

nente ab. Da die Mobilität exponentiell mit der Temperatur zunimmt, kann auf Sorptionseffekte im porösen Körper geschlossen werden.

Der Forschungsgemeinschaft für Luft- und Trocknungstechnik, Frankfurt/M., und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, werden für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit besonders gedankt.

Eingegangen am 13. Juni 1986 [K 826]

## Literatur

[1] Knaff, G.: Dissertation, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 3 (1986) Nr. 122.

- [2] Bender, E.: Proc. Fifth Symp. on Thermophysical Properties, ASME, N. Y., S. 227 (1970).
- [3] Reichenberg, D.: DCS Rep. 11, Nat. Phys. Lab., England (1971); AIChE J. 19 (1973) S. 854.
- [4] Reid, R. C.; Prausnitz, J. M.; Sherwood, T. K.: The Properties of Gases and Liquids, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, New York 1977.
- [5] Lee, B. I.; Kesler, M. G.: AIChE J. 21 (1975) S. 510.
- [6] Paulaitis, J. M.; McKay, M. E.: Ind. Eng. Chem., Fundam. 18 (1979) S. 149/153.
- [7] Tsekhanskaya, Y. V.; Iomtev, M. B.; Mushkina, E. V.: Russ. J. Phys. Chem. 38 (1964) S. 1173/1176.
- [8] Ebeling, H.; Frank, E. U.: Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 88 (1984) S. 862/865.

## Einsatz einer mikroprozessorgeregelten Dosiereinrichtung in der Biotechnologie

Klaus Memmert, Rüdiger Uhlendorf  
und Christian Wandrey\*

Herrn Professor Dr. Karl Schügerl zum 60. Geburtstag

Viele fermentationskinetische Daten, deren Kenntnis zur rechnergesteuerten Optimierung biotechnologischer Prozesse, besonders auch diskontinuierlicher Prozesse, erforderlich ist, lassen sich nur in kontinuierlichen Laborfermentationen ermitteln. Zur zuverlässigen Bestimmung dieser Daten ist es jedoch erforderlich, die Parameter der kontinuierlichen Fermentation, insbesondere deren Verweilzeit, möglichst definiert und konstant einstellen zu können. Diese Forderung ist bislang besonders bei Fermentern im Labormaßstab nur schwer zu erfüllen.

Die Verweilzeit  $\tau$ [h] bzw. ihr Kehrwert, die Durchflußrate  $D$ [h<sup>-1</sup>], berechnet sich zum einen aus dem Reaktorvolumen [l] und zum anderen aus dem Volumenstrom [l/h], mit dem das Substrat kontinuierlich in den Reaktor gelangt und mit dem die gleiche Menge des Reaktorinhalts den Reaktor wieder verläßt:

$$\text{Durchflußrate } D \text{ [h}^{-1}\text{]} = \frac{\text{Volumenstrom [l/h]}}{\text{Volumen [l]}}$$

Zum genauen Einstellen bzw. Einhalten einer definierten Durchflußrate ist es folglich notwendig, sowohl das Reaktorvolumen genau konstant zu halten als auch den Volumenstrom so genau und konstant wie möglich einzustellen.

Für das Einhalten eines über längere Zeit konstanten Volumens im kontinuierlichen System haben sich verschiedene Verfahren bewährt, vom einfachen Überlaufprinzip bis zur genauen Regelung mittels Tauchsonden oder Messung des Reaktorgewichts.

Das genaue Einstellen und konstante Aufrechterhalten eines definierten Volumenstroms über längere Zeit war dagegen bisher immer mit Schwierigkeiten verbunden.

**Verschiedene Dosierkonzepte:** Unter den konventionellen Konzepten für das Fördern eines Mediums unter sterilen Bedingungen im Labormaßstab bieten sich zwei verschiedene Pumpentypen an:

1) Die Schlauch- bzw. Peristaltikpumpe, die aufgrund der Tatsache, daß das Medium mit der Pumpentechnik nicht in Berührung

kommt, die besten Voraussetzungen für steriles Arbeiten bietet. Das Einstellen eines bestimmten Volumenstroms ist aber nur nach aufwendigem Eichen auf den jeweiligen Schlauchdurchmesser möglich, und während des Betriebs verändert sich das Schlauchmaterial meist so stark, daß eine ungefähre Konstanz des Volumenstroms nur durch ständiges Nachregeln der Pumpendrehzahl möglich ist.

