
Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Ehrenerklärung	VII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Nomenklatur	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund der Dissertation	1
1.2 Überblick über die Gliederung der Dissertation	4
2 Spurregelung von Flurförderzeugen	7
2.1 Prinzip der automatischen Fahrzeugführung	7
2.2 Formulierung der Problemstellung	9
3 Stand der Wissenschaft und Technik	13
3.1 Automatisierung in der Intralogistik	13
3.2 Regelungskonzepte zur Spurregelung	16
3.3 Analyse und Bewertung existierender Lösungsansätze	19
3.4 Präzisierung des Gegenstandes der Dissertation	24
3.4.1 Wesentlicher Beitrag der vorliegenden Dissertation	24
3.4.2 Anforderungen	25
3.4.3 Methoden zur Erprobung	26
4 Methodische Ansätze und Entwicklung der Regelstreckenmodelle	31
4.1 Methodische Ansätze	31
4.1.1 Grundlagen für die betrachteten Ansätze	31
4.1.2 Methodischer Ansatz der indirekten neuronalen Regelung	34
4.1.3 Methodischer Ansatz der direkten neuronalen Regelung	38
4.2 Anforderung an die Modellbildung sowie Festlegung der Zustands-, Eingangs- und Ausgangsgrößen	47
4.3 Entwicklung eines linearen Regelstreckenmodells	51
4.3.1 Herleitung des linearen Regelstreckenmodells	51
4.3.2 Experimentelle Validierung des linearen Einspurmodells	55
4.3.3 Analyse des linearen Regelstreckenmodells	58
4.4 Entwicklung eines nichtlinearen Regelstreckenmodells	62
4.4.1 Herleitung des nichtlinearen Regelstreckenmodells	63
4.4.2 Experimentelle Validierung des nichtlinearen Einspurmodells	65
	IX

INHALTSVERZEICHNIS

5 Konzept der direkten neuronalen Regelung zur querdynamischen Fahrzeugführung von Flurförderzeugen	69
5.1 Klassischer Vergleichsregler - Zustandsregler durch Optimierung	69
5.1.1 Struktur des Zustandsreglers	69
5.1.2 Entwurf der Zustandsrückführung	70
5.2 Konzept der direkten neuronalen Regelung in Analogie zum klassischen Vergleichsregler	72
5.2.1 Struktur des neuronalen Regelungskonzepts	72
5.2.2 Erste Trainingsphase des neuronalen Regelungskonzepts	78
5.2.3 Zweite Trainingsphase und Erprobung des neuronalen Regelungskonzepts	81
5.3 Untersuchung der Adoptionsfähigkeit des Konzepts der direkten neuronalen Regelung an verschiedene Ausführungsvarianten von Flurförderzeugen	84
5.3.1 Adaption an eine kleinere Ausführungsvariante	84
5.3.2 Adaption an eine größere Ausführungsvariante	86
5.4 Untersuchung der Adoptionsfähigkeit des Konzepts der direkten neuronalen Regelung an verschiedene Beladungszustände	88
5.4.1 Adaption an einen Beladungszustand mit definierter Zuladung	89
6 Erweiterungen des Konzepts der direkten neuronalen Regelung	93
6.1 Erweiterung des Konzepts der direkten neuronalen Regelung zur gezielten Berücksichtigung der Fahrzeuggeschwindigkeit	93
6.1.1 Struktur des erweiterten Regelungskonzepts	93
6.1.2 Erste Trainingsphase des erweiterten Regelungskonzepts	96
6.1.3 Erprobung des erweiterten Regelungskonzepts	98
6.2 Erweiterung des Konzepts der direkten neuronalen Regelung zur Kompen-sation von Störgrößen	100
6.2.1 Struktur des erweiterten Regelungskonzepts	100
6.2.2 Erste Trainingsphase des erweiterten Regelungskonzepts	103
6.2.3 Erprobung des erweiterten Regelungskonzepts	103
6.3 Erweiterung des Konzepts der direkten neuronalen Regelung zur Kompen-sation von Störgrößen im gesamten Geschwindigkeitsbereich von Flurförderzeugen	105
6.3.1 Struktur des erweiterten Regelungskonzepts	105
6.3.2 Erste Trainingsphase des erweiterten Regelungskonzepts	106
6.3.3 Erprobung des erweiterten Regelungskonzepts	108
7 Modellbasierte Prädiktive Regelung mit Multi-Modell-Ansatz und KI-gestützter Modellauswahl	113
7.1 Klassischer Vergleichsregler - Modellbasierte Prädiktive Regelung	113
7.1.1 Struktur der Modellbasierten Prädiktiven Regelung	113
7.1.2 Entwurf der Modellbasierten Prädiktiven Regelung	114
7.2 KI-basiertes Regelungskonzept zur Detektion der Ausführungsvariante	117
7.2.1 Struktur des KI-basierten Regelungskonzepts	117
7.2.2 Entwicklung eines KI-gestützten Ansatzes zur Modellauswahl	117
7.2.3 Auslegung des KI-basierten Regelungskonzepts	120
7.2.4 Erprobung und Vergleich der Regelungskonzepte	121
7.3 KI-basiertes Regelungskonzept zur Detektion des Beladungszustands	128
7.3.1 Struktur des KI-basierten Regelungskonzepts	128

