

1. EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.1.1 Problematik der Magnetlagersysteme	1
1.1.2 Fuzzy-Logik und die Problemstellung	5
1.1.3 Ziel und Hauptinhalt der Arbeit	6
1.2 Kenndaten der Regelstrecke und Grundvoraussetzung	8
2. EINSATZ DER FINITE-ELEMENTE-METHODE BEI DER BERECHNUNG VON MAGNETLAGERN	10
2.1 Die Gewichtete-Residuen-Methode	10
2.2 Das Variationsprinzip	11
2.3 Ermittlung des magnetischen Kraftvektors	11
2.4 Lösung des nichtlinearen Feldproblems	15
2.4.1 Übliche Verfahren und Probleme	15
2.4.2 N-R-Verfahren mit Beschleunigungsfaktor und Restriktionen	15
3. OPTIMALE AUSLEGUNG DER MAGNETLAGER	20
3.1 Konstruktionsoptimierung für Multi-Zielfunktionen	20
3.1.1 Zielfunktionen für Magnetlager	20
3.1.2 Optimierungsaufgabe für Magnetlager	21
3.2 Einfluß der Konstruktionsvariablen	23
3.2.1 Innendurchmesser und Lagerlänge	23
3.2.2 Luftspalt	24
3.2.3 Nut- und Polbreite, Ständer- und Wellenjochdicke	25
3.2.4 Leistungsverstärker und Steuerwicklung	26
3.2.4.1 Minimierung der Verzögerungszeit	26
3.2.4.2 Ansteuerungsweise	27
3.2.5 Magnethöhe (für das Magnetlager mit Permanentmagnet-Vormagnetisierung)	28
4. MODELLIERUNG DER MAGNETLAGER DURCH STRUKTURVORGABE UND ANSCHLIESSENDE PARAMETEROPTIMIERUNG	32
4.1 Modellbildung für Magnetlager mit Vormagnetisierung	32
4.1.1 Strukturvorgabe für das Modell zur Kraftermittlung	32
4.1.2 Modelloptimierung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	37
4.2 Modellbildung für Magnetlager ohne Vormagnetisierung	39
4.2.1 Strukturvorgabe für das Modell zur Kraftermittlung	39

4.2.2	Modelloptimierung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	45
4.2.2.1	Kopplungseffekt zwischen Steuerdurchflutungen von X- und Y-Achse	45
4.2.2.2	Sättigungen im Eisenmaterial	46
4.2.2.3	Kopplungseffekt zwischen Steuerdurchflutung und Exzentrizität	47
4.2.2.4	Iterative Parameterbestimmung mit Hilfe der Finite-Elemente Methode	48
5.	FUZZY-LOGIK UND FUZZY-SYSTEME	50
5.1	Grundlagen für Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik	50
5.1.1	Mehrwertige Logik und Darstellungsvereinbarungen	50
5.1.2	T-Norm und Φ -Operator	51
5.1.2.1	Konjunktions-, Disjunktions- und Negationsoperator	51
5.1.2.2	Implikationsoperator	53
5.1.2.3	T-Norm basierte Verknüpfungsoperationen	56
5.1.3	Die grundlegenden Operationen von Fuzzy-Mengen	57
5.1.4	Fuzzy-Relation	58
5.1.4.1	Darstellungen der Fuzzy-Relation	58
5.1.4.2	Operationen der Fuzzy-Relation	59
5.1.4.3	Spezialeigenschaften der Fuzzy-Relation	60
5.1.5	Fuzzy-Mengen-Gleichungen	61
5.2	Randbedingungen und die Fuzzy-Gleichungssysteme	62
5.2.1	Randbedingungen und die Lösbarkeit des Fuzzy-Gleichungssystems	62
5.2.2	Hinreichende Bedingungen für die Erfüllung der Randbedingungen	65
5.2.2.1	Fuzzy-Gleichungssystem $A_i \circ_r R = B_i, i=1,2,\dots,n_r$	65
5.2.2.2	Fuzzy-Gleichungssystem $A_i \diamond_r R = B_i, i=1,2,\dots,n_r$	67
5.2.2.3	Fuzzy-Gleichungssystem $A_i \triangleright_r R = B_i, i=1,2,\dots,n_r$	70
5.3	Systemverhalten bei beliebigem Eingangspunkt	72
5.3.1	Fuzzy-Gleichungssystem $A_i \circ_r R = B_i, i=1,2,\dots,n_r$	74
5.3.2	Fuzzy-Gleichungssystem $A_i \triangleright_r R = B_i, i=1,2,\dots,n_r$	75
5.4	Defuzzifizierung	78
5.5	Anwendungen auf Systemmodellierung und Fuzzy-Regelung	80
6.	SYSTEMMODELLIERUNG MIT HILFE DER FUZZY-LOGIK	82
6.1	Fuzzy-Modellierung — eine alternative Methode	82
6.2	Minimierung des Rand-Fuzzy-Modellfehlers D_{mo}	84

