

Mechatronische Spurführung zur Verschleißreduktion bei Straßenbahnen

Motivation

Die Trassierung von Strecken im innerstädtischen Schienenpersonenverkehr weist häufig enge Gleisbögen auf, um sich der Topografie in der Stadt anpassen zu können. Fahrgäste und Passanten werden durch die unangenehmen Geräusche von Straßenbahnen gestört, die sich in der Innenstadt um enge Biegungen oder an den Endhaltestellen durch die Wendeschleifen zwängen. Neben der Geräuschbelastung tritt dabei auch erhöhter Verschleiß auf, da sich in den engen Bögen große Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene und Spurkranz anlaufen einstellen. Aufgrund der hohen Abnutzung müssen die Räder regelmäßig reprofiliert werden. Auch die Schienenstücke in den Bögen müssen regelmäßig nachgearbeitet oder ausgetauscht werden. Insgesamt sind die erforderlichen Wartungsarbeiten ein wesentlicher Kostenfaktor für den Verkehrsbetrieb. Es lohnt sich demnach aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus, besonders den Verschleiß in engen Bögen zu reduzieren.

Vor diesem Hintergrund befasst sich der Lehrstuhl für Bahnsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit den beiden folgenden Forschungsthemen:

- Mechatronische Spurführung zur Reduzierung des Verschleißes zwischen Rad und Schiene beim Bogenlauf
- Bewertung des Verschleißes in engen Bögen

Mechatronische Spurführung

Aktive Spurführung wird seit einiger Zeit im Vollbahnbereich untersucht und ist dort auch schon umfangreich getes-

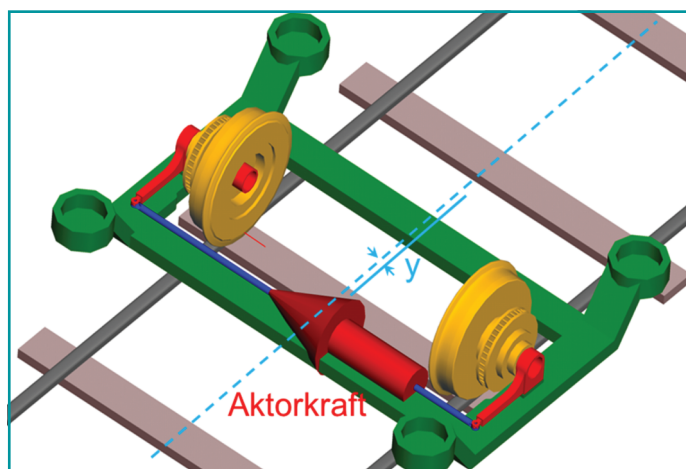


Abb. 1: Aktiv gelenktes Radpaar

tet worden [1]. Die Betriebsumgebung von Straßenbahnen ist durch viele Bögen gekennzeichnet, die um eine Größenordnung enger sind als bei Vollbahnen und keine Überhöhung aufweisen. Deswegen wird hier der Ansatz verfolgt, ein aktiv gelenktes Radpaar mit einem Aktor so zu regeln, dass die Querverschiebung y möglichst ganz verschwindet und der Spurkranz anlauf vermieden werden kann (Abb. 1).

Abb. 2 stellt die Vorgehensweise dar. Zunächst werden die Abhängigkeiten zwischen den Bewegungen des aktiv gelenkten Radpaares und den charakteristischen Kennwerten für die Kinematik im Rad-Schiene-Kontakt untersucht. Im nächsten Schritt wird ein vereinfachtes

mathematisches Modell des aktiv gelenkten Radpaares aufgebaut, das sich besonders für die Reglerdimensionierung eignet. Im Vergleich zu einem MKS-Modell in SIMPACK ist es weniger kompliziert, seine Modellgüte wird aber durch Validierung mit einem weitgehend vollständigen SIMPACK-Modell gewährleistet. Im nächsten Schritt wird mit Hilfe der μ -Synthese ein Regler konzipiert. Mit diesem modernen Entwurfsverfahren lässt sich ein Regler auslegen, der sich als besonders robust gegen Störungen und Modellunsicherheiten erweist. Die vollständige Anordnung bestehend aus aktiv gelenktem Radpaar und ausgelegtem Regler wird in einer Co-Simulation mit Hilfe des weitgehend vollständigen SIMPACK-Modells getestet.

