

Einführung in die Verfahrenstechnik und Naturstofftechnik 1-1

Mechanische Verfahrenstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. Oktober 2025

Zur Person



- PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick
 - Frank.Babick@tu-dresden.de
 - Tel.: 463-33724
 - Büro: Sch A208 / A213
- Lehre
 - Einführung in die Verfahrenstechnik und Naturstofftechnik 1-1/MVT
 - Strömungsprobleme der MVT
 - Eigenschaften von Stoffsystemen und Produktentwicklung
 - Prozessverfahrenstechnisches Seminar
 - Betreuung von Studienarbeiten
- Forschungsgebiete
 - Charakterisierung nano- und kolloiddisperse Partikelsysteme
 - Struktur-Eigenschafts-Beziehung von Partikelaggregaten und nicht-sphärischen Partikeln
 - grenzflächenbestimmte Prozesse in kolloiddispersen Systemen

Stoffwandlung - Beispiele

von Kaffeebohnen ...



... zu Kaffee



verschiedenste
Abwässer ...



... zu klarem
Wasser



aus natürlichem
Titandioxid ...



... weiße
Wandfarbe



Erdöl ...



... zu Kunststoff



Weizen ...



... zu Brot



Modul MW-VNT-16

„Einführung in die Verfahrenstechnik und Naturstofftechnik“

- Struktur
 - 8 Fächer in 4 Lehrveranstaltungen
 - Wintersemester:
 - VNT 1-1 = Mechanische VT + Thermische VT
 - VNT 1-2 = Chemische VT + Bio-VT
 - Sommersemester
 - VNT 2-1 = Technische Chemie + Lebensmitteltechnik
 - VNT 2-2 = Holztechnik + Faserwerkstofftechnik
 - Klausuren: jeweils eine Komplexprüfung aus 4 Fächern
- VNT 1-1
 - 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung
 - VNT-Direktstudenten: Fr (ug), 2. DS, ZEU/148/U
 - Aufbaustudenten, Gasthörer etc.: **¿wird ein separater Termin benötigt?**
 - bis Anfang Dezember MVT, danach TVT (auf OPAL als separate Kurse)

Lernziele der Lehrveranstaltung VNT 1-1/MVT

- Wissen:
 - Gegenstand und Aufgabe der Verfahrenstechnik
 - Konzept der Grundoperationen
 - relevante Prozesse und Stoffsysteme der Mechanischen Verfahrenstechnik
 - Kennzeichnung von Partikelsystemen
 - Physik und technische Nutzung von Sedimentation
 - technische Nutzung von Filtration
- Fähigkeiten:
 - stoffliche Bilanzierung von technischen Prozessen
 - Umrechnung von Mengenangaben
 - Darstellung von Partikelgrößenverteilungen
 - Berechnung von Sedimentationsprozessen
 - Berechnung von Filtrationsprozessen

Gliederung der Vorlesung

1. Einführung in die Verfahrenstechnik
2. Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik
3. Kennzeichnung disperser Systeme
4. Sedimentation
5. Filtration

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

Lernziele zu Kapitel 1

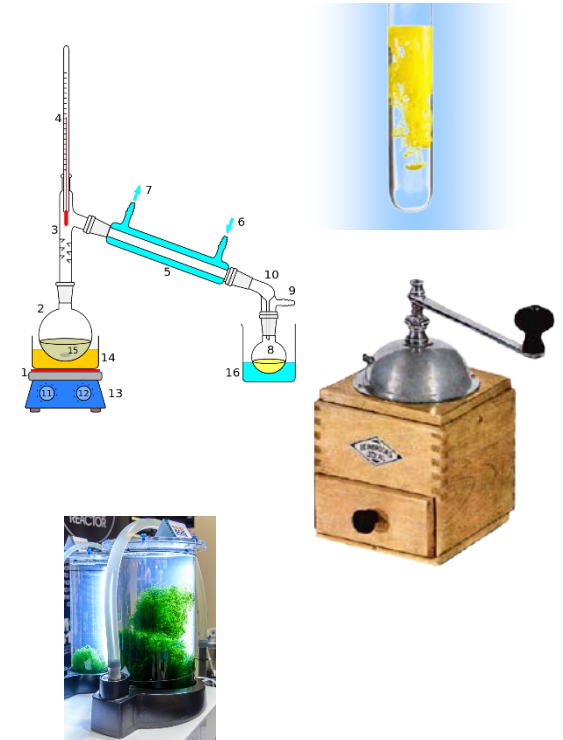
- Wissen:
 - Was ist Gegenstand und Aufgabe der Verfahrenstechnik?
 - Welche Kennzahlen beschreiben die Zusammensetzung von Stoffgemischen?
- Fähigkeiten:
 - Stoffliche Bilanzierung von technischen Prozessen
 - Umrechnung von Konzentrationsangaben

