

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 $\Gamma_1[\chi]$ oder $\Gamma_2[\chi]$ ist aktiv	152
4.6.3 Zustandsbeschränkung $\Gamma_3[\chi]$ oder $\Gamma_4[\chi]$ 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