

---

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Stand der Technik . . . . .	4
1.3 Ziele der Arbeit . . . . .	19
1.4 Vorgehensweise und Aufbau . . . . .	22
<b>2 Grundlagen</b>	<b>24</b>
2.1 Modellprädiktive Regelung (MPC) . . . . .	24
2.1.1 Prinzip der MPC . . . . .	24
2.1.2 Sollwertregelung mittels linearer MPC . . . . .	26
2.1.3 Erweiterung auf nichtlineare MPC . . . . .	30
2.2 Experimentelle Modellbildung . . . . .	31
2.2.1 Lineare Modellidentifikation nach dem ARMAX-Verfahren . . . . .	33
2.2.2 Modellierung mittels mehrerer linearer Modelle . . . . .	34
2.2.3 Künstliche neuronale Netze . . . . .	35
<b>3 Prädiktionsmodell auf Basis mehrschichtiger Perzeptrone (MLP)</b>	<b>44</b>
3.1 Datengrundlage . . . . .	47
3.2 Geeignete Netzeingänge . . . . .	49
3.3 Netzstruktur . . . . .	63
3.3.1 Hyperparameteroptimierung mittels Bayes'scher Optimierung . . . . .	63
3.3.2 Optimierter Ein-Schritt-Prädiktor . . . . .	65
3.4 Weitere Ansätze für die Prädiktion . . . . .	69
3.4.1 Lineares gesamtzeitliches Modell . . . . .	70
3.4.2 Mehrere lineare Modelle . . . . .	70
3.4.3 Physikalisches Modell . . . . .	72
3.5 Vergleich des optimierten MLP-Modells mit weiteren Modellen über einen Prädiktionshorizont . . . . .	74
<b>4 Positions-MPC mit neuronalem Multimodell-Ansatz</b>	<b>77</b>

4.1	MLP-Modellansätze für die Anwendung in der MPC . . . . .	77
4.1.1	Wiederholtes Anwenden der Ein-Schritt-Prädiktion . . . . .	77
4.1.2	Einheitsmodell-Ansatz: Ein Modell für alle Prädiktionsschritte .	79
4.1.3	Multimodell-Ansatz: Ein Modell pro Prädiktionsschritt . . . .	82
4.1.4	Vergleich der MLP-Ansätze für die Prädiktion . . . . .	85
4.2	Nichtlineare Optimierung mit neuronalem Multimodell . . . . .	87
4.2.1	Zusammensetzung des Kostenfunktional und Aufbau des Opti- mierungsproblems . . . . .	87
4.2.2	Analytische Berechnung der Gradienten für effiziente nichtlineare Optimierung . . . . .	91
4.2.3	Umsetzung von Geschwindigkeitsbeschränkungen . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Simulationsergebnisse</b>	<b>95</b>
5.1	Beschreibung des nichtlinearen Streckenmodells . . . . .	95
5.2	Bewertung der Längspositionsregelung . . . . .	97
5.3	Simulation der Szenarien . . . . .	99
5.3.1	Szenario 1: Langsamfahrt . . . . .	101
5.3.2	Szenario 2: Fahrt mit dynamischen Beschleunigungen . . . . .	106
5.3.3	Szenario 3: Fahrt mit höheren Geschwindigkeiten und Geschwin- digkeitsbegrenzung . . . . .	107
5.3.4	Szenario 4: Dynamische Stadtfahrt . . . . .	110
5.4	Anmerkungen zur Echtzeitfähigkeit . . . . .	112
5.5	Vergleich mit weiteren Regelansätzen . . . . .	113
5.6	Zusammenfassung und erweiterte Diskussion der Simulationsergebnisse	121
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>124</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>129</b>
A.1	Ergänzende Tabellen . . . . .	129
A.2	Ergänzende Abbildungen . . . . .	130
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>136</b>