

# **Lehrprofil Technische Chemie**

**Herausgegeben vom  
ProcessNet Unterrichtsausschuss für Technische Chemie an  
Wissenschaftlichen Hochschulen  
3. Auflage**



# Lehrprofil Technische Chemie

Inhaltsverzeichnis		Seite
<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>4</b>
1.1	Die organisatorische Entwicklung der Technischen Chemie	
1.2	Die inhaltliche Entwicklung	
1.3	Die Technische Chemie heute und die Anforderungen der Zukunft	
1.4	Weiterbildung	
1.5	Lehrinhalte der Technischen Chemie	
1.5.1	Ausbildungsabschnitte	
1.5.2	Voraussetzungen	
1.5.3	Die Struktur der Grundausbildung im Fach Technische Chemie	
1.5.4	Empfohlene Literatur	
<b>2</b>	<b>Chemische Prozesstechnologien</b>	<b>10</b>
2.1	Zielsetzung	
2.2	Inhaltsbeschreibung	
2.2.1	Exemplarische Beschreibung wichtiger Prozesse	
2.2.2	Grundlagen der Verfahrensentwicklung	
2.3	Vorlesungsgliederung	
2.3.1	Stoffliche Aspekte	
2.3.2	Verfahrensentwicklung	
2.4	Literatur	
2.4.1	Einführende Literatur	
2.4.2	Weiterführende Literatur	
2.4.3	Literatur zur Biotechnologie	
<b>3</b>	<b>Chemische Reaktionstechnik</b>	<b>15</b>
3.1	Zielsetzung	
3.2	Inhaltsbeschreibung	
3.2.1	Analyse und Modellierung chemischer/biochemischer Reaktionen	
3.2.2	Chemische Reaktoren und ihre Auslegung	
3.3	Vorlesungsgliederung	
3.3.1	Analyse und Modellierung chemischer/biochemischer Reaktionen	
3.3.2	Chemische Reaktoren und ihre Auslegung	
3.4	Literatur	
3.4.1	Einführende Literatur	
3.4.2	Weiterführende Literatur	
3.4.3	Literatur zur Bioreaktions- und Bioprozesstechnik	

<b>4</b>	<b>Thermische und mechanische Grundoperationen</b>	<b>20</b>
4.1	Zielsetzung	
4.2	Inhaltsbeschreibung	
4.2.1	Grundlagen der Strömungslehre sowie des Stoff- und Wärmetransports	
4.2.2	Grundlagen und Prinzipien der thermischen Grundoperationen	
4.2.3	Grundlagen und Prinzipien der mechanischen Grundoperationen	
4.3	Vorlesungsgliederung	
4.3.1	Strömungslehre, Stoff- und Wärmetransport	
4.3.2	Thermische Trennverfahren	
4.3.3	Ausgewählte mechanische Grundoperationen	
4.4.	Literatur	
4.4.1	Einführende Literatur	
4.4.2	Weiterführende Literatur	
<b>5</b>	<b>Vorlesungsbegleitende Lehrveranstaltungen</b>	<b>25</b>
5.1	Technisch-chemisches Praktikum	
5.1.1	Zielsetzung	
5.1.2	Inhaltsbeschreibung	
5.1.3	Literatur	
5.2.	Technisch-chemische Berechnungen	
5.2.1	Zielsetzung	
5.2.2	Inhaltsbeschreibung	
5.2.3	Literatur	
5.3	Exkursionen in die chemische und chemisch-pharmazeutische Industrie	
5.3.1	Zielsetzung	
5.3.2	Inhaltsbeschreibung	

## **Vorwort**

Mit der dritten Auflage des „Lehrprofils Technische Chemie“ unternehmen die im ProcessNet Unterrichtsausschuss für Technische Chemie verbundenen Fachvertreter aus wissenschaftlichen Hochschulen und Industrie den Versuch, die Lehrinhalte zur Grundausbildung in der Fachdisziplin Technische Chemie gegenüber der zweiten Auflage aus dem Jahre 2002 zu aktualisieren und zu ergänzen.

Die Vorlage der neuen Auflage des Lehrprofils soll ebenfalls als Beitrag zur Fortentwicklung der Empfehlungen der wissenschaftlichen Gesellschaften im Zuge der Einführung von Bachelor- und Masterstudiengängen verstanden werden. Eine wichtige Voraussetzung zur inhaltlichen Ausgestaltung des Hochschulfaches Technische Chemie als ein integraler Bestandteil der Ausbildung von Chemikern und Chemieingenieuren ist die Verständigung aller Hochschullehrer dieses Faches über die gemeinsame Basis der Lehrinhalte. Wichtig ist dabei, dass die Anforderungen der späteren Berufspraxis in der Auswahl der wissenschaftlichen Grundlagen berücksichtigt sind.

Das Lehrprofil soll weiterhin sowohl als Grundlage für die weitere Arbeit des Unterrichtsausschusses dienen als auch allen denjenigen zur Verfügung stehen, die an der Entwicklung des Fachgebietes Technische Chemie interessiert sind.

Die Vorbereitung der neuen, überarbeiteten Auflage, die den in den letzten Jahren eingetretenen Entwicklungen Rechnung trägt, übernahmen unter der Federführung von Herren W. Reschetilowski (Dresden) und H.-U. Moritz (Hamburg) folgende weitere Mitglieder des Unterrichtsausschusses: H. Bockhorn (Karlsruhe), N. Finke (Essen), H.-E. Gasche (Leverkusen), K.-O. Hinrichsen (München), F. Janowski (Halle/S.), G. Kreysa (Frankfurt/M.), J. Lercher (München), J. Rudolph (Ludwigshafen), T. Scheper (Hannover), J. Semel (Pullach), H. Vogel (Darmstadt), P. Wasserscheid (Erlangen), J. Weitkamp (Stuttgart).

# 1. Einführung

## 1.1 Die organisatorische Entwicklung der Technischen Chemie

Das Fach Technische Chemie als Teildisziplin der Chemieausbildung ist an deutschen wissenschaftlichen Hochschulen durch Lehrstühle der Technischen Chemie seit über 100 Jahren vertreten und war an den Technischen Hochschulen die Keimzelle der Gründung chemischer Abteilungen. Damit hat die Technische Chemie einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Chemie und in neuerer Zeit auch der Biotechnologie an den deutschen Hochschulen geleistet.

In den Jahren um 1950 war die Technische Chemie an sämtlichen Technischen Hochschulen als Grundlagenfach vertreten. An den Universitäten wurde sie jedoch, von Ausnahmen abgesehen, nicht angeboten. Verschiedene Denkschriften wiesen jedoch fortlaufend auf die allgemeine Bedeutung dieses Faches für die Chemieausbildung hin. Hier sind besonders zu nennen:

- Denkschrift der DFG „Angewandte Forschung in der Bundesrepublik Deutschland, Teil 4/1960, Lage und Ausbaunotwendigkeiten“,
- Petitum zu den Empfehlungen des Wissenschaftsrates (vorgelegt 1967 seitens der GDCh, ADUC, Bunsengesellschaft, DECHEMA und VCI),
- Vorschläge zum Chemiestudium (Fonds der Chemischen Industrie, 1991),
- Memorandum zur Stärkung der universitären Ausbildung und Forschung im Fach Chemie vor dem Hintergrund des Strukturwandels in der Weltwirtschaft (Chemische Gesellschaften, DBG, DECHEMA, GDCh, GBCh, Verbände BAVC, VAA, VCI/FCI, Industriegewerkschaft Chemie-Papier-Keramik, 1995),
- Denkschrift zur Neuordnung des Chemiestudiums an den deutschen Universitäten und Technischen Hochschulen/Universitäten vor dem Hintergrund des Strukturwandels in Industrie und Wirtschaft (Würzburger Denkschrift, Konferenz der Fachbereiche Chemie, 1996).
- Memorandum der DECHEMA zur Sicherung und Stärkung der Technischen Chemie für die Ausbildung von Chemikern an den deutschen Hochschulen und Universitäten, 2005

Im Rahmen des Ausbaus der Hochschulen in den 60er Jahren fand auch an den Universitäten – insbesondere bei Neugründungen – die Technische Chemie Eingang. Die weitergehende Berücksichtigung der Technischen Chemie wurde ebenfalls in den gemeinsamen Empfehlungen der wissenschaftlichen Gesellschaften (Vorschläge zum Chemiestudium an den wissenschaftlichen Hochschulen, 1978) zur Reform des Chemiestudiums festgehalten.

In der Denkschrift zur Neuordnung des Chemiestudiums an den deutschen Universitäten und Technischen Hochschulen/Universitäten vor dem Hintergrund des

Strukturwandels in Industrie und Wirtschaft, auch als Würzburger Modell bekannt, fand die Technische Chemie bereits im sogenannten Basisstudium (1.—6. Semester) ihren gebührenden Platz. Im weiteren Studienverlauf konnten sich die Studierenden je nach Interessenslage neben den anderen Grundlagenfächern auch im Bereich Technische Chemie spezialisieren.

Dennoch blieb das Bild hinsichtlich der Technischen Chemie an den verschiedenen Hochschulen/Universitäten nicht einheitlich und entsprach in vielen Fällen nicht dem diesem Fach gebührenden Stellenwert.

