

Folien zur Lehrveranstaltung

**Grundlagen der Mechanischen
Verfahrenstechnik**

– nur zum persönlichen Gebrauch –

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick
Dr.-Ing. Benno Wessely

Dresden, Frühjahr 2021

Zu den Personen

- PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick
 - TU Dresden, AG Mechanische Verfahrenstechnik
 - Frank.Babick@tu-dresden.de
 - Tel.: 463-33724
 - Lehre: MVT, Strömungsprobleme, Produktentwicklung
 - Forschung: Grundlagen der Partikelmessstechnik

- Dr.-Ing. Benno Wessely
 - TU Dresden, AG Mechanische Verfahrenstechnik
 - Benno.Wessely@tu-dresden.de
 - Tel.: 463-36321
 - Lehre: Mechanische Grundprozesse, Membrantechnik
 - Forschung: Praxis der Partikelmessstechnik, Sensorentwicklung



Stoffwandlung - Beispiele

von Kaffeebohnen ...



... zu Kaffee



verschiedenste
Abwässer ...



... zu klarem
Wasser



aus natürlichem
Titandioxid ...



... weiße
Wandfarbe



Erdöl ...



... zu Kunststoff



Weizen ...



... zu Brot



Lernziele der Lehrveranstaltung MVT

- Wissen:
 - Gegenstand und Aufgabe der Mechanischen Verfahrenstechnik
 - Kennzeichnung von Partikelsystemen
 - Kennzeichnung von Trennprozessen
 - Prinzipien der Sedimentation und Filtration
 - Klassier-, Zerkleinerungs- und Entstaubungstechnik
- Fähigkeiten:
 - stoffliche Bilanzierung von technischen Prozessen
 - Umrechnung von Mengenangaben
 - Berechnung von Trenngraden
 - Berechnung der erforderlichen Zerkleinerungsarbeit
 - Berechnung von Sedimentationsprozessen
 - Berechnung von Filtrationsprozessen

Gliederung der Vorlesung

1. [Einführung in die Mechanischen Verfahrenstechnik](#)
2. [Kennzeichnung disperser Stoffsysteme](#)
3. [Klassieren von dispersen Systemen](#)
4. [Zerkleinerungstechnik](#)
5. [Fest-Flüssig-Trennung mit Hilfe von Sedimentation](#)
6. [Entstaubungstechnik](#)

1. Einführung in die MVT

Lernziele zu Kapitel 1

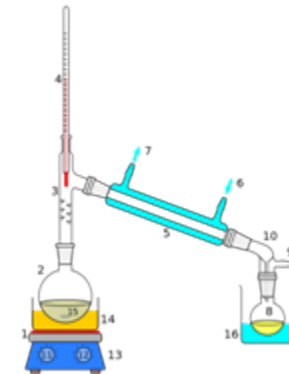
- Wissen:
 - Was ist Gegenstand Mechanischen Verfahrenstechnik?
 - Mit welcher Art von Stoffsystemen setzt sie sich auseinander und wie lassen sie sich kategorisieren?
 - Wie heißen die 4 Arten der mechanischen Grundoperationen?
 - Mit welchen Kennzahlen können wir die Zusammensetzung von Stoffgemischen quantifizieren?
- Fähigkeiten:
 - Stoffliche Bilanzierung von technischen Prozessen
 - Umrechnung von Konzentrationsangaben
 - Auswahl geeigneter Lehrbücher zur Mechanischen Verfahrenstechnik

