

3 Chemische Verfahrenstechnik

3.1 Einleitung

Die **Chemische Verfahrenstechnik**, auch bezeichnet als **Reaktionstechnik**, befaßt sich mit der Umwandlung von Stoffen durch chemische Reaktionen. Sie behandelt die technische Verwirklichung von chemischen Reaktionen unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflußgrößen wie beispielsweise Drücke, Temperaturen, Aggregatzustände oder Konzentrationen.

Während der Chemiker sich im Laboratorium mit dem Auffinden der günstigsten Reaktionsbedingungen von chemischen Reaktionen im kleinsten Maßstab beschäftigt, realisiert der Verfahrenstechniker die Umsetzung industrieller Mengen. Einflüsse wie beispielsweise Reaktionswärme, Reaktionszeit oder Aggregatzustände der Stoffe spielen beim Chemiker häufig eine untergeordnete Rolle, während sie in der Produktion über erforderliche Apparate und Anlagen und somit über Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines Prozesses entscheiden.

Erforderlich für die Tätigkeiten in der Chemischen Verfahrenstechnik sind Grundlagen aus der **chemischen Thermodynamik** und der **Reaktionskinetik**. Die chemische Thermodynamik behandelt die **Berechnung von chemischen Gleichgewichten**, die Reaktionskinetik ermittelt die **Reaktionsgeschwindigkeiten**.

3.2 Grundverfahren

In **Grundverfahren** oder **“unit operations”** verläuft die Umwandlung der Stoffe immer in gleicher Weise, mit gleichem apparativem Aufwand und nach gleichem Prinzip. Es ist dabei unerheblich, um welchen Stoff es sich handelt.

Gegenüber den mechanischen und thermischen Grundverfahren lassen sich die chemischen **“unit operations”** nicht so detailliert trennen und systematisch ordnen. Dies liegt zum einen daran, daß die Verfahren sich nicht immer eindeutig voneinander abgrenzen lassen, zum anderen daran daß oft keine bestimmten Apparate für die Reaktionen erforderlich sind.

Eine häufig vorzufindende Einteilung der chemischen Verfahren ist in Abb.3.2.1 zu finden:

Reaktionsverfahren	Beispiele von Verfahren
Thermische Verfahren	Rösten von Eisenpellets, Verbrennen von Heizöl
Katalytische Verfahren	Oxidieren von Abgasen, Polymerisieren von Kunststoffen
Elektrochemische Verfahren	Nitrieren von Zahnrädern, Kolbenringen oder Zylinderwänden, Galvanisieren von Blechen
Photochemische Verfahren	Chlorieren von Papier, Vitaminisieren
Biochemische Verfahren	Wasserreinigen in Kläranlagen, alkoholisches Gären
Hochdruckverfahren	Synthese von Ammoniak (Haber-Bosch), Luftverflüssigen (Linde-Verfahren)

Abb.3.2.1: Einteilung von chemischen Verfahren

3.3 Massenerhaltungssatz

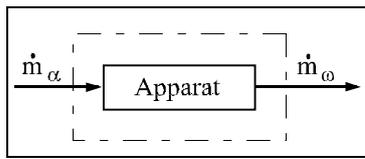
○ Massenstrom

Als Massenstrom bezeichnet man die Masse an Stoff, die sich pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt (z.B. eine Rohrleitung oder einen Apparat) bewegt (Gl.3.3.1):

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (\text{Gl.3.3.1})$$

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]
 m : Masse [kg]
 t : Zeit [s]

○ Massenbilanz



Betrachten wir einen Reaktionsapparat, dem gleichmäßig Ausgangsstoff zufließt und Produkt entnommen wird, und ziehen eine Bilanzgerade ein (Abb.3.3.2).

Abb.3.3.2: Massenströme bei einem Apparat

Massenbilanz:

$$\begin{aligned} \text{Zugeführter Massenstrom} &= \text{Massenänderung} + \text{Abgeführter Massenstrom} \\ \dot{m}_\alpha &= \Delta m + \dot{m}_\omega \end{aligned}$$

Da der Reaktionsapparat weder unendlich an Stoffmenge zunehmen noch abgeben kann, muß für einen Gleichgewichtszustand gelten:

$$\Delta m = 0$$

Die Massenbilanz gibt somit den

Massenerhaltungssatz wieder:

$$\dot{m}_\alpha = \dot{m}_\omega \quad (\text{Gl.3.3.2})$$

oder
$$\dot{m} = \text{konst.} \quad (\text{Gl.3.3.3})$$

Die Gesamtmasse der eintretenden Stoffe ist gleich der Gesamtmasse der aus einem Apparat austretenden Stoffe.