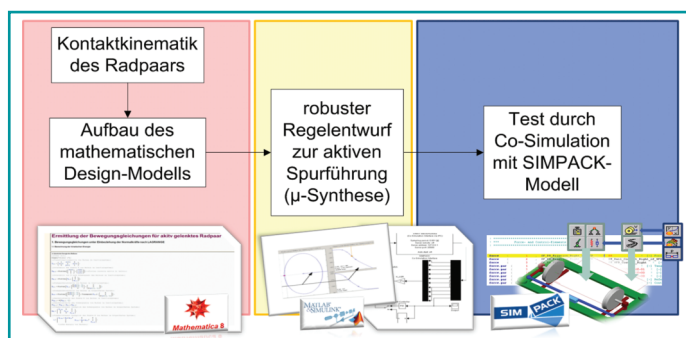


Abb. 2: Methodische Vorgehensweise zur Untersuchung des Radpaar-Verhaltens

Um die Wirksamkeit des aktiv gelenkten Radpaares abzuschätzen, wurden in der oben beschriebenen Simulationsumgebung verschiedene Fahrwerksanordnungen getestet und ihr Verhalten miteinander verglichen. Ein grober Indikator für den auftretenden Verschleiß ist der Verschleißindex. Er ist definiert als die Summe der Produkte aus Schlupfkraften und Schlüpfen und kann als Reibarbeit pro gefahrenen Meter interpretiert werden. Der Verschleißindex wurde für die folgenden vier Anordnungen ermittelt: für einen Starrsats, einen Losradsatz, ein ungeregeltes Einzelrad-Einzelradfahrwerk und ein aktiv gelenktes Radpaar (Abb. 3).

Erwartungsgemäß weist der Starrsats den größten Verschleiß beim Kurvenlauf auf. Wesentlich vorteilhafter verhalten sich der Losradsatz und das ungeregelte Einzelrad-Einzelradfahrwerk. Den geringsten Verschleißindex weist aber das aktiv gelenkte Radpaar auf. Der Verschleiß beim Geradeauslauf ist naturgemäß niedriger und spielt in der Gesamtbetrachtung eine geringere Rolle. Aber auch hier kann das aktiv gelenkte Radpaar den geringsten Verschleißindex erzielen.

Diese ersten Ergebnisse zeigen schon deutlich, dass das aktiv gelenkte Radpaar ein großes Potenzial zur Reduzierung des Verschleißes beim Bogenlauf bietet.

Bewertung des Verschleißes beim Bogenlauf

Um die Auswirkungen von alternativen Laufwerksanordnungen auf das Verschleißverhalten korrekt beurteilen zu

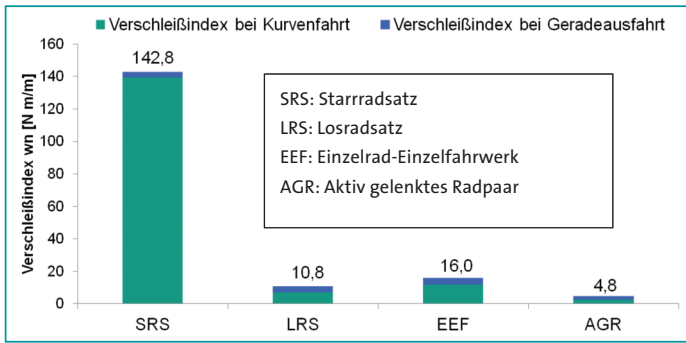


Abb. 3: Verschleißindex für verschiedene Radsatzanordnungen

können, reicht die Angabe des globalen Verschleißindexes streng genommen nicht aus. Stattdessen ist es sinnvoll, den lokalen Verschleiß entlang der Profilkontur zu ermitteln.

Mit der Entwicklung der Fahrtdynamik-Simulation kamen in den 1990er Jahren erste Ansätze auf, den Verschleiß zu berechnen. Die heute etablierten Berechnungsverfahren laufen dabei folgendermaßen ab (Abb. 4):

1. Vorgabe der Betriebssituation
2. Simulation der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion für gegebene Betriebssituationen mittels Mehr-Körper-Simulation (MKS)
3. Simulation zur lokalen Kontaktanalyse mittels der Programme FASTSIM oder CONTACT
4. Anwendung eines empirischen Verschleißmodells

Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen und Studien zu Beispielen aus dem Vollbahnbereich [2], wobei die betrachteten Bögen Radien von mindestens 300 Meter aufweisen, die im Vollbahnbereich bereits als sehr enge Kurven angesehen werden. Beim Betrieb von Straßenbahnen sind die Radien mit 25 bis 100 Metern noch deutlich kleiner, sodass es zum Spurkranzlauf und Fahrkantenkontakt kommt. Beim Fahrkantenkontakt ist die bei FASTSIM und CONTACT gemachte Annahme, dass das Kontaktgebiet sehr viel kleiner als die Abmessungen der Kontaktkörperkrümmung ist, nicht mehr gül-

tig. Daher liefern FASTSIM und CONTACT für solche Betriebs-situationen keine zuverlässigen Ergebnisse. Es besteht also der Bedarf nach einer Berechnungsmethodik, mit der der Verschleiß auch bei der Kurvenfahrt von Straßenbahnen zuverlässig beurteilt werden kann.

