

wendigkeit zur weitergehenden Miniaturisierung und Parallelisierung der Anlagentechnik. Ein Beispiel für eine effektivere Bioprozessentwicklung ist ein Bioreaktorblock mit 48 Rührkesselreaktoren im 10-mL-Maßstab (Abbildung 3).³⁶⁾ Die einzelnen magnetisch-induktiv angetriebenen Bioreaktoren verfügen über ein neuartiges gas-induzierendes Rührorgan, das in diesem kleinen Maßstab erstmals höhere Sauerstoffeintragsleistungen ermöglicht als im klassischen Labor- und Produktionsrührkesselreaktor. Mit klassischen Pipettierautomaten ist eine Automatisierung nicht möglich.

Reaktionstechnik

Hybridverfahren und multifunktionale Reaktoren

◆ In der Verfahrenstechnik spielen Hybridverfahren und multifunktionale Reaktoren weiterhin eine herausragende Rolle, insbesondere reaktive und hybride Trennverfahren sowie ihre Anwendung in der Industrie.³⁷⁾

Bei hybriden Trennverfahren sind mindestens zwei apparativ getrennte Grundoperationen verschaltet, die alle zur Lösung einer definierten Trennaufgabe beitragen. Sie werden bei schwierigen Trennungen wie im Falle von engsiedenden oder azeotropen Gemischen eingesetzt, wenn

eine einzelne Grundoperation, z. B. Rektifikation, Extraktion, Kristallisation, Membranverfahren oder Chromatographie, gar nicht oder nur mit sehr großem Aufwand zum Ziel führt.

Die Verflechtung von verschiedenen Unit Operations in derselben Anlage reduziert aber nicht nur die apparative Komplexität. Es ist auch möglich, die Ausbeuten zu steigern, da Reaktionsprodukte aus der Reaktionsmischung entfernt werden können, bevor sich das Gleichgewicht einstellt.³⁸⁾

Ein Nachteil der Hybridverfahren ist die erhöhte Prozesskomplexität. Zahl und Reihenfolge der Grundoperationen sowie Position und Zusammensetzung der Rückführströme kommen als neue Freiheitsgrade hinzu. All diese Faktoren machen die Auslegung schwieriger. Weiter schränkt ein kombiniertes Verfahren die Steuerungsmöglichkeiten ein, da z. B. Reaktion und Reinigung unter denselben Bedingungen ablaufen müssen. Daher ist ein Kompromiss zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Trennleistung zu finden. Am Beispiel der chromatographischen Reaktoren wird in Lit.³⁸⁾ über die hierbei wichtigen Prinzipien und Verfahren berichtet.

Schon klassisch ist das Konzept der Reaktivdestillation. Zur Modellierung des Verfahrens ist auch hier die Kenntnis der Reaktionskinetik und des Phasenverhaltens notwendig. Für den heterogen katalysierten

Prozess sind Modelle zur Berechnung der essentiellen Parameter zur Unterstützung des Scale-Up entwickelt worden. Experimentell wurden der Aufbau der Kolonne und der Einfluss der wichtigsten Prozessparameter variiert und mit dem Modell verglichen.³⁹⁾

Zum Scale-Up von Reaktivdestillationskolonnen mit einer Katalysatorschüttung kommt neben den erwähnten Prozessgrößen noch die Packungscharakteristik hinzu. Modell und Experiment stimmen bei diesem Verfahren sehr gut überein.⁴⁰⁾

Neben experimentellen Untersuchungen gewinnen Methoden zur systematischen Auslegung und Modellierung von Hybridprozessen an Bedeutung. Die Optimierung auf Basis von physikochemischen Modellen ist mit derzeitigen Fließbildsimulatoren mit vertretbarem Aufwand für eine vorgegebene Fließbildstruktur möglich. Systematische Ansätze zur Prozesssynthese und -optimierung von hybriden Trennprozessen mit mathematischen Methoden gibt es bisher jedoch nur für wenige Grundoperationen.⁴¹⁾

Membrantechnik

◆ Die Membrantechnik ist eine seit vielen Jahren im industriellen Einsatz bewährte Trennmethode. Aufgrund der immer differenzierteren Anwendungen sowohl in den klassischen Gebieten der Wasseraufbereitung und der Lösemittelabtrennung



