

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	<i>Streptococcus thermophilus</i>	4
2.1	Starterkulturen	5
2.2	Milchsäurebakterien	5
2.3	<i>Streptococcus thermophilus</i>	7
2.3.1	Stoffwechsel von <i>Streptococcus thermophilus</i>	8
2.3.2	Vermehrung von <i>Streptococcus thermophilus</i>	10
2.4	Herstellung von <i>Streptococcus thermophilus</i> als Starterkultur . . .	12
2.4.1	Industrielle Herstellung	12
2.4.2	Fermentationsverlauf	15
2.4.3	Wichtige Kenngrößen des Starters	15
3	Experimentelle Versuchsdurchführung	18
3.1	Organismus	18
3.2	Vorkultur	19
3.3	Medium	19
3.4	Fermentationsbedingungen	21
3.5	Fermenter und Prozessumgebung	22
3.6	Online-Messdaten	24

3.6.1	pH-Messung	25
3.6.2	Laugenzugabe zum Medium	25
3.6.3	Leitfähigkeit	25
3.7	Offline-Analysen	26
3.7.1	Zucker und organische Säuren	26
3.7.2	Keimzahl	27
3.7.3	Aktivität	29
3.8	Datennachbearbeitung	31
3.8.1	Splines	31
3.8.2	Vorglätten der Messdaten	33
3.8.3	Glättung der Messdaten	34
4	Modellbildung	37
4.1	Allgemeines zur Modellbildung	37
4.2	Modellierung des Fermentationsprozesses	39
4.2.1	Bakterienwachstum	40
4.2.2	Lactoseaufnahme und Lactatproduktion	48
4.2.3	Kenngößen des Mediums	53
4.2.4	Aktivität	55
4.2.5	Gesamtmodell für den Fermentationsprozess	59
4.3	Untersuchung der Modellstruktur bei verändertem pH-Wert	61
4.3.1	Dynamische Größen	62
4.3.2	Aktivität	65
4.4	Simulationen	66
5	Parameteridentifizierung	69
5.1	Formulierung der Parameterschätzaufgabe	70

5.1.1	Gütekriterium	71
5.1.2	Messfehler	73
5.1.3	Minimierung des Gütekriteriums	76
5.2	Sensitivität, Identifizierbarkeit und Korrelation der Parameter . .	76
5.2.1	Untersuchungsmethoden	77
5.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen	83
5.3	Optimierungsalgorithmen	89
5.3.1	Globale und lokale Optimierung	91
5.3.2	Genetische Algorithmen	91
5.3.3	Downhill-Simplex-Algorithmus	97
5.3.4	Hybridbildung	102
5.4	Durchführung der Parameterschätzung	107
5.4.1	Aufstellung des Parameterschätzproblems	107
5.4.2	Diskussion der Ergebnisse der Parameterschätzung	111
5.4.3	Automatisierter Ablauf der Parameterschätzung	116
5.4.4	Parameterwerte	116
6	Modellvalidierung	119
6.1	Ergebnisse für den pH-Wert 6.0	119
6.1.1	Veränderung der Anfangslactosekonzentration	119
6.1.2	Veränderung der Inokulationsmenge	120
6.2	Ergebnisse für die pH-Werte 5.7 und 6.3	120
7	Übertragung der Methodik	132
7.1	Fed-Batch-Experimente	132
7.2	<i>Streptococcus thermophilus</i> 782	135
8	Zusammenfassung und Ausblick	144

Inhaltsverzeichnis

8.1 Zusammenfassung	144
8.2 Ausblick	147
A Liste der Experimente	149
B Beispielgleichung der Sensitivitätsfunktionen	151
Literaturverzeichnis	i