6.2.1 Die wichtigsten existierenden Verfahren	84
6.2.2 Das modifizierte selbstlernende Verfahren	87
6.3 Minimierung des allgemeinen Fuzzy-Modellfehlers D_m	95
6.3.1 Verhalten der Fuzzy-Gleichungssysteme	95
6.3.2 Auswahl einer geeigneten T-Norm t	98
6.3.3 Einstellung der Zugehörigkeitsfunktionen	100
6.4 Modellbildungen für Magnetlager	103
6.4.1 Aufbau der fuzzifizierten Regelbasis	103
6.4.2 Ermittlung der Fuzzy-Relation R	105
6.4.3 Aufstellung des Fuzzy-Gleichungssystems und die Modell- modifikation	105
6.4.4 Magnetlager mit Vormagnetisierung	106
6.4.5 Magnetlager ohne Vormagnetisierung	109
6.4.6 Zusammenfassung der Modellierungsmethode mit Hilfe der Fuzzy Logik	111
7. FUZZY-REGELUNG	112
7.1 Die Entwicklung und Anwendung der Fuzzy-Regelung	112
7.2 Fuzzy-Reglerkonzepte für Multi-Variablensysteme	113
7.2.1 Allgemeines Reglermodell	113
7.2.1.1 Modellbeschreibung	113
7.2.1.2 Aufbau der Regelbasis mit Hilfe der dynamischen Programmierung	114
7.2.2 Vereinfachtes Reglermodell	118
7.2.3 Dezentrales Reglermodell	118
7.2.3.1 Modellbeschreibung	118
7.2.3.2 Anwendung auf Magnetlagersysteme mit zwei Reglervariablen	119
7.3 Selbstorganisierender Fuzzy-Regler (SOC)	125
7.3.1 Fuzzy-Regler mit Fuzzy-Lernalgorithmus	125
7.3.2 Anwendung auf Magnetlagersysteme	130
8. EIN FUZZY-ÄHNLICHES NICHTLINEARES REGELUNGSKON- ZEPT	133
8.1 Grundgedanken	133
8.2 Fuzzy-ähnliche Beschreibung eines Objektes — nichtlineare Trans- formation	133
8.3 Operationen der Fuzzy-Variablen	135
8.4 Reglermodell und das Entwurfsverfahren	136
8.4.1 Reglermodell	136
8.4.2 Das Entwurfsverfahren	136
8.4.2.1 Variation der nichtlinearen Funktionen	136

8.4.2.2 Entwurf des Reglers durch mathematische Programmierung	138
8.5 Anwendung auf Magnetlagersysteme	140
8.5.1 Aufbau des Reglers	140
8.5.2 Anwendung auf Magnetlager mit Vormagnetisierung	143
8.5.3 Anwendung auf Magnetlager ohne Vormagnetisierung ..	144
8.6 Zusammenfassende Aussagen über das fuzzy-ähnliche Reglerkonzept	145
9. ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEIT UND AUSBLICKE	146
9.1 Zusammenfassung	146
9.1.1 Fuzzy-Logik und die Anwendungen auf Systemmodellierung und Fuzzy-Regelung	146
9.1.2 Das fuzzy-ähnliche nichtlineare Regelungskonzept	147
9.1.3 Modellierung und Auslegung der Magnetlager	148
9.2 Ausblicke	149
Anhang A	150
Lagerungsprinzip	150
A.1 Passive Dauermagnetlager	150
A.2 Aktive Magnetlager	151
LITERATURVERZEICHNIS	155