumittel

während die Vergrößerung der Adhäsionsfläche in den anderen Fällen relativ gering bleibt.

4 Ausblick

Die hier vorliegenden qualitativen Studien zur Veränderung der Adhäsionsfläche unter Streumittelsinsatz sind die Vorstufe zur Entwicklung einer umfangreichen Simulationssoftware für Streumittelsinsatz. Das entwickelte Modell soll zukünftig um eine exaktere Beschreibung der mechanischen Vernetzung sowie der Veränderung des Rad-Schiene-Kontaktes durch das Streumittel erweitert werden. Darüber hinaus soll die derzeitige Einschränkung auf elliptische Kontaktflächen sowie Schlupf ausschließlich in x -Richtung geprüft werden. Das Tuning der Parameter anhand von Prüfstandsdaten sowie der Vergleich mit für das Modell unbekanntem Daten bildet einen ersten Validierungsschritt. Dabei soll die effiziente Umsetzung möglichst beibehalten werden, um im Rahmen weiterer Entwicklungen einen Einsatz im Fahrzeug zu ermöglichen.

Literatur

- [1] W. Carter. *On the action of a locomotive driving wheel.*, pages 151–157. Proc. R. Soc. Lond., 1926.
- [2] S. Damme, U. Nackenhorst, and B. Zastrau. On the numerical analysis of the wheel - rail system in rolling contact. *Stuttgart, Germany*, pages 13–15, 2002.
- [3] D.J. Haines and E. Ollerton. Contact stress distributions on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 177:95–104, 1963.
- [4] K.L. Johnson. The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane. *Journal of Applied Mechanics*, 25:339–346, 1958.
- [5] K.L. Johnson. *Contact mechanics*. Cambridge University Press, 1985.
- [6] J. Kalker. *On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction*. PhD thesis, TU Delft, 1967.
- [7] J. Kalker. *Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [8] J. Kalker. Wheel-rail rolling contact. *Wear*, 144(1-2):243–261, 1991.
- [9] C. Tomberger, P. Dietmaier, W. Sextro, and K. Six. Friction in wheel-rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. *Wear*, 271(1-2):2–12, 2011.

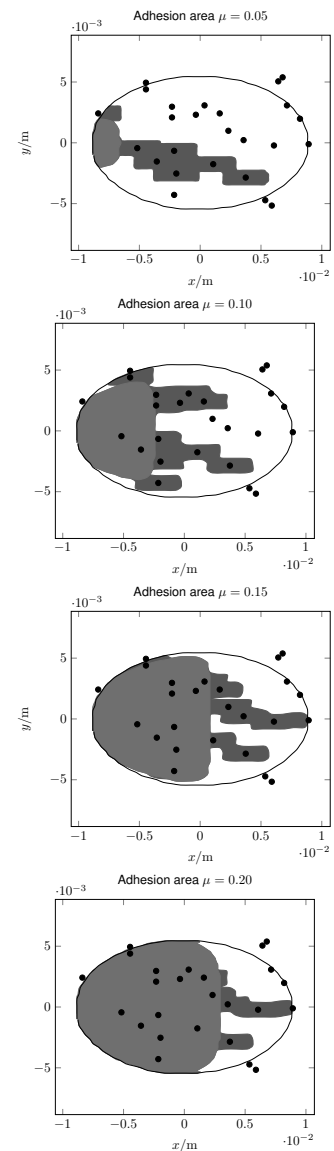


Abbildung 3: Vergrößerung der Adhäsionsfläche durch Streumittel für verschiedene Schlupffälle