

Zur Stabilität von Systemen bewegter Kontinua mit Reibkontakten am Beispiel des Bremsenquietschens

von
Hartmut Hetzler



universitätsverlag karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Technische Problemstellung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Literaturübersicht	3
1.4	Thema und Gliederung der Arbeit	6
2	Elastische Systeme mit Reibkontakt	8
2.1	Kinematik	8
2.1.1	Allgemein	9
2.1.2	Kontakt	12
2.2	Kinetik	15
2.2.1	Mechanisches Prinzip	15
2.2.2	Potentiallose Kräfte	17
2.2.3	Kontakt	18
2.2.3.1	Beitrag der Normalspannung	19
2.2.3.2	Beitrag der Scherspannungen	20
2.2.3.3	Gesamte virtuelle Arbeit	23
2.3	Diskretisierung	24
2.3.1	Diskretisierung ohne Kontakt	29
2.3.2	Diskretisierung der Kontakte	32
2.3.2.1	Lagrangesche Multiplikatoren	34
2.3.2.2	Penalty-Verfahren	40
2.3.2.3	Spezielle Ansatzfunktionen	44

3 Zur Stabilität stationärer Lösungen	49
3.1 Grundsätzliches zur Stabilität	49
3.2 Energetische Vorbetrachtung	52
3.3 Stabilität des diskretisierten Systems	54
3.3.1 Matrizeneigenschaften und Stabilität	57
3.3.2 Eigenwerte und Eigenvektoren	58
3.3.2.1 Symmetrien des komplexen Spektrums, Eigenvektoren	59
3.3.2.2 Existenz reeller Eigenvektoren	60
3.3.2.3 Reelle Darstellung von Eigenvektoren	61
3.3.3 Zusammenhang zwischen Eigenvektoren und Eigenwerten: der Rayleigh-Quotient	63
3.3.3.1 Lineares Eigenwertproblem	63
3.3.3.2 Quadratische Eigenwertprobleme	64
3.3.3.3 Orientierung der Rechtseigenvektoren	64
3.3.4 Parametereinfluss auf das Eigenwertspektrum	67
3.3.4.1 Einfache Eigenwerte	69
3.3.4.2 Halbeinfache Eigenwerte	69
3.3.4.3 Nicht-derogatorische Eigenwerte	70
3.4 Instabilitätsszenarien	73
3.4.1 Systeme ohne geschwindigkeitsproportionale Einflüsse	73
3.4.1.1 Parametereinfluss ohne Reibungskräfte	74
3.4.1.2 Lageabhängige Reibungskräfte	75
3.4.2 System mit geschwindigkeitsabhängigen Einflüssen	80
3.4.2.1 Nicht-zirkulatorische Systeme	81
3.4.2.2 Zirkulatorische Systeme	85

4 Quietschen von Scheibenbremsen	96
4.1 Problembeschreibung	96
4.1.1 Allgemein	96
4.1.2 Experimentelle Ergebnisse	98
4.1.2.1 Aufbau der Bremse und des Prüfstandes	98
4.1.2.2 Bremsenquietschen	101
4.1.3 Vorüberlegungen und grundsätzliche Modellelemente	106
4.1.4 Kinematik	107
4.1.4.1 Bremsscheibe	108
4.1.4.2 Bremsbeläge	113
4.1.4.3 Kontakte	115
4.1.5 Kinetik	117
4.1.6 Diskretisierung	120
4.2 Stabilität	126
4.2.1 Eigenwerte des reibungsfreien Systems	127
4.2.1.1 Bremsscheibe	127
4.2.1.2 Bremsscheibe und Beläge im reibungsfreien Kontakt	130
4.2.2 Stabilität des reibungsbehafteten Systems	133
4.2.2.1 Stabilität ohne Dissipation und gyroskopische Einflüsse	133
4.2.2.2 Stabilität unter Berücksichtigung sämtlicher Einflüsse	141
5 Zusammenfassung	153
Literaturverzeichnis	158