

# **Einsatz adaptiver Lernverfahren zur Regelung industrieller Verbrennungsprozesse**

Frank-Florian Steege



Universitätsverlag Ilmenau  
2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Anspruch der Arbeit . . . . .	4
1.2. Gliederung . . . . .	6
<b>2. Besonderheiten industrieller Verbrennungsprozesse</b>	<b>9</b>
2.1. Müllverbrennungsanlagen . . . . .	11
2.1.1. Aufbau des Verbrennungsraumes . . . . .	15
2.1.2. Konventionelle Regelung der Verbrennung . . . . .	19
2.1.3. Nachteile der konventionellen Regelung . . . . .	25
2.2. Zementwerke . . . . .	38
2.3. Durchführung von Testreihen in Anlagen . . . . .	42
2.4. Fazit . . . . .	44
<b>3. Selbstlernende Verfahren zur Regelung von Prozessen</b>	<b>45</b>
3.1. Einordnung lernfähiger und adaptiver Verfahren . . . . .	47
3.2. Anwendungsgebiete in der Prozessführung . . . . .	49
3.3. Adaptive Verfahren . . . . .	52
3.3.1. Anpassung der Reglerparameter . . . . .	52
3.3.2. Anpassung der Reglereingabe . . . . .	56
3.4. Lernfähige Verfahren . . . . .	60
3.4.1. Multi-Layer Perceptron . . . . .	63
3.4.2. Neural Fitted Q-Iteration . . . . .	66
3.4.3. Lineare Regression . . . . .	70
3.5. Probleme beim Training selbstlernender Modelle . . . . .	71
3.5.1. Verrauschte Messdaten . . . . .	72
3.5.2. Veränderliche Prozessbedingungen . . . . .	73

---

3.5.3.	Sicherheitskriterien und Daten geregelter Prozesse . . . . .	75
3.6.	Fazit . . . . .	76
<b>4.</b>	<b>Umgang mit schlechter Datenqualität</b>	<b>77</b>
4.1.	Verrauschte Daten . . . . .	78
4.2.	Abschätzung der möglichen Approximationsgüte . . . . .	82
4.2.1.	Der Gammatest zur Abschätzung des Rauschens . . . . .	85
4.2.2.	Versuche mit künstlichen Daten . . . . .	85
4.2.3.	Versuche mit realen Daten . . . . .	90
4.3.	Auswirkungen von Rauschen auf den Lernvorgang . . . . .	94
4.3.1.	Datenauswahl unter Beachtung von Rauschen . . . . .	97
4.3.2.	Verfahren zur Ausreißererkenntnis . . . . .	101
4.3.3.	Robuste Trainingsverfahren . . . . .	111
4.3.4.	Kombination robuster Trainings und Datenvorverarbeitung . . . . .	116
4.4.	Fazit . . . . .	119
<b>5.</b>	<b>Einfluss veränderlicher Systembedingungen</b>	<b>121</b>
5.1.	Adaptivität - Überblick . . . . .	122
5.2.	TestszENARIO . . . . .	129
5.3.	Adaptivität bei Verwendung eines einzelnen Modells . . . . .	134
5.3.1.	Datenakkumulation . . . . .	134
5.3.2.	Bereichsauswahl . . . . .	137
5.3.3.	Bereichsauswahl mit Kontrolle . . . . .	139
5.3.4.	Ergebnisse auf künstlichen Daten . . . . .	142
5.3.5.	Ergebnisse auf realen Daten aus Zementwerken . . . . .	147
5.4.	Adaptivität bei Verwendung eines Ensembles von Netzen . . . . .	151
5.4.1.	Ensemble Selection . . . . .	152
5.4.2.	Ensemble Weighting . . . . .	155
5.4.3.	Ergebnisse auf künstlichen Daten . . . . .	157
5.4.4.	Ergebnisse auf realen Daten aus Zementwerken . . . . .	158
5.5.	Übertragbarkeit auf Müllverbrennungsanlagen . . . . .	162
5.6.	Fazit . . . . .	164

