

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis V
 Tabellenverzeichnis IX
 Liste der Formelzeichen XI

**1 Die Modellbildung als Grundlage der Simulation von
 Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen 1**

- 1.1 Einleitung 1
 - 1.1.1 Aufbau von Hochgeschwindigkeits-Kettenwerken 2
 - 1.1.2 Aufbau von Hochgeschwindigkeits-Stromabnehmern 3
 - 1.1.3 Auslegungskriterien 5
 - 1.1.4 Stand der Technik 7
- 1.2 Zielsetzung der Arbeit 12

2 Modellierung des Kettenwerks 15

- 2.1 Aufbau des Kettenwerks Re 250 der DB 16
- 2.2 Modellierung von Fahrdraht, Tragseil und Y-Beiseil 17
 - 2.2.1 Wellenausbreitung 20
 - 2.2.1.1 Lösungscharakter der homogenen Bewegungsgleichungen 20
 - 2.2.1.2 Dispersionsrelationen 23
 - 2.2.2 Das Modellproblem 27
 - 2.2.2.1 Eigenfrequenzen des Modellproblems 27
 - 2.2.2.2 Belastung durch eine konstante und eine linear anwachsende
 Wanderkraft 29
 - 2.2.2.3 Belastung durch eine harmonische Wanderkraft 36
 - 2.2.3 Folgerungen 37
- 2.3 Modellierung der Hänger, Mastpunkte und Seitenhalter 38
- 2.4 Kopplung zwischen den Komponenten 41
- 2.5 Berechnung des Montagezustands 44
- 2.6 Berechnung der statischen Elastizität des Kettenwerks 47

3 Nichtmaterielle Übergangsbedingungen an der Kontaktkraft 49

4 Modellierung des Stromabnehmers 57

- 4.1 Einfache Mehrmassen-Modelle 58
 - 4.1.1 Bestimmung der Modellparameter 60
 - 4.1.2 Dynamisches Verhalten 63
 - 4.1.3 Parametervariationen 67
- 4.2 Mehrmassen-Modell mit sieben Freiheitsgraden 69
 - 4.2.1 Dynamisches Verhalten 70

4.3 Nichtlineares Mehrkörper-Modell	75
4.3.1 Bestimmung der Modellparameter	77
4.3.2 Kinematik	83
4.3.3 Dynamisches Verhalten	83
4.3.3.1 Einfluß der Kinematik des Viereckgelenks	85
4.3.3.2 Einfluß der nichtlinearen Schleifleistenfederung	86
4.3.3.3 Einfluß der Arbeitshöhe	87
4.3.4 Berücksichtigung der Aerodynamik in der Simulation	89
5 Simulation der Dynamik des gekoppelten Fahrleitung-Stromabnehmer-Systems	91
5.1 Einfluß der Biegesteifigkeit des Fahrdrabtmodells	93
5.1.1 Simulationen am Modellproblem	94
5.1.2 Simulationen am 6-MF-Kettenwerk	95
5.1.2.1 Konstante Wanderkraft	95
5.1.2.2 Drei-Massen-Modell	95
5.1.3 Folgerungen	96
5.2 Einfluß des Ausknickens der Hänger	102
5.2.1 Konstante Wanderkraft	102
5.2.2 Drei-Massen-Modell	102
5.2.3 Folgerungen	103
5.3 Einfluß des sich unter Gewichtskraft einstellenden Fahrdrabtdurchhangs	107
5.3.1 Drei-Massen-Modell	107
5.3.2 Folgerungen	108
5.4 Einfluß der Schleifleistenelastizität	111
5.4.1 Vier-Massen- und Drei-Massen-Modell	111
5.4.2 Folgerungen	112
5.5 Einfluß der getrennten Berücksichtigung beider Schleifleisten	115
5.5.1 Sieben-Freiheitsgrad- und Drei-Massen-Modell	115
5.5.2 Folgerungen	116
5.6 Einfluß der Nickbewegung der Wippe	118
5.6.1 Sieben-Freiheitsgrad-Modell	118
5.6.2 Folgerungen	119
5.7 Einfluß der Kippbewegung der Schleifleisten	127
5.7.1 Sieben-Freiheitsgrad-Modell	127
5.7.2 Folgerungen	128
5.8 Validierung der Ergebnisse	135
6 Zusammenfassung und Ausblick	139
Literaturverzeichnis	143
Anhang	153
A Kenndaten von Kettenwerken	153