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

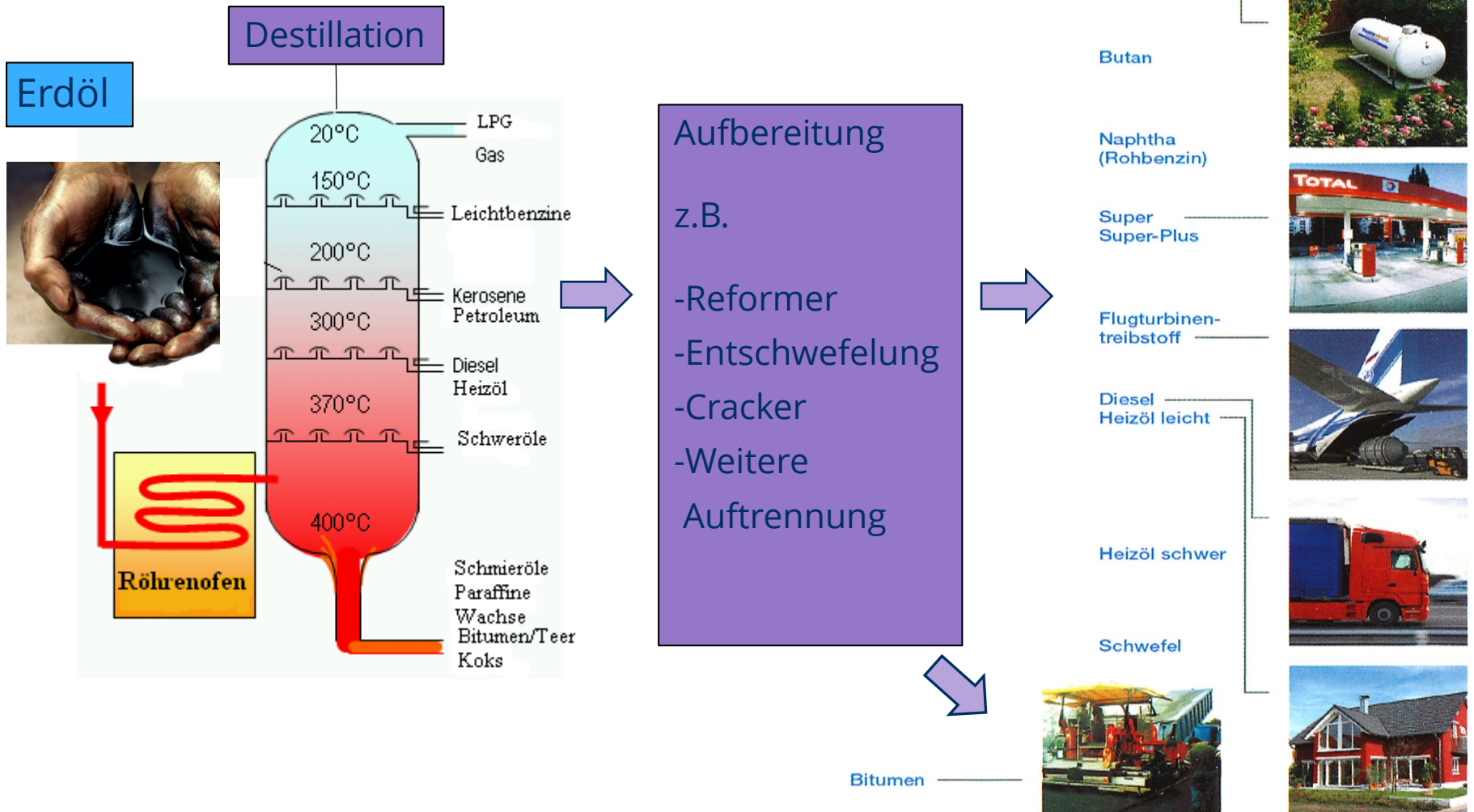
– *Stoffwandlungsprozesse* –

Was ist Verfahrenstechnik ?

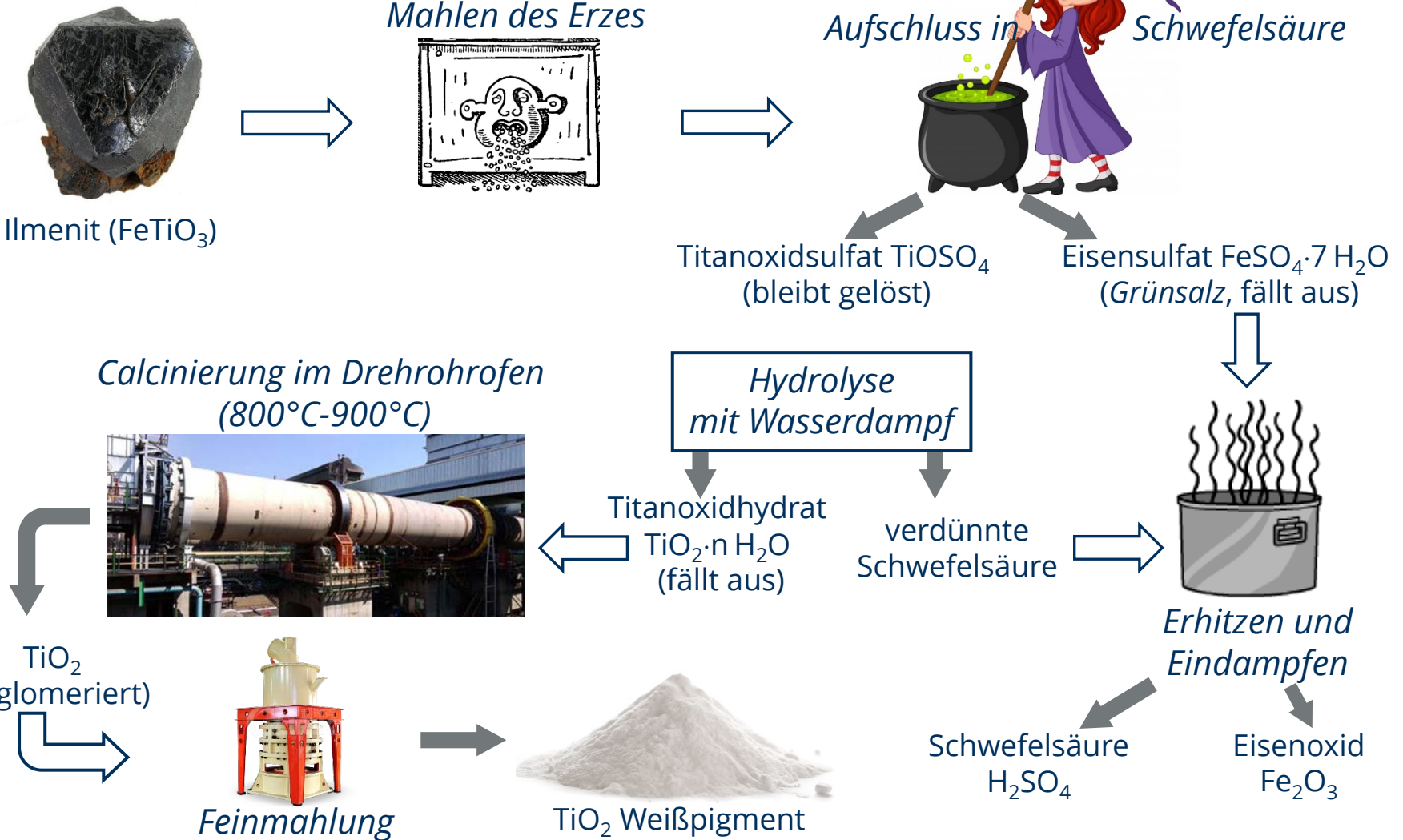
- Ingenieurwissenschaft, die sich mit Stoffumwandlungsprozessen befasst, d.h. mit der Änderung des physikalischen Zustandes oder der chemischen Natur
- zum Beispiel
 - Änderung der Moleküle
→ Chemische Verfahrenstechnik
 - Änderung der molekularen Zusammensetzung
→ Thermische Verfahrenstechnik
 - Änderung von Teilchensystemen >>Moleküle
→ Mechanische Verfahrenstechnik
 - Stoffumwandlung mit Hilfe biochemischer Prozesse
→ Bioverfahrenstechnik



