

Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen

KURZFASSUNG

der vom Fachbereich 10 Maschinentechnik
der Universität Paderborn

genehmigten
DISSERTATION

von
Stefan Goldschmidt
aus Höxter

Tag des Kolloquiums: 13.01.2003
Referent: Prof. Dr. Jörg Wallaschek
Koreferent: Prof. Dr. Michael Dellnitz

Motivation und Ziele

Die Analyse dynamischer Systeme ist ein wesentlicher Bestandteil im Rahmen der Produktentwicklung. Erschwert wird die Analyse häufig durch Nichtlinearitäten, die das Verhalten des Systems prägen. Im Gegensatz zu den linearen dynamischen Systemen mangelt es im Maschinenbau bei den nichtlinearen dynamischen Systemen an leistungsfähigen und allgemeinen Methoden, mit denen umfassende Aussagen über das Verhalten möglich sind. Wesentliche Nachteile der klassischen Methoden sind in der Regel *a)* die Voraussetzung von a priori Wissen über das Verhalten, *b)* eine Approximation des Verhaltens, die in ihrem Fehler nicht steuerbar ist, *c)* lokal statt global gültige Aussagen im Zustandsraum und *d)* fehlende statistische Informationen wie Aufenthalts- und Absorptionswahrscheinlichkeiten.

Die in den letzten Jahren entwickelten mengenorientierten numerischen Methoden stellen eine Alternative zur Analyse dynamischer Systeme dar, die die aufgeführten Nachteile nicht aufweist. Da die Methoden bisher nur auf akademische Beispiele angewandt wurden, war im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchen, wie die mengenorientierten numerischen Methoden die Analyse dynamischer Systeme im Maschinenbau unterstützen können. Im Mittelpunkt standen Systeme mit einem Verhalten, das durch mehrere Lösungen und/oder stochastische Störungen charakterisiert ist.

Mengenorientierte numerische Methoden

Ein wesentlicher Bestandteil der mengenorientierten numerischen Methoden ist die Einschränkung und Diskretisierung des Zustandsraumes. Dabei bedeutet Einschränkung, den Zustandsraum auf eine sinnvolle und interessante Teilmenge zu reduzieren, und Diskretisierung, die sinnvolle und interessante Teilmenge in kleine Teilmengen, die sogenannten Boxen zu unterteilen. Das Verhalten des Systems im eingeschränkten und diskretisierten Zustandsraum ermittelt man aus der Abbildung von Testpunkten auf Bildpunkte durch Integration der Zustandsgleichung. Im Gegensatz zu den üblichen Integrationen über lange Zeiträume für wenige Anfangsbedingungen führt man bei den mengenorientierten numerischen Methoden Integrationen über kurze Zeiträume für viele Anfangsbedingungen aus. Anzahl und Integrationszeit der Abbildungen bestimmen maßgeblich Qualität und Effizienz der Analyse.

Aufgrund der Kürze der Integrationszeiten kann man aus den Abbildungen nicht unmittelbar die gesuchten Informationen ablesen. Es sind zusätzliche Algorithmen notwendig, deren Basis die sogenannte Übergangsmatrix ist. Die Elemente der Übergangsmatrix entsprechen den Wahrscheinlichkeiten, mit denen das System in einer bestimmten Zeit

zwischen den Boxen wechselt. Diese Wahrscheinlichkeiten resultieren aus den Abbildungen. Die Links- und Rechtseigenvektoren zu den Eigenwerten eins der Übergangsmatrix geben Auskunft über die Gestalt der Attraktoren und Einzugsgebiete des Systems und über die stationären Wahrscheinlichkeiten, mit denen sich das System in den Boxen eines Attraktors aufhält (Aufenthaltswahrscheinlichkeiten) und mit denen das System in die Boxen eines Attraktors absorbiert wird (Absorptionswahrscheinlichkeiten).

Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen

Die nichtlineare Charakteristik des Rad/Schiene-Systems beeinflusst maßgeblich die Führung des Fahrzeuges. Aufgrund des Wirkprinzips des Rad/Schiene-Systems zeigt das Fahrzeug zwei grundlegende Bewegungen. Es handelt sich um die Spurführung und den Wellenlauf.