2) Die Membranpumpe, die bei einem festen Volumen pro Pumpenhub recht gut geeignet ist, einen gewünschten Volumenstrom einzustellen, und die unter idealen Bedingungen auch über eine zufriedenstellende Konstanz verfügt.

Beiden Konzepten gemeinsam ist jedoch die Tatsache, daß es sich um unregelmäßige Förderverfahren handelt, die auf sich mit der Zeit ändernde Bedingungen nicht reagieren können. So ändern sich bei beiden Pumpentypen die Volumenströme, wenn sich beispielsweise der Druck auf einer Seite der Pumpe oder die Viskosität des Mediums ändert.

Die neue, von einem deutschen Hersteller auf den Markt gebrachte Präzisionsdosieranlage YPP01<sup>1)</sup> verbindet die Vorteile der Schlauchpumpe mit einer digitalen Regelung. Die Anlage besteht aus einer elektronischen Präzisionswaage zur Durchflußmengenmessung und einer Durchflußregleinheit, bestehend aus integrierter Schlauchpumpe, Rechneinheit, Tastatur und Anzeige sowie verschiedenen Schnittstellen (Abb. 1 u. 2). Zusätzlich wird noch eine weitere, schnellaufende Schlauchpumpe benötigt.

Auf dem Eingabefeld der Regeleinheit kann die gewünschte Fördermenge in der Einheit [g/h] eingegeben werden. Auf der Waage steht als Zwischendepot eine Vorratsflasche, die ca. 2 l Nährmedium faßt. Wird die Anlage gestartet, stellt sie zunächst nacheinander unterschiedliche Pumpendrehzahlen ein, mißt die resultierenden Gewichtsabnahmen pro Zeiteinheit aus dem Vorratsgefäß auf der Waage und berechnet daraus als Koeffizienten eines linearen Gleichungssystems eine erste Eichkurve für den eingelegten Schlauch. Danach fährt sie automatisch auf den eingegebenen Sollwert, immer die von der Waage pro Meßzyklus registrierte Massenabnahme mit dem Sollwert vergleichend und die Pumpendrehzahl nachregelnd, so daß auch langsame Veränderungen der Betriebsbedingungen kompensiert werden. Die jeweils neuen Meßwerte finden auch Eingang in die interne Eichkurve, so daß auch diese ständig aktualisiert wird. Dadurch ist es möglich, daß sich die Anlage ohne starkes Einschwingen auf einen neu eingegebenen Sollwert einstellt.

Hat das Volumen in dem Zwischendepot auf der Waage eine zuvor eingegebene Untergrenze erreicht, wird diese automatisch durch die zweite, schnellaufende Pumpe bis zur gewählten Obergrenze aufgefüllt. Während der Nachfüllzeit erfolgt keine Förderstrombestimmung.

1) Hersteller: Sartorius GmbH, 3400 Göttingen.

\* Dipl.-Ing. K. Memmert, Prof. Dr. Ch. Wandrey, Institut für Biotechnologie der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich, und Dipl.-Ing. R. Uhlendorf, Sartorius GmbH, 3400 Göttingen.

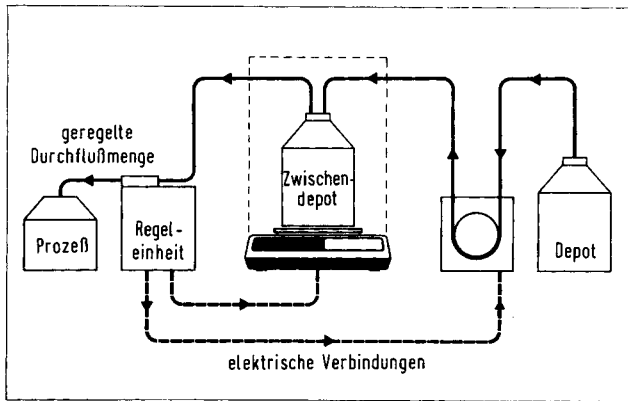


Abb. 1. Schematische Darstellung der Durchflußregleinheit.