B	Fahrdrahtparameter für das Modellproblem	153
B.1	Dämpfung des Kettenwerks	154
C	Zur Lösung der homogenen Bewegungsgleichungen	155
D	Zu den Dispersionsrelationen der Fahrdrahtmodelle	155
E	Eigenfrequenzen des vorgespannten Timoshenko-Balkens	156
F	Vorgespannter Timoshenko-Balken unter konstanter Wanderkraft	157
G	Saite und Euler-Bernoulli-Balken unter linear anwachsender Wanderkraft	158
H	Zur Modellierung des Seitenhalters	160
I	Zum Vergleich zwischen Saite und Euler-Bernoulli-Balken	162
J	Zur Parameterbestimmung der Mehrmassen-Modelle	163
J.1	Zur Bestimmung der Masse M_3	163
J.2	Ansatzfunktion für den Rayleigh Quotienten	164
K	Übertragungsfunktionen einfacher Mehrmassen-Modelle	165
L	Bewegungsgleichungen des Mehrmassen-Modells mit sieben Freiheitsgraden	166
L.1	Statische Gleichgewichtslage	169
L.2	Drei-Massen-Modell unter Berücksichtigung der Exzentrizität	170
M	Berechnung des Hebelarms des Pneumatikantriebs	170
N	Numerische Verfahren des Simulationsprogramms	171
O	Simulationsparameter	172

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Prinzipielles Vorgehen zur Modellbildung und Simulation	3
Abb. 1-2	Grundtypen von Kettenwerken	4
Abb. 1-3	Stromabnehmer DSA 350 S [Dor95]	4
Abb. 2-1	Mastfeld der Re 250 der DB	16
Abb. 2-3	Zickzack-Verspannung des Fahrdrachts	16
Abb. 2-2	An- und umgelenkter Seitenhalter	17
Abb. 2-4	Abhängigkeit der Wellenzahl von der Frequenz für den Euler-Bernoulli- und den Timoshenko-Balken unter Vorspannung	23
Abb. 2-5	Dispersionsrelationen	24
Abb. 2-6	Phasengeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenarten im Vergleich	27
Abb. 2-7	Eigenfrequenzen der Fahrdrahtmodelle im Vergleich	28
Abb. 2-8	Modellproblem unter Wanderkraft	29
Abb. 2-9	Saite unter Wanderkraft: $v < v_{kr}$	32
Abb. 2-10	Vorgespannter Euler-Bernoulli-Balken unter Wanderkraft: $v < v_{kr}$	32
Abb. 2-11	Vorgespannter Timoshenko-Balken unter Wanderkraft: $v < v_{kr}$	32
Abb. 2-12	Kontaktbahnen: $v < v_{kr}$	33
Abb. 2-13	Saite unter Wanderkraft: $v > v_{kr}$	33
Abb. 2-14	Balken unter Wanderkraft: $v > v_{kr}$	34
Abb. 2-15	Saite unter linear anwachsender Wanderkraft: $v < v_{kr}$	36
Abb. 2-16	Euler-Bernoulli-Balken unter linear anwachsender Wanderkraft: $v < v_{kr}$	36
Abb. 2-17	Mastpunkte und Seitenhalter der Re 250	38
Abb. 2-18	Modellierung der Hänger und Seitenhalter	39
Abb. 2-19	Kräftegleichgewicht am Y-Beiseil	41
Abb. 2-20	Verzweigungs- und Vereinigungspunkt von Tragseil und Y-Beiseil	42
Abb. 2-21	Zu den Übergangsbedingungen an einer Unstetigkeitsstelle	42
Abb. 2-22	Einfluß der Biegesteifigkeit auf die statische Auslenkung eines Hängerabschnitts	45
Abb. 2-23	Zur Berechnung der Hängervorspannung	46
Abb. 3-24	Zum Zusammenhang der Geschwindigkeiten von Schleifleiste und Fahrdraht	49
Abb. 3-25	Impulsbilanz der bewegten Saite an der Kontaktkraft	52
Abb. 3-26	Wellenreflexion und Wellentransmission an einer bewegten Impedanz	55
Abb. 4-1	Stromabnehmer DSA 350 S [Dor95]	57
Abb. 4-2	Konstruktionszeichnung des DSA 350 S [Dor95]	57
Abb. 4-3	Drei- und Vier-Massen-Modell	59
Abb. 4-4	Berücksichtigung des Hubantriebs im Drei-Massen-Modell	60
Abb. 4-5	Zur Bestimmung der Masse M_3 eines Mehrmassen-Modells	61
Abb. 4-6	Zur Bestimmung der Masse M_2 des Mehrmassen-Modells aus Abb. 4-3	62
Abb. 4-7	Scheinmassenverlauf: Drei-Massen-Modell und Experiment	64