○ Volumenstrom

Als **Volumenstrom** bezeichnet man das Volumen eines Stoffes, das sich pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt (z.B. eine Rohrleitung oder einen Apparat) bewegt (Gl.3.3.4):

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (\text{Gl.3.3.4}) \quad \dot{V}: \text{Volumenstrom [m}^3/\text{s]}$$

V : Volumen [m³]
 t : Zeit [s]

Gehen wir von der **Dichte** eines Stoffes (Gl.3.3.5) aus:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Gl.3.3.5}) \quad \rho: \text{Dichte [kg/m}^3]$$

m : Masse [kg]
 V : Volumen [m³]

Umgestellt und durch die Zeit geteilt:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad \left| \cdot \frac{1}{t} \right.$$

$$\frac{V}{t} = \frac{m}{\rho \cdot t}$$

Man erhält somit den Volumenstrom entsprechend Gl.3.3.6:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{Gl.3.3.6}) \quad \dot{V}: \text{Volumenstrom [m}^3/\text{s]}$$

\dot{m} : Massenstrom [kg/s]
 ρ : Dichte [kg/m³]

Für **nicht kompressible** Stoffe (Feststoffe und Flüssigkeiten) gilt: $\rho = \text{konst.}$

Aus Gl.3.3.6 und Gl.3.3.3 folgt:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\text{konst.}}{\text{konst.}} = \text{konst.}$$

Somit gilt für **nicht kompressible** Stoffe: $\dot{V} = \text{konst.}$ (Gl.3.3.7)

○ Rohrströmung von Flüssigkeiten

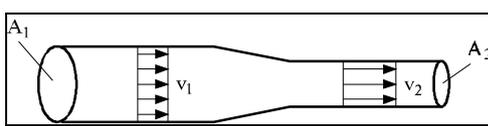
Die Dichteänderungen von Flüssigkeiten durch Temperatur oder Druck sind bei der Betrachtung von Strömungsvorgängen meistens vernachlässigbar. Man kann also annehmen: $\rho = \text{konst.}$

Der Volumenstrom in einem durchströmten Rohr errechnet sich dann aus:

$$\dot{V} = A \cdot v \quad (\text{Gl.3.3.8})$$

\dot{V} : Volumenstrom [m^3/s]
 A : Durchströmter Querschnitt [m^2]
 v : Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Für eine **Querschnittsveränderung** d.h. eine Verengung oder eine Erweiterung des Querschnittes einer Leitung oder eines Behälters, siehe z.B. Abb.3.3.3, ergeben Gl.3.3.7 und Gl.3.3.8:



$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (\text{Gl.3.3.9})$$

A_1, A_2 : Querschnittsflächen [m^2]
 v_1, v_2 : Geschwindigkeiten [m/s]

Abb.3.3.3: Rohrströmung bei Querschnittsverengung

□ Aufgabe:

20 Tonnen Wasser strömen stündlich durch eine 2-Zoll Leitung. Wie hoch ist die Strömungsgeschwindigkeit? (1 Zoll entspricht 25.4 mm).

Die Leitung verjüngt sich auf 1Zoll. Wie schnell strömt das Wasser nun?

■ Lösung:

3.4 Arbeitsweise von Reaktoren

Die Apparate der verfahrenstechnischen Anlagen, in denen chemische Reaktionen stattfinden, bezeichnet man als **Reaktoren** oder **Reaktionsapparate**.

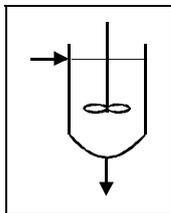
Bezüglich der **Arbeitsweise** d.h. der Art, wie die Stoffströme (Ausgangsmaterialien und Produkte) geführt werden, unterscheidet man sowohl in der chemischen als auch in der restlichen Verfahrenstechnik zwischen:

- **diskontinuierlicher Arbeitsweise**, auch als **Chargenbetrieb** oder **“batchweisem” Betrieb** (engl. “batch” = Schub) bezeichnet, und
- **kontinuierlicher Arbeitsweise**, auch **Fließbetrieb** genannt.

○ Im **Chargenbetrieb** werden die Apparate absatzweise befüllt, die Stoffe reagieren miteinander und anschließend werden die Produkte entnommen.

Chargenbetrieb ist vorteilhaft, wenn

- die Reaktionen sehr langsam sind,
- nur kleine Mengen hergestellt werden oder
- die Apparate für verschiedene Stoffe/Reaktionen verwendet werden



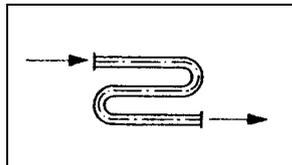
Der Grundtyp an Reaktionsapparat ist der ideale Rührkessel (Abb.3.4.1). Der Kesselinhalt wird gleichmäßig durchmischt (durch den Einsatz von Mischvorrichtungen), so daß die Reaktionen zwischen den Stoffteilchen optimal ablaufen können.

Abb.3.4.1: Idealer Rührkessel

○ Bei **kontinuierlicher Arbeitsweise** werden fortlaufend Rohstoffe aufgegeben, reagieren gelassen und Produkte entnommen.

Im Fließbetrieb sind kontinuierliches Messen, Regeln und Steuern erforderlich, so daß dieser sich nur zur Produktion von großen Mengen an Produkten lohnt.

Viele technische Herstellungsverfahren laufen heute kontinuierlich ab, sie kennzeichnen die moderne Verfahrenstechnik.



