

FORTSCHRITT-  
BERICHTE

**VDI**

Dipl.-Ing. Ulrich Hillenbrand, München

**Optimale  
fahrtechnische Auslegung  
von Schienenfahrzeugen**

Reihe **11**: Schwingungstechnik    Nr. **188**

**VDI** VERLAG

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Einführung und Literaturübersicht	1
1.1.1 Aufgabenstellung im Bereich Fahrtechnik der Eisenbahn	1
1.1.2 Systemanalyse der Querdynamik im Bereich Rad/Schiene	3
1.1.3 Arbeiten im Bereich Optimierung	7
1.2 Zielsetzung der Arbeit	11
1.3 Gliederung und Inhalt der Arbeit	13
1.4 Nomenklatur	16
2. Anforderungen, Bewertungskriterien, Auswerteverfahren	18
2.1 Beschreibung der Aufgabenstellung	18
2.2 Bewertung des Systemverhaltens	21
2.2.1 Fahrgeschwindigkeit an der Stabilitätsgrenze	22
2.2.2 Fahrkomfort	25
2.2.2.1 Beurteilung des Fahrkomforts von Schienenfahrzeugen	25
2.2.2.2 Grenzwerte für den Fahrkomfort von Schienenfahrzeugen	26
2.2.3 Beanspruchungskenngrößen für den Fahrweg	28
2.2.3.1 Grenzwert der Querstabilität des Gleisrostes	28
2.2.3.2 Grenzwert für die Fahrwegbeanspruchung	29
2.2.4 Entgleisungssicherheit	29
2.2.5 Verschleißkennwerte	31
2.2.5.1 Verschleißmechanismen und Verschleißhypothesen im R/S-System	31
2.2.5.2 Verschleißbewertung nach der Reibarbeitshypothese	32
2.2.5.3 Kriterien für die nichtlineare stationäre Bogenfahrt	33
2.2.6 Beschleunigungs- und Wegamplituden	34
2.2.6.1 Bewegungsgrößen als Gütekriterien	34
2.2.6.2 Bewegungsgrößen als Nebenbedingungen	34
2.2.7 Bildung der Zielfunktion bei vektoriellen Gütekriterien	35
2.2.7.1 Linearkombination der Einzelkriterien	36
2.2.7.2 Quadratische Kombination der Einzelkriterien	36
2.2.7.3 Bewertung des größten normierten Einzelkriteriums	37
2.3 Auswerteverfahren	38
2.3.1 Fahrt in der Geraden (Eigenverhalten/Störverhalten)	38
2.3.2 Bogenfahrt (stationär)	39
2.3.3 Instationäre Bewegungszustände	39
2.3.4 Ermittlung der Gütekriterien und Nebenbedingungen	39
3. Bildung und Verifizierung eines Rechenmodells	41
3.1 Erstellung eines mathematischen Ersatzmodells	42
3.1.1 Anforderungen an das mathematische Ersatzmodell	42
3.1.2 Auswahl eines Mehrkörperformalismus zur Gleichungserstellung	43
3.1.3 Bewegungsgleichungen des Mehrkörpersystems	45
3.1.3.1 Definitionen und Modellannahmen	45
3.1.3.2 Koordinatensysteme, Lage- und Geschwindigkeitskoordinaten	48
3.1.3.3 Verallgemeinerte Koordinaten und kinematische Gleichungen	49
3.1.3.4 Gleichungen der Dynamik	50
3.1.3.5 Verallgemeinerte Kräfte	52

3.1.4	Spezielle Modellierung von Radsätzen und Gleis-Elementen	58
3.1.4.1	Modellannahmen, Koordinatensysteme und Bewegungsgrößen	58
3.1.4.2	Die geometrischen Zwangsbedingungen des Rad/Schiene-Kontaktes	60
3.1.4.3	Die Reibkräfte in der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene	61
3.1.4.4	Führ- und Störgrößen im Fahrbahnverlauf	63
3.1.4.5	die kinematischen und dynamischen Gleichungen der Substruktur	64
3.1.4.6	Zusammenfassung der Bewegungsgleichungen	67
3.2	Parameter des Modells	68
3.2.1	Einteilung	68
3.2.1.1	Parameter des Fahrzeugmodells	69
3.2.1.2	Parameter des Fahrweges und des Zusammenwirkens Fahrzeug/Fahrweg	73
3.2.1.3	Parameter der Störgrößen und Anregungen des Systems	74
3.2.2	Wertebereiche für die Systemparameter	75
3.2.2.1	Parameter des Fahrzeugs	75
3.2.2.2	Parameter des Fahrweges und des Zusammenwirkens Fahrzeug/Fahrweg	81
3.2.2.3	Parameter der Führ- und Störgrößenmodelle	82
3.3	Verifizierung des Rechenmodells	87
3.3.1	Vergleich mit Ergebnissen von Rollprüfstandsversuchen	87
3.3.1.1	Eigenschwingungsverhalten	87
3.3.1.2	Dynamisches Verhalten bei Simulation von Gleislagestörungen	89
3.3.2	Verifizierung anhand von Versuchsfahrten auf der Strecke	92
3.3.2.1	Meßergebnisse der Versuchsfahrten mit dem ICE/V	92
3.3.2.2	Simulationsrechnungen mit dem Rechenmodell	96
3.3.2.3	Verifizierung der Simulationsrechnungen	101
3.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	112
4.	Analyse Ausgangszustand mit Referenzmodell	116
4.1	Fahrtechnische Bewertung in den Auslegungsfällen A1 bis A4	117
4.1.1	Gütekriterien	117
4.1.2	Grenzwerte als Randbedingungen	119
4.1.3	Gesamtbewertung mit Zielfunktion	120
4.2	Durchführung der Referenzanalyse	121
4.2.1	Auslegungsfall A1	123
4.2.2	Auslegungsfall A2	125
4.2.3	Auslegungsfall A3	125
4.2.4	Auslegungsfall A4	125
4.3	Empfindlichkeitsanalyse des Ausgangszustandes	127
4.3.1	Untersuchung von vorgegebenen Einflußgrößen (Betriebsparametern)	127
4.3.2	Sensitivitäts- und Wirksamkeitsanalyse der Entwurfsparameter	131
5.	Maßnahmen zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei der Simulation	139
5.1	Änderung der Integrationsparameter und des Verfahrens zur Ermittlung der Schlupfkräfte im Rad/Schiene-Kontakt	140
5.2	Verkürzung der Simulationszeiten im Auslegungsfall A1	141
5.3	Entwicklung von Entwurfsmodellen mit reduzierter Anzahl von Frei- heitsgraden	142
5.4	Ergebnisse der Maßnahmen	144

