



Anton Moser

Bioprozeßtechnik

**Berechnungsgrundlagen
der Reaktionstechnik
biokatalytischer Prozesse**



Springer-Verlag Wien GmbH

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Anton Moser
Institut für Biotechnologie, Mikrobiologie und Abfalltechnologie,
Technische Universität Graz, Österreich

ISBN 978-3-7091-2258-7 ISBN 978-3-7091-2257-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-7091-2257-0

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung,
der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur
auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© Springer-Verlag Wien 1981
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Wien New York 1981
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1981

Mit 95 Abbildungen

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Moser, Anton:
Bioprozeßtechnik: Berechnungsgrundlagen d.
Reaktionstechnik biokatalyt. Prozesse / Anton
Moser. – Wien; New York: Springer, 1981.
ISBN 978-3-7091-2258-7

Vorwort

Dieses Buch ist das Ergebnis einer mehr als zehnjährigen Tätigkeit in Forschung und Lehre. Es ist aus Vorlesungen entstanden, die ich an der Technischen Universität Graz seit 1970 und während meiner Aufenthalte als Gastprofessor an der University of Western Ontario in London, Canada, 1980, und an der Université Libre de Bruxelles, 1981, gehalten habe.

Die hauptsächliche Absicht, die ich mit diesem Buch befolge, ist erstens, die noch immer bestehende Kluft zwischen Grundlagen- und Ingenieurwissenschaften überbrücken zu helfen, und zweitens, zur inneren Entwicklung der Biotechnologie beizutragen.

Dieses Ziel findet seinen Ausdruck im Willen zur Synthese innerhalb dieses interdisziplinären Wissensgebietes, das sich auf immer mehr Spezialfächer ausdehnt. Eine nötige Neuorientierung soll durch den vereinheitlichenden, prozeßorientierten Standpunkt der „Bioprozeßtechnik“ gefördert werden, wobei eine systematische Denk- und Arbeitsweise verfolgt wird. Diese Strategie als Ausdruck einer „Research philosophy“ umfaßt vier Arbeitsprinzipien: 1. Das Arbeiten mit Vereinfachungen, d.h. das Unterscheiden zwischen Wesentlichem und Unwesentlichem; 2. das Quantifizieren; 3. die Analyse, d.h. das Trennen zwischen biologischen und physikalischen Phänomenen; sowie 4. das Denken und Arbeiten mit Modellen.

Mathematische Modelle sind in erster Linie als Arbeitshypothesen zu betrachten, die neben der unersetzlichen Intuition als Starthilfe („Denken in Analogien“) zu Prozeßentwicklungen dienen können und die anschließend im Rahmen einer adaptiven Modellbildung mit der experimentellen Realität des Bioprozesses zu vergleichen und ihr anzupassen sind. Die in diesem Buch angewandte Strategie steht im Einklang mit der sogenannten deduktiven Methode der wissenschaftlichen Bearbeitung nach Popper.

In Anlehnung an diese allgemeine Denkweise weist der Text des Buches eine Organisation in Kapitelfolgen auf, die sich nach didaktischen Gesichtspunkten sinnvoll ergeben. Nach der Definition und inneren Abgrenzung der „Bioprozeßtechnik“ zum Gesamtgebiet der Biotechnologie in Kapitel 1 und der Darlegung der Denk- und Arbeitsprinzipien in Kapitel 2 wird die Analyse von technischen Bioprozessen in den Kapiteln 3 bis 5 durchgeführt. Dabei wird mit der quantitativen Kennzeichnung von Bioreaktoren in Kapitel 3 begonnen und die Darstellung in Kapitel 4 mit der allgemeinen Handhabung von Bioreaktoren zur Gewinnung kinetischer Daten in der prozeßkinetischen Analyse fortgesetzt. Anschließend werden in Kapitel 5 die mathematischen Modellansätze für die Kinetik von Bioprozessen beschrieben, wobei vom prozeßtechnischen Stand-

VI Vorwort

punkt aus die Formalkinetik in den Vordergrund gestellt wird. Abschließend wird in Kapitel 6 die Synthese von biologischen Daten (Kinetik) und physikalischen Daten der Bioreaktoren (Transportphänomene) dargelegt, um die Umsätze bzw. Produktivitäten für die wichtigsten Operationsweisen und Reaktorgrundtypen zu ermitteln.