Peter Christophliemk, Jahrgang 1943, studierte Chemie an der Universität Göttingen und promovierte 1972 bei Achim Müller in Dortmund. Seit 1973

ist er bei der Henkel KGaA tätig, die überwiegende Zeit in Corporate Research. Seine Hauptarbeitsgebiete waren u. a. technische Silicate und Zeolithe, Katalyse, Kombinatorik und Nanotechnologie. Von 2000 bis 2002 war er Geschäftsführer der Forschungsgesellschaft SusTech Darmstadt, dem Kompetenzzentrum der Henkel KGaA für Neue Materialien und Nanotechnologie. Seit 2002 leitet er bei Henkel die Forschung Chemie.



Marcel Liauw, Jahrgang 1963, studierte Chemie an der Universität Bremen und promovierte 1994 bei Nils Jaeger und Peter Plath. 1994/95 war er

Postdoc bei Dan Luss (University of Houston). 1996 bis 2003 habilitierte er sich bei Gerhard Emig an der Universität Erlangen-Nürnberg im Fachgebiet Technische Chemie. Im Jahr 2000 arbeitete er in der Verfahrenstechnik der SKW Trostberg. Seit 2003 ist er Professor für Technische Chemie an der RWTH Aachen. Hauptarbeitsgebiete sind Mikroverfahrenstechnik, In-situ-Spektroskopie und nachwachsende Rohstoffe.



Andreas Liese, Jahrgang 1966, studierte Chemie in Bonn und promovierte 1998 bei Christian Wandrey im Forschungszentrum

Jülich mit einem Thema aus der Bioreaktionstechnik. Von 1998 bis 2003 hat er die Enzymgruppe im gleichen Institut geleitet. Seine Habilitation beendete er 2003. Im gleichen Jahr erhielt er den Hochschullehrernachwuchspreis 2003 der Dechema. Von 2003 bis 2004 war er Professor für Biotechnologie an der Universität Münster; seit Ende 2004 ist er Professor für Technische Biochemie/Biokatalyse an der TU Hamburg-Harburg und Leiter des Instituts für Biotechnologie II.

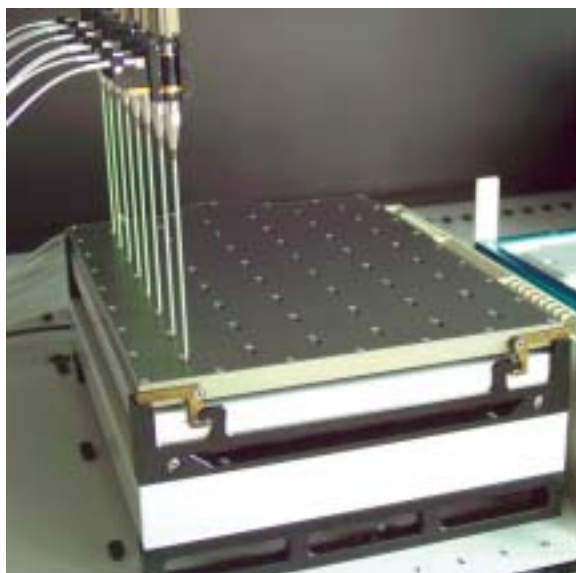


Abb. 3. Bioreaktorblock mit 48 Rührkesselreaktoren im 10-mL-Maßstab. (Foto: Dirk Weuster-Botz, TU München)

als auch in den neueren Gebieten der Bioverfahrenstechnik und Lebensmitteltechnologie steigt der Bedarf an Spezialmembranen. Hier wird die Entwicklung von anorganischen und oberflächenfunktionalisierten Membranen immer wichtiger. Zu diesem Themenkomplex hat 2004 bei der Dechema der Informationstag „Membranmaterialien – Anforderungen und Eigenschaften in den verschiedenen Anwendungen“ stattgefunden. Auf der Euromembrane 2004 an der TU Hamburg-Harburg stellte Thomas Melin eine neue Methode zur Vermeidung von Deckschichtbildung durch hochfrequente Rückspülung von Membranen vor.⁴²⁾

