

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Anspruch der Arbeit	4
1.2. Gliederung	6
2. Besonderheiten industrieller Verbrennungsprozesse	9
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
3. Selbstlernende Verfahren zur Regelung von Prozessen	45
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
4. Umgang mit schlechter Datenqualität	77
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 Ausreißererkennung	101
4.3.3. Robuste Trainingsverfahren	111
4.3.4. Kombination robuster Trainings und Datenvorverarbeitung	116
4.4. Fazit	119
5. Einfluss veränderlicher Systembedingungen	121
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

6. Funktionale Sicherheit des lernenden Systems	167
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
7. Praktische Untersuchung der selbstlernenden Regelung	229
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
8. Zusammenfassung	259

9. Ausblick	265
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
A. Merkmalsauswahl	277
A.1. Totzeit und Verzögerung	279
A.2. Mutual Information	282
A.3. Residual Mutual Information	285
A.4. Automatische Problem Dekomposition	288
B. Detaillierte Ergebnisse und Verfahrensparameter	293
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 Da- tensätze	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
C. Verwandte Untersuchungen an Verbrennungsprozessen	325

Literaturverzeichnis	331
Symbolverzeichnis	349
Abkürzungsverzeichnis	349