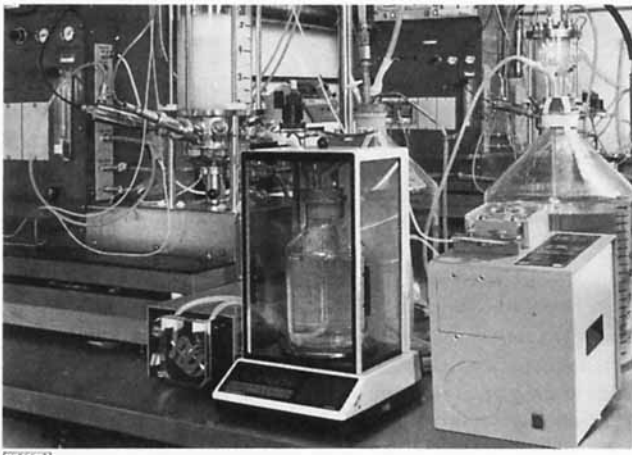


Abb. 2. Photographische Ansicht der Durchflußregleinheit in der Fermentation.

mung, statt dessen wird die Fördermenge von einer integrierten Motorregelung autark konstant gehalten.

Mit dieser Anlage ließen sich je nach eingesetztem Schlauchdurchmesser Förderströme zwischen 10 g/h und über 10 000 g/h realisieren. Der mit einem gegebenem Schlauchdurchmesser abdeckbare Förderbereich lag jeweils ca. im Verhältnis 1:10, das heißt z. B. zwischen 100 und 1000 g/h, zwischen 500 und 5000 g/h oder zwischen 1000 und 10 000 g/h.

**Ergebnisse:** Bei zwei parallel durchgeführten kontinuierlichen Fermentationen von jeweils mehreren Monaten Dauer wurde im einen Fall das Nährmedium mit einer handelsüblichen, unregelmäßig Schlauchpumpe in den Fermenter gefördert, während dazu im anderen Fall die Dosierregleinheit YPP01 verwendet wurde.

Das verwendete Fördermedium (Nährmedium), Schlauchmaterial (Marprene<sup>2)</sup>) und der Schlauchdurchmesser (Innendurchmesser: 4,8 mm, Wanddicke: 1,6 mm) sowie die Druckdifferenz zwischen Substratvorlage (Außendruck) und Fermenter (0,2 bar geregelter Überdruck) waren identisch. Das verwendete Schlauchmaterial erlaubte es trotz des langen Versuchszeitraums, in beiden Pumpen den Schlauch in der Position eingespannt zu lassen, in der er anfangs eingelegt worden war. Ein Weiterschieben oder Austauschen aus Vorsorge wegen Verschleisses war in beiden Fällen nicht nötig.

Bei beiden Versuchen befand sich das Substrat-Vorlagegefäß auf einer Waage (bei der YPP01-Anlage befindet sich das Zwischendepot sowieso auf einer Waage), so daß zur Ermittlung des jeweils aktuellen Förderstroms die Gewichtsabnahme des Vorlagegefäßes in 1 h gemessen werden konnte.

2) Vertrieb: Verder GmbH, Düsseldorf.

Bei der unregelmäßig Schlauchpumpe wurden dabei über den Versuchszeitraum Förderströme zwischen 630 und 708 g/h ermittelt (Abb. 1). Die maximale Abweichung vom mittleren Förderstrom von 670 g/h betrug somit  $\pm 6\%$ .

Die geregelte Dosieranlage wurde mit einem Sollwert von 600 g/h betrieben. Die ermittelten Förderströme lagen zwischen 599,7 und 601,1 g/h. Berechnet man die größte Abweichung vom Sollwert der Sartorius-Anlage ( $1,1 \text{ g/h} \triangleq 0,2\%$ ) relativ auf den mittleren Förderstrom der unregelmäßig Schlauchpumpe von 670 g/h, so lägen die Schwankungen bei der Sartorius-Anlage innerhalb des schraffierten Bereichs (Abb. 3).