Mit der gegenwärtigen Einführung der gestuften Bachelor-, Master- und Promotionsstudiengänge soll ein einheitlicher europäischer Hochschulraum geschaffen werden, in dem die staatenübergreifende Vergleichbarkeit der jeweiligen Abschlüsse erleichtert und die Mobilität der Studierenden und der Absolventen im zusammenwachsenden Europa gefördert wird. Die Wissenschafts- und Kultusministerien in der Bundesrepublik Deutschland haben diesen sogenannten Bologna-Prozess so interpretiert, dass die bewährten Diplomabschlüsse des Studiums der Chemie und des Chemieingenieurwesens an den deutschen Universitäten und Technischen Hochschulen/Universitäten weitgehend den Bachelor- und Masterabschlüssen weichen mussten. Ob dadurch die Qualität von Bildung und Ausbildung der Absolventen sowie ihre Chancen am Arbeitsmarkt gesteigert werden können, wird die Zukunft erweisen.

Die Veränderungen der Studienstruktur haben für das Fach Technische Chemie zwei Jahre vor dem Abschluss des Bologna-Prozesses zu keiner erkennbaren Vereinheitlichung geführt; eher hat die Diversität zugenommen.

Heute ist das Fach Technische Chemie an mehr als 30 deutschen Hochschulen/Universitäten durch mehr als 100 Hochschullehrer vertreten, wobei alle Übergänge vom Pflichtfach zum ergänzenden Lehrangebot (Lehraufträge, Honorarprofessuren) gegeben sind. Nach wie vor kommt der Technischen Chemie durch ihren Anwendungsbezug bei der Überführung von Grundlagenkenntnissen in die Praxis eine Mittlerfunktion zu, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit unserer Volkswirtschaft verbessert wird. Daher kann keine Chemiewirtschaft der Welt auf die lebenswichtige Funktion der Technischen Chemie innerhalb der chemischen Prozesstechnologien verzichten.

## 1.2 Die inhaltliche Entwicklung

Wie in den anderen chemischen Teildisziplinen auch war das Ausbildungskonzept der Technischen Chemie manchem Wandel unterworfen.

Den Ausgangspunkt im vergangenen Jahrhundert bildeten produktbezogene Themenstellungen, die sich an Technologien der Verarbeitung von Naturstoffen orientierten. Mit der Entwicklung der Chemischen Technik erweiterte sich auch die Themenstellung der Forschung und Lehre an den Hochschulen beträchtlich. Die Technische Chemie behielt jedoch bis in die 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts

ihren beschreibenden, die Vielfalt der chemischen Verfahren widerspiegelnden Charakter.

Dann setzte aber eine Entwicklung ein, welche die methodischen Aspekte, die allen Prozessen gemeinsam sind, in den Vordergrund der Betrachtungen rückte. Begriffe wie „Reaktionstechnik“ oder „Unit Operations“ (thermische und mechanische Grundoperationen) sind für diese Entwicklung kennzeichnend, mit der ein wesentlicher Schritt zum modernen, theoretisch fundierten Grundlagenfach getan wurde. Allerdings bewirkte dieses Konzept – insbesondere in der chemischen Verfahrenstechnik (Chemical Engineering) - eine starke Hinwendung zu mathematischen Methoden und eine Abstrahierung von der stofflichen Chemie. Im prinzipiellen Unterschied zur chemischen Verfahrenstechnik ist die Technische Chemie dadurch gekennzeichnet, dass sie neben der Vermittlung abstrakter, methodischer Grundlagen auch die stofflich-chemischen und biotechnologischen Aspekte in verstärktem Umfang berücksichtigt.

### 1.3 Die Technische Chemie heute und die Anforderungen der Zukunft

Alle Analysen, die in jüngster Zeit zum Berufsfeld des Chemikers durchgeführt wurden, lassen erkennen, dass dem Fach Technische Chemie in der industriellen Praxis eine außerordentlich wichtige Rolle zukommt.

Der Ausbau des Faches Technische Chemie in quantitativer Hinsicht und unter Einbeziehung der Biotechnologie ist zweifellos beachtlich, doch ist das Bild an den verschiedenen Hochschulen nicht ausgeglichen und entspricht keinesfalls den Erwartungen, welche die Technische Chemie mit den Empfehlungen zur Reform des Chemiestudiums verband.

Eine besondere Bedeutung fällt der Technischen Chemie auch im Rahmen des Umweltschutzes, der Rechtskunde, der Gefahrstoffverordnung und der Sicherheitstechnik<sup>1</sup> zu. Die fachübergreifende Betrachtung dieser Themen kann am besten im Fach Technische Chemie erfolgen.

Im Sinne einer Differenzierung des Charakters und des Ausbildungsangebotes der Hochschulen sollte die Technische Chemie an den Universitäten und Hochschulen, an denen sie als Grundlagenfach etabliert ist, ihre gewachsene Stellung (Pflichtfach) bewahren. An den übrigen Hochschulen sollte das Fach zumindest in einer Form vertreten sein, die ein Lehrangebot nach den Empfehlungen dieses Lehrprofils gewährleistet, um so jedem Chemiestudenten die Möglichkeit zum Erwerb der für die berufliche Praxis wichtigen Grundkenntnisse zu geben.

Eine Kernfunktion der Technischen Chemie ist, Grundlagenkenntnisse in praktische Anwendungen des industriellen Maßstabes zu übertragen. Sie wird damit insbesondere der Aufgabe hochindustrialisierter Länder gerecht, wissenschaftliches Bildungsgut in volkswirtschaftlichen Nutzen zu transferieren, um im globalen Wettbewerb zu bestehen.

---

<sup>1</sup> Siehe auch ProcessNet-Lehrprofil „Sicherheitstechnik“.



## 1.4 Weiterbildung

Der Fortschritt in Wissenschaft und Technik ebenso wie Veränderungen im beruflichen Umfeld des einzelnen Chemikers haben zu Anforderungen an die Weiterbildung in der Technischen Chemie geführt. Entsprechende Kurse werden vorwiegend von der DECHEMA, aber auch von der GDCh und dem VDI-Bildungswerk angeboten. In diesem Zusammenhang sei auf die jährlich erscheinenden GDCh/DECHEMA-Broschüren zur Fort- und Weiterbildung verwiesen.

Das Programm der Fortbildungskurse wird zunehmend systematisch als komplementäres Angebot zum Studium entwickelt. Experimental-Grundkurse im Karl-Winnacker-Institut der DECHEMA e.V. ergänzen die Ausbildung derjenigen Chemiker, die an den Universitäten nicht oder unvollständig in die Technische Chemie eingeführt worden sind. Spezielle Kurse bieten ein weitgefächertes Spektrum, wobei vielfach von den Instituten der Technischen Chemie an den verschiedenen Universitäten die bei ihnen gepflegten Spezialgebiete auch in der Weiterbildung vertreten werden.

## 1.5 Lehrinhalte der Technischen Chemie

### 1.5.1 Ausbildungsabschnitte

Der Gesamtbereich der technisch-chemischen Ausbildung an den wissenschaftlichen Hochschulen/Universitäten kann in zwei Teilbereiche untergliedert werden:

- a) Grundausbildung im Bachelorstudium (oder Grundstudium)
- b) Vertiefung und Schwerpunktbildung im Masterstudium (oder Hauptstudium)

Zu a): Unter Grundausbildung im Bachelorstudium (oder Grundstudium) wird derjenige Ausbildungsteil verstanden, der das technisch-chemische Basiswissen für alle Chemiker vermitteln soll. Sie sollte für die Technische Chemie mindestens sechs Semesterwochenstunden Grundvorlesung, die durch zusätzliche Übungen ergänzt wird, und ein angemessenes Praktikum umfassen (vgl. Kapitel 5). Die Aussagen dieses Lehrprofils beschränken sich allein auf die Grundausbildung im Bachelorstudium (oder Grundstudium), da nur dieser Abschnitt sinnvoll einer gewissen Harmonisierung zugänglich ist. Die im Bachelorstudium (oder Grundstudium) erworbenen Fähigkeiten und Kenntnisse bilden die Basis für eine weitere wissenschaftliche Qualifikation, insbesondere für Masterstudiengänge (oder Hauptstudium).

Zu b): In Masterstudiengängen (oder Hauptstudium) sollte grundsätzlich die Möglichkeit zur Vertiefung des technisch-chemischen Wissens in Vorlesungen und Praktika bestehen; dies ist zwingend dort erforderlich, wo Technische Chemie das Hauptfach im Masterstudium (oder Diplom-Schwerpunktfach) ist. Eine besonders intensive Beschäftigung mit dem Fach durch die Wahl von Spezialvorlesungen, die Masterarbeit (oder Diplomarbeit) und die Dissertation wird als Schwerpunktbildung bezeichnet. Die Gestaltung dieser Ausbildungsteile hängt von den spezifischen Lehr- und Forschungsangeboten der einzelnen Hochschulen/Universitäten und der Professuren in Technischer Chemie ab.

In beiden Ausbildungsabschnitten stellen mehrtägige Exkursionen in die chemische und chemisch-pharmazeutische Industrie eine wichtige Komponente der technisch-chemischen Ausbildung dar.

### 1.5.2 Voraussetzungen

Die Ausbildung im Fach Technische Chemie muss auf Kenntnissen aufbauen, die in den anderen Grundlagenfächern

Anorganische Chemie,  
Organische Chemie,  
Physikalische Chemie,  
Physik und Mathematik

in methodischer und in stofflicher Hinsicht in der Regel in den ersten Semestern des Bachelorstudiums (oder bis zum Vordiplom) vermittelt wurden. Wieweit physikalisch-chemische und chemische Grundlagen in der Grundausbildung Technische Chemie notwendigerweise eingebaut werden müssen, hängt von der gegenseitigen Abstimmung der Dozenten am einzelnen Hochschulort ab.