1. Einführung in die MVT

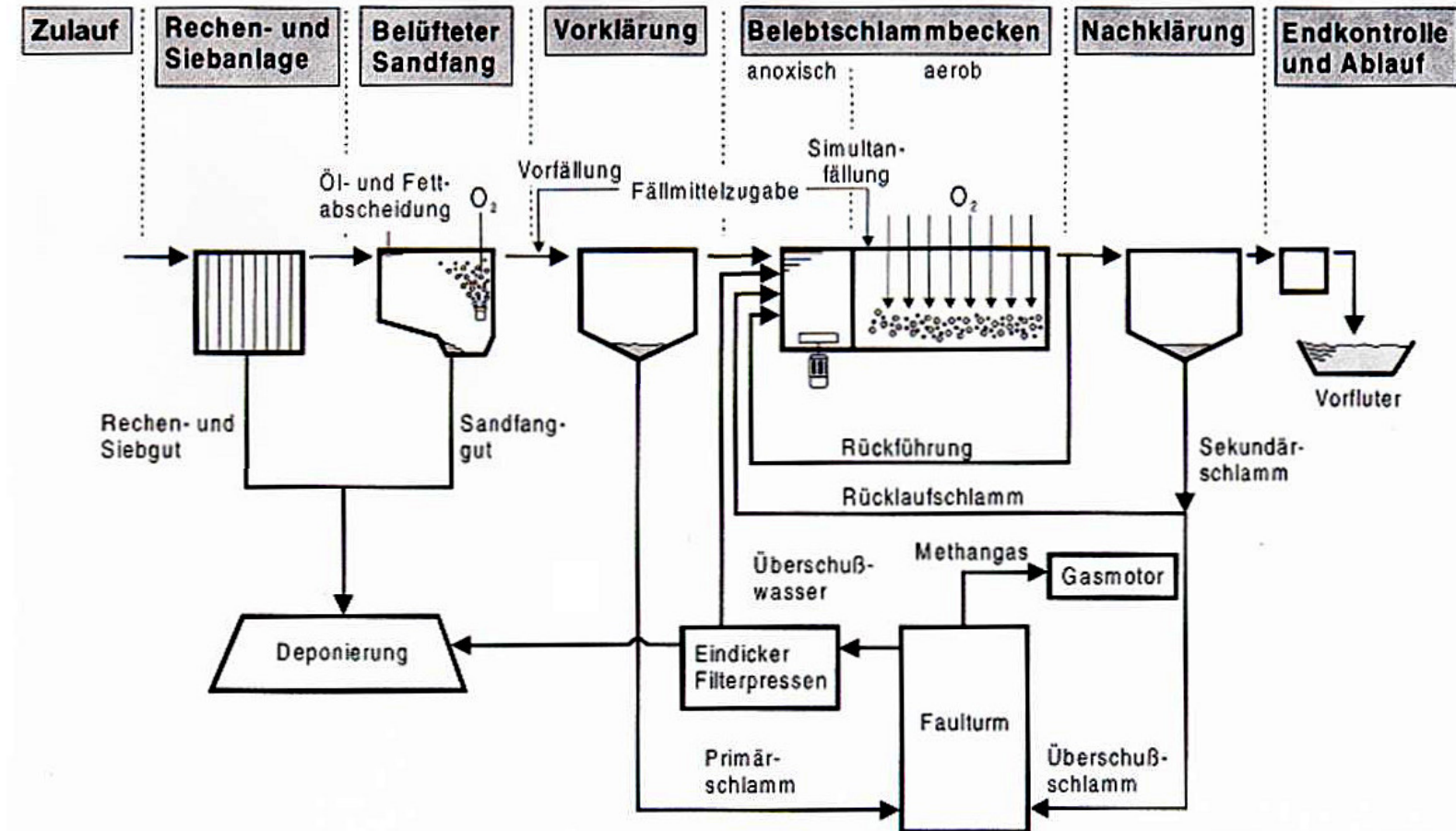
– *Stoffwandlungsprozesse* –

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



Stoffwandlung: Kommunale Kläranlage



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

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)

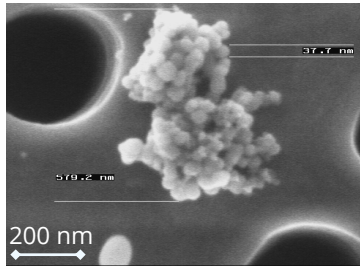
1. Einführung in die MVT

– *relevante Stoffsysteme* –

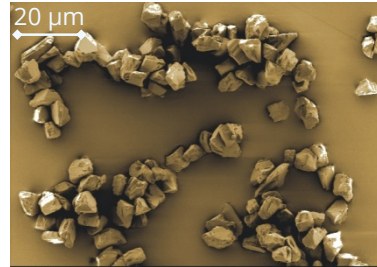
Gegenstand der MVT: Disperse Stoffsysteme

- MVT = Stoffwandlung mit Hilfe mechanischer Verfahren → beschränkt auf Größenskalen deutlich oberhalb von Molekülen → keine Behandlung von homogenen Gasen oder Flüssigkeiten, stattdessen alle Arten von *Partikelsystemen*
d.h. weder Wodka, noch Zuckerlösung, noch feuchte Luft, sondern trübe Abwässer, staubhaltige Luft, Baustoffe, pigmenthaltige Kunststoffe, ...
- disperses System = mehrphasiges (heterogenes) Stoffsystem mit (mindestens) einer zusammenhängenden (kontinuierlichen) und mindestens einer verteilten (dispersen) Phase
 - Synonyme: Partikelsysteme, partikuläre Systeme, Teilchensysteme
 - Partikel = einzelnes Element der dispersen Phase
- Beispiele
 - Sand, Milch, Dieselruß, Papier, Kunststoffe, Deo-Spray
- Abgrenzung
 - echte Lösungen: Moleküle sind nicht sichtbar, keine Trübung
 - **aber**: historisch wird „Lösung“ auch für Partikelsysteme genutzt („Stärkelösung“)