Im Zusammenhang mit der Neuordnung und Systematisierung schien mir auch eine Vereinheitlichung der Nomenklatur angebracht, wobei weitgehend bekannte Symbole herangezogen und nur in einzelnen Fällen Neubildungen in Analogie vorgenommen wurden.

Das Hauptaugenmerk des Buches wurde nicht auf eine vollständige Literaturübersicht gerichtet, sondern auf die Darstellung allgemeingültiger Ansätze zur Berechnung von technischen Bioprozessen. Die Probleme der quantitativen Erfassung stehen im Vordergrund, und dabei vor allem die der Kinetik als Drehscheibe aller reaktionstechnischen Überlegungen und Berechnungen. Die Biosynthese von Stoffwechselprodukten und alle biologisch-biochemischen Aspekte sind in dem Buch von H. J. Rehm (Technische Mikrobiologie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980) bestens dargelegt. Die verfahrenstechnischen Aspekte der Reaktorquantifizierung und des Prozeßentwurfes sind in einem sinnvollen Ausmaß enthalten, so daß eine Darstellung des Arbeitsflusses der Analyse und Synthese zur Bewältigung von Bioprozessen im technischen Maßstab in zusammenhängender Form gegeben ist. Auf Grund der andersgearteten Orientierung und der entwickelten Strategie soll das vorliegende Buch eine Lücke schließen, die zwischen den existierenden Lehrbüchern für den Autor spürbar ist.

Dieses Buch habe ich für alle Interessenten in Industrie und Universität geschrieben (Studenten der Chemie, Biologie und der Verfahrenstechnik bzw. Zivilingenieure und Ingenieure in der Fermentations-, Abwasser-, Enzym- und Lebensmitteltechnik), die sich mit der Berechnung von Bioprozessen zum Zwecke des Prozeßentwurfes zu beschäftigen haben.

Herrn Prof. A. E. Humphrey, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, und auch Herrn Prof. R. M. Lafferty, Technische Universität Graz, danke ich für die mir bei der Beurteilung meiner Habilitationsschrift gegebene Anregung und Ermunterung, diese nach entsprechender Umarbeitung und Erweiterung in Buchform zu veröffentlichen. Herrn Prof. A. Fiechter, ETH Zürich, und dem Springer-Verlag in Wien möchte ich meinen Dank dafür sagen, zu den äußeren Voraussetzungen für diese Arbeit beigetragen zu haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau, die in verständnisvoller Geduld über Jahre hinweg mir zur Seite war und die Niederschrift des Manuskriptes bzw. das Lesen und Korrigieren besorgte.

London/Ontario und Graz, Mai 1981

Anton Moser

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Nomenklatur | X |
| Indizes | XII |
| Griechische Symbole | XIII |
| Häufig benutzte dimensionslose Kenngrößen | XIV |
| Abkürzungen | XIV |
| Zeichen | XV |
| | |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Biotechnologie – Definition und Überblick | 1 |
| 1.2 Bioprozeßtechnik – Inhalt und Ausbildungsziel | 5 |
| Literatur | 10 |
| | |
| 2 Die Bioprozeßtechnik und ihre Arbeitsprinzipien | 11 |
| 2.1 Prozeßentwicklung | 11 |
| Produktionsstamm | 11 |
| Ausgangssituationen | 12 |
| Vorgangsweisen der Prozeßentwicklung | 13 |
| Prozeßentwicklung ohne mathematische Modelle | 15 |
| 2.2 Grundbegriffe zur Quantifizierung von Bioprozessen | 17 |
| Geschwindigkeit von Bioprozessen | 19 |
| Stöchiometrie | 23 |
| Grundkonzept einer einheitlichen Nomenklatur der Bioprozeßkinetik | 23 |
| Produktivität | 25 |
| 2.3 Arbeitsprinzipien der Bioprozeßtechnik | 28 |
| Prinzip des Vereinfachens | 31 |
| Prinzip des Quantifizierens | 32 |
| Prinzip des Trennens | 32 |
| Prinzip des mathematischen Modellierens | 33 |
| 2.4 Mathematische Modelle | 39 |
| Wozu werden Modelle gebraucht? | 41 |
| Modellbildung | 41 |
| Statistische Methoden | 45 |
| Statistische Grundbegriffe und Berechnungsgleichungen | 46 |
| Regressionsanalyse | 48 |
| Literatur | 51 |