### 1.5.3 Die Struktur der Grundausbildung im Fach Technische Chemie

Das Fach Technische Chemie kann in seinen grundlegenden Ausbildungsaufgaben in drei Teilbereiche gegliedert werden, die eine etwa gleichrangige Gewichtung erfahren sollen:

- Die Chemischen Prozesstechnologien befassen sich mit den stofflichen und technologischen Aspekten der industriellen Chemie (Energie–Rohstoff–Produkt–Verbund) und mit der Struktur chemischer und biotechnologischer Produktionsanlagen. Dies beinhaltet die exemplarische Beschreibung existierender Prozesse sowie die Methoden der Entwicklung und Projektierung neuer Verfahren.
- Die Chemische Reaktionstechnik sowie die Bioreaktionstechnik vermittelt die Verbindung von Stöchiometrie, Thermodynamik und Kinetik mit den mikroskopischen und makroskopischen Transportvorgängen. Auf dieser Grundlage werden dann die verschiedenen Reaktortypen sowie deren Auswahl und Dimensionierung behandelt.

Der Bereich thermische und mechanische Grundoperationen gibt einen Einblick in die Prinzipien der verfahrenstechnischen Grundoperationen zur Trennung und Mischung homogener und heterogener Stoffsysteme und die Einfügung dieser Verfahrensschritte in chemische und biotechnologische Produktionsprozesse. In diesem Abschnitt finden auch die Transportphänomene (Impuls, Stoff und Wärme) Berücksichtigung.

Um zu einem vertieften Verständnis des Zusammenspiels zahlreicher Einflussfaktoren im Produktionsprozess zu gelangen, werden zu jedem Teilbereich in der Regel vorlesungsbegleitende Rechenübungen bzw. Seminare abgehalten sowie außerdem

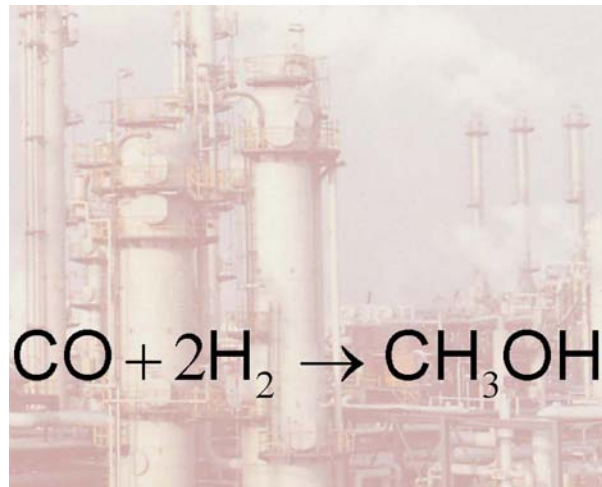
ein stark methodisch ausgerichtetes technisch-chemisches Grundpraktikum und mehrtätige Betriebsexkursionen angeboten.

Die genauere Ausgestaltung dieser Teilbereiche ist Gegenstand der folgenden Detailbeschreibungen. Dabei muss beachtet werden, dass weder die Reihenfolge der Teilbereiche, noch die Einfügung einzelner Teilaspekte (z.B. Stoff- und Wärmetransport) bindend konzipiert ist. Aus pragmatischen Gründen musste für diese Darstellung eine Abfolge gewählt werden, zu der es – bei Wahrung des Gesamtinhalts – sicherlich mehrere gleichwertige Alternativen gibt.

#### 1.5.4 Empfohlene Literatur

- Baerns, M.; Hofmann, H.; Renken, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie – Chemische Reaktionstechnik, Bd. 1, 3. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1999.
- Gmehling, J.; Brehm, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie - Grundoperationen, Bd. 2, Wiley-VCH, Weinheim 1996.
- Onken, U.; Behr, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie – Chemische Prozeßkunde, Bd. 3, Wiley-VCH, Weinheim 1996.
- Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.; Gmehling, J.; Hofmann, H.; Onken, U.; Renken, A.: Technischen Chemie, Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Emig, G.; Klemm, E.: Technische Chemie – Einführung in die Chemische Reaktionstechnik, 5. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York 2005.
- Reschetilowski, W.: Technisch-Chemisches Praktikum, Wiley-VCH, Weinheim 2002.

## 2. Chemische Prozesstechnologien



### 2.1 Zielsetzung

Dem Chemiestudenten, der in seiner Ausbildung eine Vielzahl von chemischen Einzelreaktionen und Mechanismen kennen gelernt hat, soll die Anwendung dieser Kenntnisse in der Praxis vermittelt werden. Es sollen ausgewählte, wichtige Prozesse vorgestellt werden. Dazu gehört auch ein Verständnis für den Wechsel von Herstellungsverfahren, für den Einfluss der sich ändernden Rohstoffbasis und für die Verbundproduktion, die gerade die chemische Industrie kennzeichnet. An dieser Stelle sollen auch die neuen biokatalytischen Produktionsverfahren Berücksichtigung finden. Weiterhin sollen Grundkenntnisse erworben werden, die die Entwicklung neuer Verfahren, die Weiterentwicklung bestehender Verfahren und die Verbesserung bestehender Anlagen betreffen und für die Tätigkeit des Chemikers insbesondere in der industriellen Praxis wichtig sind.

Hierzu gehören u.a. auch eine Einführung in die praktische Durchführung von Verfahrensentwicklungen und das Zusammenwirken wirtschaftlicher, technisch-wissenschaftlicher, sicherheitstechnischer und ökologischer Gesichtspunkte in die Entwicklung chemischer und biotechnologischer Verfahren. Anhand ausgewählter, typischer Verfahren sollen immer wiederkehrende Probleme der technischen Reaktionsführung und Stofftrennung sowie des Rohstoff-, Produkt- und Energieverbundes exemplarisch behandelt werden.

### 2.2 Inhaltsbeschreibung

#### 2.2.1 Exemplarische Beschreibung wichtiger Prozesse

Hier stehen zwei Ziele im Vordergrund. Zum einen soll die stoffliche Verflechtung in der industriellen Chemie dargelegt werden: aus sehr wenigen Rohstoffen entsteht eine kleine Zahl von Grundchemikalien, von denen sich dann eine Vielzahl von Zwischenprodukten und Endprodukten ableitet. Zum anderen sind charakteristische Verfahrensweisen und Reaktionsführungen beispielhaft vorzustellen. Eine

enzyklopädische Darstellung aller technischen Prozesse kann nicht erfolgen, vielmehr muss eine Auswahl typischer Verfahren vorgenommen werden. Die Prozesse werden aus den Stoffgebieten Rohstoffe, Grundchemikalien, Zwischenprodukte und Endprodukte ausgewählt, wobei der Schwerpunkt auf moderne Technologien zu legen ist, die für den beruflichen Alltag eines in der Industrie tätigen Chemikers relevant sind. Prozessbeschreibungen nehmen eine dominierende Stellung ein. Besondere Aufmerksamkeit soll auf die vernetzte Behandlung höherer Wertschöpfung (Veredelungsgrad, -stufen) gerichtet werden.

Von zunehmender Bedeutung ist auch die Biotechnologie, der mit ihren wichtigen Themen Biokatalysatoren, Bioreaktoren und Aufarbeitung von Bioprodukten eine immer wichtigere Rolle zukommt.

### 2.2.2 Grundlagen der Verfahrensentwicklung

Die stoffliche Gliederung dieses Teils umfasst die allgemeinen Randbedingungen der chemischen Industrie, die wirtschaftlichen und technisch-wissenschaftlichen Gesichtspunkte sowie die praktische Durchführung eines Verfahrens.

Zu den allgemeinen Randbedingungen gehören: Energie- und Rohstoffversorgung, Koppelprodukte, Ressourcenschonung durch stoffliche und energetische Wiederverwertung, Werksverbund, Standortwahl, Umwelt- und Arbeitsschutz, Sicherheit, Lagerung, Transport. Hier sollen auch die Struktur und Organisation eines Unternehmens vorgestellt werden.

Die wirtschaftlichen Gesichtspunkte behandeln die verschiedenen Kostenarten (Herstellkosten, Investitionen, Inbetriebnahme, Rohstoff-, Personal- und Energiekosten, Instandhaltung) sowie Erlöse und Ergebnis.

Unter technisch-wissenschaftlichen Gesichtspunkten soll auf Fragen von neuen Reaktionswegen, Ausbeute- und/oder Selektivitätssteigerung, neue Rohstoffe etc. eingegangen werden.

Die Verfahrensentwicklung beinhaltet die Übertragung eines Verfahrens vom Labor ins Technikum, die Massen- und Energiebilanz eines Verfahrens, das Verständnis von Blockfließbildern, Projektierung, Auswahl geeigneter Apparate (Konstruktion, Werkstoffe), Einsatz von Mess-, Regel- und Prozessleittechnik sowie Anlagenbau und Anlageninbetriebnahme.

In Ergänzung zu angebotenen Exkursionen in Chemiebetriebe sollen Fragen der beruflichen Tätigkeit des Chemikers einen besonderen Raum einnehmen. Anhand von Prozessen kann dargestellt werden, wie sich die Verfahrensentwicklung in Zusammenarbeit von Chemikern, Biotechnologen, Verfahrensingenieuren und Ingenieuren verschiedener Fachrichtungen vollzieht.