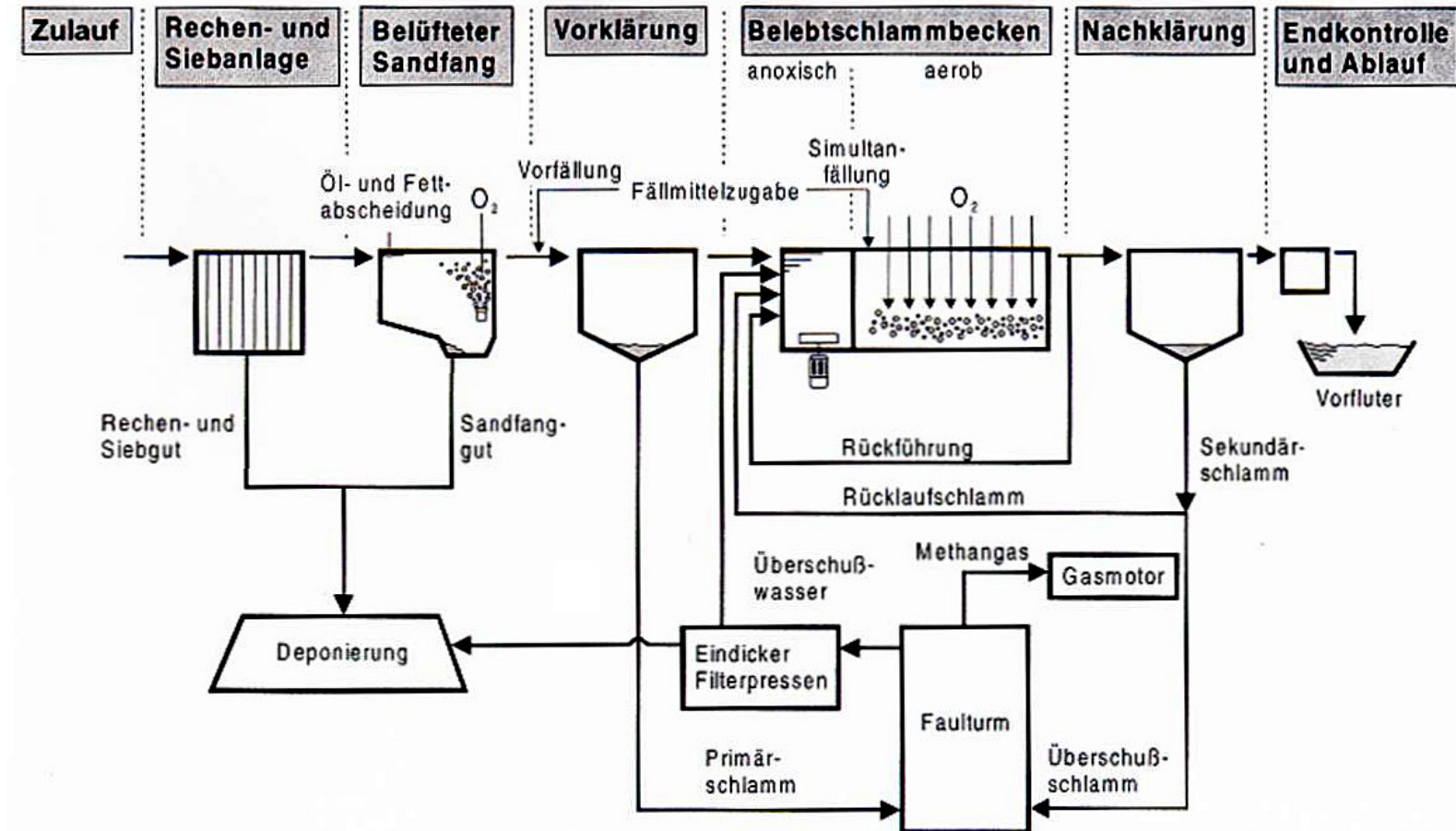
Herstellung von Kraftstoffen aus Erdöl



Aus schwarzem Erz zu weißem Pigment

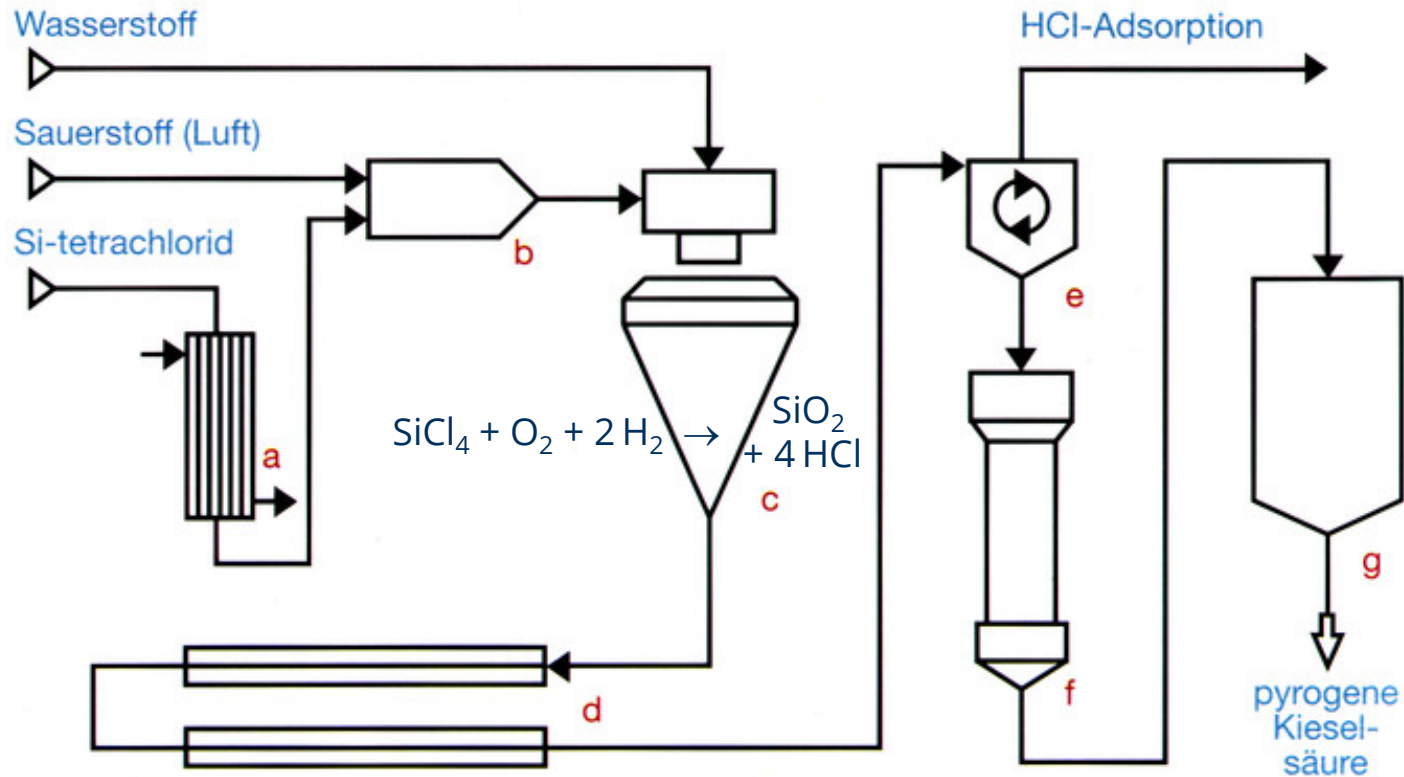


Stoffwandlung: Kommunale Kläranlage



K. Schwister: Taschenbuch der Verfahrenstechnik. Fachbuchverlag Leipzig, 2000.

Stoffwandlung: Flammensynthese von SiO₂



a: Verdampfer

b: Mischkammer

c: Brenner

d: Kühlstrecke

e: Abscheidung

f: Entsäuerung

g: Silo



Bedenken wir die Vielfalt an Produkten, dann gibt es also unzählige, spezifische Stoffwandlungsprozesse.

- ... und das müssen Verfahreningenieure alles lernen?
- **Nein.**
- Inhalt des Studiums
 - Einteilung der Stoffwandlungsprozesse in produktunabhängige Grundtypen
→ **Grundprozesse**
z.B. Destillation, Zerkleinerung, Kneten, Filtration
 - Auswahl und Auslegung von Apparaten zur Realisierung eines Grundprozesses
 - Konzeptionierung von Anlagen
 - Überwachung, Regelung und Modellierung von Anlagen



Tätigkeitsfeld der Verfahrenstechnik

- Aufgaben
 - Erarbeitung von Verfahrens- und Anlagenschemata, Auswahl geeigneter Apparate
 - Auslegung von Anlagen bzw. einzelner Apparate
 - Optimierung von Anlagen
 - Anpassung von Anlage (neue Endprodukte/Gesetzesänderung)
- Werkzeuge
 - VT-Grundkenntnisse (Kennzeichnung von Stoffsystemen, Funktion der einzelnen Apparate, Stoff- und Energieaustausch)
 - Bilanzen
 - Maßstabsübertragung (dim.-lose Kennzahlen, normierte Größen)