Im Rahmen der Analyse war zu beantworten, unter welchen Bedingungen die Bewegungen auftreten, welche Stabilität die Bewegungen aufweisen und welchen Einfluss Gleislagestörungen auf die Bewegungen haben. Die Basis der Analyse bildete ein Modell für ein Schienenfahrzeug bestehend aus Fahrzeugaufbau, Fahrwerk, Federung und Rad/Schiene-Kontakt. Das Modell wurde so gewählt, dass einerseits der Aufwand zur Analyse gering und andererseits die nichtlineare Charakteristik des Rad/Schiene-Systems berücksichtigt war. Insgesamt wurden drei Varianten des Schienenfahrzeuges untersucht.

Die erste Variante entspricht einem einachsigen Schienenfahrzeug mit Radsatz. Das Verhalten des Fahrzeuges ohne die Betrachtung von Gleislagestörungen zeigt eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Interessant ist der Bereich von 89 bis 94 m/s, in dem zwei Attraktoren in Form einer stabilen stationären Lösung und einer stabilen periodischen Lösung vorliegen. Für diesen Bereich konnte gezeigt werden, mit welchen Wahrscheinlichkeiten sich das Fahrzeug in den stabilen Lösungen aufhält und mit welchen Wahrscheinlichkeiten das Fahrzeug in die stabilen Lösungen absorbiert wird. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen exemplarisch für eine Geschwindigkeit von 90 m/s die berechneten Aufenthalts- und Absorptionswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Querverschiebung und Gierwinkel des Radsatzes. Dabei stellen die oberen Bilder die Wahrscheinlichkeiten für die stabile stationäre Lösung und die unteren Bilder die Wahrscheinlichkeiten für die stabile periodische Lösung dar.

Aus den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten ist ersichtlich, dass sich das Fahrzeug bei der stabilen stationären Lösung ohne und bei der stabilen periodischen Lösung mit Querversatz und Schräglauf des Radsatzes bewegen kann. Die Absorptionswahrscheinlichkeiten geben Aufschluss über die Zustände, die auf die stabile stationäre Lösung oder