In ergänzenden Versuchen wurde die Dosiergenauigkeit der Sartorius-Anlage bei verschiedenen Sollwerten sowie bei unterschiedlichen Gegendrücken hinter der Pumpe untersucht.

Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Sollwerten sind in Tab. 1 dargestellt. Es wurde jeweils die Abnahme des Gewichts des Zwischendepot-Gefäßes während 30 min gemessen und auf g/h umgerechnet. Schlauchmaterial und -durchmesser waren gleich den oben beschriebenen.

Tabelle 1. Gemessener Förderstrom bei verschiedenen Sollwerten.

Sollwert [g/h]	gemessener Wert [g/h]	Abweichung [%]
600	599,72	0,047
600	600,00	0,000
600	600,06	0,010
600	600,15	0,025
600	600,00	0,000
750	750,56	0,075
750	750,06	0,008
750	750,40	0,053
750	750,20	0,027
750	750,20	0,029
900	900,14	0,016
900	901,20	0,133
1200	1200,00	0,000
1200	1200,30	0,025

Tabelle 2. Gemessener Förderstrom bei verschiedenen Druckdifferenzen.

Druckdifferenz [bar]	gemessener Wert [g/h]	Abweichung [%]
0,0	600,1	0,016
0,2	600,6	0,10
0,4	601,1	0,18
0,6	600,4	0,07
0,8	600,0	0,00
1,0	600,9	0,15

Zur Messung der resultierenden Förderströme bei unterschiedlichen Druckdifferenzen wurde das Fermentergefäß, in das gepumpt wurde, mit verschiedenen, konstant geregelten Innendrücken versehen, während in dem Zwischendepot-Gefäß Umgebungsdruck herrschte. Schlauchmaterial und -durchmesser waren gleich, wie oben beschrieben. Der gewählte Sollwert betrug 600 g/h. Es wurde die Abnahme des Gewichts des Zwischendepot-Gefäßes während 1 h gemessen. Die Meßwerte sind in Tab. 2 dargestellt.

**Diskussion:** Die Bedeutung und verschiedene Ansätze, möglichst dicht am Produktivitätsmaximum einer kontinuierlichen Fermentation zu arbeiten, sind von verschiedenen Autoren [1, 2] beschrieben

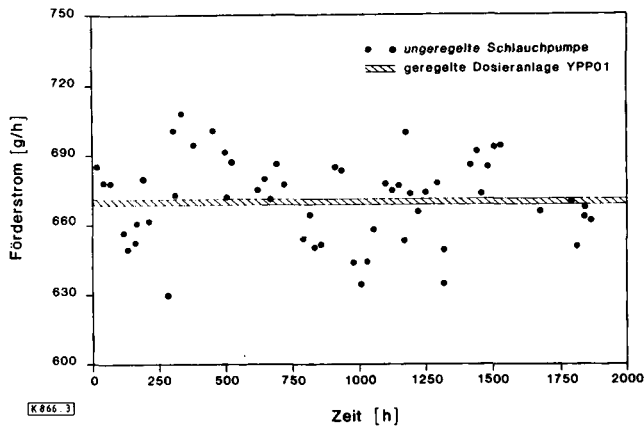


Abb. 3. Vergleich der Streubreite des Förderstroms zwischen unregelter Schlauchpumpe und geregelter Dosieranlage.

worden. So berichtet z. B. Bastin (1983) über den Rechneinsatz zur automatischen, adaptiven Ansteuerung von Arbeitspunkten nahe der maximalen Biogas-Produktivität.

Um die oben beschriebenen Meßwerte ebenfalls unter dem Gesichtspunkt maximaler Produktivität bewerten zu können, wurde folgendes Modellbeispiel einer kontinuierlichen Fermentation zur Erzeugung von Biomasse zugrundegelegt:

Der betrachtete Mikroorganismus hat folgende Eigenschaften (Werte nach Einsele, Finn und Samhaber [3] für *E. coli* auf Glucose): Substratausbeute  $Y_{x/s} = 0,5$ , Substrataffinität  $K_s = 0,005$  g/l Glucose, maximale Wachstumsrate  $\mu_{max} = 1/h$ . Die kontinuierliche Fermentation soll in einem Laborfermenter unter folgenden Bedingungen stattfinden: Arbeitsvolumen: 1,0 l, Substratzulaufkonzentration  $S_0$ : 10 g/l Glucose.

