

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 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 |
| C. Verwandte Untersuchungen an Verbrennungsprozessen | 325 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Literaturverzeichnis | 331 |
| Symbolverzeichnis | 349 |
| Abkürzungsverzeichnis | 349 |