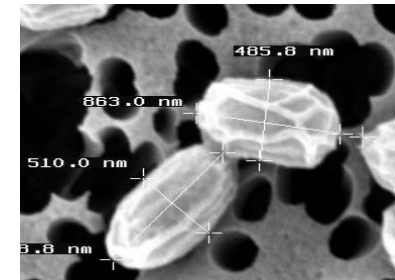
Gegenstand der MVT: Partikelsysteme



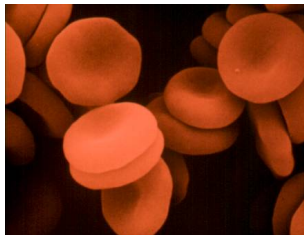
Dieselfußaggregat



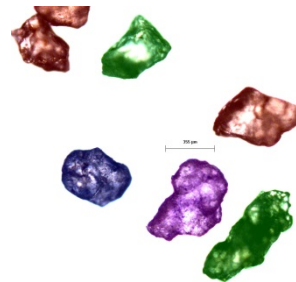
Diamantteilchen



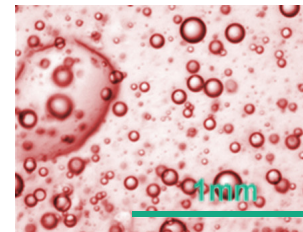
Bacillus subtilis
biologisches Fungizid



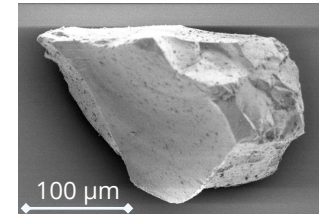
rote Blutkörperchen



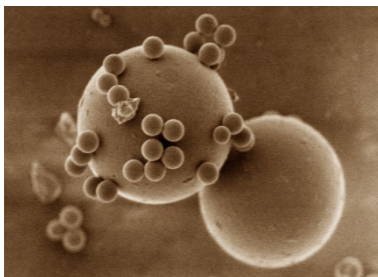
Sandkörner



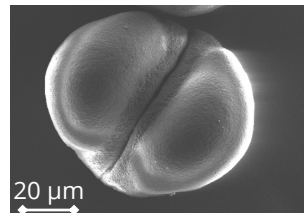
Emulsionstropfen



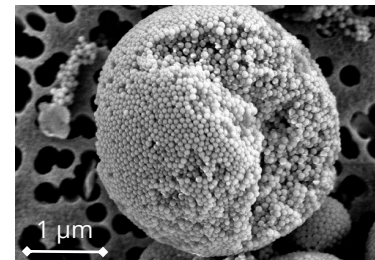
Schleifpartikel



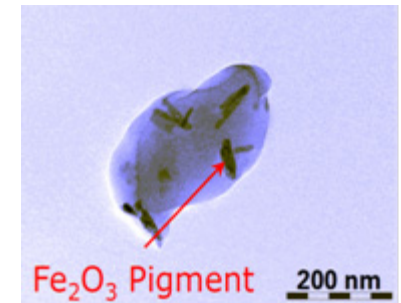
Glaskugeln zum
Sandstrahlen



Fichtenpollen



Trocknungsagglomerat



Lackabrieb mit
Buntpigment

Einteilung disperser Stoffsysteme

nach Aggregatzustand der dispersen Phase

kont. Phase	disperse Phase	Kategorie	Beispiele
gasförmig	fest	Aerosol Schüttgut	Rauch, Staub Sand, Kies, Holzspäne
	flüssig	Aerosol	Nebel, Spray
flüssig	fest	Suspension Paste	Anstrichfarbe, Schlamm Zahnpaste, Schleifpaste
	flüssig	Emulsion	Salben, Cremes, (Milch)
	gasförmig	Blasensystem Schaum	in Flotationsbecken Milchschaum
fest	fest	Kompositwerkstoffe Legierungen & Gesteine	Kunststoff, Faserverbundwerkst. Granit
	flüssig	organisches Gewebe	Bakterieren, Hefezellen
	gasförmig	poröser Festkörper Schwamm (fester Schaum)	Aktivkohle, Zeolithe, Kieselgele Metallschäume

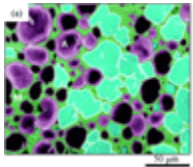
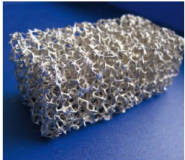
Einteilung disperser Stoffsysteme

weitere Kriterien und Grenzfälle

- Einteilung nach Größe der Partikel
 - molekulardispers: $< 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
 - kolloiddispers: $1 \text{ nm} \dots 1 \text{ }\mu\text{m}$
 - grobdispers: $> 1 \text{ }\mu\text{m}$

weitere Begriffe

- nanodispers: $1 \text{ nm} \dots 100 \text{ nm}$
- feindispers: $< 20 \text{ }\mu\text{m}$
- Grenzfälle:
 - nicht-disperse Stoffsysteme, die dennoch relevant für MVT
 - bikontinuierliche Stoffsysteme = zwei ineinander verschränkte kontinuierlicher Phasen (z. B. Metallschäume, PTFE-Membranen, Mikroemulsionen)
 - Lösungen von Makromolekülen
 - disperse Stoffsysteme, die mit gängigen Kategorien schwer beschreibbar
 - unterschiedliche disperse Phasen (z.B. Suspo-Emulsionen, Eiscreme)
 - disperse Phase ist selbst mehrphasig (z.B. Seifenblasen, multiple Emulsionen)
 - Zustand der dispersen Phase ist schlecht definiert (z.B. Milchfett, Makromoleküle)