## 2.3 Vorlesungsgliederung

### 2.3.1 Stoffliche Aspekte

#### a) Prozesse zur Rohstoffverarbeitung

Erdöl (Verarbeitung in Raffinerien), Erdgas, Kohle (Verkokung, Hydrierung, Vergasung), nachwachsende Rohstoffe, Luft, Wasser, mineralische Rohstoffe.

#### b) Prozesse zur Herstellung von Grundchemikalien

Erdölchemie, Cracken, Pyrolyse, Treibstoffe und Petrolchemikalien, Synthesegas, Ammoniak, Schwefelsäure, Chlor und Natronlauge.

#### c) Prozesse zur Herstellung von Folgeprodukten

Anorganische Folgeprodukte: Säuren (Salzsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure) und ihre Salze, Phosphor, Wasserstoffperoxid, Füllstoffe, Katalysatorträger, anorganische Fasern etc.

Organische Folgeprodukte: Sauerstoffhaltige (Alkohole, Ester, Säuren, Anhydride, Epoxide), stickstoffhaltige (Amine, Lactame, Nitrile), halogenhaltige, phosphorhaltige, schwefelhaltige und metallorganische Zwischenprodukte etc.

#### d) Endprodukte

Polymere, Detergentien, Agrochemikalien, Pharmaprodukte, Fermentationsprodukte, Düngemittel, Farbstoffe, Pigmente, Keramik, Metalle, Reinstoffe (Silicium), Gläser und Baustoffe.

### 2.3.2 Verfahrensentwicklung

#### a) Allgemeine Randbedingungen der chemischen Industrie

Energie- und Stoffversorgung, Koppelproduktion, Werksverbund, Standortwahl, produktionsintegrierter Umweltschutz, Arbeitsschutz, Sicherheit, Lagerung, Transport/Logistik, Struktur und Organisation eines Chemieunternehmens.

#### b) Wirtschaftliche Gesichtspunkte

Kostenarten (Herstellkosten, Investitionen, Inbetriebnahme, Rohstoff-, Personal- und Energiekosten, Instandhaltung), Erlöse, Ergebnis, Feasibility-Studien.

#### c) Technisch-wissenschaftliche Gesichtspunkte

Auswahl der Rohstoffe und Reaktionswege, Ausbeute und/oder Selektivitätsoptimierung, neue Rohstoffe, Minimierung von Nebenprodukten, Abgasen, Abwässern und Abfällen, konkurrierende Alternativverfahren.

#### e) Praktische Durchführung

Labor, Technikum, Demonstrationsanlage, Massen- und Energiebilanz, Fließbilder, Projektierung, Apparateauswahl (Konstruktion, Werkstoffe), Messen und Regeln, Prozessleittechnik, Anlagenbau und -inbetriebnahme, Genehmigungsverfahren, Störfallverordnung, Projektabwicklung (Netzplantechnik).

## 2.4 Literatur

### 2.4.1 Einführende Literatur

- Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, 2. Aufl, Springer Verlag, Heidelberg, 1999.
- Büchel, K.H.; Moretto, H.-H.; Woditsch P.: Industrielle Anorganische Chemie, 3. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1999.
- Fedtke, M.; Pritzkow, W.; Zimmermann, G.: Lehrbuch der Technischen Chemie, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1996.
- Keim, W.; Behr, A.; Schmitt, G.: Grundlagen der industriellen Chemie, Verlag Salle + Sauerländer, Frankfurt am Main 1986.
- McKetta, J.J.: Chemical Processing Handbook, Marcel Dekker, Inc., New York 1993.
- Onken, U.; Behr, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie – Chemische Prozeßkunde, Bd. 3, Wiley-VCH, Weinheim 1996.
- Arpe, H.-J.: Industrielle Organische Chemie. Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2007.

### 2.4.2 Weiterführende Literatur

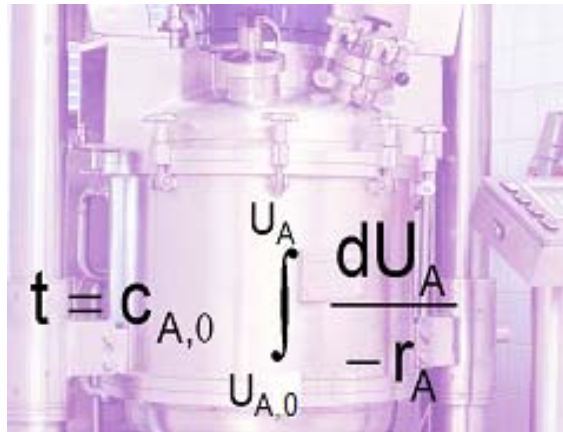
- Bernecker, G.: Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen, 4. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg 2001.
- Chenier, P.J.: Survey of Industrial Chemistry, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1992.
- Dieckelmann, G.; Heinz, H.J.: The Basics of Industrial Oleochemistry, P. Pomp GmbH, Essen 1989.
- Echte, A.: Handbuch der technischen Polymerchemie, Wiley-VCH, Weinheim 1993.
- Elias, H.-G.: Makromoleküle, 6.Aufl., Bd.1 (1999), Bd. 2 (2001), Bd. 3 (2001), Wiley-VCH, Weinheim.
- Lichtenthaler, F.N. (Hrsg.): Carbohydrates as Organic Raw Materials, Wiley-VCH, Weinheim, 1991.
- Meyers, R.A.: Handbook of Petroleum Refining Processes, 2. Aufl., McGraw-Hill Book Co., New York 1996.
- Moulijn, J.A.; Makkee, M.; van Diepen, A.: Chemical Process Technology, Wiley & Sons, Chichester-New York-Weinheim 2001.
- Schönbacher, A.: Thermische Verfahrenstechnik – Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse, Springer Verlag, Heidelberg 2002.
- Steinbach, J.: Sicherheitstechnik, Springer Verlag, Heidelberg 2002.
- Vogel, H.: Verfahrensentwicklung, Wiley-VCH, Weinheim 2002.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2002.
- Ullrich, H.: Anlagenbau, Kommunikation-Planung-Management, Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York 1983.
- Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G., Oberholz, A., Winnacker-Küchler: Chemische Technologie, in 9 Bd., 5. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Wisemann, P.: Petrochemicals, Ellis Horwood Ltd., Chichester 1986.

### 2.4.3 Literatur zur Biotechnologie

- Bailey, J.E.; Ollis, D.F.: Biochemical Engineering Fundamentals, McGraw-Hill, New York 1986.
- Blanch, H. W.; Clark, D. S.: Biochemical Engineering, Marcel Dekker Inc., 1997.
- Buchholz, K.; Kasche, V.: Biokatalysatoren und Enzymtechnologie, Wiley-VCH, Weinheim 1997.
- Glick, B.R.: Molekulare Biotechnologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995.
- Liese, A.; Seelbach, K.; Wandray, C.: Industrial Biotransformations, Wiley-VCH, Weinheim 2000.
- Rehm, H.J.; Klein, J. (Hrsg.): Biotechnology. A Multi-Volume Comprehensive Treatise, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2000.



### 3. Chemische Reaktionstechnik



#### 3.1 Zielsetzung

Die Chemische Reaktionstechnik vermittelt Kenntnisse über

- Analyse und Modellierung chemischer/biochemischer Reaktionen
- Chemische Reaktoren und ihre Auslegung

Wesentliche Voraussetzungen hierfür bilden die stöchiometrischen, thermodynamischen und kinetischen Grundlagen einfacher und zusammengesetzter Reaktionen. Die zentrale Rolle von Katalysatoren bei den meisten technischen Stoffumwandlungen ist hervorzuheben. Bei der Kinetik wird besonders auf die Wechselwirkung zwischen chemischer/biochemischer Reaktion und Transportvorgängen eingegangen. Weiterhin wird ein Überblick über die wichtigsten Reaktoren für die Durchführung homogener und heterogener Reaktionen gegeben. Die grundlegenden quantitativen Zusammenhänge für ihre Auslegung (Wirkungsweise) werden abgeleitet. Anhand der quantitativen Behandlung werden Wege zur optimalen Reaktionsführung für irreversibel und reversibel verlaufende Reaktionen aufgezeichnet, die unter vorgegebenen Randbedingungen zum gewünschten Produkt führen.

#### 3.2 Inhaltsbeschreibung

##### 3.2.1 Analyse und Modellierung chemischer/biochemischer Reaktionen

###### a) Reaktionsanalyse

Die für die Behandlung der chemischen Kinetik erforderlichen Grundbegriffe, wie Reaktionsgeschwindigkeit (einschließlich der verschiedenen kinetischen Parameter), Umsatz, Ausbeute, Selektivität, Effektivität, Stabilität und Desaktivierung bei Katalysatoren einschließlich Biokatalysatoren, werden definiert.

Für die Beschreibung von Gleichgewichtsreaktionen werden besonders Verfahren zur Berechnung der Gibb'schen Bildungsenthalpien unter Einschluss von Näherungsmethoden erläutert; weiterhin wird die Ermittlung der Gleichgewichtsumsätze bei simultan ablaufenden Reaktionen besprochen.

#### b) Reaktionsmodellierung

Zunächst werden kinetische Modelle für zusammengesetzte Reaktionen, d.h. Parallel-, Folge- und Kettenreaktionen, in homogener Phase entwickelt (Mikrokinetik), die dann auf das Zusammenwirken von Transportvorgängen und chemischer Reaktion in heterogenen Systemen ausgedehnt werden (Makrokinetik).

