

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Notation</b>   | <b>IX</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2 Intelligente Regelungen . . . . .                                     | 2         |
| 1.3 Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .                          | 3         |
| 1.4 Zielsetzung und Beiträge dieser Dissertation . . . . .                | 6         |
| 1.5 Beispielsysteme . . . . .   | 7         |
| 1.6 Publikationen und Patentanmeldungen . . . . .                         | 8         |
| <b>2 Grundlagen der iterativ lernenden und modellprädiktiven Regelung</b> | <b>9</b>  |
| 2.1 Iterativ lernende Regelung . . . . .                                  | 9         |
| 2.1.1 Zeitdiskrete iterativ lernende Regelung . . . . .                   | 12        |
| 2.1.2 Inversionsbasierte Entwurfsverfahren . . . . .                      | 17        |
| 2.1.3 Robustheit . . . . .  | 22        |
| 2.1.4 Vor- und Nachteile . . . . .  | 28        |
| 2.2 Modellprädiktive Regelung . . . . .                                   | 29        |
| 2.2.1 Unbeschränktes Optimierungsproblem . . . . .                        | 30        |
| 2.2.2 Beschränktes Optimierungsproblem . . . . .                          | 33        |
| 2.2.3 Robustheit . . . . .  | 35        |
| 2.2.4 Vor- und Nachteile . . . . .  | 38        |
| <b>3 Iterativ lernende modellprädiktive Regelung</b>                      | <b>39</b> |
| 3.1 Ideen und Herausforderungen . . . . .                                 | 39        |
| 3.2 Betrachtete Systemklassen . . . . .                                   | 43        |
| 3.2.1 Lineare Systeme . . . . .   | 43        |
| 3.2.2 Flache nichtlineare Systeme . . . . .                               | 45        |
| 3.2.3 Lineare Systeme mit unterlagerter flacher Dynamik . . . . .         | 46        |
| 3.2.4 Systemannahmen . . . . .  | 47        |
| 3.3 Optimierungsentwurf . . . . .   | 48        |
| 3.3.1 Konzept . . . . .   | 48        |
| 3.3.2 Kostenfunktion . . . . .  | 50        |
| 3.3.3 Reduzierter Entwurf . . . . .                                       | 52        |
| 3.3.4 Konvergenz und Lösbarkeit . . . . .                                 | 57        |
| 3.3.5 Robustheit . . . . .  | 63        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4      | Beobachterentwurf mit Störgrößenbetrachtung . . . . .             | 64         |
| 3.4.1    | Rekursive Störgrößenberechnung . . . . .                          | 64         |
| 3.4.2    | Diskreter zyklischer Beobachterentwurf . . . . .                  | 65         |
| 3.4.3    | Kontinuierlicher zyklischer Beobachterentwurf . . . . .           | 68         |
| 3.4.4    | Klassischer Störgrößenbeobachter . . . . .                        | 68         |
| 3.4.5    | Vor- und Nachteile . . . . .                                      | 69         |
| <b>4</b> | <b>Reduktion von Speicher- und Rechenbedarf</b>                   | <b>71</b>  |
| 4.1      | Ideen und Herausforderungen . . . . .                             | 71         |
| 4.2      | Entwurfsseitige Ansätze . . . . .                                 | 74         |
| 4.2.1    | Variable Abtastzeiten . . . . .                                   | 74         |
| 4.2.2    | Dynamisch fokussiertes Lernen . . . . .                           | 78         |
| 4.2.3    | Modellprädiktive iterativ lernende Regelung . . . . .             | 80         |
| 4.2.4    | Vergleich der Ansätze . . . . .                                   | 82         |
| 4.3      | Algorithmenseitige Ansätze . . . . .                              | 84         |
| 4.3.1    | Optimierungsaufbau . . . . .                                      | 84         |
