

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Thomas Winsel,  
Kassel

Nr. 513

## Stabile neuronale Prozessmodelle

Automatisierte Generierung  
echtzeitfähiger Modelle  
zur Nachbildung des  
dynamischen Verhaltens von  
Verbrennungsmotoren

RUK<sup>00</sup>

HLuHB Darmstadt



15462116

**VDI Verlag**

# Inhaltsverzeichnis

## Auswahl verwendeter Abkürzungen, Variablen und Parameter VIII

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Technik	4
1.2	Ziele der Arbeit	5
<b>2</b>	<b>Nachbildung des quasistationären Verhaltens nichtlinearer Prozesse mit neuronalen Netzen</b>	<b>7</b>
2.1	Kriterien zur Eingangsauswahl bei ungenau bekannten Prozessen	8
2.1.1	Eingangsauswahl durch Interpretation diskreter Lipschitz-Quotienten	8
2.1.2	Beschreibung des Verfahrens	9
2.1.3	Lipschitz-Analyse zur statischen Drehmoment-Nachbildung	10
2.2	Neuronale Netze zur statischen Funktionsapproximation	12
2.2.1	Multi-Layer-Perceptron (MLP)	13
2.2.2	Radiale Basisfunktionen (RBF)-Netz	14
2.2.3	Interpolierte lokale, lineare Modelle (LLM)	16
2.2.4	Interpolations- und Extrapolationsverhalten von Polynom-, MLP-, RBF- und LLM-Approximatoren	17
2.2.5	Nichtlineare Lernverfahren	19
2.3	Dreischichtige MLP zur Funktionsapproximation	21
2.3.1	Approximationsfähigkeit dreischichtiger MLP	22
2.3.2	Automatisierte Ermittlung einer optimalen Neuronenanzahl in der verdeckten Schicht	23
2.3.3	Aufprägung eines gewünschten Interpolations-/Extrapolationsverhaltens	24
2.4	Lernverfahren für $(1 N 1)$ -MLP mit interpretierbaren Wichtungen	27
2.4.1	Interpretierbarkeit versus Approximationsfähigkeit	27
2.4.2	Aufbau einer interpretierbaren, neuronalen MLP-Struktur (WIN-MLP) zur Nachbildung statischer nichtlinearer Funktionen	28

	31
2.5 <i>Anwendung: MLP zur Nachbildung quasistationärer Motorkennfelder</i> . . . . .	31
2.5.1 Stand der Technik: Echtzeitfähige Motormodelle . . . . .	31
2.5.2 Gesamtstruktur eines Motormodells . . . . .	33
2.5.3 Nachbildung des Drehmoments im Schleppbetrieb . . . . .	36
2.5.4 Nachbildung des indizierten Drehmoments . . . . .	41
<b>3 Nachbildung des dynamischen Verhaltens nichtlinearer Prozesse mit rekurrenten neuronalen Netzen</b> . . . . .	<b>52</b>
3.1 Voraussetzung an den dynamischen Prozess . . . . .	53
3.2 MLP mit internen dynamischen Erweiterungen $\Rightarrow$ RNN . . . . .	55
3.2.1 Modellstruktur eines RNN . . . . .	55
3.2.2 RNN-Approximationsfähigkeit . . . . .	56
3.2.3 RNN-Lernverfahren . . . . .	57
3.2.4 Simulationsstabilität eines RNN . . . . .	57
3.3 MLP mit externen dynamischen Erweiterungen $\Rightarrow$ TDNN . . . . .	60
3.3.1 Modellstruktur eines TDNN-MLP . . . . .	60
3.3.2 TDNN-Lernverfahren in seriell/paralleler oder in paralleler Modellanordnung . . . . .	61
3.3.3 Approximationsfähigkeit eines TDNN-MLP-Simulationsmodells . . . . .	63
3.3.4 Exponentielle Simulationsstabilität des TDNN-Ausgangs . . . . .	66
3.4 TDNN-MLP in erweiterter Zustandsdarstellung . . . . .	71
3.5 Globale gleichmäßig asymptotische Simulationsstabilität des TDNN-MLP . . . . .	77
3.5.1 Existenz einer eindeutigen Ruhelage des TDNN-MLP . . . . .	77
3.5.2 Globale asymptotische Stabilität der Ruhelage nach Lyapunov . . . . .	79
3.6 Zusammenfassender Vergleich der Existenz- und Stabilitätskriterien . . . . .	84
3.7 Modifiziertes LM-Lernverfahren für stabile TDNN-MLP . . . . .	86
3.7.1 Regularisierung des LM-Verfahrens . . . . .	88
3.7.2 Adaption der Regularisierung im Training . . . . .	89
3.8 <i>Anwendung: Stabile TDNN-MLP zur Nachbildung des dynamischen Motorverhaltens</i> . . . . .	92
3.8.1 Ermittlung transientser Messdaten am Motorenprüfstand . . . . .	92
3.8.2 Nachbildung des Luftpfades bzw. des Druckverlaufs im Saugrohr . . . . .	96
3.8.3 Nachbildung des Kraftstoffpfades bzw. der Verläufe des Luft-/Kraftstoffverhältnisses $\lambda$ . . . . .	100
3.8.4 Nachbildung des inneren Motordrehmomentes an der Kurbelwelle . . . . .	104

---

<b>4</b>	<b>Nachbildung nichtlinearer, zyklischer Prozesse mit neuronalen Netzen</b>	<b>114</b>
4.1	Motivation einer Zylinderdruck-Simulation . . . . .	114
4.2	Konzept der automatisierten Generierung eines Simulationsmodells zur zeitlich hochauflösenden Nachbildung zyklischer, nichtlinearer Prozesse . . . . .	115
4.3	Automatisierte WIN-MLP-Merkmalsextraktion im Arbeitszyklus eines typischen Zylinderdruckverlaufs . . . . .	117
4.4	Nachbildung der Merkmalsfolgen mit stabilen TDNN-MLP . . . . .	121
4.5	<i>Anwendung:</i> Hochauflösende Nachbildung des Zylinderdruckverlaufs im Ottomotor . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Beweise</b>	<b>130</b>
A.1	Beweis der Behauptung 3.1.1 . . . . .	130
A.2	Beweis der Behauptung 3.2.1 . . . . .	131
A.3	Beweis der Behauptung 3.3.1 . . . . .	133
A.4	Direkte Lyapunov-Methode zum Stabilitätsnachweis . . . . .	135
A.4.1	Asymptotische Stabilität . . . . .	135
A.4.2	Exponentielle Stabilität . . . . .	135
<b>B</b>	<b>Definitionen</b>	<b>136</b>
B.1	Matrizenoperator $\text{diag}(\star)$ . . . . .	136
B.2	Auswahl verwendeter Vektor- und Matrizennormen . . . . .	138
B.3	Auswahl verwendeter Fehlermaße . . . . .	138
B.4	Auswahl verwendeter Standard-Matrizen . . . . .	139
<b>C</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>140</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>