

M. Sc. Jingjun Zhang, Berlin

# **Dynamisches Bogenlauf- verhalten mit stochastischen Gleislagefehlern**

**Modell- und Verfahrensentwicklung unter Verwendung  
der Methode der statistischen Linearisierung**

Reihe **12**: Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. **304**

# Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	VIII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Ziel und Gliederung der Arbeit</b>	<b>9</b>
2.1 Zielsetzung . . . . .	9
2.2 Arbeitsschritte . . . . .	9
<b>3 Einzelradsatzmodell im Gleisbogen mit stochastischen Gleislagefehlern</b>	<b>11</b>
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 $x_{t,r}$ . . . . .	19
3.5 Schlupfkkräfte . . . . .	20
3.5.1 Schlüpf im Gleisbogen mit Gleislagefehlern . . . . .	22
3.5.2 Schlupfkkräfte nach Kalkerscher linearer Theorie . . . . .	23
3.5.3 Nichtlineare Schlupfkkräfte nach Shen, Hedrick und Elkins . . . . .	23
3.6 Nichtlineare, stochastische Bewegungsdifferentialgleichungen . . . . .	24
<b>4 Statistische Linearisierung</b>	<b>25</b>
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 Schlupfkkräfte . . . . .	31
4.3.1 Statistische Linearisierung der Kalkerschen Schlupfkkräfte . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Lösungsverfahren für das linearisierte System</b>	<b>41</b>
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
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der statistischen Linearisierung</b>	<b>51</b>
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
<b>7</b>	<b>Beispielrechnung zum Bogenlaufverhalten eines gefesselten Radsatzes</b>	<b>69</b>
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
<b>8</b>	<b>Modifizierung des Modells durch Berücksichtigung des Einflusses großen Bohrschlupfes</b>	<b>96</b>
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
<b>9</b>	<b>Vergleich mit dem Zeitschrittintegrationsverfahren</b>	<b>108</b>
9.1	Gleislagefehler . . . . .	108
9.2	Vergleichsergebnisse . . . . .	109
<b>10</b>	<b>Erweiterung des entwickelten Verfahrens auf ein ganzes Fahrzeug</b>	<b>112</b>
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
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Schlüpfе, Schupfkräfte und Systemdifferentialgleichungen des Einzelrad-</b> <b>satzmodells</b>	<b>130</b>
A.1	Schlüpfе . . . . .	130
A.2	Kalkerscher Schlupfkräfte . . . . .	131
A.3	Bewegungsdifferentialgleichungen . . . . .	132
<b>B</b>	<b>Nichtlinearitäten und ihre statistisch linearisierten Funktionen</b>	<b>136</b>
B.1	Geometrische Nichtlinearitäten . . . . .	136
B.2	Nichtlinearitäten in den Kalkerschen Schlupfkräften . . . . .	139
B.3	Rekursionsverfahren für statistische Linearisierung der Schlupfkräfte . . . .	140
<b>C</b>	<b>Berechnung der Kovarianzen unter Verwendung des Residuensatzes</b>	<b>142</b>
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
<b>D</b>	<b>Technische Daten</b>	<b>146</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>150</b>