Bei der am Lehrstuhl für Bahn-systemtechnik entwickelten Methodik wird anstelle von FASTSIM und CONTACT die Finite Elemente Methode (FEM) zur lokalen Kontaktanalyse verwendet. Bei ausreichend feiner Diskretisierung gibt es keine geometrischen Einschränkungen, sodass auch der Fahrkantenkontakt zuverlässig analysiert werden kann. Mit Hilfe der FEM werden die lokalen

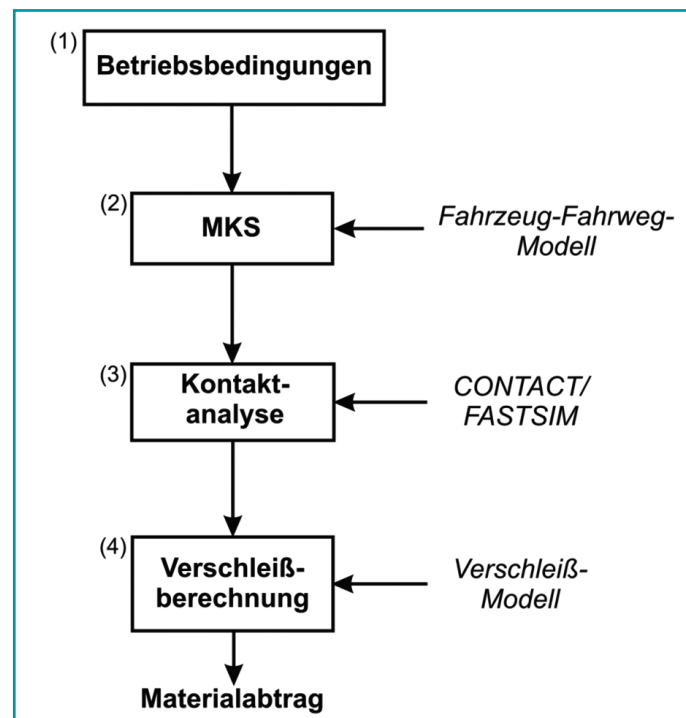


Abb. 4: Methodik zur Verschleißberechnung im Vollbahnbereich

Schubspannungen und die lokalen Gleitgeschwindigkeiten ermittelt, aus denen die Reibleistungsdichte berechnet werden kann. Diesem Ansatz liegt die energetische Betrachtungsweise zugrunde, dass zur Ablösung eines Verschleißpartikels aus dem Materialverbund Energie aufgebracht werden muss. Der zu erwartende lokale Verschleiß ist demnach proportional zur eingebrachten lokalen Reibleistung.

Das in ABAQUS aufgebaute FE-Modell zur Analyse des Rad-Schiene-Kontaktes konnte für den Normal- und Tangentialkontakt validiert werden [3]. Zurzeit werden Simulationsstudien zum Verschleißverhalten bei Straßenbahnen durchgeführt.

Zusammenfassung

Bei den im städtischen Schienenpersonenverkehr üblichen engen Bögen tritt bei konventionellen Fahrwerken großer Verschleiß an Rad und Schiene auf. Die erforderlichen Wartungsarbeiten verursachen daher nennenswerte Kosten für den Verkehrsbetrieb. Am Lehrstuhl für Bahnsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technolo-

gie (KIT) wird ein Fahrwerkskonzept untersucht, mit dem der Verschleiß signifikant reduziert werden kann. Beim aktiv gelenkten Radpaar wird in allen Betriebssituationen die Querverschiebung auf null geregelt und so ein günstiges Verschleißverhalten erreicht.

Um verschiedene Laufwerkskonzepte hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens vergleichen zu können, wurde eine neue Methodik zur Verschleißbewertung entwickelt. Dies war notwendig, weil die etablierten Verfahren für die Kontaktverhältnisse in engen Bögen keine Gültigkeit haben.

Die bisherigen Simulationsergebnisse zeigen, dass hier ein vielversprechender Weg eingeschlagen wurde. Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen werden die Absicherung der vorgeschlagenen Konzepte vervollständigen.

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
 Lehrstuhl für
 Bahnsystemtechnik
 Institut für
 Fahrzeugsystemtechnik
 Karlsruher Institut für
 Technologie (KIT)
www.bahnsystemtechnik.de

Quellenverzeichnis:

- [1] HIMMELSTEIN, Günther, SCHNEIDER, Richard: Gleis-schonung durch aktive Radsatzsteuerung. *EI Der Eisenbahningenieur* 60/2009, 50–53.
- [2] ENBLON, Roger: Deterioration mechanisms in the wheel-rail interface with focus on wear prediction: a literature review, *Vehicle System Dynamics* 47 (2009), 661-700.
- [3] HECK, Jennifer, GRATZFELD, Peter: Ein Beitrag zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen, *Bahntechnik Aktuell* Band 42/2012, 9-20.