Der Grundtyp an Reaktor ist das ideale Strömungsrohr (Abb.3.4.2). Hier findet in Längsrichtung keine Durchmischung der Stoffströme statt, diese durchströmen den Reaktionsapparat kontinuierlich.

Abb.3.4.2: Ideales Strömungsrohr

○ Um die Vorteile von idealem Rührkessel und idealem Strömungsrohr zu verknüpfen, werden **stetig betriebene Rührkessel** eingesetzt. Diese werden kontinuierlich befüllt und entleert, durch Mischvorrichtungen wird der Behälterinhalt gleichmäßig durchmischt.

○ Durch hintereinanderschalten mehrerer Rührkessel entsteht eine sogenannte **Rührkesselkaskade** (Abb.3.4.3). Diese kann auch als ideales Strömungsrohr mit Mischstufen gesehen werden.

Gegenüber einem einzelnen, kontinuierlich betriebenen Rührkessel verbessert die Rührkesselkaskade den Reaktionsablauf.

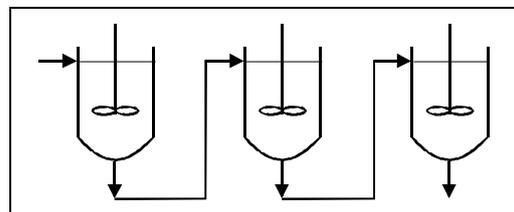


Abb.3.4.3: Rührkesselkaskade

3.5 Energieumsatz bei Reaktionen

Betrachten wir einen Reaktor mit zulaufenden und ablaufenden Stoffströmen (Abb.3.5.1) und legen eine Bilanzgerade herum.

Die chemische Energie der Stoffe wird durch deren Bildungsenthalpie (siehe Abb.2.1.1) berücksichtigt.

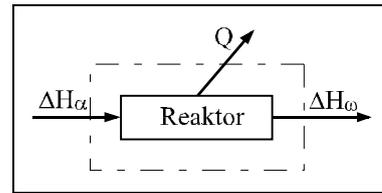


Abb.3.5.1: Energienströme beim Reaktor

Energiebilanz:

$$\begin{aligned} \text{Zugeführte Bildungsenergie} &= \text{Abgegebene Wärme} + \text{Abgeführte Bildungsenergie} \\ \Delta H_{\alpha} &= Q + \Delta H_{\omega} \quad (\text{Gl.3.5.1}) \end{aligned}$$

Andererseits gilt für jede chemische Reaktion das Energieerhaltungsgesetz in der Form:

$$\boxed{\Delta H_R = \Delta H_{\omega} - \Delta H_{\alpha}} \quad (\text{Gl.3.5.2}) \quad \begin{aligned} \Delta H_R &: \text{Reaktionsenthalpie [J]} \\ \Delta H_{\alpha} &: \text{Bildungsenthalpie der Ausgangsstoffe [J]} \\ \Delta H_{\omega} &: \text{Bildungsenthalpie der Produkte [J]} \end{aligned}$$

Aus Vergleich von Gl.3.5.1 und Gl.3.5.2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\alpha} &= Q + \Delta H_{\omega} \quad \text{d.h.} \quad \Delta H_{\omega} - \Delta H_{\alpha} = -Q \\ \Delta H_R &= \Delta H_{\omega} - \Delta H_{\alpha} \quad \text{d.h.} \quad \Delta H_{\omega} - \Delta H_{\alpha} = \Delta H_R \end{aligned}$$

Daher: $\boxed{\Delta H_R = -Q}$ (Gl.3.5.3)

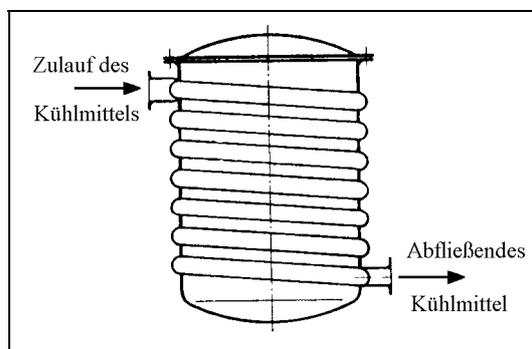
Entsprechend der Reaktionswärme Q der Stoffe unterscheidet man zwischen

- exothermen und
- endothermen Reaktionen

○ Bei **exothermen** Reaktionen wird Wärme frei. Die **Bildungsenthalpie der Produkte** ist **geringer** als die **Bildungsenthalpie der Ausgangsstoffe**.

Die Stoffe in den Apparaten müssen gekühlt werden. Durch einen Kühlmantel oder Kühlschlangen (Abb.3.5.1) an den Wänden der Behälter oder durch gekühlte Rührer und andere Einbauten wird ein Kühlmittel gepumpt, das die freiwerdende Wärme aufnimmt und abführt. Hierzu kann Wasser oder ein anderes Kühlmittel genommen werden.