Mikroverfahrenstechnik

◆ Vor etwa 15 Jahren haben die intensiven Untersuchungen begonnen⁴³⁾ – nun gelangen mikrostrukturierte Apparate zunehmend in der chemischen Produktion zum Einsatz. Nach dem Erfolg des Demis-Projekts, der Propylenoxid-Herstellung in einer Mikroreaktor-Pilotanlage [Trendbericht „Technische Chemie 2003“, *Nachr. Chem.* 2004, 52, 332], startet Anfang 2005 mit „Impulse“ ein Projekt, das die Integration von Bauteilen mit angemessenen Dimensionen in Produktionsanlagen evaluieren wird.⁴⁴⁾

Ein typisches Anwendungsgebiet für miniaturisierte Komponenten ist

die Antriebstechnik, z. B. die On-board-Wasserstoffherstellung für Brennstoffzellenfahrzeuge.⁴⁵⁾ Eine bemerkenswerte Anwendung von Mikrostrukturreaktoren ist die elektrochemische NADH-Cofaktor-Regenerierung.⁴⁵⁾

Das Autorenteam dankt den Kolleginnen und Kollegen für ihre Beiträge.

Peter Christophliemk

Henkel KGaA, Düsseldorf

peter.christophliemk@henkel.com

Marcel Liauw

RWTH Aachen

liauw@itmc.rwth-aachen.de

Andreas Liese

TU Hamburg-Harburg

andreas.liese@tu-harburg.de

- 1) IoLiTec, www.iolitec.de
- 2) P. Wasserscheid, *Nachr. Chem.* 2001, 49, 12–16; P. Wasserscheid, *Chem. unserer Zeit* 2003, 37, 52–63.
- 3) M. Antonietti, D. Kuang, B. Smarsly, Y. Zhou, *Angew. Chem.* 2004, 116, 5096–5100.
- 4) Y. A. Beste, M. Eggersmann, H. Schoenmakers, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 79, 1407.
- 5) S. Houlton, *Manufacturing Chemist*, 2004, www.manufacturing-chemist.info/story.asp?storyCode=26158
- 6) B. Jastorff, R. Störmann, J. Ranke, K. Mölter, F. Stock, B. Oberheitmann, W. Hoffmann, J. Hoffmann, M. Nüchter, B. Ondruschka, J. Filser, *Green Chemistry* 2003, 5, 136–142.
- 7) S. Balthasar, K. Michaelis, N. Dinauer, H. von Briesen, J. Kreuter, K. Langer, *Biomaterials* 2005, 26, 2723–2732.
- 8) T. Liu, J. Tang, L. Jiang, *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 2004, 313, 3–7.
- 9) L. Malaquin, C. Vieu, M. Geneviève, Y. Tauran, F. Carcenac, M. L. Pourciel, V. Leberre, E. Trevisiol, *Microelectron. Eng.* 2004, 73–74, 887–892.
- 10) M. Dreja, J. Noglich, J. Josa, *Tenside Surfactants Deterg.* 2004, 180–186.
- 11) R. Kniep, A. Bordas, C. Braunbarth, H. Franke, T. Poth, G. Schechner, J. Kremer, C. Kropf, P. Wülknitz, *Int. Ass. Dent. Res. 82nd General Meeting* 2004, *Progr. Book* 3526.
- 12) H.-M. Sauer, S. Spiekermann, E. Cura, L. H. Lie, *Adhäsion Kleben Dichten* 2004, 47, 12–14
- 13) W. A. Herrmann, *Rede anlässlich der Eröffnung der Katalysatorenfabrik der Süd-Chemie AG, Bad Aibling*, 2002.
- 14) R. Jackstell, S. Harkal, H. Jiao, A. Spangenberg, C. Borgmann, D. Röttger, F. Nierlich, M. Elliot, S. Niven, K. Cavell, O. Navarro, M. S. Viçiu, S. P. Nolan, M. Beller, *Chem. Eur. J.* 2004, 10, 3891–3900.