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

– Angaben von Stoffmengen –

Möglichkeiten zur Quantifizierung der Stoffmenge

Extensive Größen

- extensive Größen
 - Wert ist abhängig vom Umfang der Messprobe
- übliche Maße
 - Masse m
 - Volumen V
 - Stoffmenge n
 - Anzahl N
- Flächeninhalte
 - Oberfläche S
 - Projektionsfläche A_{proj}
 - effektive Schattenfläche (= Extinktionsquerschnitt C_{ext})
- Äquivalentgrößen
 - BSB_5 = biologischer Sauerstoffbedarf in 5 d
 - CSB = chemischer Sauerstoffbedarf

Möglichkeiten zur Quantifizierung der Stoffmenge

Intensive Größen

- intensive Größen
 - keine Änderung bei Teilung oder Vergrößerung der Messprobe
 - Bezug der „Menge“ auf eine zu ihr proportionale GrößeMenge M = Masse m , Volumen V , Stoffmenge n , Anzahl N , Oberfläche S , ...

- Konzentration:
$$c = \frac{\text{Menge der Komponente } i}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{M_i}{V_{ges}}$$

z. B. Massenkonzentration c_m , molare Konzentration c_n

- Anteil:
$$\varphi = \frac{\text{Menge der Komponente } i}{\text{Menge aller Komponenten}} = \frac{M_i}{\sum M_k}$$

z. B. Massenanteil φ_m , Volumenanteil φ_V

- Beladung:
$$X_{A/B} = \frac{\text{Menge der Komponente } A}{\text{Menge der Komponente } B} = \frac{M_A}{M_B}$$

z. B. Feststoffbeladung von Gasströmungen $X_{FS/G} = \text{kg Feststoff/kg Fördergas}$

Beispiel zur Umrechnung von Mengenangaben

Möglichkeit zum Selbstversuch

- bekannt sei für eine Sandschlämme:
 - 10 Ma.-% Sand (2500 kg/m³) in Wasser (1000 kg/m³)
- gesucht ist:
 - die Massenkonzentration (kg Sand/m³)
- anschauliche Lösung
 - 1 Tonne Schlamm → 100 kg Sand + 900 kg Wasser
 - 100 kg Sand entspricht 100/2500 m³ = 0,04 m³ Sand
 - 900 kg Wasser entspricht 900/1000 m³ = 0,9 m³ Wasser (900 l Wasser)
 - Massenkonzentration des Sandes = 100 kg / 0,94 m³ = 106 kg/m³
- abstrakte Lösung

$$c_{m,S} = \frac{m_S}{V_{\text{ges}}} = \frac{m_S}{V_S + V_W} =$$

$$c_{m,S} = \frac{2500 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1 + 2,5 \cdot 0,9 / 0,1} = 106 \text{ kg/m}^3$$

Aufgabe zum Selbststudium

- Wir bleiben bei der Sandschlämme bestehend aus ...
... 10 Ma.-% Sand (2500 kg/m^3) in Wasser (1000 kg/m^3).
- Wie hoch ist der Volumenanteil des Sandes?
- Wie hoch ist die Massenbeladung (Sand auf Wasser)?

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

– *stoffliche Bilanzierung* –

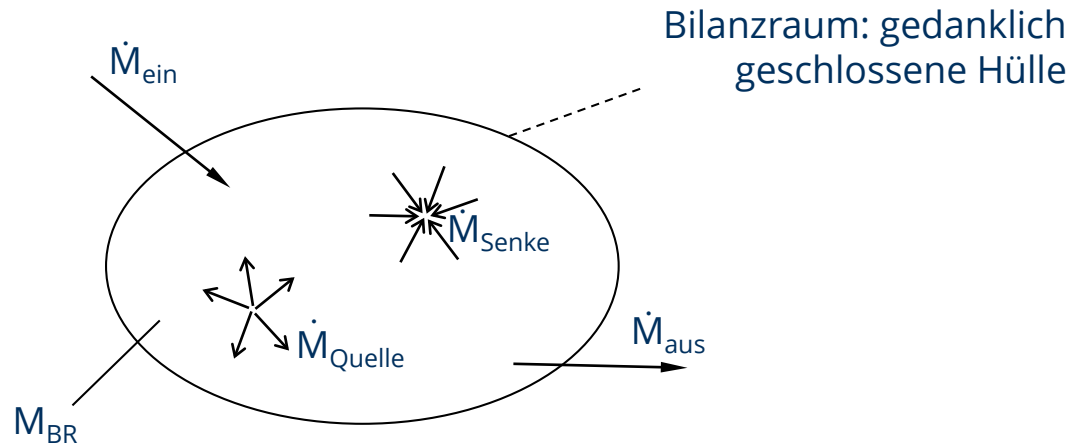
Bilanzierung von technischen Prozessen

- typische Fragestellungen:
 - Wieviel Kilogramm CaCl_2 werden benötigt, um mittels Fällung 1 t CaCO_3 herzustellen?
 - Welche Wärmemenge ist zur Trocknung einer gegebenen Mengen feuchten Holzes erforderlich?
 - Wie hoch ist der Materialverlust durch Abrieb und Staubbildung beim pneumatischen Transport von Baustoffen?
 - Innerhalb welcher Zeitdauer kann ein Tanklaster mit Milch mit der vorhandenen Pumpe entleert werden?
 - Nach wie vielen Tagen muss ein Feinststaubfilter ersetzt werden, weil seine Aufnahmekapazität erreicht wurde?
 - Welche Menge an Schlamm muss ein Klärwerk pro Tag entsorgen?
- Gegenstand der Bilanzierung
 - Objekte: Anlagen, Behälter, Apparate, Reaktoren, Mischer, Verteiler ...
 - Größen: Stoffmengen (extensiv & intensiv), Energie (Wärme, Arbeit)
 - Fragen: Rezeptur, Menge an Produkt & Abfall, Leckagen, Kinetik von Prozessen

