

Diss ETH 6254

DER TOTAL GEFUELLTE BIOREAKTOR

OPTIMIERUNG, PHYSIKALISCH - CHEMISCHE UND BIOLOGISCHE  
CHARAKTERISIERUNG

ABHANDLUNG

zur Erlangung  
des Titels eines Doktors der Naturwissenschaften  
der  
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von  
DANIEL KARRER  
dipl. Natw. ETH-Z  
geboren am 6. Januar 1951  
von Teufenthal AG

angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. A. Fiechter, Referent  
Prof. Dr. F. Widmer, Korreferent

1978

## 7. Z U S A M M E N F A S S U N G

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues, total gefüllt betriebenes Reaktorsystem vorgestellt, das dank kleinem Schlankheitsgrad verglichen mit einem konventionellen FBT-System eine ausserordentlich gute Homogenität der Gas- und Flüssigphase und günstige Zerteilungseigenschaften aufweist.

Der Reaktor stellt eine Weiterentwicklung der von BLENKE et al. 1965 beschriebenen Schlaufe dar.

Anhand von Strömungsmusteruntersuchungen werden optimale Konstruktionslösungen für die Reaktorgeometrie aufgezeigt. Die erzielten Verbesserungen äussern sich im Vergleich zur Originalversion des Reaktors in einer Verdoppelung der mittleren Fliessgeschwindigkeiten bei gleichem Leistungsaufwand.

Die spezielle Anordnung des Schaumabscheiders erlaubt die gesamte Gasphase zu dispergieren und ermöglicht dadurch eine Erhöhung des Reaktorfüllungsgrades bis auf 90 %.

Inhomogenitäten durch Wandwachstum oder Schaumbildung werden im gefüllt betriebenen Reaktor wirksam verhindert. Das Verteilverhalten des Reaktors darf als nahezu ideal bezeichnet werden. Totzonen sind selbst in nicht-Newtonschen Lösungen nicht zu beobachten. Das im Gegensatz zu der ausgeprägten Zonenbildung in konventionellen Reaktoren mit Scheibenrührern ideale Fliessmuster ermöglicht insbesondere in hochviskosen Medien die Mischzeiten bedeutend herabzusetzen.

Die gegenüber den Strömungsgeschwindigkeiten kleinen Blasenanstiegsgeschwindigkeiten führen zu einer häufigen Rezirkulation der Gasblasen und somit zu einem grossen relativen Gasanteil in der Dispersion. Die Gasphase darf als ideal gemischt bezeichnet werden.

Für die physikalische Charakterisierung der Zerteilung wurde eine neue dynamische  $K_L a$ -Bestimmungsmethode entwickelt, die auch die

Gasphasen- und Sondendynamik des Prozesses berücksichtigt.

Aus den dynamischen  $K_L a$ -Messungen in unbewachsenen Medien verschiedener Salzkonzentrationen wird die Bedeutung des Koaleszenzverhaltens für den Stofftransport ersichtlich. Der Salzeffekt im Medium D 8 % erhöht die  $K_L a$ -Werte bei 1500 rpm gegenüber Wasser um 100 %.

Bezüglich der Sauerstofftransferrate kompensiert aber die bei grossen Salzkonzentrationen geringe Sauerstofflöslichkeit teilweise die hohen  $K_L a$ -Werte in Salzlösungen. Weitaus grössere Verbesserungen der OTR-Werte bringt die Herabsetzung des Reaktorfüllungsgrades von 80 auf ca. 60 %. Der in nicht-koaleszierenden Medien auch bei kleinen Rührleistungen hohe Gasanteil wirkt sich positiv auf den Stofftransfer aus. Die Unabhängigkeit des relativen Gasanteils von den Rührbedingungen erlaubt, die Belüftungsrate ohne Beeinträchtigung des  $K_L a$ -Wertes zu senken und den Luftsauerstoff optimal auszunützen. Die physikalisch ermittelten OTR-Werte stimmen bei gleichem relativen Gasanteil gut mit den Daten aus biologischen Versuchen überein. Dies zeigt, dass die Veränderungen im Dispersions- und Koaleszenzverhalten durch das Zellenwachstum den Stofftransport im R 0050 nur wenig beeinflussen.

Verglichen mit FBT-Systemen ergeben sich im R 0050 dank dem grösseren dispergierten Gasvolumen und der besseren Durchmischung bei gleichen Bedingungen sowohl in physikalischen wie auch in biologischen Experimenten höhere Stofftransferraten.

