

VN 8850 K96

FORTSCHRITT-
BERICHTE

VDI

Dr.-Ing. Ulrich Kulozik, Freising

**Verfahrenstechnik
kontinuierlicher
Fermentationen**

**dargestellt am Beispiel der
Milchsäure- und Biomasse-
gewinnung im Rohrfermenter**

Reihe **17**: Biotechnik

Nr. **77**

VDI VERLAG

INHALTSVERZEICHNIS

1 Stand und Entwicklungstendenzen in der Fermentationstechnik	1
1.1 Entwicklung und systematische Einteilung kontinuierlicher Reaktionssysteme.....	1
1.2 Großtechnische Fermentationsverfahren mit kontinuierlicher Prozeßführung:	13
Einige Beispiele	
1.3 Möglichkeiten der Prozeßgestaltung kontinuierlicher Fermentationen mit	19
Zellretention	
1.3.1 Zellretention und Produktabtrennung im Zentrifugalfeld.....	20
1.3.2 Zellretention und Produktabtrennung mit Membranen.....	21
1.3.3 Zellretention durch Trägerfixierung ("Immobilisierung").....	31
1.4 Bedeutung, Zielsetzung und Grenzen kontinuierlicher Fermentationen	34
1.4.1 Operationale und technisch-apparative Aspekte.....	38
1.4.2 Zellphysiologische und mikrobiologische Aspekte.....	39
1.4.3 Ökonomische Aspekte.....	40
2 Intentionen, Konzept und Reaktorbauarten für die Fermentation in turbulenter....	42
Rohrströmung	
2.1 Charakteristische Merkmale und Eigenschaften des Rohrreaktors im	43
Vergleich zum kontinuierlichen Rührkessel	
2.2 Rohrreaktor Konzepte und -bauarten.....	46
2.3 Sauerstofftransport in aeroben Rohrreaktoren.....	50
2.3.1 Sauerstofftransport in biologischen Systemen.....	51
2.3.2 Strömungsformen in Rohrreaktoren mit Mehrphasenströmungen	53
2.3.3 Gasdispersion und Sauerstofftransfer in Rohrreaktoren ohne Einbauten.....	55
2.3.4 Gasdispersion und Sauerstofftransfer in Rohrreaktoren mit Einbauten.....	56
2.3.5 Vergleich von Rohrreaktoren mit und ohne Einbauten am Beispiel der	58
aeroben Biomassegewinnung	
2.3.6 Technische Möglichkeiten zur Realisierung von aeroben Fermentationen ...	62
im Rohrreaktor	
2.4 Rohrreaktoren für anaerobe Fermentationen.....	66
3 Verweilzeitverteilungen in kontinuierlichen Fermentationssystemen	67
3.1 Bedeutung des Verweilzeitverhaltens für biologische Prozesse.....	67
3.2 Methoden zur Messung von Verweilzeitverteilungen.....	68
3.3 Modellvorstellungen zur Beschreibung von Verweilzeitverteilungen.....	72
3.3.1 Zellenmodell.....	72
3.3.2 Axiales Dispersionsmodell	77
3.3.3 Axiales Dispersionsmodell unter Berücksichtigung	80
radialer Konzentrationsprofile	
3.3.4 Analogie von Rührkesselkaskade und Strömungsrohr	81
3.3.5 Verweilzeitverteilungen von Reaktoren mit partieller Rückführung	83