| 4.3.2    | Optimierungslöser . . . . .                                       | 92         |
| <b>5</b> | <b>Robuster Entwurf am Beispiel eines Schwimmbadsystems</b>       | <b>109</b> |
| 5.1      | Modellierung . . . . .  | 109        |
| 5.1.1    | Systemaufbau . . . . .  | 109        |
| 5.1.2    | Systembeschreibung . . . . .                                      | 111        |
| 5.2      | Identifikation . . . . .  | 112        |
| 5.2.1    | Totzeitbestimmung . . . . .                                       | 112        |
| 5.2.2    | Systemdynamik . . . . .   | 112        |
| 5.2.3    | Störprofile . . . . .   | 114        |
| 5.3      | Regelungsentwurf . . . . .  | 114        |
| 5.4      | Robuste ILMPC . . . . .   | 115        |
| 5.5      | Ergebnisse . . . . .  | 118        |
| <b>6</b> | <b>Energiebasierter Entwurf am Beispiel einer Verdrängerpumpe</b> | <b>121</b> |
| 6.1      | Modellierung . . . . .  | 121        |
| 6.1.1    | Systemaufbau . . . . .  | 121        |
| 6.1.2    | Systembeschreibung . . . . .                                      | 122        |
| 6.2      | Identifikation . . . . .  | 125        |
| 6.2.1    | Identifikation der magnetischen Widerstände . . . . .             | 125        |
| 6.2.2    | Identifikation der mechanischen Parameter . . . . .               | 126        |
| 6.2.3    | Identifikation der elektrischen Parameter . . . . .               | 127        |
| 6.3      | Reglerentwurf . . . . .   | 127        |
| 6.4      | Energiebasierte ILMPC . . . . .                                   | 129        |
| 6.5      | Ergebnisse . . . . .  | 132        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>7</b> | <b>Prozesszeitenoptimierung über ILC am Beispiel einer Balancierplattform</b> | <b>135</b> |
| 7.1      | Modellierung . . . . .  | 135        |
| 7.1.1    | Systemaufbau . . . . .  | 135        |
| 7.1.2    | Systembeschreibung . . . . .  | 136        |
| 7.2      | Identifikation . . . . .  | 138        |
| 7.2.1    | Identifikation des elektrischen Teilsystems . . . . .                         | 138        |
| 7.2.2    | Identifikation des mechanischen Teilsystems . . . . .                         | 139        |
| 7.3      | Regler- und Beobachterentwurf . . . . .                                       | 139        |
| 7.4      | Prozesszeitenoptimierung . . . . .  | 142        |
| 7.4.1    | Ortsabhängige Kostenfunktion . . . . .  | 142        |
| 7.4.2    | Trajektorienberechnung . . . . .  | 143        |
| 7.4.3    | Prozesszeitenreduktion . . . . .  | 145        |
| 7.5      | Ergebnisse . . . . .  | 147        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>149</b> |
| 8.1      | Zusammenfassung . . . . .   | 149        |
| 8.2      | Ausblick . . . . .  | 152        |
| <b>A</b> | <b>Mathematische Grundlagen</b>   | <b>153</b> |
| A.1      | Normen . . . . .  | 153        |
| A.2      | Matrizen . . . . .  | 155        |
| A.3      | Mengen und Polyeder . . . . .   | 158        |
| A.3.1    | Mengen . . . . .  | 158        |
| A.3.2    | Polyeder . . . . .  | 159        |
| A.4      | Systeme und Funktionen . . . . .  | 159        |
| A.4.1    | Systeme . . . . .   | 159        |
| A.4.2    | Funktionen . . . . .  | 162        |
| A.4.3    | Optimalitätsbedingungen . . . . .   | 165        |
| A.4.4    | Problempermutation . . . . .  | 170        |
| <b>B</b> | <b>Veröffentlichungen, Patentanmeldungen und studentische Arbeiten</b>        | <b>171</b> |
| B.1      | Veröffentlichungen . . . . .  | 171        |
| B.2      | Patentanmeldungen . . . . .   | 171        |
| B.3      | Studentische Arbeiten . . . . .   | 172        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>173</b> |
|          | <b>Lebenslauf</b>   | <b>185</b> |