Das Kühlmittel wird an anderer Stelle abgekühlt (beispielsweise mit Luft in einem Wärmetauscher) und zurück zum Reaktor geführt, dies ist der **geschlossene Kreislauf des Kältemittels**. Lässt man das erhitzte Wasser verdampfen, so spricht man einem **geöffneten Kreislauf**.



Wird die Wärme nicht abgeführt, **verlangsamen** sich die **Reaktionen** durch Verschiebung des chemischen Gleichgewichtes (Gesetz des geringsten Widerstandes).

Desweiteren können **Gefahren** durch hohe **Temperaturen** und **Druck** entstehen.

Nicht zuletzt verändern manche Stoffe ihre **Qualität** durch überhitzen, es können nicht erwünschte **Nebenreaktionen** ablaufen.

Abb.3.5.1: Reaktor mit Kühlschlangen

○ **Endotherme** Reaktionen laufen nur ab, wenn den Ausgangsstoffen Wärme zugeführt wird, weil die **Produkte** eine **höhere Bildungsenthalpie** besitzen als die **Ausgangsstoffe**.

Über ähnliche Einbauten wie beim Kühlen, über einen Heizmantel oder Einbauten (Abb.3.5.2), wird ein meist gasförmiges Heizmittel (häufig überhitzter Wasserdampf) gepumpt, das dem Apparateinhalt die erforderliche Wärme liefert.

Die freiwerdende Kondensationswärme des Heizmittels erwärmt den Reaktorinhalt, das flüssige Heizmittel fließt ab, wird erneut erhitzt und zum Reaktor zurückgeführt. Man spricht vom **geschlossenen Kreislauf des Heizmittels**.

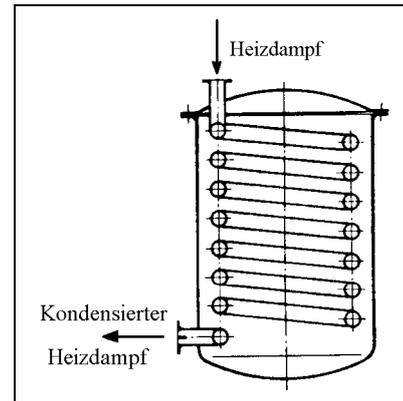


Abb.3.5.2: Heizgefäß mit Rohrschlange

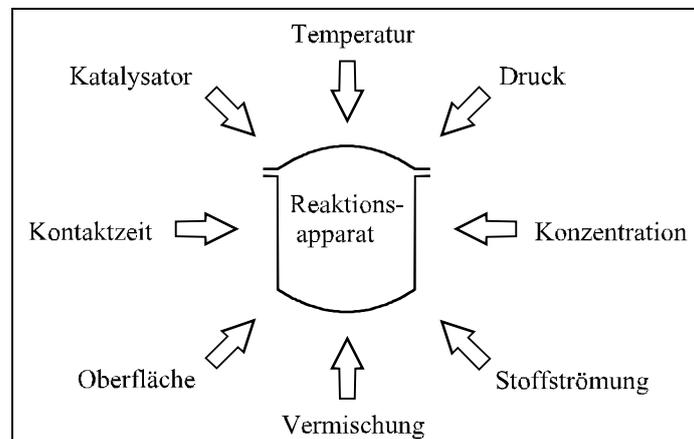
3.6 Einflußgrößen auf die Reaktorauslegung

Der Verlauf einer Reaktion hängt von vielen Einflußgrößen (Abb.3.6.1) ab.

Diese haben bei kleinen Quantitäten im Labormaßstab oft nur einen geringen Einfluß, spielen aber bei der technischen Herstellung von grösseren Mengen meist eine wichtige Rolle. Sie legen daher oft die Reaktorbauform und -abmessungen fest.

Bei Betrachtung des Reaktionsablaufes und bei der damit zusammenhängenden Auslegung des Reaktors sind die nachfolgende Einflußgrößen von Bedeutung:

Abb.3.5.1: Einflüsse auf Reaktion



○ Temperatur

Exothermen bzw. endothermen Reaktionen müssen Wärme entzogen bzw. zugeführt werden, damit sie wie gewollt ablaufen. An den Reaktoren bedarf es daher entsprechenden konstruktiven Maßnahmen, um die Reaktionswärme zu entziehen bzw. hinzu zu führen, siehe hierzu Abschnitt 3.5.

○ Druck

Bei vielen Reaktionen entsteht Druck durch Bildung von Gasen oder Erwärmung der Stoffe. Man betreibt viele Reaktoren allerdings bei Umgebungsdruck, das heißt in geöffneten Behältern. Dies mindert den apparativen Aufwand, wobei insbesondere eine Regelung des Reaktionsablaufes über Temperaturen wesentlich leichter ist als über Drücke.

Bei Unterdruck- und bei häufiger auftretenden Überdruck- und Hochdruckprozessen müssen die Apparate entsprechend ausgelegt werden. Die Berechnung von Druckreaktoren erfolgt hierzulande meist nach den deutschen **AD-Merkblättern** (Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter) unter Berücksichtigung des Regelwerkes TRS (Technische Regeln Druckbehälter) und der Druckbehälterverordnung. Allerdings kann auch nach Regelwerken aus anderen Ländern berechnet werden, beispielsweise bei Tochtergesellschaften von ausländischen Firmen oder bei Lieferung von Apparaten ins Ausland.