Für verschiedene Durchflußraten  $D$  der chemostatischen kontinuierlichen Fermentation berechnen sich Substratkonzentration  $S$ , Biomasse-Konzentration  $X$  und Produktivität  $P$  in jeweils stationären Betriebspunkten wie folgt:

$$S = \frac{K_s D}{\mu_{max} - D} \text{ [g/l]} \quad ,$$

$$X = Y_{x/s} (S_0 - S) \text{ [g/l]} \quad , \quad P = D X \text{ [g/l h]} \quad .$$

Trägt man die berechneten Werte für  $S$ ,  $X$  und  $P$  gegen die Durchflußraten  $D$  auf (Abb. 4), so erkennt man, daß Substrat- und Biomasse-

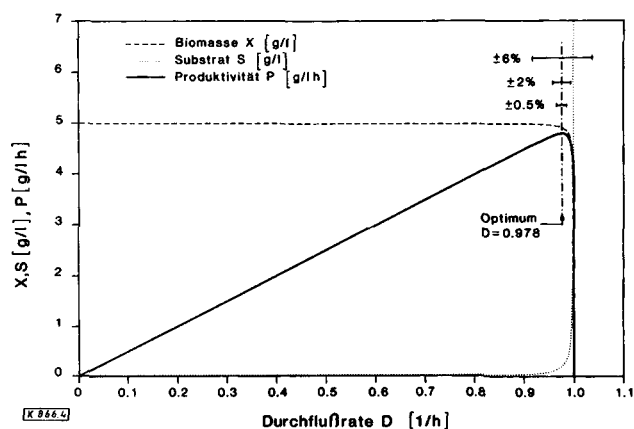


Abb. 4. Darstellung der berechneten stationären Betriebspunkte für Biomasse  $X$ , Substratkonzentration  $S$  und Produktivität  $P$  in der kontinuierlichen Fermentation über den Durchflußraten  $D$  sowie Ausmaß relativer Abweichungen von der optimalen Durchflußrate  $D = 0,978$  h<sup>-1</sup>; nähere Erläuterungen im Text.

Konzentration über weite Bereiche praktisch unabhängig von der Durchflußrate sind, während die Produktivität hier mit steigender Durchflußrate linear zunimmt. Nähert man sich einer kritischen Durchflußrate  $D_{krit}$ , so ändern sich die stationären Konzentrationen von Biomasse und Substrat zunehmend stark, bis bei  $D_{krit}$  die stationäre Biomasse-Konzentration  $X = 0$  ist (wash out) und die Substratkonzentration gleich der Konzentration des einlaufenden Substrats  $S_0$  ist. Die Produktivität der Biomasse-Produktion durchläuft ein Maximum und erreicht ab  $D_{krit}$  ebenfalls den Wert Null. Die maximale Produktivität ergibt sich in diesem Beispiel bei einer Durchflußrate von 0,978/h. Das entspricht bei dem angenommenen Arbeitsvolumen von 1,0 l einem Volumenstrom von 978 ml/h.

Berechnet man den Einfluß von unterschiedlichen Abweichungen von dieser optimalen Förderrate, so erkennt man, daß vor allem Abweichungen zu erhöhten Förderraten hin zu gravierenden Produktivitätseinbußen führen, da die kritische Durchflußrate schnell überschritten ist (wash out). Aber auch bei Abweichungen zu niedrigeren Förderraten hin sinkt die Produktivität ab.

Tab. 3 zeigt die für die angenommenen Prozeßparameter errechneten Werte von resultierender Förderrate, Biomasse- und Substratkonzentration sowie der Produktivität im Chemostat bei verschiedenen prozentualen Abweichungen vom optimalen Förderstrom von 978 ml/h.

Tabelle 3.

Abhängigkeit der Biomasse- und Substratkonzentration sowie der Produktivität von Abweichungen vom optimalen Förderstrom.