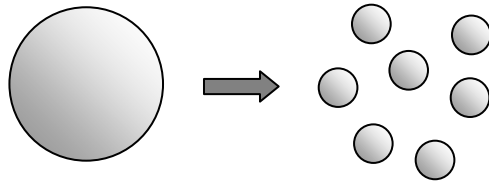


1. Einführung in die MVT

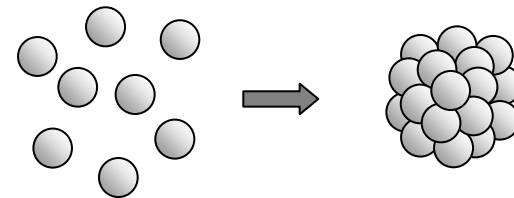
– *mechanische Grundprozesse* –

Überblick über die mechanische Grundoperationen

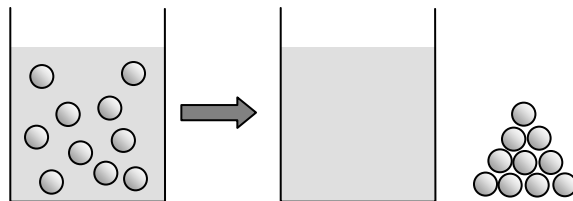
Zerkleinern



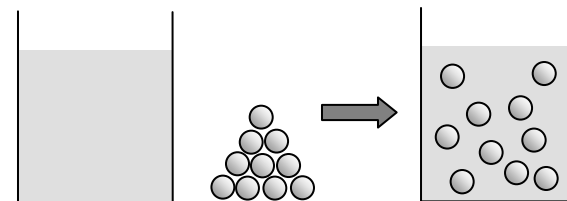
Agglomerieren



Trennen



Mischen

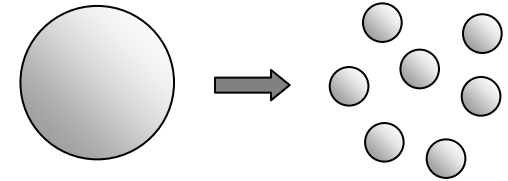


- weitere Aufgaben der MVT:
 - Lagern, Fördern, Dosieren von Schüttgütern
 - Erfassung und Kennzeichnung des dispersen Zustandes → Granulometrie
 - interdisziplinäre Beteiligung an Prozessen der Partikelsynthese

Typische MVT-Prozesse

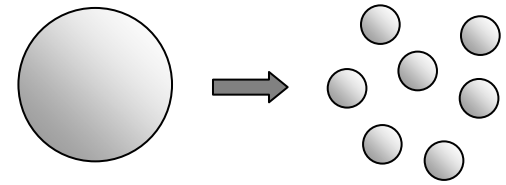
- Zerkleinern:
 - Feststoffmahlung, Emulgieren, Versprühen, Dispergieren, ...
- Agglomerieren:
 - Granulieren, Tablettieren, Flocken, Sintern, ...
- Trennen:
 - Auspressen, Eindicken, Feststoff-/Ölabscheidung, Entgasen, Entstauben; Sortieren, Klassieren ...
- Mischen:
 - Feststoffmischen, Suspendieren, Begasen, Kneten; Coaten, ...
- Partikelsynthese und Kombination mit therm. & chem. Prozesse:
 - Fällen, Kristallisieren, Lösen; Wirbelschichttrocknen, katalyt. Festbettreaktionen
- Partikeltransport und Lagerung

Zerkleinern



- Ziele:
 - Einstellung einer bestimmter Partikelgröße
z.B. für Baustoffe, Farbpigmente, Lebensmittel
 - Schaffung größerer Oberflächen
z.B. für Katalysatoren,
oder zur Begünstigung von Wärme-Stoffaustausch (Extraktion, Lösen)
 - Aufschließen heterogener Stoffe
z.B. Erz- und Getreidemahlung, Müllzerkleinerung
- Beispiele
 - Mahlen und Brechen von Feststoff
 - Emulgieren
 - Versprühen von Flüssigkeiten und Suspensionen
 - Dispergieren von agglomerierten Feststoffen in Flüssigkeiten und Gasen