Bei der Behandlung heterogener Reaktionen werden das Zusammenwirken von chemischer/biochemischer Reaktion und Transportvorgängen sowie deren Auswirkung auf Aktivierungsenergie, Reaktionsordnung und Selektivität aufgezeigt.

Schließlich werden die Methoden zur experimentellen Gewinnung kinetischer Daten und deren Auswertung behandelt, wobei u. a. High-Throughput-Methoden und Kombinatorik an Beispielen angesprochen werden sollen. Dazu werden unter besonderer Berücksichtigung zusammengesetzter Reaktionen Laborreaktoren und ihre Wirkungsweise (Integral-, Differential- und gradientenfreier Kreislaufreaktor) sowie statistische Methoden zur Modellunterscheidung und Parameterschätzung vorgestellt. Hierzu werden auch spezielle Rechenprogramme zur Lösung kinetischer Problemstellungen (z.B. PREDICI<sup>®</sup>, PRESTO<sup>®</sup>) und anderer dynamischer Systeme (z.B. MATLAB<sup>®</sup>, Simulink<sup>®</sup>, Berkeley Madonna<sup>®</sup>, MathCad<sup>®</sup> u.a.m.) verwendet.

### 3.2.2 Chemische Reaktoren und ihre Auslegung

#### a) Chemische Reaktoren

Eigenschaften und Besonderheiten der wichtigsten in der Chemischen Technik (einschließlich der Biotechnologie) eingesetzten Reaktoren für homogen und heterogen verlaufende Umsetzungen werden qualitativ erläutert und vergleichend mit den sogenannten idealen Reaktoren diskutiert. Ferner werden die Gesichtspunkte für die Auswahl bestimmter Reaktortypen besprochen und die Grundlagen zu alternativen Reaktionstechniken (z.B. reaktive Trenntechniken, Mikroreaktionstechnik, Membranreaktoren) vermittelt.

#### b) Auslegung und Wirkungsweise chemischer Reaktoren

Die Berechnung bzw. Wirkungsweise idealer und realer Reaktoren wird für die verschiedenen in Kapitel 3.2.1 genannten Reaktionstypen unter isothermen und nicht-isothermen Bedingungen auf der Grundlage von Bilanzgleichungen für Stoffmenge, Energie und Impuls behandelt.

Einführend wird das dynamische und das stationäre Verhalten idealer, isothermer Reaktoren für homogene Reaktionen über Stoffbilanzen abgeleitet. Die Zusammenhänge zwischen Reaktorgröße, Kinetik, Reaktionszeit sowie Umsatz und Ausbeute werden ermittelt. Weiter wird auf die Auswahl geeigneter Reaktortypen und deren Kombination zur Maximierung von Umsatz und Produktausbeute eingegangen. Für einfache Reaktionen erfolgt die Auslegung von satzweise und kontinuierlich arbeitenden Reaktoren mittels analytischer und grafischer Lösungsmethoden der entsprechenden Stoffbilanzen. Exemplarisch werden für bestimmte Typen von Parallel- und Folgereaktionen die in unterschiedlichen Reaktoren erzielbaren Ausbeuten an gewünschtem Produkt quantitativ vermittelt und daraus Kriterien für die Auswahl bzw. die Kombination von unterschiedlichen Reaktoren abgeleitet. Dabei werden auch in Praxis häufig verwendete Semibatch-Reaktoren berücksichtigt.

Reale Reaktoren werden u.a. durch die Abweichung ihres fluiddynamischen Verhaltens von den Bedingungen der idealen Reaktoren über Verweilzeitverteilung und Segregation des strömenden Mediums charakterisiert. Zur Anwendung realer Verweilzeitverteilungen für die Reaktorauslegung werden das Dispersions- und das Kaskadenmodell sowie mehrparametrische Modelle eingeführt. Schließlich wird das Problem der Kopplung von Kinetik und Verweilzeitverteilung (Mikro- und Makrovermischung) erläutert.

Für exotherm verlaufende Gleichgewichtsreaktionen wird die optimale Temperaturführung zur Minimierung des Reaktorvolumens bzw. zur Maximierung des Umsatzes bei vorgegebenem Reaktor festgelegt. Anschließend wird die Auslegung adiabatischer und polytroper Reaktoren unter Berücksichtigung der simultan zu lösenden Stoff- und Wärmebilanzen behandelt. Hierbei wird auch das Problem stabiler und instabiler Betriebspunkte beim Betrieb chemischer Reaktoren diskutiert.

Grundzüge des Leistungsspektrums und Einsatzbereiches von computergestützten Methoden der Simulation, Optimierung und Versuchsplanung werden behandelt.

### 3.3 Vorlesungsgliederung

#### 3.3.1 Analyse und Modellierung chemischer/biochemischer Reaktionen

##### a) Reaktionsanalyse

Grundbegriffe (Umsatz, Ausbeute, Selektivität, Reaktionsgeschwindigkeit, Reaktionslaufzahl, Schlüsselkomponenten, Schlüsselreaktionen, Reaktionsfortschritt der Teilreaktionen bei komplexen Umsetzungen, Methoden zur Abschätzung unbekannter thermodynamischer Größen einer Reaktion).

##### b) Reaktionsmodellierung

Homogene Reaktionen (einfache irreversible und reversible Reaktionen beliebiger Ordnung, Parallelreaktionen, Folgereaktionen, Kettenreaktionen, homogen- und Enzym-katalysierte Reaktionen, Geschwindigkeitskonstante, präexponentieller Faktor, Aktivierungsenergie).

Mehrphasen-Reaktionen (mit Fest-, Flüssig- und Gasphasen, langsam, schnell und momentan ablaufende Reaktionen, Wechselwirkung von chemischer Reaktion und Stofftransport).

Heterogen katalysierte Reaktionen (Teilschritte [Film- und Porendiffusion], Wechselwirkung von Transportvorgängen und Reaktion und deren Einfluss auf Ausbeute und Selektivität).

##### c) Experimentelle Bestimmung kinetischer Daten und deren Auswertung

Wichtige Typen von Laborreaktoren (Integral-, Differential- und Kreislaufreaktor), Vor- und Nachteile; Auswertung: Klassische Methoden (Differential- bzw. Integralmethode) (Lineardarstellung, Parameterbestimmung, Fehlerabschätzung), statistisch begründete Methoden (lineare und nicht-lineare Regression, Vertrauensbereiche, Versuchspläne).

### 3.3.2 Chemische Reaktoren und ihre Auslegung

#### a) Qualitative Einführung

Reale Reaktoren für homogene und heterogene chemische und biochemische Umsetzungen – Beschreibung und Kriterien für ihre Auswahl (homogen: Rührkessel und Rohrreaktoren; heterogen: Festbett-, Flugstaub-, Wirbelschicht-, Rieselbett-, begaster Rührkessel-, Blasensäulen- Strahlreaktor, Fermenter), Alternative Reaktorkonzepte (z.B. reaktive Trenntechniken).

Ideale Reaktoren (Satzreaktor, kontinuierlich betriebener Rührkessel- und Rührkessel-Kaskadenreaktor, Strömungsrohr-Reaktor mit und ohne Rückführung, Semibatch-Rührkesselreaktor), Mikrostrukturreaktoren.

#### b) Auslegung und Wirkungsweise

Ideale, isotherme Reaktoren (Einführung von Stoffbilanzen zur Reaktormodellierung, Vorausberechnung von Umsatz, Ausbeute und Produktionsleistung, grafische Verfahren zur Reaktorauslegung, Reaktionsführung und Reaktorauswahl, Produktmaximierung bei zusammengesetzten Reaktionen).

Reale, isotherme Reaktoren (Verweilzeitverteilung fluider Medien, Reaktorberechnung mittels Kinetik und Verweilzeitverteilung, Mikro- und Makrovermischung, Dispersions- und Kaskadenmodell, ein- und zweidimensionale Reaktormodelle, homogene und heterogene Reaktormodelle).

Berücksichtigung thermischer Effekte bei der Auslegung chemischer Reaktoren (Einführung von gekoppelten Stoff- und Energiebilanzen, Temperaturführung endothermer und exothermer Gleichgewichtsreaktionen, adiabatische Reaktionsführung, polytrope Reaktoren, Einfluss der Temperaturführung auf die Selektivität zusammengesetzter Reaktionen, dynamisches Verhalten von Reaktoren).

Anwendung computergestützter Methoden der Simulation, Optimierung und Versuchsplanung.

### 3.4 Literatur

#### 3.4.1 Einführende Literatur

- Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.; Gmehling, J.; Hofmann, H.; Onken, U.; Renken, A.: Technische Chemie, Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Emig, G.; Klemm, E.: Technische Chemie – Einführung in die Chemische Reaktionstechnik, 5. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York 2005.
- Baerns, M.; Hofmann, H.; Renken A.: Lehrbuch der Technischen Chemie – Chemische Reaktionstechnik, Bd. 1, 3. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1999.
- Dialer, K.; Leschonski, K.; Onken, U.: Grundzüge der Verfahrenstechnik und der Reaktionstechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1986.
- Hill, C.G.: An Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design, John Wiley & Sons Inc., New York 1977.
- Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York 1998.
- Smith, J.M.: Chemical Engineering Kinetics, 3. Aufl., McGraw-Hill, New York 1981.