| | |
|--|-----|
| 3 Bioreaktoren | 53 |
| 3.1 Überblick: Industrielle Reaktoren | 53 |
| Mikrobiologische Reaktoren (Fermenter und Abwasseranlagen) | 53 |
| Enzymreaktoren | 55 |
| Sterilisatoren | 57 |
| 3.2 Systematisierung der Bioreaktoren | 57 |
| Homogene bzw. heterogene Systeme | 57 |
| Operationsweisen | 59 |
| Mischungszustand der Reaktoren | 59 |
| 3.3 Quantifizierungsmethoden | 62 |
| Mischzeit t_m und Mischgüte m | 62 |
| Verweilzeitverteilung (VZV) | 64 |
| 1- d -Dispersionsmodell | 65 |
| Tank-in-Serie-Modell | 67 |
| O ₂ -Transportgeschwindigkeit (OTR) | 70 |
| O ₂ -Ausnutzungsgrad η_{O_2} | 75 |
| Leistungsaufwand P | 75 |
| O ₂ -Ertrag (-Ökonomie) O ₂ -E | 75 |
| Hinterlandsverhältnis (HI) | 75 |
| Wärmetransportgeschwindigkeit (ΔHTR) | 76 |
| Charakteristische Größe der biokatalytischen Masse | 79 |
| Vergleich prozeßtechnischer Daten von Bioreaktoren | 79 |
| Biologische Testsysteme | 81 |
| 3.4 Operationsweisen und Bioreaktorkonzepte | 82 |
| 3.5 Bioreaktormodelle | 87 |
| Modell 1: Der ideale diskontinuierliche Rührkessel (dkRK) | 88 |
| Modell 2: Der ideale kontinuierliche Rührkessel (kRK) mit $V = \text{konstant}$ | 88 |
| Modell 3: Der ideale semikontinuierliche Rührkessel (skRK) mit $V = \text{variabel}$ | 89 |
| Modell 4: Der ideale kontinuierliche Rohrreaktor (kRR) | 90 |
| Modell 5: Realer kRR mit Dispersion | 91 |
| Literatur | 94 |
| 4 Prozeßkinetische Analyse | 97 |
| 4.1 Situation in den verschiedenen Bioreaktoren | 97 |
| 4.2 Test auf Pseudohomogenität | 99 |
| 4.3 Ermittlung kinetischer Daten mit Bioreaktoren | 104 |
| Integrale und differentielle Reaktoren | 104 |
| Integrale und differentielle Auswertungsmethode | 107 |
| Ergebnisse der differentiellen und integralen Analyse: Linearisierungsdiagramme | 110 |
| 4.4 Heterogene Modellansätze | 117 |
| Externe Transportlimitierung | 119 |
| Interne Transportlimitierung | 120 |
| Transportbeschleunigung | 122 |
| Literatur | 126 |
| 5 Formalkinetik von Bioprozessen | 128 |
| 5.1 Temperaturabhängigkeit: $k(T)$ | 129 |