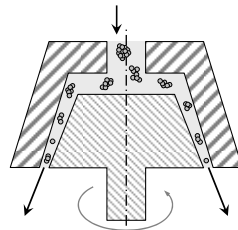
Zerkleinern



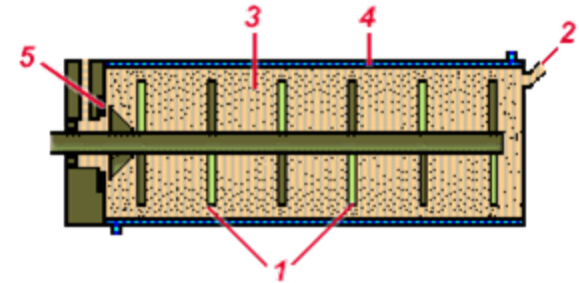
3-Walzen-Stuhl [1]



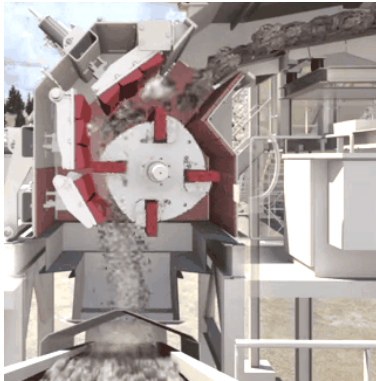
Versprühen [2]



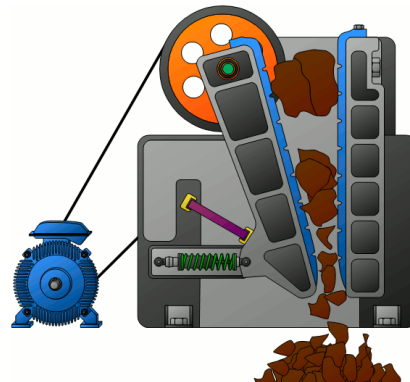
Kolloidmühle [4]



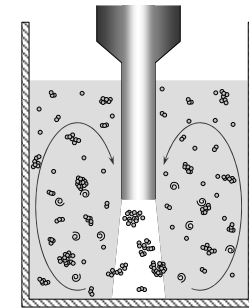
Rührwerkskugelmühle [3]



Hammermühle [5]

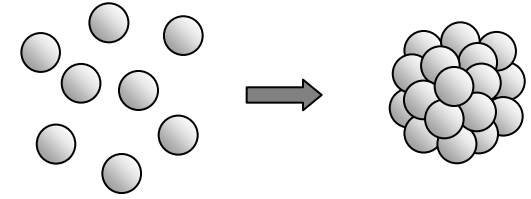


Backenbrecher [6]



Ultraschalldispersion [7]

Agglomerieren



- Ziele:
 - verbesserte Abscheidung
z.B. Flockung in Kläranlagen
 - verbesserte Handhabung
z.B. Dosierbarkeit, verringerte Staubentwicklung, verringerte Schüttdichte
 - Einstellung bestimmter Produkteigenschaften
z.B. Partikelgröße, Löseverhalten

- Beispiele
 - Tablettieren
 - Granulieren
 - Sprühagglomeration
 - Flockung

Agglomerieren



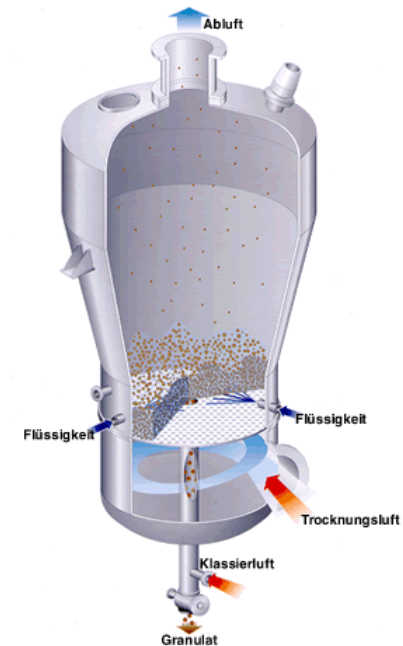
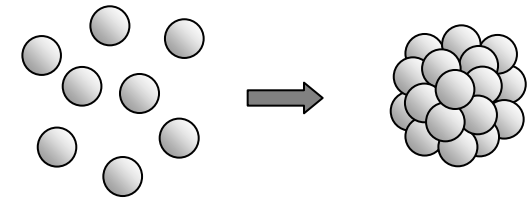
Aufbauagglomeration
mit Granulierteller [11]



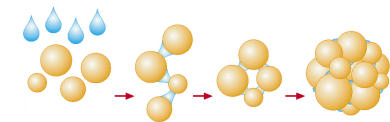
Pressagglomeration
(Tabletten, Brikettes) [12]