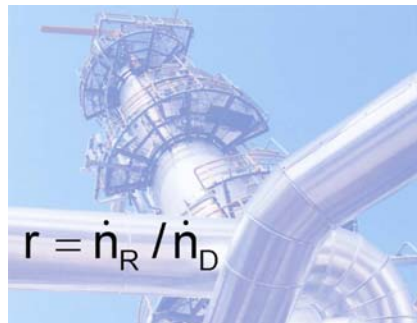
### 3.4.2 Weiterführende Literatur

- Brötz, W.: Chemische Reaktionstechnik, Wiley-VCH, Weinheim 1980.
- Beenackers, A.A.C.M.; Swaaij, von W.P.M.; Westerterp, K.R.: Chemical Reactor Design and Operation, John Wiley & Sons Inc., New York 1988.
- Carberry, J.J.: Chemical and Catalytic Reaction Engineering, Dover Publications, Dover 2001.
- Coulson, J.M.; Richardson, J.F.: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer, Vol. 1, 6. Aufl., Butterworth-Heinemann, Oxford 1999; Unit Operations, Vol. 2, 3. Aufl., Pergamon Press, Oxford 1978; Chemical Reactor Design, Vol.3, 3. Aufl., Butterworth-Heinemann, Oxford 1994; Solutions to Vol. 1, 6. Aufl., Butterworth-Heinemann, Oxford 2000; Chemical Engineering Design, Vol. 6, 6. Aufl., Butterworth-Heinemann, Oxford 1999.
- Danckwerts, P.V.: Gas-liquid Reactions, McGraw-Hill, New York 1970.
- Froment, G.F.; Bischoff, K.B.: Chemical Reactor Analysis and Design, John Wiley & Sons Inc, New York 1990.
- Fogler, H. S.: "Elements of Chemical Reaction Engineering", 4. Aufl., Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Pearson International Edition 2006.
- Hayes, H.F.: Introduction to Chemical Reactor Analysis, Hemisphere Publication 2001.
- Ingham, J.; Dunn, I.J.; Heinzle, E.; Prenosil, J. E.; Snape, J. B.: Chemical Engineering Dynamics – An Introduction to Modeling and Computer Simulation, Wiley-VCH, Weinheim 2007.
- Löwe, A.: Chemische Reaktionstechnik – mit MATLAB und SIMULINK, Wiley-VCH, Weinheim 2000.
- Satterfield, C.N.: Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice, McGraw Hill 1991.
- Schuler, H.: Prozeßsimulation, Wiley-VCH, Weinheim 1995.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2002.
- Vogel, H.: Verfahrensentwicklung, Wiley-VCH, Weinheim 2002.

### 3.4.3 Literatur zur Bioreaktions- und Bioprozesstechnik

- Chmiel, H. (Hrsg.): Bioprozeßtechnik 1 und 2, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1991, Uni-Taschenbücher-UTB 1597 und 1834.
- Schügerl, K.: Bioreaktionstechnik, Bioprozesse mit Mikroorganismen und Zellen, Birkhäuser Verlag 1997.
- Schügerl, K.; Bellgardt, K.-H.: Bioreaction Engineering. Modeling and Control, Springer Verlag, Heidelberg 2000.
- Schügerl, K.; Zeng A.-P.: Tools and Applications of Biochemical Engineering Science, Springer Verlag, Heidelberg 2002.

## 4. Thermische und mechanische Grundoperationen



### 4.1 Zielsetzung

Die Grundoperationen beschreiben die Schritte der chemischen bzw. biochemischen Produktionsverfahren, die dem eigentlichen Reaktor vor- oder nachgeschaltet sind. Dies sind sowohl Prozesse zur Vorbereitung der Eduktströme (Zerkleinern, Mischen, Reinigen u. a.) als auch zur Aufarbeitung der Produktströme (insbesondere thermische Trennverfahren, wie die Rektifikation). Grundsätzlich wird zwischen thermischen und mechanischen Grundoperationen unterschieden. Die Auslegung von Apparaten zur Durchführung von thermischen Grundoperationen erfordert die zuverlässige Kenntnis des Wärme- und Stofftransports und der thermodynamischen Reinstoff- und Gemischdaten (insbesondere Phasengleichgewichtsdaten) des zu trennenden Systems. Bei den mechanischen Grundoperationen sind insbesondere die Gesetze der Mechanik und der Physik zu beachten. Bei der Konzeption wird häufig auf empirische oder halbempirische Korrelationen sowie auf dimensionslose Kriteriengleichungen, die auf Basis der Ähnlichkeitstheorie entwickelt wurden, zurückgegriffen. Wesentlich ist darüber hinaus die Behandlung ausgewählter Beispiele technischer Apparateausführungen, um so dem Chemiker ein Gefühl dafür zu vermitteln, wie die von ihm im Labor durchgeführten Grundoperationen im technischen Maßstab realisierbar und berechenbar sind. Damit soll die Basis für die Zusammenarbeit zwischen Chemikern und Ingenieuren in der späteren beruflichen Praxis geschaffen werden.

### 4.2 Inhaltsbeschreibung

#### 4.2.1 Grundlagen der Strömungslehre sowie des Stoff- und Wärmetransports

Einführend wird eine Übersicht über wichtige Elemente der Strömungslehre sowie über Grundlagen des Stoff- und Wärmetransportes gegeben. Ausgehend von den einfachen Gesetzen der laminaren Strömung werden Beziehungen für den turbulenten Bereich entwickelt, wobei das methodische Vorgehen der Formulierung mit dimensionslosen Kennzahlen behandelt wird. Ausgewählte Fälle (z.B. Schüttschicht, Wirbelschicht), die für die industrielle Chemie einschließlich der Biotechnologie wichtig sind, werden betrachtet.

Beim Stoff- und Wärmetransport werden die charakteristischen Kenngrößen in ihrer stofflichen und parametrischen Abhängigkeit behandelt. Die Gesetze des Stoff- und

Wärmeübergangs werden als dimensionslose Kennzahlabhängigkeiten formuliert. Als Anwendungsbeispiele werden unter Einbeziehung der Bilanzgleichungen die Auslegung von Wärmetauschern und Verdampfern besprochen.

Möglichkeiten und Grenzen der Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen werden an überschaubaren Beispielen aufgezeigt, wobei entsprechende Simulationsprogramme wie FLUENT, COMSOL u.a. zum Einsatz kommen.

#### 4.2.2 Grundlagen und Prinzipien der thermischen Grundoperationen

Zum guten Verständnis der thermischen Grundoperationen sollen zunächst die thermodynamischen Grundlagen der Stofftrennprozesse behandelt werden, wobei den Phasengleichgewichten und deren Beeinflussung durch Temperatur, Druck und Konzentrationsverhältnisse eine entscheidende Bedeutung zukommt. Wichtig ist die Behandlung von Verteilungskoeffizienten, Trennfaktoren, singulären Punkten und kalorischen Effekten. Kinetische Aspekte müssen eine entsprechende Berücksichtigung finden, da bei einigen Trennprozessen (z.B. der Kristallisation oder Trocknung) auch die Stofftransportgeschwindigkeit prozessbestimmend sein kann.

Sodann werden für die wichtigsten thermischen Trennverfahren – Rektifikation, Absorption, Extraktion, Adsorption, Membranverfahren, Kristallisation und Trocknung – jeweils die verschiedenen Betriebsweisen, die wichtigsten Apparattypen und die Berechnungsansätze für die Auslegung des Verfahrens sowie gegebenenfalls einige besonders wichtige spezielle Verfahrensvarianten dargelegt. Die technische Realisierung wird jeweils an industriell bedeutsamen Beispielen aufgezeigt.

Abschließend sollte eine zusammenfassende übergeordnete Darstellung der thermischen Trennverfahren gegeben werden. Dazu werden die wichtigsten gemeinsamen Merkmale der Trennverfahren hervorgehoben: Kopplung von Stoff- und Wärmebilanzen, mehrstufige Verfahrensführung im Gegen- oder Kreuzstrom, Ermittlung optimaler Phasenverhältnisse, Berechnung über HETS-Einheiten oder das HTU-NTU-Konzept, Belastungsgrenzen für die Apparate (Durchsatz, Druckverlust).

#### 4.2.3 Grundlagen und Prinzipien der mechanischen Grundoperationen

Die mechanischen Grundoperationen werden in einer kleinen Auswahl gebracht, wobei vor allem die Bereiche ausgewählt werden sollen, die für die industrielle Chemie einschließlich der Biotechnologie wichtig sind. Empfohlen werden der Bereich der mechanischen Stofftrennung (z.B. Feststoffabscheidung aus Gas- und Flüssigkeitsströmen, Absetzen und Filtrieren), der Stoffvereinigung (z.B. Mischen und Rühren) sowie Grundlagen zum Zerkleinern und zur Verarbeitung von Feststoffen. Dabei beschränkt sich die Behandlung der theoretischen Grundlagen auf die Behandlung der einfachsten Grundgesetze. Wesentlich sind vor allem die technische Ausführung und die dabei auftretenden Probleme bei der Übertragung von der dem Chemiker geläufigen Durchführung im Labor in den technischen Maßstab.

## 4.3 Vorlesungsgliederung

### 4.3.1 Strömungslehre und Stoff- und Wärmetransport

#### a) Gesetze des Stoff- und Wärmetransports

Mechanismen des Transports durch Leitung, Übergang, Durchgang. Kriteriengleichungen, Bestimmung des Transportkoeffizienten, Transportwiderstände (Grenzschicht-Modelle), Bedeutung von volumen- und flächenbezogenen Stoffübergangskoeffizienten.

