
1 Einleitung

Steigende Nutzungszahlen im Personenindividualverkehr und eine damit einhergehende Zunahme der Verkehrsichte führen zwangsläufig zu Staus und insbesondere innerstädtisch zu einem Mangel an Stellplätzen für Personenkraftwagen (Pkw). Diese Herausforderungen sollen durch die angestrebte Verkehrswende bewältigt werden. Ein Ziel dieser Verkehrswende ist die Verringerung des Individualverkehrs bei gleichzeitigem Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) [1]. Die Reduzierung des Individualverkehrs ist zugleich dem Erreichen der aktuellen Klimaschutzziele dienlich. Dies wird bei einer Betrachtung des äquivalenten CO₂-Ausstoßes von Personenkraftwagen (1 g CO₂ pro Personenkilometer) im Vergleich zur Eisenbahn (0,02 g CO₂ pro Personenkilometer) und zu Straßenbahnen (0,04 g CO₂ pro Personenkilometer) deutlich. [2] Eine Maßnahme der Verkehrswende ist, mehr Verkehr auf die Schiene zu verlagern. Dafür soll die bestehende Taktung erhöht werden, wodurch Schienen und Räder noch stärker belastet werden und noch höhere Lastzyklenzahlen ertragen müssen als heute schon.

Im Kontakt zwischen Rad und Schiene wirken lokal Belastungen von über 1.000 MPa [3, S. 1], die damit viel höher als z. B. bei Lastkraftwagen (Lkw) auf der Straße mit ca. 1,14 MPa sind [4]. Grund ist die unterschiedlich große Kontaktfläche von ca. 140 mm² [5] im Schienenverkehr und ca. 60.000 mm² im Straßenverkehr [4]. Bei der Beurteilung der Belastungen der Kontaktfläche im Rad-Schiene-Kontakt ist zu berücksichtigen, dass neben den Tragkräften auch die Antriebs-, Brems- und Führungskräfte übertragen werden [6, S.16]. Entsprechende Kräfte werden auch im Kontakt zwischen Straße und Rad übertragen [7, S. 51]. Die Fahrwiderstände sind hingegen auf der Schiene deutlich kleiner als beim Lkw. Beispielsweise liegt der Radwiderstandsbeiwert mit 0,0015 im Rad-Schiene-Kontakt deutlich unter den im Rad-Straßen-Kontakt mit ca. 0,01 [6, S. 49].

Form, Größe und Lage der Kontaktfläche haben Auswirkungen auf die Wälzreibung [8, S. 16] [9, S. 100] und somit auch auf den Verschleiß [5, 10]. Die Kontaktfläche beeinflusst zudem auch die Polygonisierung der Räder [11] [12, S. 47]. Entsprechend besteht ein Interesse an der Bestimmung der Kontaktflächengröße und -form, welche analytisch, experimentell oder numerisch erfolgen kann. Kontaktflächen, welche numerisch mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Randelementmethode (REM) bestimmt werden, bedürfen der statistischen Validierung der Ergebnisse durch Experimente. Zur experimentellen Bestimmung der Kontaktflächen werden bisher Druckmessfolien, Kohlepapier in Kombination mit herkömmlichem Papier¹ sowie Ultraschall verwendet. [13] Durch die eingebrachten Zwischenschichten liegt jedoch eine veränderte Kontakt situation vor, die in den vergleichenden Simulationen zu

¹ Kohlepapier in Kombination mit herkömmlichem Papier wird im weiteren Verlauf zusammengefasst als Kohlepapier bezeichnet.

berücksichtigen ist. Die Erarbeitung der notwendigen numerische Berücksichtigung der Zwischenschichten bildet den Ausgangspunkt für diese Arbeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Forschungshypothese untersucht, wonach mittels neu zu entwickelnder Materialmodelle für Druckmessfolien und Kohlepapier die Genauigkeit und Simulationsstabilität von simulierten Rad-Schiene-Kontaktsituationen ermöglicht und erhöht wird. Angestrebt wird dabei eine Verbesserung der Genauigkeit der Simulationsmodelle durch entsprechend zu entwickelnde Materialmodelle der Zwischenlagen. Diese sollen numerisch stabil sein, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Oberflächenrauheit der Kontaktkörper, sodass die Ergebnisqualität im Vergleich zur nicht Berücksichtigung verbessert wird. Es soll beurteilt werden, ob Kohlepapier ebenso effektiv bei der Bestimmung der Kontaktflächengröße und -form eingesetzt werden kann wie Druckmessfolien, insbesondere da Kohlepapier ein kostengünstigeres Medium zur Kontaktbestimmung im Vergleich zu Druckmessfolien ist. Die experimentellen Ergebnisse verschiedener Rad-Schiene-Kontakt-Situationen sollen simulativ nachgebildet werden, sodass bei entsprechender Übereinstimmung der Ergebnisse die entwickelten Materialmodelle als validiert angesehen werden können. Dafür werden Materialmodelle für drei verschiedene einlagige Druckmessfolien, welche bereits in zahlreichen Experimenten verwendet wurden, entwickelt. Zusätzlich wird ein Materialmodell für Kohlepapier erarbeitet, welches ebenso als Mittel zur Bestimmung von Kontakt Situationen genutzt wird. Bei der Auswertung der Untersuchungen und der Beurteilung der Materialparameterbestimmung wird die Frage beantwortet, wie groß oder klein die Differenz zwischen Experiment und Simulation ist, das heißt, welche ist besonders klein oder kleiner als bei vorherigen Entwicklungen.