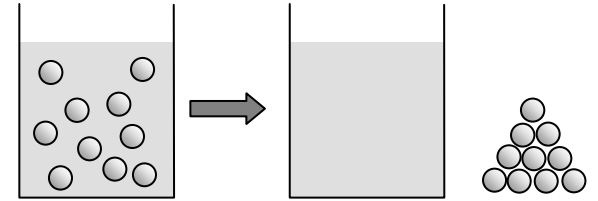
Flockung feiner Trübstoffe [13]



Sprühagglomeration [14,15]

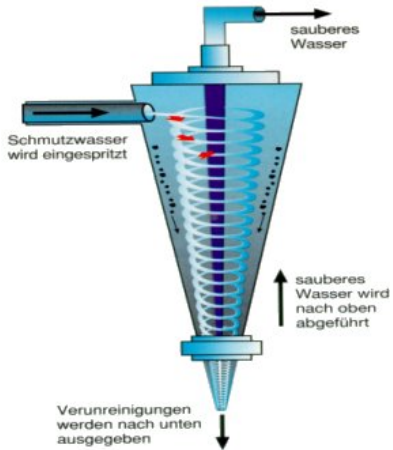


Trennen



- Ziele
 - Gewinnung der/einer dispersen Phase
z.B. Kristallisationsprodukte, Milchfett und Milchproteine, Getreidesichtung
 - Reinigen der kontinuierlichen Phase
z.B. Reinigen von Abluft (*Entstaubung*) und Abwasser, Bierfiltration
 - Auftrennen der dispersen Phase(n)
z.B. Schleifkörner und Baustoffe nach Partikelgröße (*Klassieren*)
z.B. erzhaltiges Gestein in Erz und Mineral (*Sortieren*)
- Beispiele:
 - Sedimentation und Zentrifugation
 - Filtrieren und Auspressen
 - Windsichten
 - Sieben
 - Flotieren
 - Magnet- sowie Schwimm-Sink-Sortierung

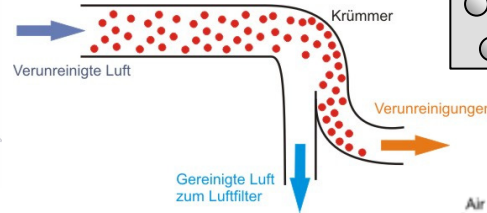
Trennen



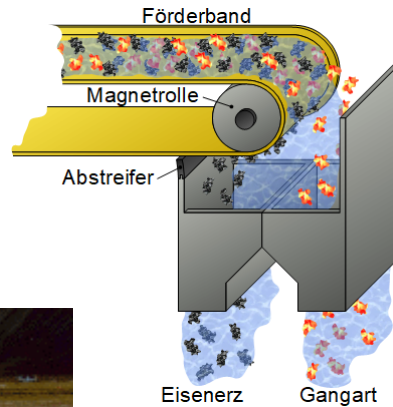
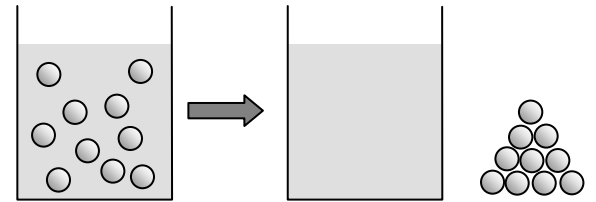
Fest-Flüssig-Trennung mit Hydrozyklon [23]



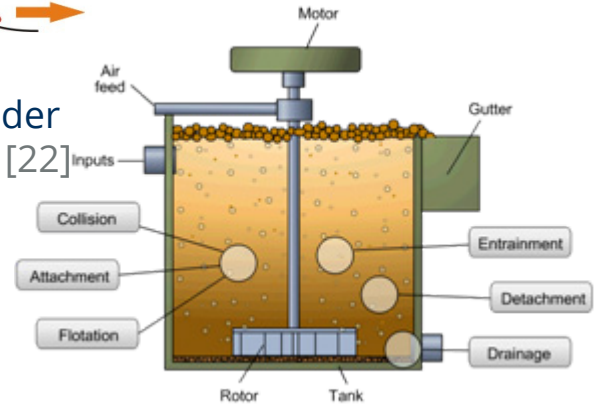
Filtration (Beutelfilter) [21]



Umlenkabscheider zur Enstaubung [22]



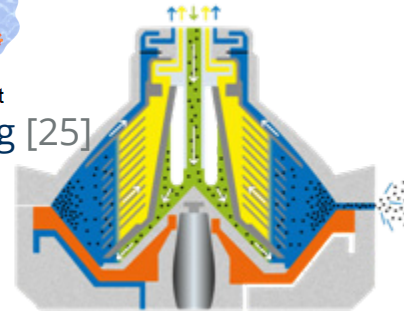
Magnetsortierung [25]



