

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Ehrenerklärung</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund der Dissertation . . . . .	1
1.2 Überblick über die Gliederung der Dissertation . . . . .	4
<b>2 Spurregelung von Flurförderzeugen</b>	<b>7</b>
2.1 Prinzip der automatischen Fahrzeugführung . . . . .	7
2.2 Formulierung der Problemstellung . . . . .	9
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>13</b>
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
<b>4 Methodische Ansätze und Entwicklung der Regelstreckenmodelle</b>	<b>31</b>
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
	<b>IX</b>

<b>5</b>	<b>Konzept der direkten neuronalen Regelung zur querdynamischen Fahrzeugführung von Flurförderzeugen</b>	<b>69</b>
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 Adaptionfähigkeit 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 Adaptionfähigkeit des Konzepts der direkten neuronalen Regelung an verschiedene Beladungszustände . . . . .	88
5.4.1	Adaption an einen Beladungszustand mit definierter Zuladung . . .	89
<b>6</b>	<b>Erweiterungen des Konzepts der direkten neuronalen Regelung</b>	<b>93</b>
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 Kompensation 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 Kompensation 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
<b>7</b>	<b>Modellbasierte Prädiktive Regelung mit Multi-Modell-Ansatz und KI-gestützter Modellauswahl</b>	<b>113</b>
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
<b>8</b>	<b>Vergleich der vorgestellten neuronalen Regelungskonzepte und experimentelle Validierung der Ergebnisse</b>	<b>135</b>
8.1	Erprobung und Vergleich der vorgestellten Regelungskonzepte . . . . .	135
8.2	Untersuchung der Adaptionfähigkeit 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 Adaptionfähigkeit 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
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>160</b>
	<b>Anhang</b>	<b>176</b>
<b>A</b>	<b>Ergänzungen zu den Streckenmodellen und den Modellparametern</b>	<b>177</b>
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>B</b>	<b>Regelungs- und systemtheoretische Grundlagen</b>	<b>191</b>
B.1	Definition wichtiger Normen . . . . .	191
B.2	Ergänzungen zur Zustandsregelung . . . . .	191
B.3	Ergänzungen zur Modellbasierten Prädiktiven Regelung . . . . .	193
<b>C</b>	<b>Ergänzungen zu den neuronalen Regelungskonzepten</b>	<b>197</b>
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
<b>D</b>	<b>Generierung synthetischer Trainingsdaten</b>	<b>215</b>
<b>E</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>219</b>