FORTSCHRITT-BERICHTE VDI

M. Sc. Jingjun Zhang, Berlin

Dynamisches Bogenlaufverhalten mit stochastischen Gleislagefehlern

Modell- und Verfahrensentwicklung unter Verwendur der Methode der statistischen Linearisierung

Reihe **12**: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik

Nr. **304**

HLuHB Darmstadt
13437858

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen VIII

1 Einleitung 1
- 1.1 Problemstellung . . . 1
- 1.2 Stand der Forschung . . . 3
  - 1.2.1 Rad/Schiene-Kontaktgeometrie . . . 3
  - 1.2.2 Rad/Schiene-Rollkontaktmechanik . . . 4
  - 1.2.3 Bogenlauf . . . 4
  - 1.2.4 Störverhalten . . . 6

2 Ziel und Gliederung der Arbeit 9
- 2.1 Zielsetzung . . . 9
- 2.2 Arbeitschritte . . . 9

3 Einzelradsatzmodell im Gleisbogen mit stochastischen Gleislagefehlern 11
- 3.1 Mechanisches Modell und Voraussetzungen . . . 11
  - 3.1.1 Mechanisches Modell . . . 11
  - 3.1.2 Voraussetzungen zum Gleisbogen . . . 11
  - 3.1.3 Voraussetzungen zum Radsatz . . . 12
  - 3.1.4 Voraussetzungen zum Gesamtsystem Radsatz-Gleisbogen . . . 13
- 3.2 Koordinatensysteme . . . 13
- 3.3 Freiheitsgrade zur Beschreibung der Systembewegung . . . 15
  - 3.3.1 Beziehung zwischen Gleislagefehlern und Systembewegungen . . . 15
  - 3.3.2 Unabhängige Freiheitsgrade . . . 17
- 3.4 Kontaktgeometrie . . . 18
  - 3.4.1 Ableitung der Geometrieparameter $\dot{Z}$ und $\dot{\Phi}_x$ . . . 18
  - 3.4.2 Vorverlagerung $x_{l,r}$ . . . 19
- 3.5 Schlupfkräfte . . . 20
  - 3.5.1 Schlüpfe im Gleisbogen mit Gleislagefehlern . . . 22
  - 3.5.2 Schlupfkräfte nach Kalkerscher linearer Theorie . . . 23
  - 3.5.3 Nichtlineare Schlupfkräfte nach Shen, Hedrick und Elkins . . . 23
- 3.6 Nichtlineare, stochastische Bewegungsdifferentialgleichungen . . . 24

4 Statistische Linearisierung 25
- 4.1 Grundlagen der statistischen Linearisierung . . . 25
  - 4.1.1 Eindimensionales Problem . . . 26
  - 4.1.2 Zweidimensionales Problem . . . 27
- 4.2 Statistische Linearisierung der Nichtlinearitäten von Kontaktgeometrieparametern . . . 29
  - 4.2.1 Vereinfachung der Geometriebeziehung . . . 29
  - 4.2.2 Bestimmung der statistisch äquivalenten, linearen Funktionen . . . 30
- 4.3 Statistische Linearisierung der Schlupfkräfte . . . 31
  - 4.3.1 Statistische Linearisierung der Kalkerschen Schlupfkräfte . . . 33

4.3.2 Statistische Linearisierung der nach Shen, Hedrick und Elkins bestimmten Schlupfkräfte . . . 36
4.3.3 Statistisch äquivalente, lineare Schlupfkräfte . . . 37
4.4 Statistisch linearisierte, stochastische Differentialgleichungen . . . 38
4.5 Iteration der statistischen Linearisierung . . . 38
4.5.1 Kopplung zwischen Linearisierung und Systemlösung . . . 38
4.5.2 Schätzwerte . . . 40