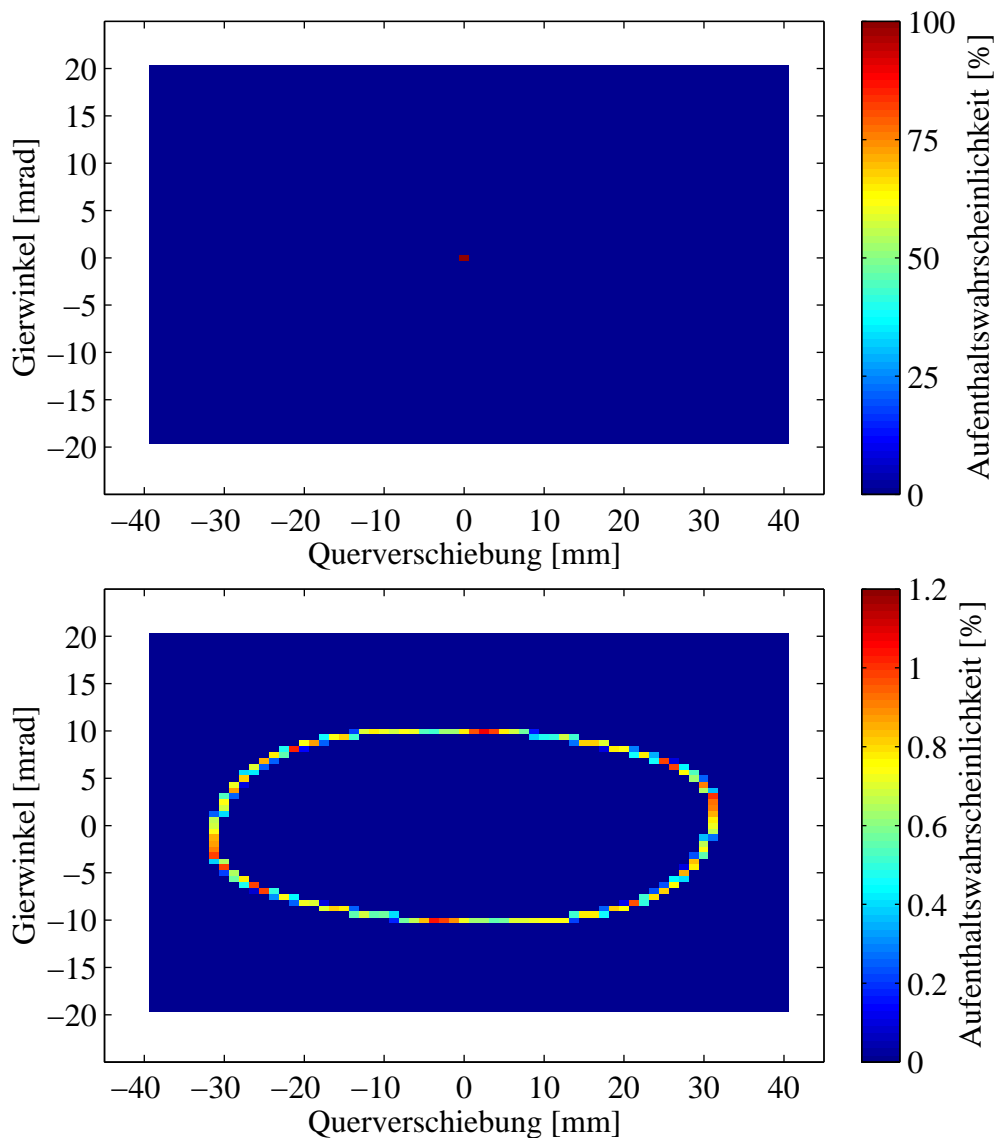


Abbildung 1: Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des einachsigen Schienenfahrzeuges mit Radsatz ohne Störungen der Gleislage bei einer Geschwindigkeit von 90 m/s, oben die stabile stationäre Lösung und unten die stabile periodische Lösung

die stabile periodische Lösung führen. Bedeutend ist, dass es Zustände mit großer Querverschiebung oder großem Gierwinkel gibt, die auf die stabile stationäre Lösung und nicht auf die stabile periodische Lösung führen. In erster Näherung führen Zustände, bei denen der Radsatz querverschoben und zur Gleisaußenseite orientiert ist (erster und dritter Quadrant), eher auf die stabile stationäre Lösung und Zustände, bei denen der Radsatz querverschoben und zur Gleismitte orientiert ist (zweiter und vierter Qua-