INHALTSVERZEICHNIS

7.3.2	Entwicklung eines Ansatzes zur KI-gestützten Detektion des Beladungszustands	128
7.3.3	Auslegung des KI-basierten Regelungskonzepts	130
7.3.4	Erprobung und Vergleich der Regelungskonzepte	131
8	Vergleich der vorgestellten neuronalen Regelungskonzepte und experimentelle Validierung der Ergebnisse	135
8.1	Erprobung und Vergleich der vorgestellten Regelungskonzepte	135
8.2	Untersuchung der Adoptionsfähigkeit der Regelungskonzepte an verschiedene Ausführungsvarianten	139
8.2.1	Adaption an eine kleinere Ausführungsvariante - Linde E16	139
8.2.2	Adaption an eine größere Ausführungsvariante - Linde E80	141
8.3	Untersuchung der Adoptionsfähigkeit an verschiedene Beladungszustände .	143
8.3.1	Adaption an einen Beladungszustand mit definierter Zuladung	144
8.4	Experimentelle Validierung der Ergebnisse	146
8.4.1	Struktur des Fahrzeugführungssystems	146
8.4.2	Experimentelle Validierung des Zustandsreglers durch Optimierung .	147
8.4.3	Experimentelle Validierung des Konzepts der direkten neuronalen Regelung	150
8.4.4	Ausblick auf die experimentelle Durchführung des Online-Trainings .	153
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
Literaturverzeichnis		160
Anhang		176
A	Ergänzungen zu den Streckenmodellen und den Modellparametern	177
A.1	Diskretisierung des linearen Regelstreckenmodells	177
A.2	Ergänzungen zur Analyse des linearen Regelstreckenmodells	178
A.3	Ergänzungen zur Entwicklung des nichtlinearen Regelstreckenmodells	179
A.4	Identifikation der Modellparameter	182
A.5	Ergänzungen zur Validierung der Regelstreckenmodelle	189
B	Regelungs- und systemtheoretische Grundlagen	191
B.1	Definition wichtiger Normen	191
B.2	Ergänzungen zur Zustandsregelung	191
B.3	Ergänzungen zur Modellbasierten Prädiktiven Regelung	193
C	Ergänzungen zu den neuronalen Regelungskonzepten	197
C.1	Definition der Hyperparameter der direkten neuronalen Regelung	197
C.2	Ergänzungen zu den Aktivierungsfunktionen der Klassifikatoren	200
C.3	Erprobung der Klassifikatoren der indirekten neuronalen Regelung	201
C.4	Zweite Trainingsphase der direkten neuronalen Regelung	205
C.5	Erste Trainingsphase der direkten neuronalen Regelung zur experimentellen Validierung	211
C.6	Experimentelle Validierung ausgewählter Regelungskonzepte	212
D	Generierung synthetischer Trainingsdaten	215
E	Lebenslauf	219