Die veränderte Kontakt situation wird durch die Implementierung der Zwischenschichten in der Simulation berücksichtigt. Für die Bestimmung der Materialparameter der Druckmessfolien werden experimentelle Ergebnisse des Kontaktes zweier Hertz'scher Körper von Lekue [14] herangezogen. Mit diesen am nahezu glatten Hertz'schen Kontakt ermittelten Kontaktflächengrößen ist es möglich, numerische Materialmodelle für die Druckmessfolien zu entwickeln und am Rad-Schiene-Kontakt zu validieren. Zur Modellierung der Papier-Kohlepapier-Zwischenschichten liegen keine anwendbaren Materialmodelle vor. Deshalb wird ein bestehendes unvollständiges Materialmodell für einen anderen Papiertyp vereinfacht und anschließend evaluiert. Die experimentellen Untersuchungen, welche der Validierung der entwickelten Materialmodelle dienen, erfolgen am rauen Rad-Schiene-Kontakt. Das Vorliegen von rauen Kontaktflächen in den Experimenten führt zur Notwendigkeit diese in den Simulationen berücksichtigen zu müssen. Die Experimente selbst werden auf einem Hydropulsprüfstand durchgeführt, sodass die wirkenden Belastungen und Positionen definiert variiert werden können.

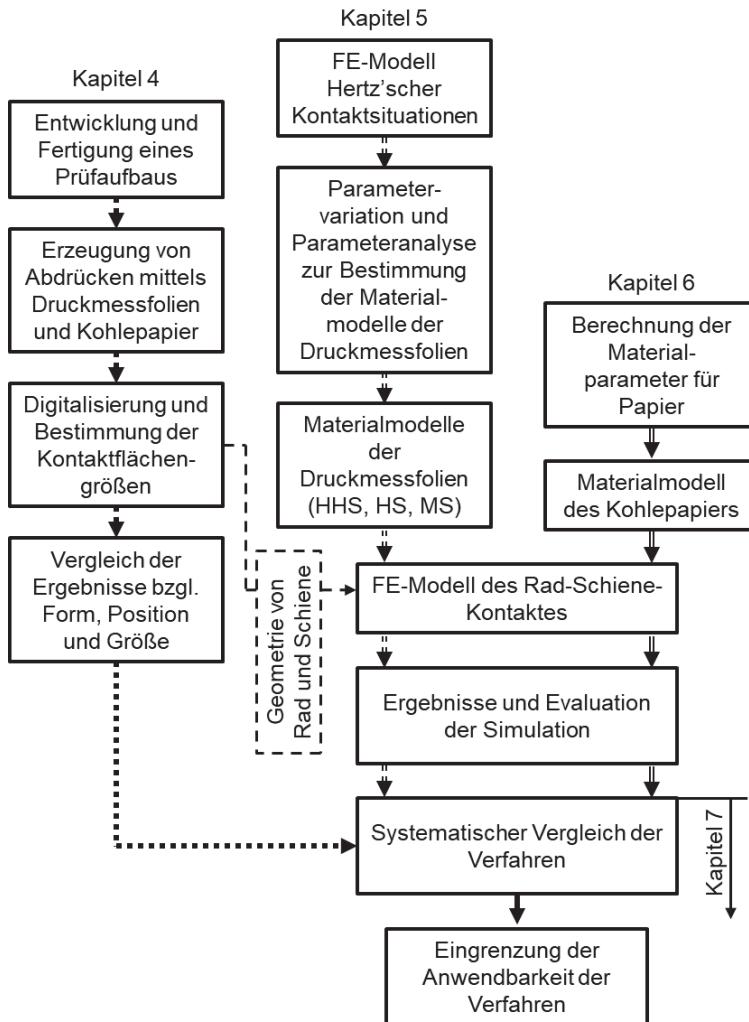


Abb. 1.1: Vorgehensweise zur Entwicklung und Validierung von Materialmodellen für Druckmessfolien sowie Kohlepapier

Nach der Einleitung wird im zweiten Kapitel eine Einführung in den Stand der Technik vorgenommen, woraus sich die Motivation und Zielsetzung in Kapitel 3 ableiten. Der darauffolgende Ablauf dieser Arbeit ist in [Abb. 1.1](#) schematisch dargestellt. Im Kapitel 4 wird zuerst der Prüfaufbau für die Experimente mit den entsprechenden Parametern vorgestellt. Die experimentelle Durchführung und Auswertung wird beschrieben. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen der Experimente und deren Evaluation. Im Kapitel 5 werden zunächst die Materialmodelle für die Simulationen der Druckmess-

folien am glatten Hertz'schen Kontakt entwickelt und darauf aufbauend auf den rauen Rad-Schiene-Kontakt übertragen. Das Materialmodell für das Kohlepapier wird in Kapitel 6 bestimmt, sodass darauffolgend ebenfalls der raue Rad-Schiene-Kontakt nachgebildet wird.

Aus dem Ablaufplan in Abb. 1.1 geht hervor, dass die Kapitel 4 bis 6 inhaltlich zu Beginn parallel verlaufen, wobei die Simulationen in Kapitel 5 und 6 das nahezu gleiche FE-Modell verwenden. Für dieses wird die in den Experimenten (Kapitel 4) ermittelte Geometrie berücksichtigt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel 4 bis 6 erfolgt in Kapitel 7 ein systematischer Vergleich der Verfahren mit einer anschließenden Beurteilung ihrer Anwendbarkeit. Die Erkenntnisse dieser Arbeit werden in einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8 resümiert.