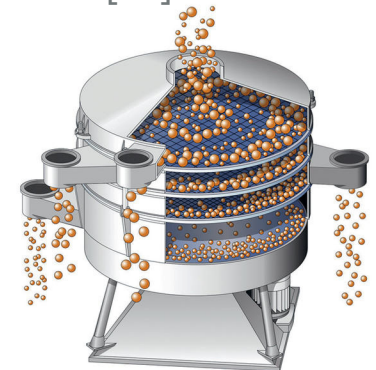
Flotation [24]



Windsichten [26]

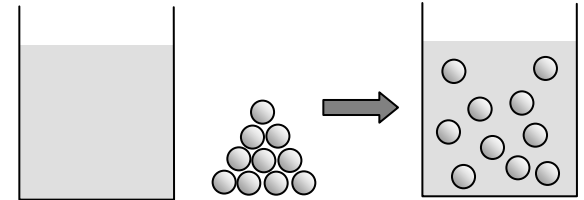


Fest-Flüssig-Trennung mit Zentrifugen [27]



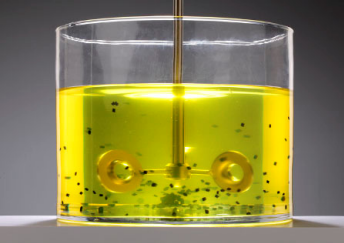
Siebklassierung [28]

Mischen



- Ziele:
 - verbesserter Wärme- und Stoffaustausch für chemische Reaktionen und thermische Prozesse
z.B. durch Rühren (Kristallisation, Flüssigphasenkatalyse)
oder durch Fluidisieren (Wirbelschichttrocknung, Gasphasenkatalyse)
 - makroskopisch homogene Eigenschaften
z.B. von Anstrichfarben (Farbpigmente in Lösemittel)
oder von Kunststoffen (unterschiedliche Polymere, partikuläre Additive)
oder von Tabletten (Wirkstoff und Stärke) und Betonmischungen
- Beispiele:
 - Begasen
 - Rühren
 - Suspendieren und Dispergieren
 - Kneten und Extrudieren
 - Feststoffmischen
 - Beschichten von Granulaten (*Coaten*)

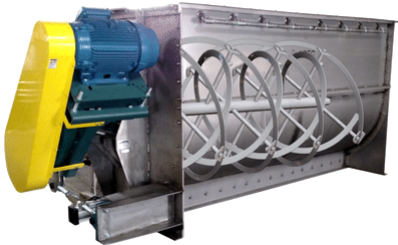
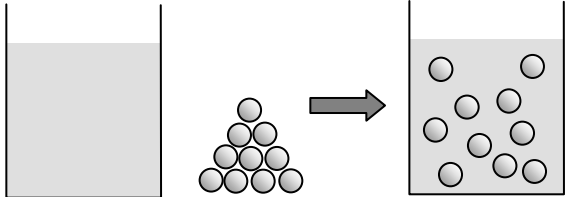
Mischen



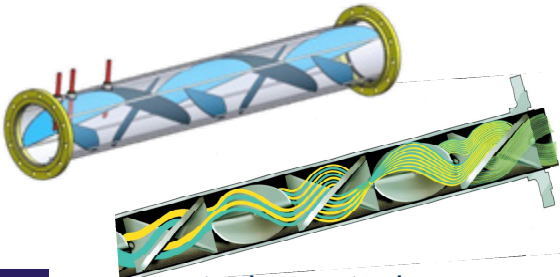
Suspendieren von Partikeln [31]



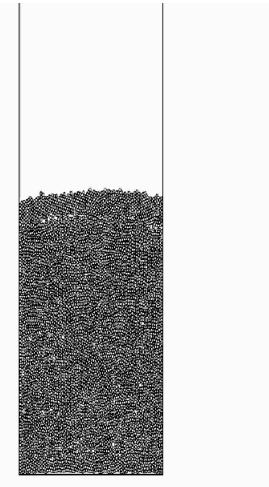
Taumelmischer [32]



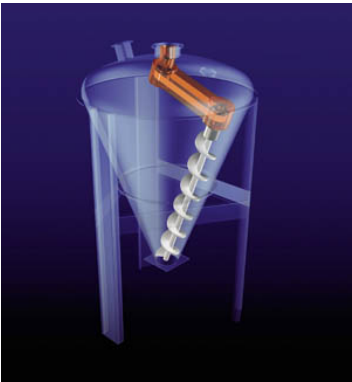
Trogmischer [33]