Abweichung [%]	res. Förderstrom [ml/h]	Biomasse [g/l]	Substrat [g/l]	Produktivität [g/l h]
+0,0	978	4,889	0,222	4,781
-0,0	978	4,889	0,222	4,781
+0,5	983	4,856	0,287	4,773
-0,5	973	4,910	0,181	4,778
+1,0	988	4,798	0,404	4,739
-1,0	968	4,924	0,152	4,767
+2,0	998	3,978	2,044	3,968
-2,0	958	4,942	0,115	4,737
+2,2	1000	0,000	10,000	0,000
-2,2	956	4,945	0,110	4,730
+4,0	1017	0,000	10,000	0,000
-4,0	939	4,962	0,077	4,658
+6,0	1037	0,000	10,000	0,000
-6,0	919	4,972	0,057	4,570
+10,0	1076	0,000	10,000	0,000
-10,0	880	4,982	0,037	4,385

Deutlich ist in Tab. 3 zu erkennen, daß ausgehend vom Produktivitätsoptimum schon eine Erhöhung des Förderstroms um 2,2% zum „wash out“ in der angenommenen Fermentation führen würde.

Vergleicht man die während der oben genannten kontinuierlichen Fermentationen beobachteten Abweichungen der Förderströme (6% bei der unregelmäßigen Schlauchpumpe einerseits, 0,2% bei der geregelten Dosieranlage andererseits) mit den Werten aus Tab. 3, so erkennt man, daß die sehr geringen Abweichungen der geregelten Anlage vom Sollwert noch praktisch keine negativen Auswirkungen auf den Prozeß haben, während die Schwankungen in der Förderleistung einer unregelmäßigen Schlauchpumpe zu erheblichen Beeinflussungen des Prozesses führen können.

Hinzu kommt, daß bei den meisten konventionellen Pumpensystemen, im Gegensatz zu der geregelten Dosieranlage, ein gezieltes Vorwählen eines definierten Förderstroms kaum möglich ist.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die YPP01-Dosieranlage ist die rechnergesteuerte Substratdosierung bei der Anzucht langsam wachsender Mikroorganismen in der anaeroben Abwasserreinigung. Bei entsprechenden Arbeiten an unserem Institut ist die Dosieranlage im Setpoint-Control-Betrieb an einen Personal Computer gekoppelt, der den Pumpen-Sollwert in Abhängigkeit vom Biogasstrom und dem pH-Wert an die Dosieranlage vorgibt [4].

Ebenfalls bei der anaeroben Abwasserreinigung werden in unserem Institut Verfahren entwickelt, bei denen mit Hilfe der Dosieranlage eine Medienoptimierung in der laufenden kontinuierlichen Kultur durchgeführt wird, indem von einem übergeordneten Personal Computer anhand des gemessenen Biogasstroms (Maß für die Abbauleistung) eine geregelte Supplementierung des Abwassers mit limitierenden Nährsalzen vorgegeben wird [5].

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit der Präzisionsdosieranlage YPP01 ein Pumpensystem angeboten wird, das unter sterilen

Bedingungen sowohl in bezug auf exaktes Einstellen des gewünschten Förderstroms im Bereich von 10 bis 10 000 ml/h als auch in bezug auf minimale Abweichungen vom eingestellten Sollwert konventionellen Pumpensystemen weit überlegen ist.

Im mehrmonatigen Einsatz in der kontinuierlichen Fermentation im Labormaßstab hat sich dieses Gerät als äußerst praktisch und zuverlässig erwiesen.

Eingegangen am 24. November 1986 [K 866]

## Literatur

- [1] Mou, D.-G.; Cooney, C. L.: *Biotechnol. Bioeng.* 25 (1983) Nr. 1, S. 225/256.
- [2] Bastin, K. H.: *Spez. Berichte d. Kernforschungsanlage Jülich*, Nr. 217.
- [3] Einsele, A.; Finn, R. K.; Samhaber, W.: *Mikrobiologische und biochemische Verfahrenstechnik*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1985.
- [4] Schürbüscher, D.: persönliche Mitteilung, Jülich 1986.
- [5] Keim, P.: persönliche Mitteilung, Jülich 1986.