Bilanzgleichung

- Grundform:
 - Mengenänderung in einem Behälter resultiert aus ein- und ausgehenden Strömen sowie aus Bildungs- und Abbauprozessen

- Schema:



$$\frac{dM_{\text{BR}}}{dt} = \sum \dot{M}_{\text{ein}} - \sum \dot{M}_{\text{aus}} + \sum \dot{M}_{\text{Quelle}} - \sum \dot{M}_{\text{Senke}}$$

- Vereinfachungen
 - stationär: keine zeitliche Änderung (kont. Prozesse, fehlende Speicherkapazität)
 - weder Bildung noch Abbau (Gesamtmasse, Gesamtenergie)

Welche Größen dürfen wir bilanzieren?

- uneingeschränkt bilanzierbare Größen:
 - sämtliche Erhaltungsgrößen: Masse, Impuls, Energie, elektr. Ladung, ...
 - Masse & Stoffmenge der Teilkomponenten
- eingeschränkt bilanzierbar:
 - Volumen
 - **aber:** in mechan. Verfahrenstechnik (MVT) häufig Volumenbilanzen
 - **nur ...**
 - wenn Komponenten nicht ineinander löslich (d. h. Volumenadditivität bzw. kein Exzessvolumen)
 - wenn Komponenten inkompressibel (bzw. isobare Bedingungen)
(in der Praxis: für feste & flüssige Stoffe, kleine Druck- und Temperaturänderungen)
 - wenn keine Reaktionen oder Prozesse mit Volumenänderung
(z.B. keine Volumenbilanz für Kondensation von Dampf)

Bilanzierungsbeispiel 1 – Gesamtmenge

Reaktorbefüllung

- Frage:
ζ nach welcher Befüllungsdauer wird der maximale Füllstand erreicht?
- Bilanz am Gesamtvolumen:

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V}_{\text{zu}} - \dot{V}_{\text{ab}} + \dot{V}_{\text{Quelle}} - \dot{V}_{\text{Senke}}$$

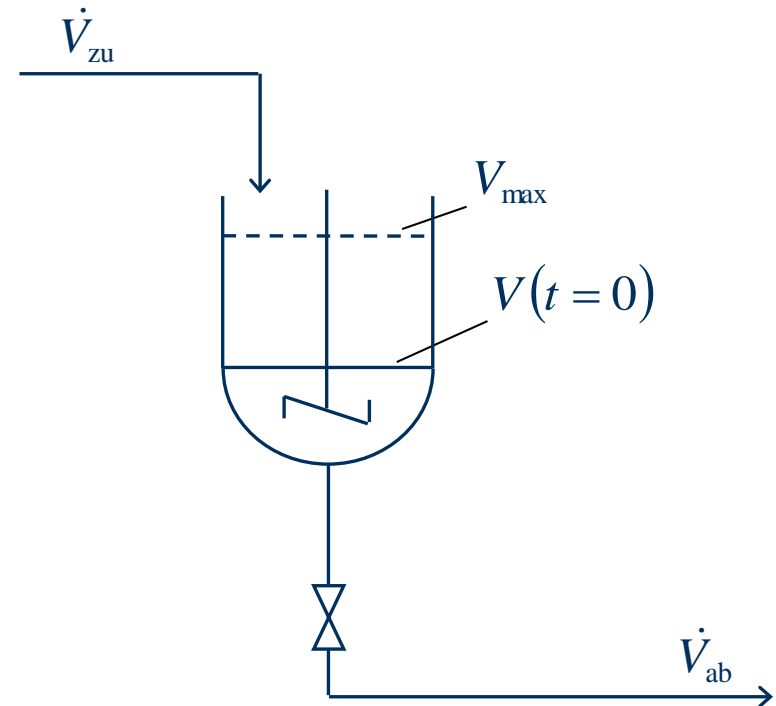
wobei $\dot{V}_{\text{Quelle}}, \dot{V}_{\text{Senke}} \equiv 0$

d.h. $\frac{dV}{dt} = \dot{V}_{\text{zu}} - \dot{V}_{\text{ab}}$

→ $\int dV = \int (\dot{V}_{\text{zu}} - \dot{V}_{\text{ab}}) \cdot dt$

→ $V_{\text{max}} - V_0 = (\dot{V}_{\text{zu}} - \dot{V}_{\text{ab}}) \cdot t_{\text{füll}}$

→ $t_{\text{füll}} = \frac{V_{\text{max}} - V_0}{\dot{V}_{\text{zu}} - \dot{V}_{\text{ab}}}$



Bilanzierungsbeispiel 2 – Einzelkomponenten

Feststoffabscheidung

- Frage:
ζwie hoch ist Partikelkonzentration im Reaktor nach der Zeitspanne Δt ?