Die Bestimmung der maximalen respirativen Verdünnungsrate in einer kontinuierlichen Kultur von S. cerevisiae zeigt, dass  $D_r$  in Kleinreaktoren eine biologische und nicht eine reaktorspezifische Grösse darstellt. In den beiden untersuchten Reaktoren darf der Einfluss der Vermischung auf den Stoffwechsel dieser Organismen vernachlässigt werden, da eher der Sauerstofftransfer als die makroskopische Verteilung des Substrates zum limitierenden Stofftransportschritt wird. Bezüglich der Abhängigkeit der maximalen respirativen Verdünnungsrate von der Substratkonzentration ergeben sich Hinweise,

dass möglicherweise die Mikrovermischung, das heisst die molekulare Diffusion in den Mikrowirbeln nicht ausreicht, um die bei hohen Substratkonzentrationen grossen Gradienten genügend schnell abzubauen und dadurch zu einer Repression der Zellen führen.

In einer kontinuierlichen Kultur von T. cutaneum wurde bei Belüftung mit Luft und vollständiger Ausnützung des gelösten Sauerstoffs Produktivitäten bis  $10.6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $P/V = 10 \text{ W} \cdot \text{l}^{-1}$ ) erreicht. Bei Belüftung mit Sauerstoff sind in Batchversuchen momentane Produktivitäten ( $\mu \cdot X$ ) bis  $19 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $P/V = 10 \text{ W} \cdot \text{l}^{-1}$ ) möglich. Dieser Wert stellt für den Stofftransport im Reaktor eine obere Grenze dar, da die molekulare Substratdiffusion in den Eddies bei hohen Biomassekonzentrationen limitiert ist.

## 8. S U M M A R Y

In the present investigation, a new reactor system is illustrated which can be operated completely filled. Due to the small height-diameter ratio, the reactor shows in comparison to a conventional FBT-system, an excellent homogeneity of the gas and liquid phase and exhibits a favourable micromixing efficiency. The system was developed from the loop reactor, described by BLENKE et al. 1965.

The investigations of the reactor's flow pattern resulted in an optimal reactor geometry. Due to the optimisation, the average flow velocities at a defined power input were doubled compared to the original reactor version.

In the completely filled bioreactor, the whole gas phase is dispersed and the filling degree is up to 90 %. Thus inhomogeneities due to wall growth and foam formation are prevented.

The high recirculation of the air bubbles in the reactor has a positive effect on the gasholdup. For a physical characterization of the micromixing efficiency, a new dynamic method for measuring  $K_L a$  was developed, which also allows for the dynamic changes of the oxygen concentration in the gasphase and the oxygen probe.

The importance of the gas bubble coalescence in bioreactors is demonstrated in dynamic  $K_L a$  measurements, in medias with different ionic strengths. For this reason the  $K_L a$  values found in biological systems are twice the values found in water. Concerning oxygen transfer rates, the high  $K_L a$  values in biological solutions are partially compensated for, by the lowered oxygen solubility.

More effective in enlarging the oxygen transfer rate is a reduction of the reactor filling degree to 60 %, resulting in an increase of the gasholdup to 40 %.

At the same gasholdup, the physically measured OTR values are comparable to data from biological experiments, showing that

changes in the dispersion and coalescence characteristics which are due to the cellular growth, do not have much influence on mass transfer characteristics in the completely filled bioreactor.

Compared to the conventional FBT-system, the mass transfer rates in the completely filled bioreactor are distinctly better in the physical and biological experiments, proving the high homogeneity degree and higher gasholdup of the new system.

The determination of the maximum respiratory dilution rate in a continuous cultivation of S. cerevisiae shows that in small scale reactors  $D_r$  is a biological and not a reactor specific constant. Therefore, the influence of macromixing on the cells can be neglected. In the system investigated the mass transfer limiting step is given by the oxygen transfer from the air bubbles to the liquid.

The reported dependence of  $D_r$  on the substrate concentration is possibly due to a deficiency in the micromixing capacity in the reactor and, therefore leads to an early repression of the culture.

In a continuous culture of T. cutaneum, maximum productivities up to  $10 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  were observed, when the culture was aerated with air. At an aeration with oxygen, momentary productivities ( $\mu \cdot X$ ) up to  $19 \cdot \text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $P/V = 10 \text{ W} \cdot \text{l}^{-1}$ ) were found. This value is the upper limit for the mass transfer in a reactor at this power input, because of a molecular diffusion limitation of the substrate at high biomass concentrations.