

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik . . . . .	2
1.2 Gegenstand der Arbeit . . . . .	4
1.3 Gliederung der Ausarbeitung . . . . .	5
<b>2 Grundlagen neuronaler Netzwerke</b>	<b>7</b>
2.1 Biologisches Vorbild und technisches Neuronenmodell . . . . .	7
2.1.1 Transferfunktionen . . . . .	9
2.2 Topologien neuronaler Netzwerke . . . . .	10
2.3 Lernverfahren . . . . .	12
2.3.1 Lernen durch Rückpropagation des Fehlers . . . . .	13
2.3.2 Gradientenabstieg mit zusätzlichem Moment . . . . .	15
2.3.3 Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus . . . . .	16
2.4 Universelle Approximationseigenschaften neuronaler Netze . . . . .	17
2.5 Abbildung dynamischer Prozesse mit neuronalen Netzen . . . . .	18
2.6 Anwendungsarten neuronaler Lernverfahren . . . . .	19
2.6.1 Trainingsdatengewinnung und -aufbereitung . . . . .	21
2.6.2 Bewertung der Generalisierungsfähigkeit . . . . .	22
2.7 Systematischer Entwurfsprozess für neuronale Netze . . . . .	23
<b>3 Anwendung der strukturvariablen Regelung auf neuronale Lernverfahren</b>	<b>27</b>
3.1 Grundbegriffe der strukturvariablen Regelung . . . . .	28
3.2 Stabilitätsbetrachtung nichtlinearer Systeme . . . . .	31
3.3 Systeme im Gleitzustand . . . . .	33
3.3.1 Existenz und Erreichbarkeit des Gleitzustandes . . . . .	34
3.3.2 Invarianz und Robustheit . . . . .	36
3.4 Anwendung der Gleitzustandsregelung auf neuronale Netzwerke . . . . .	37
3.4.1 Definition der Schaltfunktion . . . . .	38

3.4.2	Herleitung des Stellgesetzes . . . . .	40
3.5	Darstellung neuronaler Netzwerke im Gleitzustand . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Flugsimulation und Reglerimplementierung</b>	<b>49</b>
4.1	Nichtlineare Zustandsgleichungen der Flugzeugbewegung . . . . .	50
4.2	Modellannahmen und Umsetzung der Regelungsverfahren . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Modellfreie neuronale Regelung</b>	<b>55</b>
5.1	Lernen innerhalb eines Regelkreises . . . . .	56
5.2	Aufbau des modellfreien neuronalen Flugreglers . . . . .	57
5.2.1	Wahl der Regelgröße zur Ermittlung des Lernsignals . . . . .	60
5.2.2	Auslegung des neuronalen Reglers . . . . .	62
5.2.3	Auslegung des neuronalen Beobachters . . . . .	64
5.2.4	Beschreibung des Referenzmodells . . . . .	66
5.3	Erweiterung des Regelkreises . . . . .	67
5.3.1	Stabilitätsbetrachtung nach Ljapunow . . . . .	69
5.4	Implementierung des Vorwissens . . . . .	71
5.4.1	Bewertung des statistischen Trainings . . . . .	73
5.4.2	Bewertung des Reglertrainings . . . . .	75
5.4.3	Bewertung des Beobachtertrainings . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Nichtlineare dynamische Inversion</b>	<b>79</b>
6.1	Grundprinzip der dynamischen Inversion . . . . .	80
6.1.1	Nichtlineare Zustandstransformation . . . . .	82
6.1.2	Linearisierende Zustandsrückführung . . . . .	84
6.1.3	Interne Dynamik des Regelkreises . . . . .	86
6.1.4	Referenzmodelle . . . . .	87
6.1.5	Fehlerdynamik und linearer Regler . . . . .	89
6.2	Dynamische Beschränkung der Ersatzregelgrößen . . . . .	93
6.3	Erweiterung durch neuronale Netzwerke . . . . .	96
6.3.1	Fehlerdynamik der erweiterten Reglerarchitektur . . . . .	98
6.3.2	Stabilitätsbetrachtung des erweiterten Systems . . . . .	103
6.3.3	Erweiterung mit dem Gleitzustandslernverfahren . . . . .	105
6.4	Umsetzung der Regelungsstrategie . . . . .	109
6.4.1	Anwendung auf die Rotationsdynamik . . . . .	111
6.4.2	Anwendung auf die Lageregelung . . . . .	115
6.4.3	Anwendung auf die Bahndynamik und Bahnvorgabe . . . . .	118
6.4.4	Steuerflächenzuweisung . . . . .	121
6.5	Parameterwahl für das Gesamtsystem . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Ausgewählte Simulationsergebnisse</b>	<b>127</b>
7.1	Vergleich der Regelungsansätze . . . . .	128

---

7.2 Einfluss der Lernverfahren auf die dynamische Inversion . . . . .	135
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
8.1 Zukünftige Forschungsansätze . . . . .	155
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>A Anhang</b>	<b>167</b>