5 Lösungsverfahren für das linearisierte System 41
5.1 Mittelwertproblem . . . 41
5.2 Differentialgleichungen der dynamischen Anteile . . . 43
5.3 Spektraldichten . . . 44
5.3.1 Spektraldichten der Systemantworten . . . 44
5.3.2 Spektraldichten der linearisierten Kalkerschen Schlupfkräfte . . . 47
5.4 Varianzen und Kovarianzen . . . 48

6 Ergebnisse der statistischen Linearisierung 51
6.1 Linearisierte Geometrieparameter . . . 51
6.2 Ergebnisse der statistischen Linearisierung der Kalkerschen Schlupfkräfte . 60
6.2.1 Vereinfachte Schlupfkoeffizienten f_{ij} . . . 60
6.2.2 Statistisch linearisierte Funktionen in den Kalkerschen Schlupfkräften 63
6.3 Statistisch linearisierte Schlupfkräfte . . . 65

7 Beispielrechnung zum Bogenlaufverhalten eines gefesselten Radsatzes 69
7.1 Statistische Kennwerte für sehr gutes Gleises . . . 69
7.2 Statistische Kennwerte mit größeren Störpegeln . . . 76
7.3 Ergebnisse mit real gemessenen Profilpaarungen . . . 83
7.4 Frequenzgangfunktionen und Spektraldichten . . . 87
7.4.1 Ergebnisse für kleine Störpegel . . . 87
7.4.2 Ergebnisse für große Störpegel . . . 92

8 Modifizierung des Modells durch Berücksichtigung des Einflußes großen Bohrschlupfes 96
8.1 Erweiterung des Approximationsmodells der nichtlinearen Schlupfkräfte . . 96
8.2 Modifiziertes Verfahren bei statistischer Linearisierung der Schlupfkräfte . 100
8.3 Ergebnisse der Beispielrechnungen . . . 102

9 Vergleich mit dem Zeitschrittintegrationsverfahren 108
9.1 Gleislagefehler . . . 108
9.2 Vergleichsergebnisse . . . 109

10 Erweiterung des entwickelten Verfahrens auf ein ganzes Fahrzeug 112
10.1 Fahrzeugmodell . . . 112
10.1.1 Voraussetzungen . . . 112
10.1.2 Bewegungsdifferentialgleichungen . . . 113
10.2 Statistische Linearisierung für ein ganzes Fahrzeugsystem . . . 115
10.3 Verfahren zur Lösung des statistisch linearisierten Fahrzeugsystems . . . 116

10.3.1 Definition der Zeitverschiebung 117
10.3.2 Spektraldichtematrix der Gleislagefehler 118
10.3.3 Spektraldichten der Systemantworten 119
10.3.4 Berechnung der Kovarianzen 120
10.4 Beispielrechnungen 121
10.4.1 Ergebnisse für ein Drehgestell 121
10.4.2 Ergebnisse für ein ganzes Fahrzeug 123

11 Zusammenfassung und Ausblick 127

A Schlüpfe, Schupfkräfte und Systemdifferentialgleichungen des Einzelradsatzmodells 130
A.1 Schlüpfe 130
A.2 Kalkerscher Schlupfkräfte 131
A.3 Bewegungungsdifferentialgleichungen 132

B Nichtlinearitäten und ihre statistisch linearisierten Funktionen 136
B.1 Geometrische Nichtlinearitäten 136
B.2 Nichtlinearitäten in den Kalkerschen Schlupfkräften 139
B.3 Rekursionsverfahren für statistische Linearisierung der Schlupfkräfte 140

C Berechnung der Kovarianzen unter Verwendung des Residuensatzes 142
C.1 Varianzen und Kovarianzen der Systemantworten 142
C.2 Varianzen und Kovarianzen der Kalkerschen Schlupfkräfte 143
C.3 Kovarianzen von Systemantworten und Gleislagefehlern 145

D Technische Daten 146
D.1 Daten des Radsatzes b.z. des Fahrzeuges 146
D.2 Spektraldichten der Gleislagefehler 146
D.2.1 Spektraldichten aus der Arbeit von Renger 146
D.2.2 Spektraldichten aus RSVD und ORE 148

Literaturverzeichnis 150