- Bilanz am Gesamtvolumen:

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V}_{zu} - \dot{V}_{ab} + \dot{V}_{Quelle} - \dot{V}_{Senke} \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow \dot{V}_{zu} = \dot{V}_{ab}$$

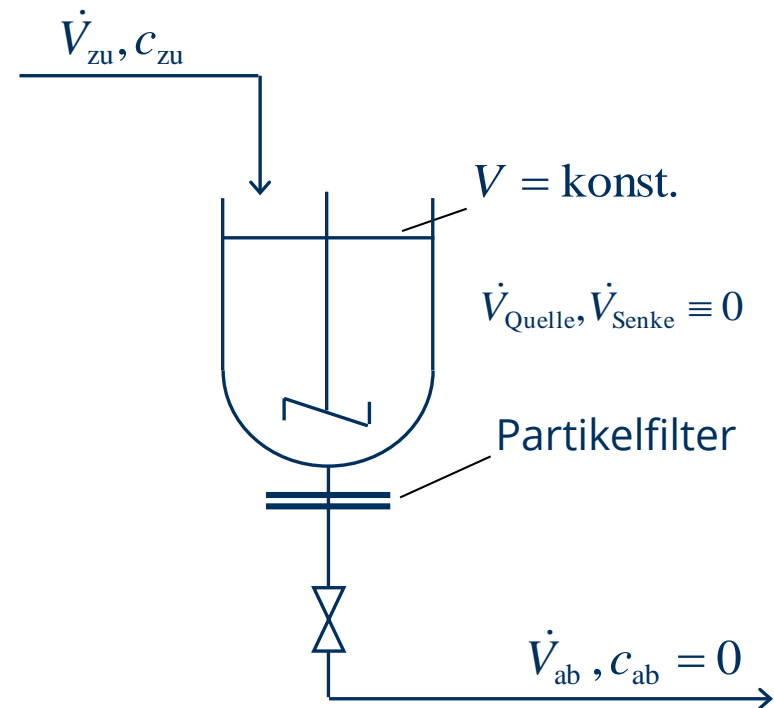
- Bilanz für partikuläre Phase:

$$\frac{d(c \cdot V)}{dt} = c_{zu} \cdot \dot{V}_{zu} - c_{ab} \cdot \dot{V}_{ab} + \dot{M}_Q - \dot{M}_S$$

wobei: $\dot{M}_{Quelle}, \dot{M}_{Senke} \equiv 0, c_{ab} = 0$

d.h. $V \cdot \frac{dc}{dt} = c_{zu} \cdot \dot{V}_{zu}$

$$\rightarrow c = c_0 + c_{zu} \frac{\dot{V}_{zu} \cdot \Delta t}{V}$$



Bilanzierungsbeispiel 3 – Dichte von Stoffgemischen

Suspensionsdichte – Aufgabe zum Selbstversuch

- Aufgabe 1

- gegeben: Schlamm aus 10 **Ma.-%** Sand (2500 kg/m³) in Wasser (1000 kg/m³)
- anschauliche Lösung (s. Foliensatz zu Stoffmengen):
 - schon bekannt: 1 t Suspension enthält 0,9 m³ Wasser und 0,04m³ Sand
 - das heißt: Suspensionsdichte = 1000 kg ÷ 0,94 m³ = 1064 kg/m³
- abstrakte Lösung:

$$\rho_{\text{sus}} = \frac{m_{\text{ges}}}{V_{\text{ges}}} = \frac{m_{\text{ges}}}{V_{\text{S}} + V_{\text{W}}}$$

- allg. Berechnung: $\rho_{\text{eff}}^{-1} = \sum_k \varphi_{m,k} \rho_k^{-1}$

- Aufgabe 2

- gegeben: Sandschlämme mit 10 **Vol.-%** Sand in Wasser

- abstrakte Lösung:
$$\rho_{\text{sus}} = \frac{m_{\text{ges}}}{V_{\text{ges}}} = \frac{m_{\text{S}} + m_{\text{W}}}{V_{\text{ges}}} = \frac{\varphi_{V,S} \cdot V_{\text{ges}} \cdot \rho_{\text{S}} + \varphi_{V,W} \cdot V_{\text{ges}} \cdot \rho_{\text{W}}}{V_{\text{ges}}} = \varphi_{V,S} \cdot \rho_{\text{S}} + (1 - \varphi_{V,S}) \cdot \rho_{\text{W}}$$

$$= 0.1 \cdot 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.9 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- allg. Berechnung: $\rho_{\text{eff}} = \sum_k \varphi_{m,k} \rho_k$

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

– *dimensionslose Kennzahlen* –

Maßstabsübertragung in der Verfahrenstechnik

Beispiel „Suspendieren von Partikeln“

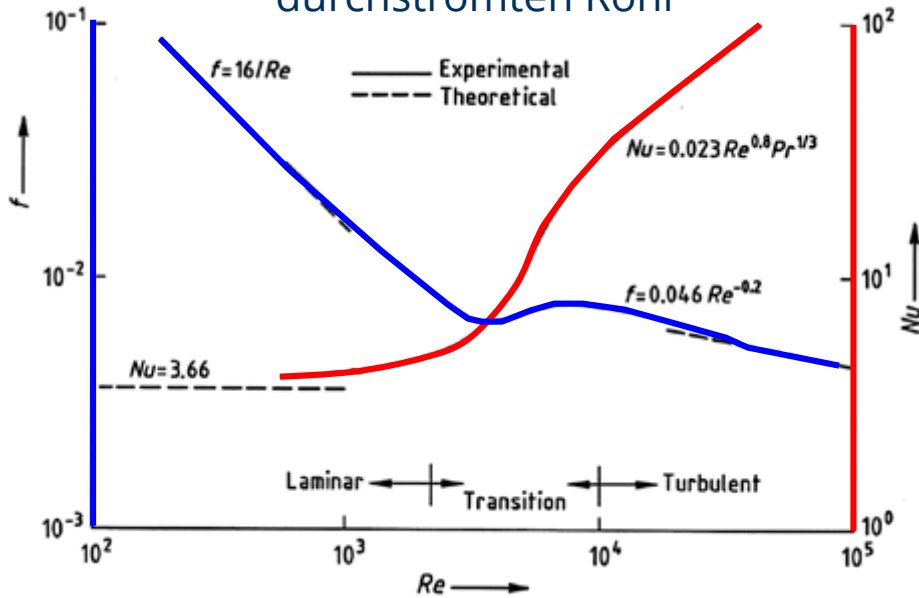
- Ziel:
 - homogene Verteilung der Partikel in der Flüssigkeit
- Anwendungen:
 - Flüssigphasenreaktionen mit Katalysatorpartikeln
 - Auflösen von Feststoffen
 - Partikelsynthese mittels Kristallisation
- Ergebnisse aus Laborversuchen
 - Ziel wird am besten in **turbulenten** Rührerströmungen erreicht
→ „schnelles“ Rühren mit „großen“ Rührern
 - Homogenität umso eher, je geringer Dichtedifferenz, je kleiner und langsamer die Partikel, je weniger Partikel, ...
- Was heißt das für industrielle Rührreaktoren?
 - Bedarf für universell gültige Kriterien des „guten Suspendierens“
 - dimensionslose Kennzahlen