Abb. 4-8	Phasenverhalten des Drei-Massen-Modells	65
Abb. 4-9	Frequenzgänge des Drei-Massen-Modells	66
Abb. 4-10	Scheinmassenverlauf: Vier-Massen-Modell und Experiment	67
Abb. 4-11	Parametervariationen des Drei-Massen-Modells	68
Abb. 4-12	Mehrmasse-Modell mit sieben Freiheitsgraden	69
Abb. 4-13	Scheinmasse und Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Exzentrizität	71
Abb. 4-14	Relative Auslenkung am Kraftort: wandernde konstante Kontaktkraft	72
Abb. 4-15	Kippbewegung der Schleifleisten: wandernde konstante Kontaktkraft	72
Abb. 4-16	Relative Auslenkung des Kraftangriffspunkts bei einer Erregerfrequenz von 10 rad/s	73
Abb. 4-17	Relative Auslenkung des Kraftangriffspunkts bei einer Erregerfrequenz von 50 rad/s	73
Abb. 4-18	Nichtlineares Mehrkörper-Modell	76
Abb. 4-19	Abmessungen des nichtlinearen Mehrkörper-Modells	76
Abb. 4-20	Modell der elastischen Oberschere	78
Abb. 4-21	Zur Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeit am Oberscherengelenk	78
Abb. 4-22	Verlauf des Hebelarms der Pneumatik über dem Unterscherenwinkel	80
Abb. 4-23	Geometrie am Dämpfer der Unterschere	81
Abb. 4-24	Hebelarm des Unterscherendämpfers	81
Abb. 4-25	Hubkurve des DSA 350 S	83
Abb. 4-26	Scheinmassenverlauf des modifizierten Drei-Massen-Modells	84
Abb. 4-27	Übertragungsfunktionen des modifizierten Drei-Massen-Modells	85
Abb. 4-28	Scheinmassenverlauf des nichtlinearen Mehrkörper-Modells	86
Abb. 4-29	Einfluß der nichtlinearen Schleifleistenfederung auf den Scheinmassenverlauf	87
Abb. 4-30	Scheinmassenverlauf des nichtlinearen Mehrkörper- Modells	87
Abb. 4-31	Scheinmassenverlauf des nichtlinearen Mehrkörper- Modells	88
Abb. 4-32	Sprungantworten des Mehrkörpersystems bei verschiedenen Arbeitshöhen	89
Abb. 4-33	Einfluß der Aerodynamik auf die Kontaktkraft	90
Abb. 5-1	Sechs-Mastfeld-Kettenwerk	92
Abb. 5-2	Modellproblem	94
Abb. 5-3	Vergleich von Saite und Balken anhand eines von einer Wandermasse mit $v = 70$ m/s befahrenen Fahrdrahtabschnitts	98
Abb. 5-4	Vergleich von Saite und Balken anhand der Kontaktbahnen einer Wanderkraft (masseloser Stromabnehmer) am 6-MF-Kettenwerk	99
Abb. 5-5	Vergleich von Saite und Balken bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 70$ m/s	100
Abb. 5-6	Vergleich von Saite und Balken bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 85$ m/s	101
Abb. 5-7	Kontaktbahn einer konstanten Wanderkraft am 6-MF-Kettenwerk bei	