#### b) Auslegung technischer Apparate

Wärmetauscher mit Gleich-, Kreuz- und Gegenstromführung, Wärmeaustausch bei kondensierenden Dämpfen, Trocknung, Sterilisation.

#### c) Grundlagen der Strömungslehre

Kontinuitätsgleichung, Bernoulli-Gleichung, Druckverlust, Widerstandsbeiwert, Reynolds-Kriterium, Messung der Strömungsgeschwindigkeit, Ausfluss- und Durchfluss-Verhalten, Mikrofluidik, Förderprinzip von Pumpen.

### 4.3.2 Thermische Trennverfahren

Aufgabe und Bedeutung innerhalb einer Chemieanlage, Prinzip, Übersicht über technisch wichtige Trennverfahren, Energiebedarf.

#### a) Thermodynamische und kinetische Grundlagen

Phasengleichgewichtsbeziehung (dampf-flüssig, flüssig-flüssig, flüssig-fest): theoret. Berechnung, experimentelle Bestimmung, grafische Darstellungsmöglichkeiten; Verteilungskoeffizienten, Trennfaktoren, singuläre Punkte (azeotrope, eutektische, kritischer Punkt); kalorische Effekte (Misch-, Verdampfungs-, Schmelzwärmen); Kinetik von Stoffübergangsprozessen (geschwindigkeitsbestimmende Teilschritte, Limitierung durch Film- und Porendiffusion, Viskositätseffekte)

#### b) Wichtige thermische Trennverfahren

##### b1) Rektifikation

Betriebsweisen (kontinuierlich, diskontinuierlich), Rektifikationsapparate (Boden-, Füllkörper-, Packungskolonnen), spezielle Rektifizierverfahren (Vakuum-, Trägerdampf-, Azeotrop- und Extraktivrektifikation), Energiesparmaßnahmen (Druck-Temperatur-Staffelung, Brüdenkompression/Wärmepumpe), Berechnungsansätze für Stufenzahl/Höhe (McCabe-Thiele) und Durchmesser einer Kolonne (F-Faktoren) sowie für den Energiebedarf (Heizung, Kühlung)

##### b2) Absorption

Absorptionsarten (phys./chem. Wäschen), Betriebsweisen (Gegenstrom, Gleichstrom), Absorptionsapparate (Kolonnen, Blasensäulen/begaste Rührkessel, Sprüh-, Strahl-, Rotationswäscher), Absorptionsmittelauswahl, Berechnungsansätze (Konzept des



stufenweisen bzw. stetigen Kontakts der Phasen), Mehrkomponenten-Absorption (Selektivitäten, kinetische Einflüsse), Regeneration des Absorptionsmittels

#### b3) Extraktion

Extraktionsarten (Flüssig-flüssig-Extraktion, Reaktivextraktion, Extraktion mit überkritischen Fluiden, Feststoffextraktion), Betriebsweisen (Gegenstrom, Kreuzstrom), Extraktionsapparate (Mixer-Settler, Kolonnen, Zentrifugalextraktoren, Band- und Turmextraktoren), Extraktionsmittelauswahl, Berechnungsansätze (Beladungsdiagramme, Dreiecksdiagramme), Regeneration des Extraktionsmittels.

#### b4) Adsorption

Adsorptionsarten (Physisorption/Chemisorption), Betriebsweisen (Festbett- und Bewegtbettverfahren, Verfahren mit suspendierten Adsorbens), Adsorptionsmittelauswahl, Adsorptionsapparate, Berechnungsansätze für Taktverfahren (Durchbruchskurven) und kontinuierliche Verfahren (Stufenzahlberechnung), Ein- und Mehrkomponenten-Adsorption, Regenerationsmethoden (TSA, PSA u.a.)

#### b5) Membrantrennverfahren

Verfahrensarten (Umkehrosmose, Ultrafiltration, Elektrodialyse, Pervaporation, Gaspermeation), Membranmaterialien und Membranaufbau (anorganische und organische Membranen, Diffusions-/Porenmembranen, asymmetrische und ionenselektive Membranen, Modularten (Rohr-, Platten-, Wickel-, Kapillar-, Hohlfasermodule), Berechnungsansätze (Stofftransport an/durch die Membran), Deckschichteinflüsse (Fouling, Scaling).

#### b6) Kristallisation

Grundlagen (Löslichkeit, Übersättigung, Keimbildung, Kristallwachstum, Kornform und Größenverteilung), Kristallisationsarten (Kühlungs-, Verdampfungs-, Vakuumkristallisation), Betriebsweisen (Suspensions-, Schichtkristallisation, fraktionierende/-klassierende Kristallisation, Mutterlaugenrückführung/ -ausschleusung, Kristallisationsapparate (Kristallisationskessel - MSMPR, MSCPR, CSCPR -, Kratzkühler, Kristallisierkolonnen), Schmelzkristallisation.

#### b7) Trocknung

Grundlagen (Feuchtebindung in Feststoffen, Feuchteaufnahme von Gasen/Mollier-Diagramm), Kinetik des Trocknungsverlaufs (Trocknungsabschnitte), Trocknungsarten (Kontakt-, Konvektions-, Strahlungs-, Gefriertrocknung), Betriebsweisen (disk./kont., Gleich-(Gegenstrom, Durchlauf-/Kreislauf-trocknung), Trocknungsapparate (z.B. Band-, Trommel-, Wirbelschicht-, Strom-, Sprühtrockner), Berechnungsansätze (für Apparatedimensionen, Trocknungszeit und Energiebedarf).

#### c) Übergeordnete Prinzipien der thermischen Trennprozesse

Konzept der Trennstufe (theoretische Stufe, praktische Stufe, NTU-, HTU- und HETP-Wert); Führung der Stoffströme (Gleich-, Kreuz-, Gegenstrom); Stoff- und Wärmebilanzen (Arbeitslinien); Gemeinsamkeiten und Unterschiede der apparativen Lösungen.

### 4.3.3 Ausgewählte mechanische Grundoperationen

#### a) Mechanische Stofftrennung flüssig/fest

Grundgesetze der Sedimentation, Zentrifugation, Filtration; Zusammenhang zwischen Größe, Form und Dichte der Feststoffteilchen und der Trennleistung; Wirkungsgrad (Zeit- und Flächenbedarf).

#### b) Stoffvereinigung und Mischtechnik

Mischprozesse für verschiedene Phasenkombinationen Gas-Flüssig-Fest (Düsen, Rühren, Kneten etc.)

#### c) Verarbeiten von Feststoffen

Schüttgutbehandlung und Formgebung (z.B. Katalysatorformkörper etc.), Auftrennen des Mahlguts (Zerteilungsgrad und Energieaufwand).

## 4.4 Literatur

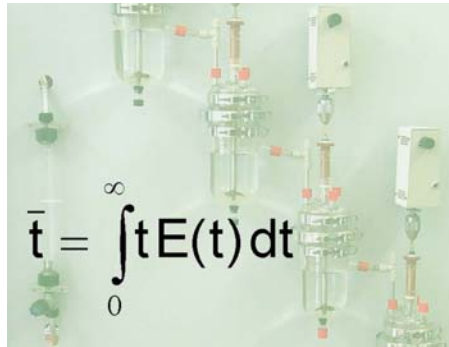
### 4.4.1 Einführende Literatur

- Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.; Gmehling, J.; Hofmann, H.; Onken, U.; Renken, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie, Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Gmehling, J.; Brehm, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie - Grundoperationen, Bd. 2, Wiley-VCH, Weinheim 1996.
- Gramlich, K.; Militzer, K.-E.; Weiß, S.: Thermische Verfahrenstechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1993.
- Grassmann, P.; Widmer, F.; Sinn, H.: Einführung in die thermische Verfahrenstechnik, 3. Aufl., Walter De Gruyter, Berlin 1997.
- Vauck, W. R. A.; Müller, H. A.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik, 11. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1999.

### 4.4.2 Weiterführende Literatur

- Onken, U.: Thermische Verfahrenstechnik, Carl Hanser Verlag, München 1975.
- Sattler, K.: Thermische Trennverfahren, 3. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2001.
- Schönbacher, A.: Thermische Verfahrenstechnik – Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse, Springer Verlag, Heidelberg 2002.
- Titze, H.; Wilke, H.-P.: Elemente des Apparatebaus, 3. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg 1992.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2002.
- Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G., Oberholz, A., Winnacker-Küchler: Chemische Technologie, in 9 Bd., 5. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Zogg, M.: Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl., Teubner, Stuttgart 1993.

## 5. Vorlesungsbegleitende Lehrveranstaltungen



### 5.1 Technisch-chemisches Praktikum

#### 5.1.1 Zielsetzung

Das Anliegen des Technisch-chemischen Praktikums ist es, ausgehend von soliden Grundkenntnissen der Thermodynamik von Phasengleichgewichten und der chemischen Kinetik, die physikalisch-chemischen Grundlagen für die Auslegung von chemischen Reaktoren sowie von Prozesseinheiten zur thermischen und mechanischen Stofftrennung mit der dazugehörigen Mess- und Regelungstechnik zu vermitteln. Hierbei sollen auch biokatalytische Verfahrensschritte Berücksichtigung finden. Dadurch werden die Praktikumssteilnehmer in die Lage versetzt, ihre experimentellen Fähigkeiten und ihr bisheriges Wissen auf dem Gebiet der Technischen Chemie zu vertiefen, um damit für die Ausarbeitung, das Betreiben und die Verbesserung von technisch-chemischen Verfahren in ihrem späteren Berufsleben gerüstet zu sein.