| | |
|---|------------|
| 5.2 Mikrokinetische Ansätze aus der Kinetik chemischer und enzymatischer Reaktionen | 133 |
| 5.3 Grundmodelle des Wachstums und Substratverbrauches in homogenen Systemen | 136 |
| $\mu(S)$: Einfache Funktionen | 136 |
| Wachstum von Myzelien und Pellets | 138 |
| Funktion $\mu(t)$ | 139 |
| Instationäre Kinetik: $\mu_{\max}(t)$ und $K_S(t)$ | 141 |
| Funktion $Y(t)$ | 142 |
| <i>S</i> -Inhibition | 142 |
| Funktion $\mu(\text{pH})$ | 144 |
| Endogener Stoffwechsel | 144 |
| 5.4 Grundmodelle der Produktbildung | 146 |
| Wärmebildung bei Fermentationen | 151 |
| 5.5 Modelle heterogener Bioprozesse | 152 |
| 5.6 Kinetik von Multi-komponenten Systemen | 156 |
| Multi- <i>S</i> -Kinetik (Fermentations-, Abwassertechnik) | 157 |
| Mischpopulation | 162 |
| Pseudokinetik | 163 |
| Mehrkomponentensysteme der Lebensmitteltechnik | 164 |
| Literatur | 165 |
| 6 Prozeßentwurf: Methoden der Voraussage des Umsatzes bzw. der Produktivität | 169 |
| 6.1 1-Phasen(L-)Reaktoren vom Typ des kRK: 1-stufiger kRK | 170 |
| Mehrstufige kRK (kRK-Kaskade) | 172 |
| kRK mit Zellrückführung | 173 |
| 6.2 1-Phasen(L-)Reaktoren: Vergleich zwischen idealem kRR und idealem kRK | 175 |
| Fermentationsprozesse zur Produktion sekundärer Metaboliten | 175 |
| Sterilisation | 176 |
| Lebensmitteltechnik | 177 |
| Prozesse mit Enzymkinetik (Wachstumsprozesse der Fermentationstechnik und Enzymtechnik) | 177 |
| 6.3 1-Phasen(L-)Reaktoren mit beliebiger Verweilzeit und Mikro-Mischung | 181 |
| Graphische Methode | 181 |
| Berechnung | 182 |
| 6.4 Pseudohomogenes Modell für Film-Bioreaktoren | 183 |
| Kinetik als geschwindigkeitsbestimmender Schritt | 184 |
| Transportvorgänge als geschwindigkeitsbestimmender Schritt | 184 |
| 6.5 G/L-Reaktormodell für Bioprozesse | 185 |
| 6.6 Schlußwort | 187 |
| Literatur | 188 |
| Sachverzeichnis | 190 |

Nomenklatur

| | | |
|--------------------------|---|---|
| A | % | Ausbeute |
| A | cm^2 | Austauschoberfläche |
| a | cm^2/cm^3 | Spezifische Austauschoberfläche |
| $a_i(b, c, d)$ | – | Stöchiometrische Koeffizienten |
| c | g/l | Konzentration, allgemein |
| c_p | $\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ | Spezifische Wärme |
| C | g/l | CO_2 -Konzentration |
| d | cm | Durchmesser, charakteristische Länge |
| D | cm^2/sec | Diffusions-, Dispersionskoeffizient |
| D | h^{-1} | Verdünnungsgeschwindigkeit |
| E | g/l | Enzymkonzentration |
| E | cm^2/sec | Konvektionskoeffizient |
| $E(\eta_{\text{TR}})$ | – | Beschleunigungsfaktor |
| $E_a(E)$ | kcal/mol | Aktivierungsenergie |
| F | m^3/h | Durchflußgeschwindigkeit |
| F_r | m^3/h | Rückflußgeschwindigkeit |
| $F(t)$ | – | VZV-Funktion (Stufenfunktion) |
| $f(t)$ | – | VZV-Funktion (Impulsfunktion) |
| f | – | Mathematische Funktion, allgemein |
| f | % | Fehler, relativer |
| ΔG | kcal/mol | Freie Reaktionsenthalpie |
| G | kg | Gewicht |
| g | cm/sec^2 | Erdbeschleunigung (980) |
| g_c | $\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{sec}^2$ | Gravitationskonstante ($6,671 \cdot 10^{-8}$) |
| $\Delta H, \Delta H_V$ | kcal/l | Volumetrische Reaktionswärme |
| $\Delta H_R(\Delta H_m)$ | kcal/gX oder kcal/gS | Metabolische Reaktionsenthalpie (bzw. -Wärme) |
| I | g/l | Inhibitorkonzentration |
| J | – | Inhomogenität (Gl. 3.1) |
| $K(K_c)$ | öS, DM | Kosten (Extraktionskosten) |
| K_{GG} | g/l | Gleichgewichtskonstante (Gl. 5.11) |
| K | l/g | Konstante der Langmuir-Kinetik |
| K_m | g/l | Michaelis-Menten-Konstante |
| K_S | g/l | Monod-Konstante |
| K_I | g/l | Inhibitionskonstante |
| K_H | g/l | Hill-Konstante (Gl. 5.16) |
| K_P | g/l | Konstante der Rückreaktion bei reversiblen Reaktionen (Gl. 5.12) |