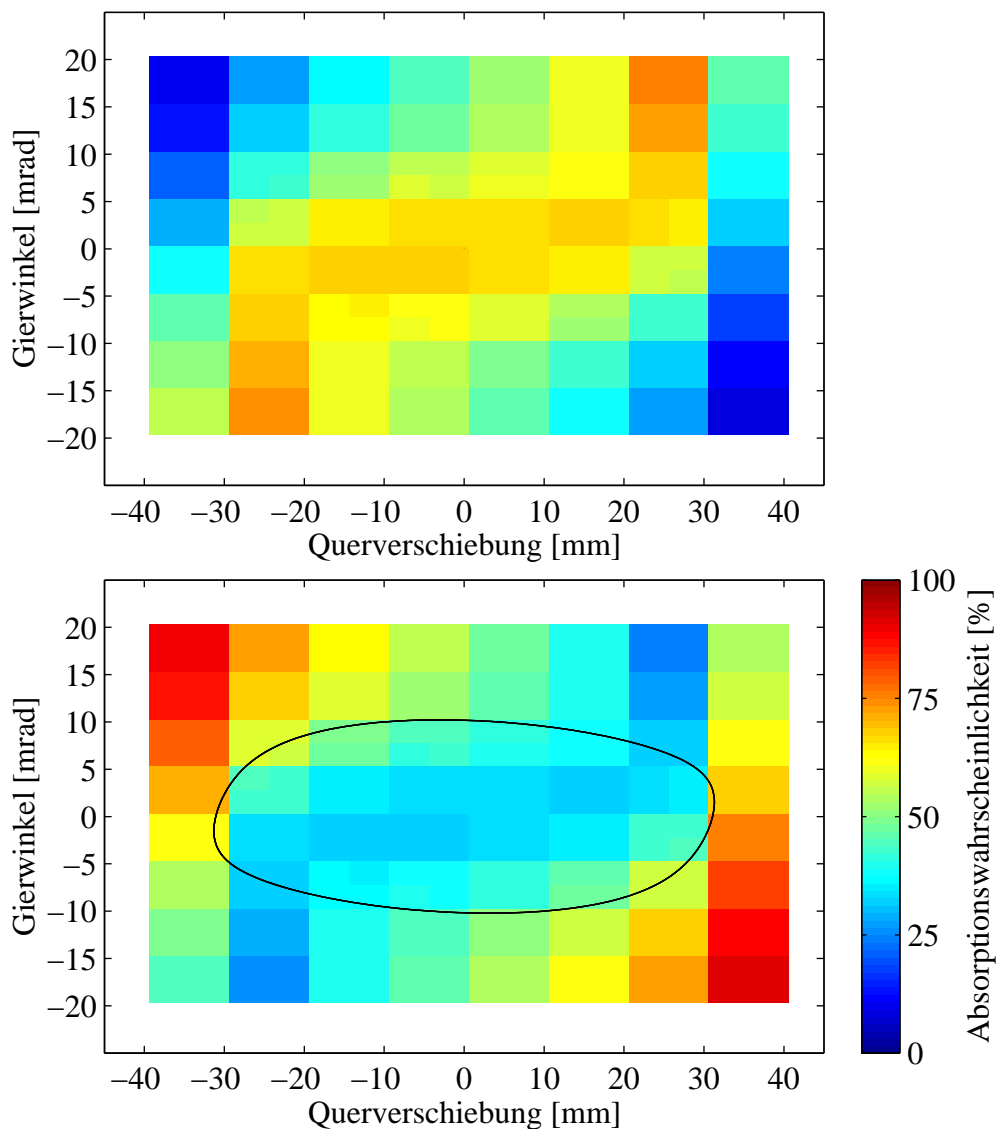


Abbildung 2: Absorptionswahrscheinlichkeiten des einachsigen Schienenfahrzeuges mit Radsatz ohne Störungen der Gleislage bei einer Geschwindigkeit von 90 m/s, oben die stabile stationäre Lösung und unten die stabile periodische Lösung

drant), eher auf die stabile periodische Lösung. Bei der Analyse des Fahrzeuges mit Betrachtung der Gleislagestörungen stellte sich heraus, dass das Fahrzeug nur einen Attraktor aufweist. Die Gleislagestörungen bewirken in diesem Fall, dass die Attraktoren des ungestörten Systems zu einem Attraktor des gestörten Systems verschmelzen.

Bei der zweiten Variante des modellierten Schienenfahrzeuges handelt es sich um ein einachsiges Schienenfahrzeug mit Losradsatz. Für dieses Fahrzeug erfolgte eine Para-

meterstudie, bei der Steifigkeit und Dämpfung der Federung mit Hilfe der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten so gewählt wurden, dass Stabilität und Bogenfahrt des Fahrzeuges unter Einfluss von Gleislagestörungen den Anforderungen genügen.

Die dritte Variante des modellierten Schienenfahrzeuges umfasst ein zweiachsiges Schienenfahrzeug mit Radsatz. Für das Fahrzeug ohne Einbeziehung von Gleislagestörungen konnte auf der Grundlage der Absorptionswahrscheinlichkeiten gezeigt werden, dass von den zwei Attraktoren in Form stabiler periodischer Lösungen im Bereich von 98 bis 118 m/s ein Attraktor das Verhalten dominiert. Aufgrund des hochdimensionalen Zustandsraumes und des damit verbundenen Berechnungsaufwandes ist eine Analyse des Fahrzeuges unter Berücksichtigung von Gleislagestörungen mit den mengenorientierten numerischen Methoden, wie sie dieser Arbeit zugrunde liegen, nicht sinnvoll.

Neben den mengenorientierten numerischen Methoden kamen im Rahmen dieser Arbeit auch Methoden wie die Modalanalyse, die Quasilinearisierung und die Verzweigungsanalyse zum Einsatz. Dabei zeigte sich, dass Modalanalyse und Verzweigungsanalyse eine gute Ergänzung zu den mengenorientierten numerischen Methoden sind. Sie bieten den Vorteil, dass sie effizient Informationen über Typ, Anzahl und Stabilität der Lösungen liefern. Auf der Grundlage dieser Daten können dann mit den mengenorientierten numerischen Methoden die interessierenden Fälle hinsichtlich der Gestalt der Attraktoren und Einzugsgebiete und der Aufenthalts- und Absorptionswahrscheinlichkeiten zielgerichtet und detailliert analysiert werden. Im Gegensatz dazu liefert die Quasilinearisierung nur eine Approximation des dynamischen Verhaltens, die in ihrem Fehler nicht steuerbar ist.

Fazit

Die mengenorientierten numerischen Methoden bieten das Potential einer leistungsfähigen und allgemeinen Methode zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme. Mit ihr können sehr effizient Informationen über die Gestalt der Attraktoren und Einzugsgebiete und der Aufenthalts- und Absorptionswahrscheinlichkeiten bestimmt werden.

Es wurden Informationen über die Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen gewonnen, die mit klassischen Ansätzen in dieser Form nicht zugänglich sind. Das betrifft insbesondere die Aufenthalts- und Absorptionswahrscheinlichkeiten sowie die Behandlung des dynamischen Verhaltens unter Einfluss von Gleislagestörungen.