Den Berechnungsrichtlinien aller Werke liegt für einen dünnwandigen ($d_a/d_i \leq 1.2$) zylindrischen Hohlkörper die sogenannte Kesselformel zugrunde:

Kesselformel
$$\sigma_{\max} = \frac{p \cdot d_a}{2 \cdot s} \quad (\text{Gl.3.6.1}) \quad \text{mit} \quad \sigma_{\max} : \text{maximal zulässige Spannung} \quad [\text{N/mm}^2]$$

p : Überdruck im Zylinder [N/mm²]
 d_a : Außendurchmesser des Zylinders [mm]
 s : Wanddicke [mm]

Daraus errechnet sich die Mindestwandstärke für die Kesselwand (bei bekannter maximal zulässiger

Spannung des Werkstoffes):
$$s = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma_{\max}} \quad (Gl.3.6.2)$$

Anmerkung:

Die Berechnungsformel für Zylinderschalen mit ($d_a/d_i \leq 1.2$) lautet nach AD-Merkblatt B1:

$$s = \frac{d_a \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 \quad (Gl.3.6.3)$$

wobei s : Erforderliche Mindestwanddicke [mm]
 d_a : Außendurchmesser [mm]
 p : Berechnungsdruck [bar]
 K : Festigkeitskennwert bei Berechnungstemp. [N/mm²]
 S : Sicherheitsbeiwert bei Berechnungsdruck [-]
 v : Berechnungsspannung in Schweißnaht [-]
 c_1 : Zuschlag zur Berücksichtigung von Wanddickenunterschieden [mm]
 c_2 : Abnutzungs (Korrosions-) zuschlag [mm]

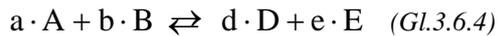
□ Aufgabe:

Berechne für einen Zylinder mit Überdruck die axiale und die radiale (tangentele) Spannungen in der Zylinderwand. Wo ist die Spannung am größten?

■ Lösung:

○ Konzentrationen

Alle chemische Reaktionen sind genau betrachtet reversibel. Sie lassen sich wie folgt anschreiben (hier für zwei Edukte und zwei Produkte):



Die Reaktionsgleichung gilt für eine bestimmte Temperatur und einen bestimmten Druck. nach einer gewissen Zeit herrscht ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen allen Stoffen, das sich beschreiben läßt durch das

Massenwirkungsgesetz:

$$K = \frac{[D]^d \cdot [E]^e}{[A]^a \cdot [B]^b} \quad (\text{Gl.3.6.5})$$

K: Gleichgewichtskonstante [-] (Einheit abhängig von der Anzahl der Stoffe und den Werten der stöchiometrischen Faktoren)
 [A] ... [E]: Stoffmengenkonzentrationen [mol/l]
 a ... e: Stöchiometrische Faktoren [-]

Bei höheren Konzentrationen der Ausgangsstoffe (Edukte) verlaufen die Reaktionen schneller in Richtung Produktbildung, da sich die zu reagierenden Stoffteilchen öfter treffen können. Die Entnahme der Produkte führt zur erneuten Bildung dergleichen. Man sagt, daß das Reaktionsgleichgewicht sich nach rechts verlagert.

Bei manchen Stoffen können apparative Maßnahmen erforderlich sein, damit die Stoffströme richtig geführt werden und die Reaktionen optimal ablaufen.

○ Stoffströmung

Bei Strömungen unterscheidet man zwischen laminaren und turbulenten Strömungen. Kennzeichnend für eine Strömung ist die **Reynolds-Zahl**, sie berücksichtigt die Form des um- oder durchströmten Körpers und ist vom Medium abhängig. Die Reynolds-Zahl errechnet sich aus dem Verhältnis der Mssenträgheitskräfte zu den Reibungskräften.

Für kreisförmige Rohre gilt:

$$\boxed{\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}} \quad (\text{Gl.3.6.6})$$

wobei Re: Reynoldszahl [-]
 v: Geschwindigkeit [m/s]
 d: Rohrdurchmesser [m]
 ν: Kinematische Viskosität des Fluids [m²/s]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

η: Dynamische Viskosität [Pa s] (1 Pa = 1 N/mm²)
 ρ: Dichte des Fluids [kg/m³]

Bei Re < 2320 herrscht laminare Strömung, bei Re > 2320 ist die Strömung turbulent.

Turbulenzen führen zu Quervermischungen und verbessern den Stoffaustausch. Durch das Abreißen der Strömung von der Wand wird jedoch der Wärmeübergang verschlechtert.

○ Vermischung

Eine gleichmäßige Verteilung der Stoffteilchen wird durch Rührvorrichtungen und Einbauten angestrebt. Dies beschleunigt den Reaktionsablauf.

