

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1	Elektromagnetisch betätigte Bremsen	3
2.1.1	Umgebung und Systemgrenzen	3
2.1.2	Charakteristik	4
2.1.3	Anwendungen und Kenngrößen	6
2.1.4	Konventionelle Wirkprinzipien	11
2.2	Magnetorheologische Flüssigkeiten – MRF	19
2.2.1	Charakteristik	19
2.2.2	Technische Nutzung	20
2.2.3	Kommerzielle MRF	22
2.3	Modellierung von MRF	23
2.3.1	Mikroskopische Modelle	23
2.3.2	Makroskopische Modelle	28
2.3.3	Weitere Ansätze	30
2.4	MRF-Bremsen	31
2.4.1	Charakteristik im Vergleich zu konventionellen Systemen	31
2.4.2	Anwendungen von MRF-Bremsen und -Kupplungen	34
2.4.3	Bekannte MRF-Bremsen	36
2.5	Konstruktion von MRF-Bremsen	38
2.5.1	Konzeptphase	39
2.5.2	Entwurfsphase	39
2.5.3	Verschleißverhalten	41
2.6	Detaillierte Aufgabenstellung	42
2.6.1	Motivation	42
2.6.2	Ziel	43
2.6.3	Vorgehensweise	43
3	Konzeption	49
3.1	Funktionsstruktur einer MRF-Bremse	49
3.2	Rotor abbremsen	52
3.2.1	Gestalt des Scherspalt es	52
3.2.2	Beschaffenheit der Wirkflächen	54
3.3	Bremse betätigen	55

3.3.1	Magnetfeld variieren	55
3.3.2	Magnetfeld führen	55
3.3.3	Remanentes Magnetfeld erzeugen	60
3.4	Wärme übertragen	66
3.5	Bewegung führen	66
3.6	MRF am Wirkort halten	67
3.7	Zusammenfassung des Kapitels	70
4	Modellierung	71
4.1	Modellierung der MRF	72
4.1.1	Magnetisches Teilmodell der MRF	72
4.1.2	MR-Effekt	75
4.1.3	Fließverhalten	77
4.1.4	Erweiterung für elastische Verformungen	80
4.1.5	Fazit	82
4.2	Bremsmomentbildung	83
4.2.1	Betrachtung eines beliebigen Scherspaltens	83
4.2.2	Technisch relevante Sonderfälle	86
4.2.3	Gültigkeitsbereich	91
4.2.4	Fazit	94
4.3	Magnetkreis -- Magnetostatik	94
4.3.1	Näherungslösung für überschlägige Auslegungen	95
4.3.2	Evaluation der Näherungslösung	97
4.3.3	Erweiterung für polarisierte Magnetkreise	104
4.3.4	Fazit	106
4.4	Magnetkreis - zeitveränderliches Feld	107
4.4.1	Exakte Lösung der Diffusionsgleichung	107
4.4.2	Konvergenzverhalten der Zeitbereichslösung	111
4.4.3	Evaluation der exakten Lösung bei zeitharmonischer Anregung	114
4.4.4	Fazit zur exakten Lösung	118
4.4.5	Näherungslösung	119
4.4.6	Evaluation der Näherungslösung	124
4.4.7	Fazit zum zeitveränderlichen Magnetfeld	126
4.5	Elektrischer Kreis	127
4.5.1	Statischer Zustand	127
4.5.2	Instationärer Zustand	128
4.5.3	Fazit	131
4.6	Wärmeübertragung	132
4.6.1	Dissipationsbedingte Temperaturerhöhung	132
4.6.2	Temperaturabhängige Stoffgrößen	134
4.6.3	Fazit	135
4.7	Zusammenfassung des Kapitels	135

5 Auslegungsverfahren	137
5.1 Konzept einer MRF-Bremse	137
5.2 Auslegen des Magnetkreises	138
5.2.1 Gesamtmodell der MRF-Bremse	139
5.2.2 Bestimmen der elektrischen Stellleistung	140
5.2.3 Vorüberlegungen	140
5.2.4 Optimieren des steuerbaren Momentes	142
5.2.5 Einfluss einzelner Spezifikationen	147
5.2.6 Fazit	151
5.3 Auslegen der Wicklung	152
5.4 Alternatives Auslegungsverfahren	155
5.5 Validierung	157
5.5.1 MRF-Bremse mit neutralem Magnetkreis	157
5.5.2 MRF-Bremsen mit polarisiertem Magnetkreis	162
5.6 Zusammenfassung des Kapitels	164
6 Verschleißverhalten	165
6.1 Messsystem	165
6.2 Messverfahren	170
6.3 Auswerten der Messdaten	172
6.4 Beschreibung der Ergebnisse	176
6.4.1 Vorversuch zur Scherspalttemperatur	176
6.4.2 Verschleißverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen	178
6.4.3 Reproduzierbarkeit	180
6.4.4 Druckaufbau während des Versuches	181
6.4.5 Dichtelement	182
6.4.6 Betriebsart	183
6.4.7 Bremsleistung	184
6.5 Zusammenfassung des Kapitels	185
7 Bewertung von MRF-Bremsen für haptische Anwendungen	187
7.1 Vergleich elektromagnetisch betätigter Bremsen	187
7.2 Bewegungssteuerung von Pkw-Türen	188
7.3 Weiterentwicklung der Labormuster	192
7.4 Zusammenfassung des Kapitels	194
8 Zusammenfassung und Ausblick	195
Literatur	199