

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Der Steuerknüppel als Schnittstelle	3
2.1. Begriffe und Aufbau des Mensch-Maschine-Systems	3
2.2. Bedienelemente	8
2.3. Modellierung des Pilotenverhaltens	9
2.4. Aktive Bedienelemente	11
2.4.1. Begriffe und Prinzipien	11
2.4.2. Historische Entwicklung der aktiven Steuerknüppel . . .	18
2.5. Technische Ausführungen von Flugzeugsteuerknüppeln	23
2.6. Technische Ausführungen von aktiven Steuerknüppeln	26
2.7. Grenzen der aktiven Bedienelemente	32
3. Konzeption eines aktiven Steuerknüppels	34
3.1. Ziele, Festlegungen und Randbedingungen	34
3.1.1. Flugzustandsabhängiger Kraft-Weg-Zusammenhang . . .	34
3.1.2. Kopplung zwischen Piloten- und Copilotensteuerknüppel	37
3.1.3. Festlegung der Kinematik	37
3.1.4. Sicherheits- und Fehlerforderungen	39
3.2. Untersuchung der Lösungsmöglichkeiten	42
3.2.1. Basissystem	42
3.2.2. Gebersystem	44
3.2.3. Aktiver Teil	47

4. Steuerknüppelfunktionen	51
4.1. Vorbemerkung	51
4.2. Allgemeine Kennlinie	52
4.3. Kennlinie des Basissystems	55
4.4. Aktiver Steuerknüppel mit variabler Federsteifigkeit	58
4.5. Aktiver Steuerknüppel mit erhöhter Dämpfung	61
4.6. Kopplung zwischen Piloten- und Copilotensteuerknüppel	62
4.7. Wahrnehmungsschwelle für sprungförmige Momentenänderungen	65
4.8. Motorauswahl	67
4.9. Steuerung und Regelung	68
4.9.1. Herleitungen zum Regelkreis	68
4.9.2. Abtastung	74
4.9.3. Auslegung des Regelkreises	75
4.9.4. Regelkreis des Experimentalsystems	76
4.9.5. Regelung bei der Kopplung zwischen Piloten- und Copilotensteuerknüppel	78
4.9.6. Redundanter Betrieb	79
4.9.7. Weitere Ergebnisse des praktischen Betriebs	80
5. Redundanz und Fehlererkennung	82
5.1. Redundanzgrad	82
5.1.1. Triplex-Lösung	82
5.1.2. Lösungsansatz mit Duplexanordnung	84
5.2. Redundanzart	85
5.2.1. Zusammenwirken der beiden Kanäle	85
5.2.2. Betriebsart der beiden Motoren	86

5.3. Fehlererkennungsverfahren	89
5.3.1. Übersicht	89
5.3.2. Residuungenerierung	91
5.3.3. Auswahl des Fehlererkennungsverfahrens	95
5.4. Konzept der Fehlererkennung	97
5.4.1. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse bezüglich Fehlererkennung	97
5.4.2. Aufteilung der Kanäle in Teilsysteme	98
5.5. Teilsystem Leistungselektronik und Wicklung	100
5.6. Thermisches Teilsystem	102
5.7. Elektromechanisches Teilsystem	103
5.8. Teilsystem Steuerung und Regelung	104
5.9. Gesamtstruktur	106
5.10. Modellierte Fehler	108
5.11. Struktur der Fehlererkennung am Experimentalsystem	113
5.12. Praktische Untersuchungen zur Fehlererkennung	118
5.12.1. Auswahl der Fehler	118
5.12.2. Untersuchung des Überstromfehlers	118
5.12.3. Untersuchung des Windungsschlusses	124
6. Modellbildung	129
6.1. Vorbemerkungen	129
6.2. Motoren	129
6.2.1. Daten	129
6.2.2. Reluktanzmoment	131
6.2.3. Motorkonstante K_T	133

6.2.4. Motorkonstante K_B	137
6.2.5. Wirbelstromverluste	137
6.2.6. Wicklungswiderstände	137
6.2.7. Ankerinduktivität	137
6.2.8. Modell des Motors	138
6.3. Modell der Leistungselektronik und Wicklung	139
6.4. Thermisches Teilsystem	143
6.4.1. Vorbemerkung	143
6.4.2. Mechanischer Aufbau des Motors	143
6.4.3. Theorie	144
6.4.4. Meßanordnung	153
6.4.5. Methode der Auswertung	154
6.4.6. Auswertung	157
6.4.7. Zusammenfassung des thermischen Teilsystems	160
6.5. Elektromechanisches Modell	162
6.5.1. Theorie	162
6.5.2. Kennwertermittlung	166
6.5.3. Anordnung und Ausblick	170
7. Zusammenfassung und Ausblick	173
A Versuchsstand	177
Literatur und Quellenangabe	182