3.4	Messung der Verweilzeitverteilung der Rührkesselkaskade.....	90
3.5	Messung der Verweilzeitverteilung im Rohrreaktor	95
4	Rahmenbedingungen für die fermentative Milchsäuregewinnung.....	98
4.1	Molkeanfall, Verwertungsproblem, Umweltrelevanz.....	98
4.2	Milchsäure als Fermentationsprodukt und deren Verwendung im	99
	industriellen und klinischen Bereich	
4.3	Stoffwechsel, Transportvorgänge und Zellphysiologie der.....	101
	Milchsäurefermentation	
4.3.1	Stoffwechselwege	103
4.3.2	Regulierung der Stoffwechselaktivität.....	106
4.4	Vergleich: Fermentative und chemisch-synthetische Milchsäuregewinnung.....	108
4.5	Methoden zur Abtrennung und Reindarstellung von Milchsäure.....	109
5	Charakterisierung des Stoffumsatzes und der Zellkultur	111
5.1	Verwendete Mikroorganismenkultur	111
5.1.1	Temperaturprofil	112
5.1.2	pH-Wert-Profil	113
5.1.3	Produktprofil	114
5.1.4	Nährstoffbedarf.....	115
5.2	Nährmedienherstellung.....	116
5.3	Bestimmung von Milchsäure und Kohlenhydraten.....	117
5.3.1	Hochdruckflüssigchromatografie (HPLC)	118
5.3.2	Enzymatische Analytik	122
5.4	Biomassecharakterisierung.....	123
5.4.1	Zelltrockenmasse.....	123
5.4.2	Optische Dichte	123
5.4.3	Zellvolumenanteil in der Fermentationssuspension.....	125
5.4.4	Lebendkeimzahlbestimmung	126
5.5	Dynamische Viskosität und Dichte der Bakteriensuspension.....	127
5.6	Fermentationskenngrößen: Definition und Bedeutung.....	128
6	Milchsäurefermentation: Experimentelle Untersuchung und Optimierung des	133
	Stoffumsatzes	
6.1	Milchsäurefermentation im diskontinuierlichen Modus: Einstellung der.....	133
	Grundbedingungen und Grundlage zur kontinuierlichen Prozeßführung	
6.1.1	Versuchsanlagen und Versuchsablauf.....	134
6.1.2	Einfluß der Anfangszellkonzentration	135
6.1.3	Substratlimitierung	138
6.1.4	Produktinhibierung und Substratinhibierung.....	142
6.1.5	Diskontinuierliche Milchsäurefermentation bei hohen Zelldichten	148
6.2	Kontinuierliche Milchsäurefermentation im ideal gemischten Rührkessel.....	153
6.2.1	Versuchsanlage und Beschreibung der Versuchsdurchführung.....	153

6.2.2	Substratumsatz und Produktivität unter Variation der mittleren Verweilzeit und der Biomassekonzentration	156
6.2.3	Zellphysiologische Beschreibung des Produktivitätsverlaufs bei veränderter Verdünnungsrate	160
6.2.4	Volumetrische Produktivität im kontinuierlichen Rührkessel.....	165
6.2.5	Produktivität im kontinuierlichen Rührkessel im Vergleich zur Batchfermentation	167
6.3	Kontinuierliche Fermentation in einer Rührkesselkaskade	169
6.3.1	Versuchsanlage und experimenteller Ablauf	169
6.3.2	Substratumsatz und Produktivität unter Variation von mittlerer Verweilzeit, Substratkonzentration und Bakterienzeldichte	174
6.3.3	Vergleich der Produktivität von kontinuierlichem Rührkessel und kontinuierlicher Rührkesselkaskade	180
6.4	Schlußfolgerungen und Konsequenzen für die Übertragung des Prozesses auf den Rohrreaktor	181
6.4.1	Apparative Auslegung des Rohrreaktors.....	181
6.4.2	Technische Aspekte.....	184
6.5	Kontinuierliche Milchsäurefermentation im Rohrreaktor	187
6.5.1	Versuchsanlage und experimenteller Ablauf	187
6.5.2	Substratumsatz im Rohrfermenter	199
7	Modellierung der Fermentation unter Berücksichtigung des Verweilzeitverhaltens und der Substratumsatzkinetik	201
7.1	Reaktionskinetik des Stoffumsatzes	201
7.1.1	Reaktionskinetisches Modell.....	202
7.1.2	Methodik und Parameter der Reaktionskinetik.....	203
7.2	Reaktormodelle mit Berücksichtigung der Verweilzeitverteilungskarakteristik und der Stoffumsatzkinetik	206
7.2.1	Massenbilanz und Stoffumsatzkinetik	207
7.2.2	Verweilzeitmodell und Stoffumsatzkinetik.....	209
7.3	Vergleich zwischen modelliertem und experimentellem Reaktionsablauf	210
7.3.1	Diskontinuierliche Fermentation.....	210
7.3.2	Kontinuierlicher Rührkessel.....	212
7.3.2	Kontinuierliche Rührkesselkaskade	212
7.3.3	Kontinuierlicher Rohrfermenter	213
8	Schlußfolgerungen und Ausblick	216
9	Zusammenfassung	221
10	Literaturverzeichnis	226