

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Stand der Technik | 2 |
| 1.1.1 Populationsmodelle | 2 |
| 1.1.2 Regelung von Populationen in Bioreaktoren | 4 |
| 1.1.3 Systemanalyse altersstrukturierter Populationsmodelle | 6 |
| 1.1.4 Steuerung und Regelung | 8 |
| 1.2 Aufbau, Struktur und Ziele der Arbeit | 10 |
| 2 Modellierung und Systemanalyse von Populationssystemen | 13 |
| 2.1 Modellierung altersstrukturierter Populationssysteme | 14 |
| 2.2 Bioreaktoren | 18 |
| 2.2.1 Experimenteller Aufbau und Prozessführung des Bioreaktors | 18 |
| 2.2.2 Vorbereitung einer Fermentation | 20 |
| 2.2.3 Messprinzip der Biomasse | 21 |
| 2.2.4 Regelungsziele für Populationsdynamiken in Bioreaktoren | 23 |
| 2.2.5 Struktur des Regelungskonzepts | 24 |
| 2.3 Populationsdynamik im Kontext von Bioreaktoren | 25 |
| 2.4 Systemanalyse | 28 |
| 2.4.1 Stabilisierbarkeit | 28 |
| 2.4.2 Stationäre Analyse | 31 |
| 2.4.3 Spektrale Analyse | 37 |
| 2.5 Numerische Methoden für die Simulation | 40 |
| 2.5.1 Finite-Differenzen-Verfahren | 40 |
| 2.5.2 Galerkin-Verfahren | 44 |
| 2.6 Kurzzusammenfassung | 50 |
| 3 Modellbasierter Steuerungsentwurf für lineare Populationsmodelle | 53 |
| 3.1 Herleitung eines linearen Populationsmodells | 53 |
| 3.2 Lösung des linearen Populationsmodells | 56 |
| 3.3 Inversionsbasierte Steuerung | 61 |
| 3.3.1 Entwurf der inversionsbasierten Steuerung | 61 |
| 3.3.2 Simulative Validierung | 62 |
| 3.4 Trajektoriengenerierung mit Modellregelkreis (MRK) | 68 |
| 3.5 Kurzzusammenfassung | 73 |

| | |
|---|------------|
| 4 Steuerung und Regelung von nichtlinearen Populationsmodellen | 75 |
| 4.1 Optimaler Steuerungsentwurf | 76 |
| 4.1.1 Entwurf der optimalen Steuerung | 76 |
| 4.1.2 Simulative Validierung | 80 |
| 4.2 Herleitung und Analyse des Ein-Ausgangs-Modells | 86 |
| 4.3 Inversionsbasierter Steuerungsentwurf | 98 |
| 4.3.1 Stabilität der internen Dynamik | 99 |
| 4.3.2 Herleitung der inversionsbasierten Vorsteuerung | 103 |
| 4.3.3 Simulative Validierung | 104 |
| 4.4 Nichtlineare Ausgangsregelung mit Eingangsbeschränkungen | 106 |
| 4.4.1 Entwurf der Rückführung | 106 |
| 4.4.2 Simulative Validierung | 116 |
| 4.5 Entwurf einer modellbasierten Störgrößenkompensation | 121 |
| 4.5.1 Analyse der Beobachterfehlerdynamik | 122 |
| 4.5.2 Analyse der Stabilität des geschlossenen Regelkreises | 125 |
| 4.5.3 Simulative Validierung | 131 |
| 4.6 Trajektoriengenerierung als Optimalsteuerungsproblem | 146 |
| 4.6.1 Keine Zustandsbeschränkung ist aktiv | 151 |
| 4.6.2 Zustandsbeschränkung $\Gamma_1[x]$ oder $\Gamma_2[x]$ ist aktiv | 152 |
| 4.6.3 Zustandsbeschränkung $\Gamma_3[x]$ oder $\Gamma_4[x]$ ist aktiv | 153 |
| 4.6.4 Transversalitätsbedingung | 155 |
| 4.6.5 Lösungskandidaten | 156 |
| 4.6.6 Simulative Validierung | 158 |
| 4.7 Experimentelle Validierung | 159 |
| 4.7.1 Keine intraspezifische Konkurrenz | 159 |
| 4.7.2 Berücksichtigung von intraspezifischer Konkurrenz | 163 |
| 4.8 Kurzzusammenfassung | 165 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick | 167 |
| A Experimentelle Realisierung der Verdünnungsrate | 173 |
| B Sollwerte für die Prozessführung | 177 |
| C Analyse der internen Dynamik | 179 |
| D Abschätzung der Dini-Ableitung der Funktionale W und V | 191 |
| E Experimentelle Ergebnisse für verschiedene Arbeitspunktwechsel | 193 |
| Abkürzungen | 199 |
| Symbolverzeichnis | 201 |
| Abbildungsverzeichnis | 211 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| Tabellenverzeichnis | 215 |
| Literaturverzeichnis | 217 |