
Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Stand der Technik	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit	3
1.2.1	Ziele der Arbeit	4
1.2.2	Aufbau der Arbeit	5
1.3	Stand der Technik	7
1.3.1	Historische Entwicklung des automatischen Fahrens	7
1.3.2	Historische Entwicklung von künstlicher Intelligenz und neuronalen Netzwerken	11
1.3.3	Lernende Regelungsansätze im Kontext des automatischen Fahrens	17
1.3.4	Einordnung der durchgeführten Untersuchungen in den Stand der Technik	20
2	Fahrzeugtechnische Grundlagen	23
2.1	Fahrzeugmodellierung	28
2.2	Das lineare Einspurmodell	29
2.3	Das erweiterte Einspurmodell	33
2.3.1	Das Wankmodell	33
2.3.2	Das nichtlineare Einspurmodell	35
2.3.3	Reifenmodelle	36
2.3.4	Annäherung des Übertragungsverhaltens der Regelstrecke	40

3	Theorie künstlicher neuronaler Netzwerke	43
3.1	Biologische Neuronen	44
3.2	Abstrahierte Neuronen	46
3.2.1	McCulloch-Pitts-Zelle	47
3.2.2	Gewichtete Netzwerke	49
3.3	Mehrschichtige Netzwerke	50
3.3.1	Das Multilayer Perceptron (MLP)	50
3.3.2	Aktivierungsfunktionen	53
3.4	Lernen in künstlichen neuronalen Netzwerken	62
3.4.1	Klassifizierung von Lernalgorithmen	63
3.4.2	Der Backpropagations-Algorithmus	68
3.4.3	Trainings- / Lernverfahren	77
4	Adaptive Fahrdynamikregelung	85
4.1	Anforderungen an den adaptiven Regler und Motivation der hybriden Regelungsarchitektur	86
4.2	Adaptive Querdynamikregelung	90
4.2.1	Kaskadisch aufgebauter Querdynamikregler mit invertiertem Modell der Regelstrecke	91
4.2.2	Umsetzung des Basisreglers	93
4.2.3	Erweiterung des Basisreglers um neuronale Netzwerke	97
4.2.4	Betrachtung des invertierten Modells der Regelstrecke	101
4.3	Längsdynamikregelung	102
5	Simulationen als Grundlage für Fahrversuche	105
5.1	Aufbau der Simulationsumgebung zur Bewertung der untersuchten Fahrdynamikregelungskonzepte	106
5.2	Validierung der Simulationsumgebung	109
5.2.1	Linearer Betriebsbereich	111
5.2.2	Nichtlinearer Betriebsbereich	113
5.3	Integration des künstlichen neuronalen Netzwerkes	115
5.3.1	Querdynamikregelung ohne künstliches neuronales Netzwerk	117
5.3.2	Querdynamikregelung mit integriertem neuronalen Netzwerk	118

6	Effekte auf die Adaptionsgeschwindigkeit des KNN im geschlossenen Regelkreis	125
6.1	Einfluss unterschiedlicher Trainingsverfahren auf das neuronale Netzwerk im geschlossenen Regelkreis	126
6.1.1	Auswahl geeigneter Hyperparameter	128
6.2	Einfluss unterschiedlicher Aktivierungsfunktionen auf die Adaptionsgeschwindigkeit	151
6.3	Einfluss der Netzwerktopologie und des Trainingsverfahrens auf die Echtzeitfähigkeit des Netzwerktrainings	156
6.4	Einfluss von Gewichtsinitialisierung und Netzwerktopologie auf die Adaptionsgeschwindigkeit des KNN	159
7	Langzeitstabilität des neuronalen Netzwerkes im geschlossenen Regelkreis	167
7.1	Einfluss von Lernrate, Trainingsverfahren und Fehlerschranken auf die Langzeitstabilität des neuronalen Netzwerkes im geschlossenen Regelkreis	170
7.2	Einfluss von Eingangsnormalisierung auf die neuronal gestützte Fahrdynamikregelung	176
7.3	Einfluss von Regularisierung der Netzwerkgewichte auf die neuronal gestützte Fahrdynamikregelung	181
8	Generalisierbarkeit bisheriger Erkenntnisse	189
8.1	Fehler in Folge hoher Dynamik und Annäherung an die Kraftschlussgrenzen	190
8.2	Lernen auf Strecken mit komplexer Streckengeometrie	195
8.3	Adaptive Fahrdynamikregelung in fehlerbehafteten Systemzuständen	201
8.3.1	Fehler aus unzureichender Systemidentifikation	201
8.3.2	Sprunghaft aufgeschaltete Fehler	206
9	Auswertung der Fahrversuche	215
9.1	Versuchsträger und Messtechnik	216
9.2	Fahrversuche auf Hoch- und Niedrigreibwert	218
9.2.1	Einfache Streckengeometrie und unterschiedliche Dynamikbereiche	218
9.2.2	Langzeitstabilität des neuronalen Netzwerkes bei kontinuierlich aufgeschalteten Systemstörungen	226

9.3	Experimente zum Nachweis des robusten Betriebs des adaptiven Reglers	244
9.3.1	Experimente auf Niedrigreibwert	244
9.3.2	Applikation der adaptiven Regelstrategie auf Rennstrecken	251
9.3.3	Applikation des neuronalen Netzwerkes in einer abweichenden Regelstrategie	256
10	Zusammenfassung und Ausblick	265
	Literaturverzeichnis	271