| | | |
|----------------------------|---|--|
| $K_{P,e}$ | öS, DM | Kosten für Produktextraktion |
| k | ! | Geschwindigkeitskonstante, allgemein |
| k_E | sec^{-1} | Elektrodenkonstante (Gl. 3.25c) |
| k_d | sec^{-1} | Absterbekonstante |
| $k_{\Delta H}$ | $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ | Wärmetransportkoeffizient |
| k_L | cm/sec | Stofftransportkoeffizient (flüssigseitig) |
| k_r | $(\text{l/g})^{n-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante |
| k_{TR} | sec^{-1} | Stofftransportgeschwindigkeitskonstante (Gl. 2.9b) |
| k_P | h^{-1} | Produktbildungsgeschwindigkeitskonstante |
| k_{PZ} | h^{-1} | Produktzerfallsgeschwindigkeitskonstante |
| $k_{V,G}$ | sec^{-1} | Verdünnungsgeschwindigkeitskonstante (G-Phase), Gl. 3.25b |
| k_w | $\text{kcal/h} \cdot ^\circ\text{C}$ | Wärmetransportgeschwindigkeitskonstante (Gl. 2.9c) |
| L | cm | Länge, charakteristische |
| L | „tato“ | Leistung eines Reaktors (Gl. 2.13) |
| L | h^{-1} | Schlammbelastung (B_{TS}) |
| M | kg | Masse |
| m | % | Mischgüte |
| m | h^{-1} | Koeffizient des Erhaltungstoffwechsels (σ_e) |
| N | — | Dimensionslose Kennzahlen (s. extra) |
| N | — | Äquivalentstufenzahl |
| N | — | Zellzahl |
| N | — | Molzahl |
| n | upm | Drehzahl |
| n | — | Reaktionsordnung |
| n'_i | $\text{mol/m}^2 \cdot \text{sec}$ | Molarer Flux (Gl. 2.2) |
| n, n_i | — | Anzahl, laufende Zahl i |
| n_H | — | Koeffizient der Hill-Kinetik |
| n | $\text{g/l} \cdot \text{h}$ | Stofftransportgeschwindigkeit |
| O | g/l | O_2 -Konzentration |
| P | W | Leistungsbedarf |
| P | g/l | Produktkonzentration |
| p | Ps | Partialdruck |
| q_S, q_{O_2}, q_P | $\text{mmol/gX} \cdot \text{h}$ | siehe σ_S, σ_O, π |
| q | $\text{kcal/l} \cdot \text{h}$ | Wärmetransportgeschwindigkeit |
| R | $\text{kg cm}^{-2} \text{ l}^{-1}$ | Gaskonstante (0,08478) |
| R | cm | Radius |
| r, r_i | g/l h | Reaktionsgeschwindigkeit (absolute) bzw. Umsetzungs- oder Bildungsgeschwindigkeit |
| r' | $\text{g/cm}^2 \text{ sec}$ | Oberflächenbezogene Reaktionsgeschwindigkeit |
| r^* | ! | Bezogene Reaktionsgeschwindigkeit, allgemeine |
| r | — | Rückstromstärkeverhältnis |
| r | — | Korrelationskoeffizient (Gl. 2.36) |
| ΔS | $\text{cal/mol } ^\circ\text{K}$ | Reaktionsentropie |
| S | g/l | Substratkonzentration |
| s | sec^{-1} | Oberflächenenerneuerungsgeschwindigkeit |
| s | — | Streuungsbreite einer Verteilungsfunktion |
| s^2 | — | Varianz einer Verteilungsfunktion |