	Berücksichtigung und Vernachlässigung des Hängerknickens, $v = 100 \text{ m/s}$	104
Abb. 5-8	Einfluß des Hängerknickens bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 70 \text{ m/s}$	105
Abb. 5-9	Einfluß des Hängerknickens bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 85 \text{ m/s}$	106
Abb. 5-10	Einfluß des Fahrdrahtdurchhangs bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 70 \text{ m/s}$	109
Abb. 5-11	Einfluß des Fahrdrahtdurchhangs bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell, $v = 85 \text{ m/s}$	110
Abb. 5-12	Einfluß der Schleifleistenelastizität bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einer Geschwindigkeit von $v = 70 \text{ m/s}$	113
Abb. 5-13	Einfluß der Schleifleistenelastizität bei Befahrung des 6-MF-Kettenwerks mit einer Geschwindigkeit von $v = 85 \text{ m/s}$	114
Abb. 5-14	Einfluß der getrennten Berücksichtigung beider Schleifleisten bei $v = 70 \text{ m/s}$	117
Abb. 5-15	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 70 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen.....	120
Abb. 5-16	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 70 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen: ohne Nicken berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	121
Abb. 5-17	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 70 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen: mit Nicken berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	122
Abb. 5-18	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 85 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen.....	123
Abb. 5-19	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 85 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen: ohne Nicken berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	124
Abb. 5-20	Einfluß der Nickbewegung bei $v = 85 \text{ m/s}$ und vernachlässigtem Kippen: mit Nicken berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	125
Abb. 5-21	Verläufe des Nickwinkels.....	126
Abb. 5-22	Einfluß der Kippbewegung bei $v = 70 \text{ m/s}$ und berücksichtigtem Nicken.....	130
Abb. 5-23	Einfluß der Kippbewegung bei $v = 85 \text{ m/s}$ und berücksichtigtem Nicken.....	131
Abb. 5-24	Einfluß der Kippbewegung bei $v = 70 \text{ m/s}$ und berücksichtigtem Nicken: mit Kippen berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	132
Abb. 5-25	Einfluß der Kippbewegung bei $v = 85 \text{ m/s}$ und berücksichtigtem Nicken: ohne Kippen berechnete Kontaktkräfte an der vorderen und hinteren Schleifleiste.....	133
Abb. 5-26	Verläufe der Schleifleistenkippwinkel (mit Nicken).....	134
Abb. 5-27	Berechnete Kontaktbahn bei Befahrung des 12-MF-Kettenwerk	

	mit einem Drei-Massen-Modell bei $v = 70$ m/s	138
Abb. 5-28	Berechnete Kontaktkraft bei Befahrung des 12-MF-Kettenwerks mit einem Drei-Massen-Modell bei $v = 70$ m/s	138
Abb. A-1	Kräfte am Seitenhalter	161

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1	Parameter des Drei-Massen-Modells	64
Tabelle 4-2	Eigen- und Tilgerfrequenzen des gedämpften und ungedämpften Drei-Massen-Modells	64
Tabelle 4-3	Zusätzliche Parameter des Vier-Massen-Modells	66
Tabelle 4-4	Parameter des Mehrmassen-Modells mit sieben Freiheitsgraden	70
Tabelle 4-5	Parameter des nichtlinearen Mehrkörper-Modells	82
Tabelle 4-6	Eigenfrequenzen des modifizierten Drei-Massen-Modells	84
Tabelle 4-7	Eigenfrequenzen des linearisierten Mehrkörper-Modells (mittlere Arbeitshöhe)	84
Tabelle 4-8	Eigenfrequenzen des linearisierten Mehrkörper-Modells (minimale Arbeitshöhe)	88
Tabelle 4-9	Eigenfrequenzen des linearisierten Mehrkörper-Modells (maximale Arbeitshöhe)	88
Tabelle 5-1	Auswertung der mit einer Modellierung des Fahrdrahtes als Saite und als Balken erhaltenen Ergebnisse	96
Tabelle 5-2	Auswertung der unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Hängerknickens erhaltenen Ergebnisse	103
Tabelle 5-3	Auswertung der unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Fahrdrahtdurchhangs erhaltenen Ergebnisse	107
Tabelle 5-4	Auswertung der unter Berücksichtigung und Vernachlässigung der Schleifleistenelastizität erhaltenen Ergebnisse	111
Tabelle 5-5	Auswertung der bei Simulation mit dem Sieben-Freiheitsgrad-Modell unter Vernachlässigung der Kipp- und Nickbewegung erhaltenen Ergebnisse	115
Tabelle 5-6	Auswertung der bei Simulation mit dem Sieben-Freiheitsgrad-Modell erhaltenen Ergebnisse in Hinblick auf den Einfluß der Nickbewegung	119
Tabelle 5-7	Auswertung der bei Simulation mit dem Sieben-Freiheitsgrad-Modell erhaltenen Ergebnisse in Hinblick auf den Einfluß der Kippbewegung der Schleifleisten	128
Tabelle 5-8	Einfluß der Fahrdrahtzugspannung	135
Tabelle A-1	Vergleich wichtiger Kenndaten der Kettenwerke für Neubaustrecken der DB (Deutschland), SNCF (Frankreich) und FS (Italien)	153