Insbesondere sind Toträume zu vermeiden d.h. Bereiche in denen die Stoffe nicht in Bewegung sind oder eventuell beim Entleeren zurück bleiben.

○ Oberfläche

Die Oberfläche der Stoffe hängt vom **Aggregatzustand** und dem **Zersetungsgrad** (d.h. wie fein der Stoff verteilt ist) ab. Viel Oberfläche entspricht großen Austauschflächen an denen die Reaktionen ablaufen können.

Die Bauform des Reaktors richtet sich nach den Aggregatzuständen der Stoffe. Bei Flüssigkeiten und Gasen werden beispielsweise häufig stehende Kolonnen verwendet, in denen eine Durchmischung unter Ausnutzung der Schwerkraft erfolgen kann.

Der Zersetungsgrad entscheidet auch über den verwendeten Reaktor. Beispielsweise müssen Gasblasen möglichst fein verteilt in eine Flüssigkeit dispergiert werden oder zwei nicht mischbare Flüssigkeiten durch Einbauten verteilt und in Kontakt gebracht werden.

○ Kontaktzeit

Die Kontaktzeit zwischen den verschiedenen Stoffteilchen ist direkt ausschlaggebend für die Reaktionsdauer.

Die apparative Gestaltung soll die gleiche Kontaktzeit zwischen den Teilchen ermöglichen.

○ Katalysator

Katalysatoren beschleunigen Reaktionen. Sie liegen meist in fester oder flüssiger Form vor und müssen nach der Reaktion wieder vom Stoff abgetrennt werden.

Alle Stoffteilchen sollten möglichst gleichmäßig mit dem Katalysator in Berührung kommen.

3.7 Apparatebauarten

Viele Reaktionen sind nicht an eine bestimmte Reaktorbauart gebunden, so daß die Vielzahl an Reaktoren klein ist gegenüber der Vielzahl an Apparaten in der mechanischen und der chemischen Verfahrenstechnik. Trotzdem gibt es noch mehrere verschiedene Bauformen, die zum Teil von den Aggregatzuständen der Ausgangsstoffe (oder Edukte) und der Produkte abhängen. Einige Reaktorbauarten sollen hier vorgestellt werden:

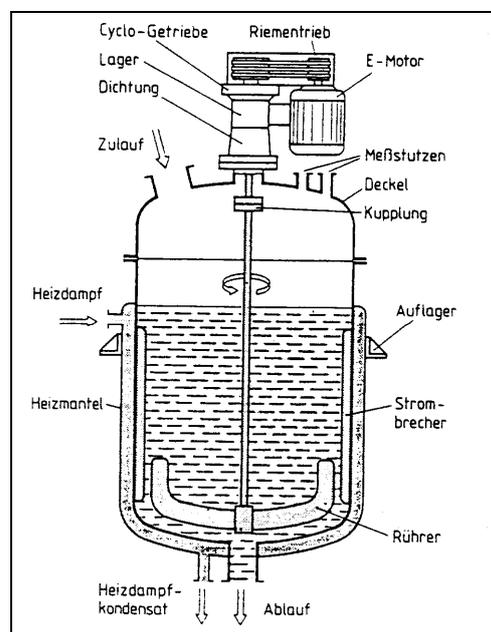
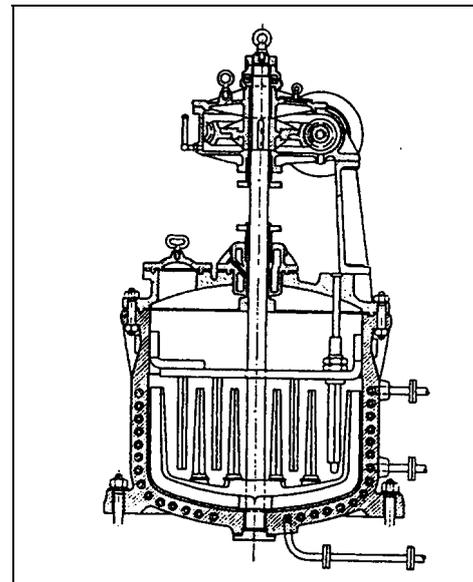


Abb.3.7.1: Rührkessel

Die wohl einfachste und älteste Bauform eines Reaktors ist der **Rührkessel** (Abb.3.7.1), ein zylindrisch stehendes oder aufgehängtes Gefäß mit Rührwerk. Einbauten im Apparat können zu gleichmäßigerer Durchmischung des Behälterinhaltes führen, Erwärmen oder Abkühlen sind durch eine doppelwandige Bauweise oder außen aufgeschweißte Rippen möglich. Durch entsprechende Bauweise kann der Rührkessel auch als Druckbehälter verwendet werden.



3.7.2: Autoklav

Bei hohen Drücken werden sogenannte **Autoklaven** (Abb.3.7.2) verwendet, beispielsweise bei der Polymerisation von Kunststoffen oder zur Sterilisation von Lebensmittelkonserven. Die meist zylindrisch stehenden Hochdruckbehälter sind durch ihre robuste Bauweise mit dicken Flanschen und Schrauben gekennzeichnet. Es sind die typischen Reaktoren der chemischen Industrie für Reaktionen bei hohen Drücken und Temperaturen. Sie arbeiten meist diskontinuierlich und können für verschiedene Reaktionen (Stoffe) verwendet werden..