#### 5.1.2 Inhaltsbeschreibung

Unter Beachtung der Vorlesungsschwerpunkte sollte das Technisch-chemische Praktikum folgende Komplexe umfassen:

##### Praktikumsversuche zu chemischen Prozesstechnologien

- Messen, Steuern, Regeln von chemischen/biochemischen Prozessstufen
- Rohstoffverarbeitungstechnologien
- Experimentelle Durchführung ausgewählter chemischer/biokatalytischer Verfahrensstufen

##### Praktikumsversuche zur chemischen Reaktionstechnik

- Verweilzeitverhalten und Umsatz in chemischen Reaktoren
- Ermittlung der Wärmebilanz verschiedener Reaktortypen
- Makrokinetische Untersuchungen heterogener Reaktionen

##### Praktikumsversuche zu thermischen und mechanischen Grundoperationen

- Thermische Trennverfahren (z. B. Rektifikation, Extraktion, Sorption, Trocknung)
- Mechanische Trennverfahren (z. B. Filtration, Siebung, Flotation)
- Mischvorgänge (z. B. Rühren, Begasen)

### 5.1.3 Literatur

- Kripylo, P.; Vogt, F.: Praktikum der Technischen Chemie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig Stuttgart 1993.
- Patat, F.; Kirchner, K.: Praktikum der Technischen Chemie, 4. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin 1986.
- Reschetilowski, W.: Technisch-Chemisches Praktikum, Wiley-VCH, Weinheim 2002.

## 5.2 Technisch-chemische Berechnungen

### 5.2.1 Zielsetzung

Zur quantitativen Beschreibung von Prozessabläufen oder von stationären Zuständen werden in der chemischen Reaktionstechnik und der Bioreaktionstechnik sowie für thermische oder mechanische Grundoperationen physikalisch-chemisch begründete mathematische Modelle zu Grunde gelegt. Da eine hohe Effektivität bei der Entwicklung und Verbesserung chemischer und biotechnologischer Verfahren nur erreichbar ist, wenn experimentelle Untersuchungen so weit wie möglich durch Berechnungen und Prozesssimulationen vorbereitet oder unterstützt werden, ist die Herausbildung von Fertigkeiten zur fehlerfreien Ausführung technisch-chemischer Berechnungen das Ziel der vorlesungsbegleitenden Rechenübungen. Der Schwerpunkt liegt auf der sicheren Anwendung, Modifizierung und Kombination von Formeln und mathematischen Modellen. Zur Minimierung des Zeitaufwandes für die Durchführung der Zahlenrechnung sind Programmsysteme wie Mathcad, Maple, Mathematica, MATLAB, Simulink oder Tabellenkalkulationsprogramme (Microsoft Excel, Origin) in die Lösung einzubeziehen.

### 5.2.2 Inhaltsbeschreibung

Mit Berechnungen zu Aufgaben aus den folgenden thematischen Komplexen können die inhaltlichen Schwerpunkte der Vorlesungen zu chemischen Prozesstechnologien, zur chemischen Reaktionstechnik und zu den thermischen und mechanischen Grundoperationen umfassend unterstützt werden:

- Aufstellung von Stoff- und Enthalpiebilanzen
- Thermodynamik von Gleichgewichtsprozessen und von chemischen/biochemischen Reaktionen
- Kinetik homogener, heterogener und komplexer chemischer/biochemischer Reaktionen
- Stofftransport, Wärmetransport und chemische Reaktion – Anwendung der allgemeinen DAMKÖHLERSchen Bilanzgleichung zur Aufstellung mathematischer Modelle für den Ablauf chemischer/biochemischer und verfahrenstechnischer Prozesse in verschiedenen Reaktoren und Apparaten
- Der Umsatz in isotherm betriebenen Modellreaktoren - diskontinuierlicher Idealkessel, Semibatch-Reaktor, kontinuierlicher Idealkessel, Idealrohr, Rohrreaktor mit Rückvermischung, Reaktorschaltungen
- Rückführung von Stoffströmen mit und ohne Produktabtrennung

- Verweilzeitverteilung und chemische Reaktion
- Dynamisches Verhalten von Modellreaktoren
- Reaktionstechnik heterogener Reaktionen: Einfluss des Stofftransports auf den Reaktionsverlauf
- Nichtisotherme Prozessführung: Wärmetransport, optimale Temperaturführung, Reaktorstabilität
- Auslegung von Triebkraftprozessen mit rechnerischen und grafischen Methoden (Rektifikation, Extraktion, Sorptionsverfahren, Trocknung, Kristallisation)
- Berechnungen auf der Basis dimensionsloser Kennzahlen
- Verwendung von Regressionsmodellen, Statistische Versuchsplanung und -auswertung
- Mathematische Methoden zur System- und Prozessoptimierung und zur optimalen Modellanpassung

### 5.2.3 Literatur

- Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.; Gmehling, J.; Hofmann, H.; Onken, U.; Renken, A.: Lehrbuch der Technischen Chemie, Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- Bisswanger, H.: Enzymkinetik, 3. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 2000.
- Bockhardt, H.-D.; Güntzschel, P.; Poetschukat, A.: Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig Stuttgart 1992.
- Budde, K.; Hertwig, K.; Köpsel, R.; Rückauf, H.; Thiele, R.; Turek, F.: Reaktionstechnik II - Aufgabensammlung, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1985.
- Butt, J. B.: Reaction Kinetics and Reactor Design, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1980.
- Dialer, K.; Leschonski, K.; Onken, U.: Grundzüge der Verfahrenstechnik und der Reaktionstechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien 1986.
- Dunn, I.J.; Heinzle, E.; Ingham, J., Prenosil, J. E.: Biological Reaction Engineering, VCH, Weinheim New York Basel Cambridge 1995.
- Ebert, K.; Ederer, H.; Isenhour, T. L.: Computer Applications in Chemistry, VCH, Weinheim 1989.
- Emig, G.; Klemm, E.: Technische Chemie – Einführung in die Chemische Reaktionstechnik, 5. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York 2005.
- Fogler, H. S.: Elements of Chemical Reaction Engineering”, 4 Aufl., Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Pearson International Edition 2006.
- Hagen, J.: Chemische Reaktionstechnik, VCH, Weinheim New York Basel Cambridge, 1993.
- Ingham, J.; Dunn, I.J.; Heinzle, E.; Prenosil, J. E.; Snape, J. B.: Chemical Engineering Dynamics – An Introduction to Modeling and Computer Simulation, Wiley-VCH, Weinheim 2007.
- Krypilo, P.; Pilchowski, K.; Pritzkow, W.: Aufgaben zur Technischen Chemie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987.
- Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering, John Wiley & Sons, 1998.

- Levenspiel, O: The Chemical Reactor Omnibook; Published by Oregon State University, Corvallis, Oregon, Distributed by OSU Book Stores, Inc. Corvallis, Oregon 97339, 1996.
- Müller-Erlwein, E.: Chemische Reaktionstechnik, B. G. Teubner, Stuttgart Leipzig, 1998.
- Snape, J.B.; Dunn, I.J.; Ingham, J.; Prenosil, J.E.: Dynamics of Environmental Bioprocesses – Modelling and Simulation, VCH, Weinheim New York Basel Cambridge Tokyo 1995.
- Wittenberger, W.; Fritz, W.: Rechnen in der Verfahrenstechnik und der chemischen Reaktionstechnik, Springer Verlag, Wien New York 1981.
- Wolf, K.-H.: Aufgaben zur Bioreaktionstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1994.

### 5.3 Exkursionen in die chemische und chemisch-pharmazeutische Industrie

#### 5.3.1 Zielsetzung

Exkursionen in die chemische und chemisch-pharmazeutische Industrie sollen einen Beitrag dazu leisten,

- die Praxisrelevanz der in den Vorlesungen, Praktika und Rechenübungen vermittelten Lehrinhalte sichtbar zu machen,
- anschaulich zu zeigen, welche Probleme zu lösen sind, um einen chemischen Prozess vom Laborversuch in den Industriemaßstab zu überführen oder eine Anlage über lange Zeit stabil zu fahren bzw. ein Verfahren bei laufendem Betrieb weiter zu verbessern,
- die Bereitschaft bei den Chemiestudenten zu motivieren, sich die für eine Kooperation mit Spezialisten für Verfahrenstechnik, Regelungstechnik, Prozessautomatisierung und Betriebsökonomie notwendigen Kenntnisse anzueignen,
- die enge Verknüpfung von Prozesskunde, chemischer/biochemischer Reaktions- und Verfahrenstechnik, Sicherheitstechnik, Ökologie und Ökonomie zu verdeutlichen.

#### 5.3.2 Inhaltsbeschreibung

Die inhaltliche Gestaltung der Exkursion ist entsprechend der betrieblichen Möglichkeiten auf die genannten Zielstellungen zu orientieren. Um eine hohe Effektivität der Exkursionen zu erreichen, empfiehlt es sich,

- die inhaltlichen Schwerpunkte vorher mit den Betrieben abzusprechen und in den Lehrveranstaltungen darzustellen,
- von den Studenten Exkursionsberichte zu einem prozessspezifischen Thema und zu einem Querschnittsthema abzufordern und dafür bereits vor der Exkursion den Teilnehmern die Aufgabenstellung auszuhändigen.



DECHEMA e.V.  
Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
D-60486 Frankfurt

Postfach 15 01 04  
D-60061 Frankfurt

Telefon 069 75 64 0  
Telefax 069 75 64 201



**DECHEMA e.V.**