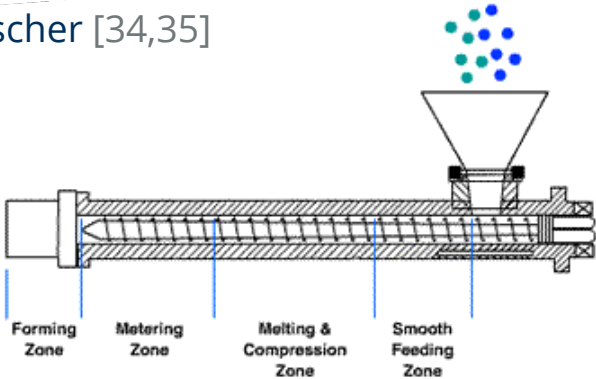
statischer Mischer [34,35]



Fluidisieren [36]



Schneckenmischer [37]



Extruder [38]

Bildquellen (1)

Zerkleinern:

- [1] <https://www.ebay.com.au/itm/Brand-New-Barley-Crusher-Malt-Grain-3-Roller-Mill-for-Home-brewing-/291670870722> (2020)
- [2] Daniel Göhler (TU Dresden), Vortrag, 2014.
- [3] unbekannte Internetquelle (2007)
- [4] F. Babick, *Suspensions of colloidal particles and aggregates*. Springer, 2016; S. 236
- [5] <https://www.911metallurgist.com/blog/hammer-mill-working-principle> (2020)
- [6] <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/stahl-erzeugung-herstellung/eisenerz-foerderung-und-erz-aufbereitung/> (2020)
- [7] Frank Babick ©2014

Agglomerieren:

- [11] www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/Dienstleistung/Geraete/Granulierteller.html (2007)
- [12] Compaction with roller presses (Broschüre), Maschinenfabrik Köppern, Hattingen, 2020.
- [13] <http://www.ctech-europe.nl/polyclay-Flocculanten.html> (2020)
- [14] Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.
- [15] Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

Bildquellen (2)

Trennen:

- [21] <http://filtrations-technik.de> (2007)
- [22] <https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheitsabscheider#/media/Datei:Inertialseparator.jpg> (2020)
- [23] http://www.schwelm-anlagentechnik.de/de_wasser/bio_compact1.htm (2007)
- [24] www.minerals.org.au/primary/secondary/secondary_resources/oresome_froth2 (2007)
- [25] = [6]
- [26] unbekannte Internetquelle (2007)
- [27] <https://www.centrimax.com/files/images/illustration/centrimax-separator.jpg> (2019)
- [28] unbekannte Internetquelle (2007)

Mischen:

- [31] <https://www.buddeberg.de/images/buddeberg-images/Ruehrtechnik/Suspendieren.jpg> (2019)
- [32] unbekannte Internetquelle (2007)
- [33] <https://www.apecusa.com/wp-content/uploads/2019/07/RibbonMixer-2.gif> (2020)
- [34] <https://www.cgtrader.com/free-3d-models/industrial/other/static-mixer-dn300> (2020)
- [35] http://www.ranommachinery.com/mixer3_7.php (2020)
- [36] Mao Ye; Jeroen Link (University of Twente): <http://fcre.tnw.utwente.nl/animations.html> (2007)
- [37] EMT GmbH, Konus-Schneckenmischer VSM (2007)
- [38] <https://www.bergeninternational.com/spanish/extrusio.html> (2020)

1. Einführung in die MVT

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

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 $X_{\text{FS/G}} = \text{kg Feststoff/kg Fördergas}$

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 MVT

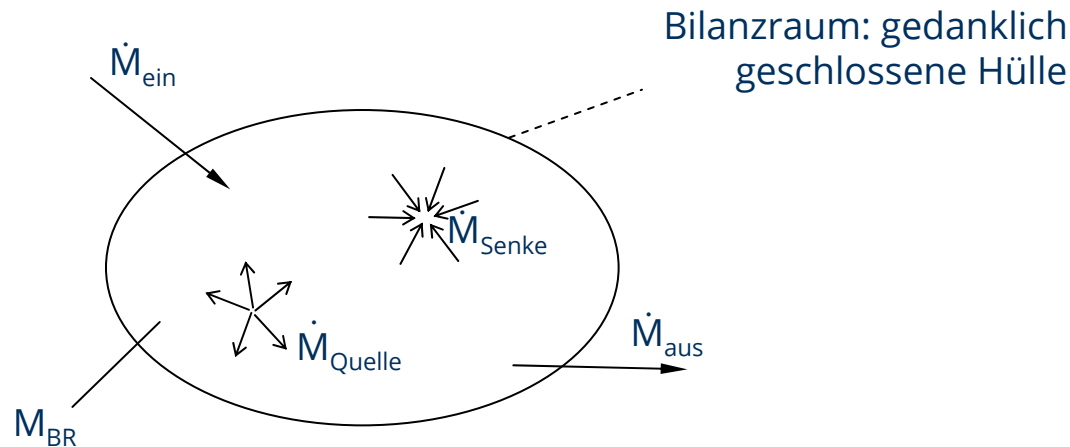
– stoffliche Bilanzierung –

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)