Nahe einem idealen Strömungsrohr arbeitet das Druckrohr (Abb.3.7.4), das kontinuierlich von den Ausgangsstoffen durchströmt wird. Die Reaktion findet in dem **Druckrohr** an einem **Katalysator** statt, so wie z.B. die Abgase im Fahrzeugauspuff.

Abb.3.7.4: Druckrohr

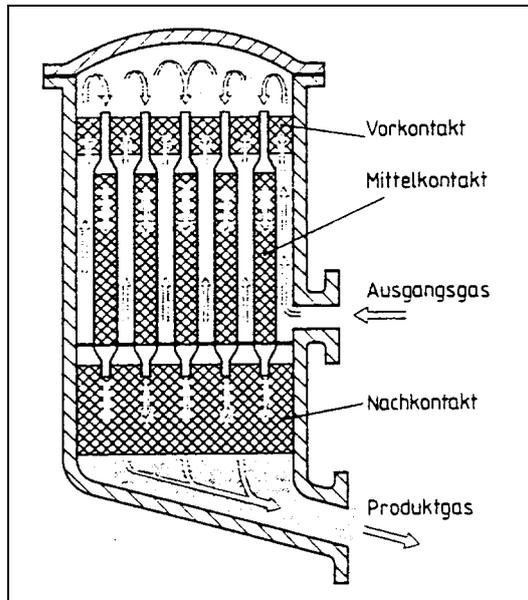
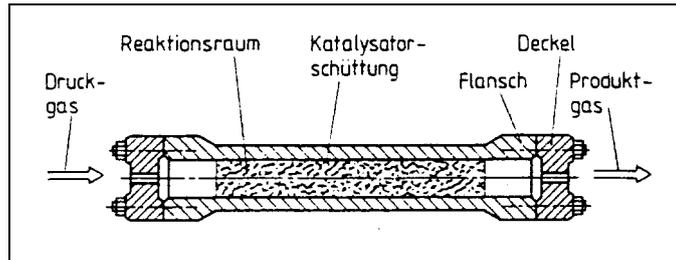


Abb.3.7.5: Röhrenkontaktofen

Allgemein verwendet man bei Reaktoren mit Katalysatorfüllungen die Bezeichnung "Kontakt".

Im **Röhrenkontaktofen** (Abb.3.7.5) beispielsweise ist der Katalysator in Röhren eingebaut, die beheizt oder gekühlt werden können und von den Stoffen durch- und umströmt werden.

Dem gegenüber liegt der Katalysator im **Flachbettkontaktofen** (Abb.3.7.6) als Schüttung auf einem Sieb, das von den Stoffen durchströmt wird. Heiz- oder Kühlrohre verlaufen durch die Katalysatorschicht.

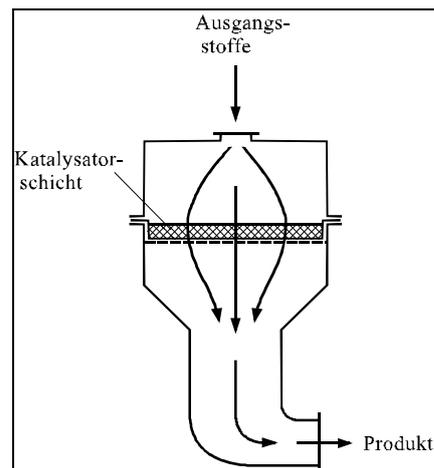
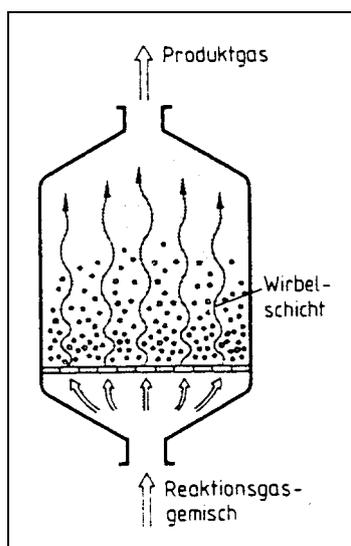


Abb.3.7.6: Flachbettkontaktofen



Der beste Stoffaustausch erfolgt im **Wirbelschichtreaktor** (Abb.3.7.7), wo die Katalysatorpartikel frei beweglich in einer Gas- oder Flüssigkeitsströmung sind und daher viel Oberfläche anbieten (beispielsweise beim Cracken von Erdöl).

Aber nicht nur Katalysatoren können Wirbelschichtreaktoren füllen, auch feste Ausgangsstoffe können der Inhalt sein, beispielsweise bei der Feuerung von Kohlestaub zur Energiegewinnung.

Abb.3.7.7: Wirbelschichtreaktor

Thermische Reaktionen finden unter anderem im **Schachtofen** (Abb.3.7.8) statt, einer klassischen Bauform die beispielsweise durch die Eisengewinnung bekannt ist.