<b>6. Funktionale Sicherheit des lernenden Systems</b>	<b>167</b>
6.1. Prozessregelung und funktionale Sicherheit . . . . .	169
6.1.1. Prozessmodell als Eingabe des Reglers . . . . .	175
6.1.2. Lernfähige Regler . . . . .	177
6.2. Daten geregelter Prozesse und Expertenwissen . . . . .	179
6.2.1. Lernen auf Daten eines geregelten Prozesses . . . . .	180
6.2.2. Sichere Strategie am Cart-Pole-Simulator . . . . .	189
6.2.3. Sichere Strategie in einer MVA . . . . .	196
6.2.4. Sichere Strategie in einem Zementwerk . . . . .	202
6.3. Seltene Zustände und Expertenwissen . . . . .	208
6.4. Untersuchung der Regelstrategie eines Modells . . . . .	214
6.4.1. Einfluss der Stellgröße auf Zielgrößen . . . . .	216
6.4.2. Wirkrichtung der Stellgröße . . . . .	219
6.5. Ensembles . . . . .	222
6.6. Fazit . . . . .	227
<b>7. Praktische Untersuchung der selbstlernenden Regelung</b>	<b>229</b>
7.1. Model-Predictive Control und Softsensor . . . . .	232
7.1.1. Prozessmodelle ohne direkten Regler . . . . .	232
7.1.2. Prozessmodelle mit direktem konv. Regler . . . . .	234
7.2. Ersetzung konventioneller Regler durch NFQ-Regler . . . . .	238
7.2.1. Praktische Untersuchungen MVA 1 - Zuteiler . . . . .	240
7.2.2. Praktische Untersuchungen MVA 1 - Rost . . . . .	241
7.2.3. Praktische Untersuchungen MVA 1 - Zuteiler und Rost . . . . .	243
7.2.4. Praktische Untersuchungen Zement - SNCR . . . . .	245
7.3. Parametrisierungsaufwand selbstlernender System . . . . .	248
7.3.1. Adaptive Modelle mit externer Stellstrategie . . . . .	249
7.3.2. Adaptive Modelle mit interner Stellstrategie . . . . .	252
7.3.3. Hinweise zur Methodenauswahl . . . . .	254
7.4. Fazit . . . . .	256
<b>8. Zusammenfassung</b>	<b>259</b>

<b>9. Ausblick</b>	<b>265</b>
9.1. Parametrisierung und Überwachung mittels HMI . . . . .	266
9.1.1. Online Priorisierung von Regelgrößen . . . . .	266
9.1.2. Darstellung aktiver und inaktiver Modelle . . . . .	269
9.1.3. Eingabemöglichkeit für Expertenwissen . . . . .	269
9.2. Übertragbarkeit auf andere Basismodelle . . . . .	273
9.2.1. Lineare Regressionsmodelle . . . . .	273
9.2.2. Bayes'sche Modelle . . . . .	274
9.2.3. Clusteranalyse . . . . .	275
<b>A. Merkmalsauswahl</b>	<b>277</b>
A.1. Totzeit und Verzögerung . . . . .	279
A.2. Mutual Information . . . . .	282
A.3. Residual Mutual Information . . . . .	285
A.4. Automatische Problem Dekomposition . . . . .	288
<b>B. Detaillierte Ergebnisse und Verfahrensparameter</b>	<b>293</b>
B.1. Müllverbrennungsanlagen und Zementwerke . . . . .	293
B.2. Cartpole-Versuchsumgebung . . . . .	294
B.2.1. Physik und Parameter des Simulators . . . . .	294
B.2.2. Versuche zum Lernen auf geregelten Daten . . . . .	299
B.3. Umgang mit schlechter Datenqualität . . . . .	301
B.3.1. Gammatest-Pseudocode . . . . .	301
B.3.2. Abschätzung des Rauschens für verschiedene Datensätze . . . . .	302
B.3.3. Auswirkungen zusätzlicher Eingaben . . . . .	304
B.3.4. Auswirkungen der Datensatzgröße . . . . .	305
B.3.5. Filterung von Outliern . . . . .	306
B.4. Veränderliche Prozesse . . . . .	310
B.5. Sicherheit und geregelte Prozesse . . . . .	316
B.5.1. Parameter und Aufbau der Simulation . . . . .	316
B.5.2. Erweiterte Versuchsergebnisse . . . . .	317
<b>C. Verwandte Untersuchungen an Verbrennungsprozessen</b>	<b>325</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>331</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>349</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>349</b>