XII Indizes

| | | |
|--------------|--------------------------------------|---|
| T | $^{\circ}\text{C}, ^{\circ}\text{K}$ | Temperatur |
| t | sec | Zeit, allgemein |
| t_c | sec | Zykluszeit |
| t_K | sec | Kontaktzeit |
| t_L | h | Lagzeit |
| t_M | h | Reifezeit |
| t_m | sec | Mischzeit |
| t_r | sec | Reaktionszeit |
| U | % | Umsatz |
| V | m^3 | Volumen |
| v | m/sec | Geschwindigkeit |
| v_S | m/sec | Superfizielle Strömungsgeschwindigkeit |
| v_{mf} | m/sec | Geschwindigkeit der minimalen Fluidisation |
| \dot{v} | min^{-1} | Schergefälle (Scher-Geschwindigkeitsgradient) |
| X | g/l | Zellkonzentration |
| $x(x_i)$ | — | Prozeßvariable bzw. Größe, allgemein |
| $Y(Y_{i/j})$ | — | Ertragskonstante (Gl. 2.8) |
| z | — | Koordinate |

Indizes

| | |
|------------|--------------------------------|
| ads | Adsorption |
| ber | Berechnet |
| B | Blasen |
| C | CO_2 |
| d | Absterben |
| des | Desorption |
| ex | Austritt |
| E | Enzym, Elektrode |
| e | Endogen oder Extraktion |
| eff | Effektiv |
| exp | Experimentell |
| G | Gas |
| ges | Gesamt |
| ΔH | Reaktionsenthalpie bzw. -wärme |
| in | Eintritt |
| i | Komponente, laufende Zahl |
| j | Komponente, laufende Zahl |
| krit | Kritisch |
| K | Kalt, Katalysator |
| L | Flüssig oder longitudinal |
| max | Maximal |
| 0 | Nullwert, Anfang |
| O | O_2 |
| opt | Optimal |
| P | Produkt oder Partikel |

| | |
|-----|----------------|
| PZ | Produktzerfall |
| r | Reaktion |
| R | Reaktor |
| rel | Relativ |
| S | Substrat |
| S | Festphase |
| St | Sterilisation |
| top | Spitze |
| TR | Transport |
| t | Zeit |
| V | Volumen |
| V | Verdünnung |
| W | Warm, Wachstum |
| X | Zellmasse |
| z | Koordinate |

Griechische Symbole

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|---|
| α_w | — | Wasseraktivität |
| α, α_i | — | Empirischer Koeffizient |
| β | — | Empirischer Koeffizient |
| β | — | Koeffizient der Zellaufkonzentrierung (X_T/X) |
| γ | — | Empirischer Koeffizient |
| γ | g/cm ² | Oberflächenspannung |
| δ | cm | Filmdicke |
| ϵ | — | Volumenanteil (hold up) |
| ϵ | h ⁻¹ | Spezifische Enzymbildungsgeschwindigkeit |
| ϵ | cm ² /sec ³ | Energiedissipation (Energieverteilung pro Masse) (Gl. 4.1 c, d) |
| ϵ | — | Verhältniszahl zwischen Enzymkonstanten (Gl. 5.48) |
| η | — | Wirkungsgrad, Effektivitätsfaktor |
| η_{O_2} | % | O ₂ -Effektivitätsfaktor (Gl. 3.26) |
| η_t | — | Effektivitätsfaktor der Reaktion |
| $\eta_{TR}(E)$ | — | Effektivitätsfaktor des Transportes |
| λ | h | Lebenserwartung |
| λ | $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ | Leitfähigkeit |
| Λ | h | Alter |
| μ | h ⁻¹ | Spezifische Wachstumsgeschwindigkeit |
| ν | h ⁻¹ | Spezifische Zellzahlvermehrungsgeschwindigkeit |
| ν | cm ² /sec | Kinematische Viskosität |
| π | h ⁻¹ | Spezifische Produktbildungsgeschwindigkeit (q_P) |
| $\pi_{\Delta H}$ | kcal/g h | Spezifische Wärmebildungsgeschwindigkeit |
| Π | — | Produktsumme |
| ρ | g/cm ³ | Dichte |
| $\sigma(\sigma_S)$ | h ⁻¹ | Spezifische S-Verbrauchsgeschwindigkeit (q_S) |
| σ_e | h ⁻¹ | Koeffizient des Erhaltungsstoffwechsels (m) |
| σ_O | h ⁻¹ | Spezifische O ₂ -Verbrauchsgeschwindigkeit (q_{O_2}) |