– z.B. Rührer-Reynoldszahl $Re_R = \frac{\rho_{\text{sus}} d_R^2 n_R}{\eta_{\text{sus}}}$ & Suspendierkennzahl $Su = \frac{\rho_{\text{fl}} d_R^2 n_R^3}{g \varphi_V \Delta \rho \cdot v_{\text{sink}}}$

Dimensionslose Kennzahlen in der VT

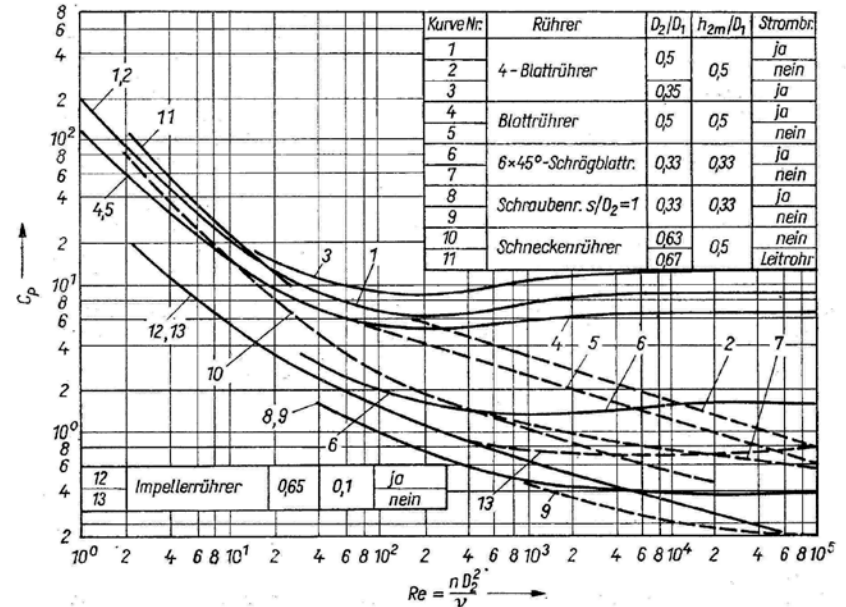
Reibung und Wärmeübertragung im durchströmten Rohr



Achsen:

- Reibungskoeffiz. = dim.-loser Druckverlust
- Nußelt-Zahl = dim.-loser Wärmeübergang
- Reynolds-Zahl = dim.-lose Geschwindigkeit

Leistungsaufnahme von Rührern



Achsen:

- Newton-Zahl = dim.-loser Leistungsbedarf
- Reynolds-Zahl = dim.-lose Drehzahl

1. Einführung in die Verfahrenstechnik

– *Literaturverweise* –

Literatur zum Einstieg

Überblick auf die gesamte Verfahrenstechnik

- J. Draxler, M. Siebenhofer: *Verfahrenstechnik in Beispielen. Problemstellungen, Lösungsansätze, Rechenwege*. Springer Vieweg, Wiesbaden, **2014**; [doi:10.1007/978-3-658-02740-7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-02740-7); ISBN: 978-3-658-02739-1
- K. Schwister (Hrsg.): *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2000/2007/**2017**; ISBN 978-3-446-44778-3
- D. S. Christen: *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure*. Springer, Berlin, Heidelberg, **2005**; [doi:10.1007/b138137](https://doi.org/10.1007/b138137); ISBN 978-3-540-40322-7

Erläuterung zum BSB5

<https://www.nd-aktuell.de/artikel/964771.die-luft-wird-knapp.html?sstr=BSB5>

- biochemischen Sauerstoffbedarf über fünf Tage (BSB5)
 - Maß für die Belastung von Wasser mit organischen Verunreinigung (Zucker, Eiweiße, Stärke, Fette, ...)
- Bestimmung für eine Abwasserprobe:
 - definierte Verdünnung
 - Anreicherung mit O_2 bis zur Sättigung
 - elektrochem. Messung der O_2 -Konzentration
 - Zugabe lebender Bakterien
 - dichtes Verschließen des Gefäßes
 - Lagerung bei 25 Grad ohne Licht für fünf Tage.
 - Bakterien verstoffwechseln die organischen Bestandteile und vermehren sich
 - ➔ Verbrauch des gelösten O_2
 - nach fünf Tagen erneute Messung der O_2 -Konzentration
 - Differenz zu Anfangswert = BSB5



Zeichnung: Chow Ming