- 15) J. Almena, A. Monsees, R. Kadyrov, T. Riermeier, B. Gotov, J. Holz, A. Börner, *Adv. Synth. Catal.* 2004, 346, 1263–1266.
- 16) *Adv. Synth. Catal.* 2004, 346, 1007–1249.
- 17) *Acc. Chem. Res.* 2004, 47, 487–631.
- 18) C. Song, *Chem. Commun.* 2004, 1033–1043.
- 19) J. Park, P. Sreekanth, B. Kim, *Adv. Synth. Catal.* 2004, 346, 49–52.
- 20) A. Nait Ajjou, J.-L. Pinet, *J. Mol. Catal. A* 2004, 214, 203–206.
- 21) P. Claus, Y. Önal, M. Lucas, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 76, 9, 1261–1263.
- 22) A. Behr, Q. Miao, *J. Mol. Catal. A* 2004, 222, 1–2, 127–132.
- 23) A. Bollmann, K. Blann, J. T. Dixon, F. M. Hess, E. Killian, H. Maumela, D. S. McGuinness, D. H. Morgan, A. Neveling, S. Otto, M. Overett, A. M. Z. Slawin, P. Wasserscheid, S. Kuhlmann, *J. Am. Chem. Soc.* 2004, 126, 14712–14713.
- 24) www.topcombi.org
- 25) H. Lynggaard, A. Andreasen, C. Stegelmann, P. Stoltze, *Prog. Surf. Sci.* 2004, 77, 71–137.
- 26) B.M. Weckhuysen, *In-Situ Spectroscopy of Catalysts*, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, 2004.
- 27) R. Schlögl, S. Bee Abd Hamid, *Chem-Inform* 2004, 35(22).
- 28) C. P. Mehnert, *Chem. Eur. J.* 2004, 11, 50–56.
- 29) http://cext.dechema.de/pdf/pos_pap_weise_biotech.pdf
- 30) A. Bruggink, *Org. Proc. Res. Dev.* 2003, 7, 622–640.
- 31) R. Sterner, F. X. Schmid, *Science* 2004, 304, 1916–1917; M. A. Dwyer, L. L. Looger, H. W. Hellinga, *Science* 2004, 304, 1967–1971.
- 32) H. Gröger, W. Hummel, C. Rollmann, F. Chamouleau, H. Husken, H. Werner, C. Wunderlich, K. Abokitse, K. Drauz, S. Buchholz, *Tetrahedron* 2004, 60, 633–640.
- 33) P. Oedman, W. Wellborn, A. Bommarius, *Tetrahedron: Asymmetry* 2004, 15, 2933–2937
- 34) H. Pfründer, M. Amidjojo, U. Kragl, D. Weuster-Botz, *Angew. Chem.* 2004, 116, 4629–4631.
- 35) C. Ferloni, M. Heinemann, W. Hummel, T. Daussmann, J. Büchs, *Biotechnol. Prog.* 2004, 20, 975–978
- 36) R. Puskeiler, D. Weuster-Botz, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 76(9), 1338.
- 37) A. Stankiewicz, *Chem. Ind. (Dekker)* 2004, 261–308.
- 38) T. Borren, H. Schmidt-Traub, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 76, 805–814.
- 39) M. Schmitt, H. Hasse, K. Althaus, H. Schoenmakers, L. Gotze, P. Moritz, *Chem. Eng. Proc.* 2004, 43(3), 397–409.
- 40) A. Hoffmann, C. Noeres, A. Gorak, *Chem. Eng. Proc.* 2004, 43, 383–395.
- 41) M. Franke, A. Gorak, J. Strube, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 76(3), 199–210.
- 42) T. Melin, *Vortrag auf der Euromembrane 2004, Hamburg-Harburg*, 30. September 2004.
- 43) K. Jähnisch, V. Hessel, H. Löwe, M. Baerns, *Angew. Chem.* 2004, 116, 410–451.
- 44) T. Bayer, M. Matlosz, J. Jenck, *Chem. Ing. Tech.* 2004, 76(5), 528–533.
- 45) S.K. Yoon, E. Chohan, C. Kane, Th. Tzedakis, P. Kenis, *Vortrag auf dem AIChE Annual Meeting in Austin, TX*, am 8. 11. 2004.