## Kristallwachstumskinetik von Kaliumsulfat in wäßrigen Lösungen

Ivan Bakardjiev\*

Herrn Professor Dr.-Ing. Rolf Lacmann zum 60. Geburtstag

Die Kristallisation aus Lösungen wird zur Gewinnung oder Reinigung von Produkten der chemischen Industrie in großem Maß eingesetzt. Trotz der allgemein anerkannten wirtschaftlichen Bedeutung fehlen spezielle Theorien zur Kinetik und zum Mechanismus des Kristallwachstums aus Lösungen. Von vereinfachten Bedingungen ausgehende Betrachtungen ermöglichen keine quantitativen Aussagen, da die Wechselwirkungen zwischen Lösungsmittel und Substrat schwierig zu erfassen sind. Bei Ionenkristallen sind die Probleme noch komplizierter. Bei der Lösungskristallisation werden kinetische Untersuchungen dadurch erschwert, daß im Gegensatz zur Kristallisation in der Gasphase, bedingt durch die höhere Viskosität, ein Abfall des chemischen Potentials beim Transport der Kristallbausteine aus der übersättigten Lösung an die wachsende Kristallfläche auftritt. Für das Verständnis des Prozesses ist die sich stationär einstellende Orts- bzw. aktuelle Konzentration  $C^*$  unmittelbar vor der wachsenden Kristallfläche von entscheidender Bedeutung.

Sie teilt den Gesamtprozeß in zwei aufeinanderfolgende Schritte:

- Volumendiffusion zum Transport der Kristallbausteine aus der Lösung an die wachsende Kristallfläche,
- Grenzflächenkinetik, d. h. arteigene Adsorption, Oberflächendiffusion und Einbau der Bausteine in das Kristallgitter.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, besonders auch für praktische Anwendungen, eine Methodik zu entwickeln, die es ermöglicht, aus der experimentell bestimmten Wachstumsisotherme und deren systematischer Beeinflussung durch definierte Kristallbewegung die Parameter der Prozessschritte – Volumendiffusion und Grenzflächenkinetik – getrennt zu betrachten; dies erfolgt am Beispiel des Kaliumsulfats.

### 1 Theorie

Formelkinetisch lassen sich die Kristallwachstumsisothermen, die den Zusammenhang zwischen der Wachstumsgeschwindigkeit und

der Übersättigung darstellen, durch folgenden Ausdruck wiedergeben<sup>1)</sup> [1]:

$$\frac{dm}{dt} = K_z A \Psi[C - C_0] \quad (1)$$

Da die Kristalloberfläche schwer zu kontrollieren ist, kann, falls der Habitus des wachsenden Kristalls praktisch unverändert bleibt, folgende Annahme gemacht werden [2]:

$$A = f m^{2/3} \quad (2)$$

Nach Integration folgt aus den Gln. (1) und (2)

$$m^{1/3} - m_0^{1/3} = \frac{1}{3} K_z f \Psi[C - C_0] t \quad (3)$$

Da der Faktor  $f$  nur von der Form und Dichte des Kristalls abhängt, besteht Linearität bei konstanter Übersättigung.

Die lineare Wachstumsgeschwindigkeit  $G = dL/dt$  wird durch folgende Gleichung dargestellt:

$$G_m = \frac{dm^{1/3}}{dt} \sim G \quad (4)$$

Nach Gl. (3) gilt dann

$$G_m = \frac{1}{3} K_z f \Psi[C - C_0] \quad (5)$$

Die experimentelle Ermittlung von  $\Psi[C - C_0]$  wird zur empirischen Darstellung der Abhängigkeit des Kristallwachstums von der Übersättigung benutzt.

Gl. (5) kann zur Berechnung der Konzentrationsabnahme in den Kristallisationslösungen sowie zur Bestimmung der scheinbaren Reaktionsordnung und der Aktivierungsenergie verwendet werden.

Zur Bestimmung der Parameter der Volumendiffusion und der Grenzflächenkinetik wird von einem stationären Verlauf ausgegan-

\* Dr. I. Bakardjiev, Kaliforschungs-Institut der Kali und Salz AG, Bemeroder Str. 37, 3000 Hannover 71.

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluß des Beitrages.