Im **Drehrohr** (Abb.3.7.9) erfolgt die Stoffströmung ebenfalls im Gegenstrom, durch leichte Neigung des Reaktors bewegt sich der Feststoff weiter. Sehr große Drehrohre findet man in der Zementindustrie zum Brennen von Kalkstein und Ton.

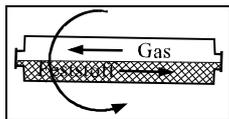


Abb.3.7.9: Drehrohr

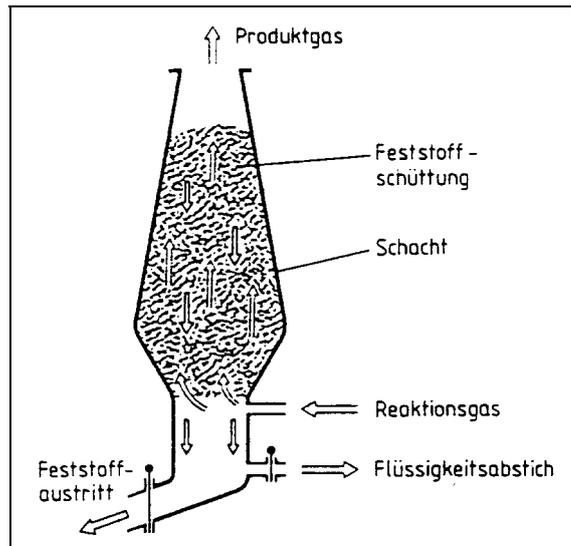
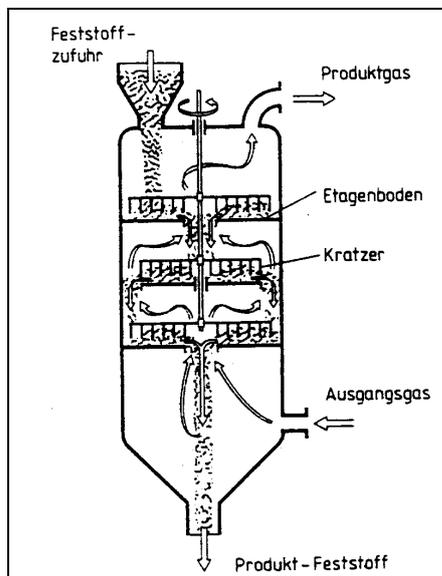


Abb.3.7.8: Schachtofen



Dem gegenüber wird in einem **Etagenofen** (Abb.3.7.10) der Reaktionsverlauf zwischen Feststoff und Gasstrom verbessert, indem beide Stoffströme im Gegenstrom geführt werden, z.B. beim Rosten von Eisenerz.

Eine ganz andere Bauform stellt die **Elektrolyse-Zelle** (Abb.3.7.11) dar, die beispielsweise zur elektrolytischen Raffination von Kupfer verwendet wird.

Reaktionen zwischen Gasen und Flüssigkeiten finden häufig in **Gasblasenreaktoren** (Abb.3.7.12) statt, Kolonnen in denen die Gasblasen in der Flüssigkeit hochströmen. Diese Apparatebauform ist auch häufig in der chemischen Verfahrenstechnik vorzufinden.

Abb.3.7.10: Etagenofen

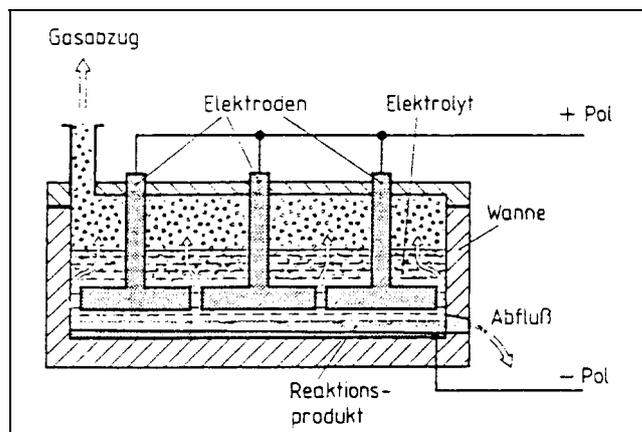


Abb.3.7.11: Elektrolyse-Zelle

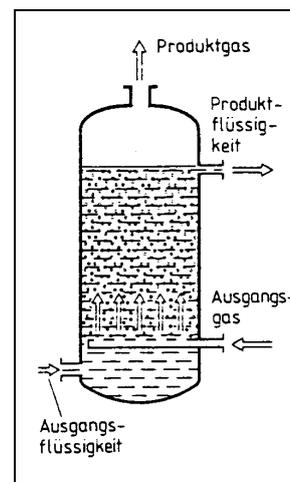


Abb.3.7.12: Gasblasenreaktor

Hierüber hinaus gibt es noch mehrere Reaktoren, die jedoch von der Bauform und Führung der Stoffströme her meistens ähnlich konzipiert und aufgebaut sind.