XIV Abkürzungen

| | | |
|----------|-----|--|
| Σ | – | Summe |
| τ | – | Bezogene, dimensionslose Zeit (t/\bar{t}) |
| τ_E | sec | Charakteristische Zeit einer Elektrode (Gl. 3.25d) |
| τ_L | sec | Verzögerungszeit für instationären Lag (Gl. 5.35) |
| ϕ | – | Konsumtionskoeffizient (Gl. 5.25) |
| Φ | – | Thiele-Modul |
| ω | – | Empirischer Koeffizient |

Häufig benutzte dimensionslose Kenngrößen

| Symbol | Definition | Bedeutung | Name |
|-----------|-------------------------|---|-------------------|
| B_0 | $v \cdot L/D_L$ | makroskopisch bewegte/rückvermischte Masse | Bodenstein |
| Da_I | $r \cdot L/v \cdot c$ | abreagierte/zuströmende Masse | Damköhler, 1. Art |
| Da_{II} | $r \cdot L^2/D \cdot c$ | Geschwindigkeitskonstante der Reaktion/ Stofftransport | Damköhler, 2. Art |
| Fr | $v^2/g \cdot L$ | Trägheitskräfte/Schwerkraft | Froude |
| Ha | Gl. 4.31 | Stoffübergang mit/ohne chemische Reaktion | Hatta |
| Re | $v \cdot L/\nu$ | Impuls/innere Reibung | Reynolds |
| Sc | ν/D | molekularer Impuls/Diffusion | Schmidt |
| Sh | $k_L \cdot L/D$ | gesamter Stoffübergang/Diffusion | Sherwood |
| We | $v^2 \cdot L/\gamma$ | Trägheits-/Grenzflächenkräfte | Weber |
| Hl | Gl. 3.28 | Volumen Flüssigfilm an G/L-Grenzfläche pro Volumen Gesamtflüssigkeit | Hinterland |

Abkürzungen

| | |
|-------------------|--|
| BS | Blasensäule |
| BSB | Biologischer O ₂ -Bedarf |
| B _{TS} | Schlammbelastung (L) |
| CTR | CO ₂ -Transportgeschwindigkeit |
| CSB | Chemischer O ₂ -Bedarf |
| DS | Dünnschichtreaktor |
| dk | Diskontinuierlich |
| FR | Filmreaktor |
| ΔHTR | Wärmetransportgeschwindigkeit |
| id | Ideal |
| k | Kontinuierlich |
| kRK, kRR | Kontinuierlicher Rührkessel, Rohrreaktor |
| mm | Maximale Mischung |
| NkRK | Kontinuierliche Rührkesselkaskade mit Anzahl N |
| OTR | O ₂ -Transportgeschwindigkeit |
| O ₂ -E | O ₂ -Ertrag |
| Pr | Produktivität |
| RK | Rührkessel |

| | |
|-----|---------------------------------------|
| RR | Rohrreaktor |
| sk | Semikontinuierlich |
| STR | Substrat-Transportgeschwindigkeit |
| SAQ | Summe der Abweichungsquadrate |
| SD | Strahldüsenreaktor |
| SR | Schlaufenreaktoren |
| TR | Turmreaktor |
| TOC | Totaler organischer Kohlenstoffgehalt |
| ts | Totale Segregation |
| var | Varianz |
| VZV | Verweilzeitverteilung |
| ZTS | Zelltrockensubstanz |

Zeichen

| | |
|----------|--|
| \cong | Größer, gleich oder kleiner als |
| ∞ | Unendlich, Endwert |
| * | Sättigungswert |
| — | Stationär, Gleichgewichts-, Mittelwert |
| \wedge | Abweichungsvariable |
| ‡ | Übergangszustand |
| ~ | Aktiv |