6. Optimierung des fahrtechnischen Verhaltens	149
6.1 Vorbereitung der Optimierung	150
6.1.1 Auswahl eines geeigneten numerischen Optimierungsverfahrens	150
6.1.1.1 Charakterisierung des Optimierungsproblems	150
6.1.1.2 Optimalitätsbedingungen	150
6.1.1.3 Lösung des Optimierungsproblems mit Hilfe der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP)	152
6.1.2 Normierungen und numerische Gradienten	154
6.1.2.1 Normierungen	154
6.1.2.2 Numerische Gradientenbildung	156
6.2 Vorgehensweise bei der Optimierung	158
6.2.1 Einführung eines Vergleichsmodells mit konventionellen Fahrwerken	158
6.2.2 Vorbemerkungen zum Ablauf der Optimierung	159
6.2.3 Hinweise zur Ergebnisdarstellung	161
6.3 Optimierung des Rechenmodells mit konventionellen Fahrwerken	162
6.3.1 Fahrt in der Geraden (A1)	162
6.3.1.1 Optimierung mit fester Gewichtung	162
6.3.1.2 Ermittlung des günstigsten Kompromisses (Pareto-Optimum)	163
6.3.2 Fahrt mit Einzelstörung (A2)	164
6.3.2.1 Überprüfung des Entwurfsmodells EM	165
6.3.2.2 Ermittlung des günstigsten Kompromisses (Pareto-Optimum)	165
6.3.3 Bemerkungen zur Optimierung bei der Bogenfahrt (A3 und A4)	166
6.3.4 Ergebnisse der Optimierung bei Bogenfahrt	166
6.3.4.1 Fahrt im weiten Bogen mit Radius 4000m (A3)	166
6.3.4.2 Fahrt im engen Bogen mit Radius 500m (A4)	167
6.3.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse in den einzelnen Auslegungsfällen	176
6.3.6 Optimierung Geradeausfahrt und Bogenfahrt (A1 und A3)	178
6.4 Optimierung des Rechenmodells mit Koppelrahmen-Fahrwerken	182
6.4.1 Fahrt in der Geraden (A1)	182
6.4.1.1 Vergleich der Modellvarianten und der Parameternormierungen	182
6.4.1.2 Ermittlung des günstigsten Kompromisses (Pareto-Optimum)	182
6.4.2 Fahrt mit Einzelstörung (A2)	183
6.4.2.1 Überprüfung des Entwurfsmodells	183
6.4.2.2 Ermittlung des günstigsten Kompromisses	183
6.4.3 Fahrt im weiten Bogen mit Radius 4000m (A3)	184
6.4.4 Fahrt im engen Bogen mit Radius 500m (A4)	185
6.4.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse in den einzelnen Auslegungsfällen	193
6.4.6 Gemeinsame Auslegung für die Auslegungsfälle A1 und A3	195
6.5 Ergebnisanalyse	198
6.5.1 Ergebnisvergleich der beiden Fahrwerkskonfigurationen	198
6.5.2 Günstigste Lösung bei gemeinsamer Auslegung	198
6.5.3 Bewertung der Maßnahmen zur Einsparung von Simulationszeiten	201
7. Zusammenfassung der Ergebnisse, Schlußfolgerungen und Empfehlungen	202
7.1 Darstellung der Ergebnisse	202
7.1.1 Vorbereitende Grundlagenuntersuchungen	202
7.1.2 Beitrag zur Weiterentwicklung der Fahrzeugauslegung	202
7.1.3 Endergebnis der durchgeführten Optimierungrechnungen	203
7.2 Weitere Untersuchungen und Entwicklungen	204
7.2.1 Weiterführung der begonnenen Auslegungsmethodik	204

7.2.2 Aktive Lenkung zur Verbesserung der Fahrt im Bogen .....	205
7.2.3 Weiterentwicklung des Auslegungsinstrumentariums .....	206
7.2.4 Hinweis zur Anwendung in anderen Bereichen .....	207
Anhang A. Basisdatensatz des ICE/V-Mittelwagens (Demowagen 1) .....	208
Anhang B. Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen .....	211
B.1 Abkürzungen .....	211
B.2 Liste der Formelzeichen .....	212
Anhang C. Literaturverzeichnis .....	216