

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Bremsengeräusche	2
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
1.4 In der Literatur verwendete Begriffe	7
2 Stabilität	11
2.1 Definition	11
2.2 Stabilitätssätze	14
2.3 Stabilität und Matrizen	17
2.3.1 Orthogonale Diagonalisierbarkeit	17
2.3.2 M-K-Systeme	18
2.3.3 M-K-N-Systeme	20
2.3.4 M-D-K-Systeme	22
2.3.5 M-G-K-Systeme	24
2.3.6 M-D-G-K-Systeme	27
2.3.7 M-D-G-K-N-Systeme	30
2.3.8 M-D-G-K-N-S-Systeme	31
3 Erregungs- und Dämpfungsmechanismen	33
3.1 Geschwindigkeitsabhängiges Reibgesetz	34
3.1.1 Reibwertverhalten	34
3.1.2 Minimalmodell	35
3.1.3 Stick-Slip	38
3.2 Positive Reibungsdämpfung	39
3.3 Reibinduzierte Unsymmetrie der Steifigkeitsmatrix	42
3.3.1 Minimalmodell mit zwei Freiheitsgraden	42
3.3.2 Modellierung als Euler-Bernoulli-Balken	47
3.4 Kontaktdämpfung, Fügestellendämpfung	62
3.5 Corioliskräfte	63
3.5.1 Kinematik	63
3.5.2 Eigenfrequenzen von Bremsscheiben	65
3.5.3 Stabilitätsverhalten	66
3.6 Materialdämpfung	67
3.7 Dämpfung an den Systemgrenzen	69
3.8 Abstrahldämpfung	70

4 Finite Elemente Analyse	71
4.1 Modellaufbau	72
4.2 Nichtlineare statische Berechnung	74
4.2.1 Rotation der Bremsscheibe	74
4.2.2 Schräglage	75
4.2.3 Kurvenfahrt	77
4.2.4 Belagverschleiß	79
4.2.5 Temperaturverteilung	81
4.3 Lineare Stabilitätsanalyse	81
4.3.1 Linearisierung	81
4.3.2 Reelle Eigenwertberechnung	82
4.3.3 Projektion der Systemmatrizen	83
4.3.4 Komplexe Eigenwertberechnung	86
5 Materialparameter	87
5.1 Reibmaterial	87
5.1.1 Transversale Isotropie	88
5.1.2 Vergleich der Messverfahren	91
5.1.3 Ultraschall	93
5.1.4 Modalanalyse, Eigenfrequenzmessung, Grindo Sonic	93
5.1.5 Kompressibilitätsmessung	98
5.1.6 Dynamische Messung mit Piezoanregung in axialer Richtung	99
5.2 Dämpfungsblech	106
5.2.1 Aufbau	106
5.2.2 Eigenschaften von Dämpfungsblechen	107
5.2.3 Eigenfrequenzmessung, Modalanalyse	110
5.2.4 Kompressibilitätsmessung	112
5.2.5 Dynamische Messung in axialer Richtung	113
5.2.6 Shore-Härte	114
5.3 Stahl- und Gussbauteile	115
5.4 Gummilager	116
6 Kontakte	117
6.1 Kinematik	117
6.2 Kontaktsteifigkeit	118
6.3 Variationsformulierung	120
6.3.1 In Richtung der Einheitsnormalen	121
6.3.2 In Tangentialrichtung bei Haften	122
6.3.3 In Tangentialrichtung bei Gleiten	122
6.3.4 In Tangentialrichtung bei zusätzlicher Führungsgeschwindigkeit	124
6.4 Kontakt zwischen Bremsscheibe und Bremsbelag	125
6.5 Kontakt zwischen Belagrückenplatte und Bremssattelhalter	126
6.5.1 Modellierung mit Coulomb'scher Reibung	127
6.5.2 Modellierung bei hochfrequenten Schwingungen	128
6.6 Befettung	130

7 Randbedingungen	133
7.1 Schwenklager und Radlager	133
7.2 Achslenker, Federbein und Gummilager	134
7.3 Rad, Reifen und Antrieb	137
8 Anwendungen im Entwicklungsprozess	141
8.1 Ergebnisinterpretation	141
8.2 Robustheitsbewertung	143
8.2.1 Stabilitätskriterien	144
8.2.2 Systeme mit Materialdämpfung	150
8.2.3 Verallgemeinerung auf Systeme mit vielen Freiheitsgraden	150
8.2.4 Robustheitsaussagen bei stochastisch verteilten Parametern	152
8.2.5 Stabilitätsprognose am Bremssystem	154
8.3 Abhilfemaßnahmen	156
8.3.1 Axiale Steifigkeit und Reibwertverhalten	156
8.3.2 Belaglänge	157
8.3.3 Maximale Amplitude	158
8.3.4 Bauteilverhalten	159
8.3.5 Trennung der koppelnden Schwingformen	161
8.3.6 Sensitivitätsanalyse am reduzierten System	163
9 Zusammenfassung und Ausblick	167
9.1 Zusammenfassung	167
9.2 Nichtlinearität und Grenzzykelberechnung	168
9.3 Zusätzliche Dämpfungsmechanismen	169
9.4 Materialparameter	169
9.5 Stabilitätsbewertung bei streuenden Parametern	170
9.6 Prognose von Abhilfemaßnahmen	171
9.7 Andere Bremsgeräusche	171
A Anhang: Verwendete Software	173
B Anhang: Beweise	175
B.1 Beweis des linearen Stabilitätssatzes 2.5 in Kapitel 2.2	175
B.2 Herleitung der Variationsformulierung in Kapitel 6.3	176
B.3 Herleitung der Auswertung am EA-Stab in Kapitel 5.1	178
C Anhang: Charakterisierung der Schwingformen von Bremsscheiben	179
C.1 Rotationssymmetrie und Doppelmoden	179
C.2 Out-of-Plane Moden	180
C.3 In-Plane-Radial Moden	181
C.4 In-Plane-Tangential Moden	181
C.5 In-Plane-Tangential-Shear Moden	182
Literaturverzeichnis	183