

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 2024

2. Mechanische Verfahrenstechnik

Lernziele zu Kapitel 2

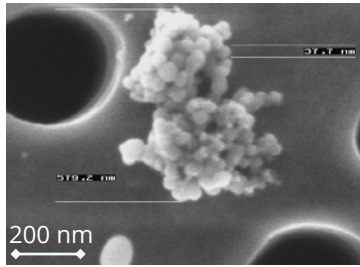
- Wissen:
 - Welche Art von Stoffsystemen sind Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik?
 - In welche Kategorien werden sie eingeteilt?
 - Wie heißen die 4 Arten der mechanischen Grundoperationen?
- Fähigkeiten:
 - Auswahl geeigneter Lehrbücher zur Mechanischen Verfahrenstechnik

2. Mechanische Verfahrenstechnik – *relevante Stoffsysteme* –

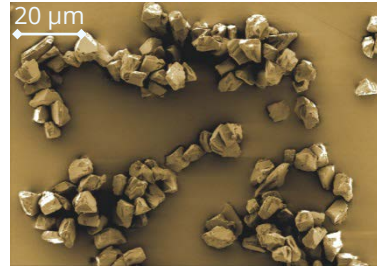
Gegenstand der MVT: Disperse Stoffsysteme

- 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“)

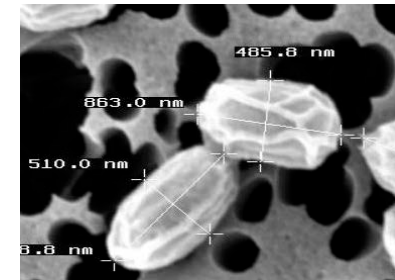
Gegenstand der MVT: Partikelsysteme



Dieselfußaggregat



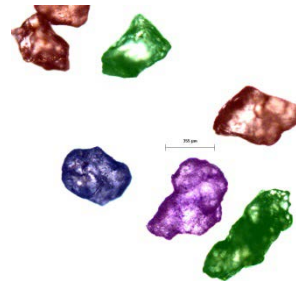
Diamantteilchen



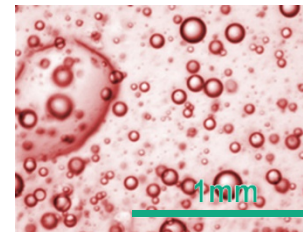
Bacillus subtilis
biologisches Fungizid



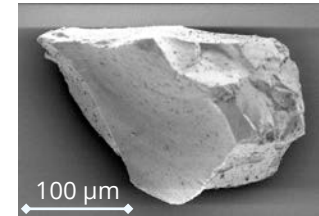
rote Blutkörperchen



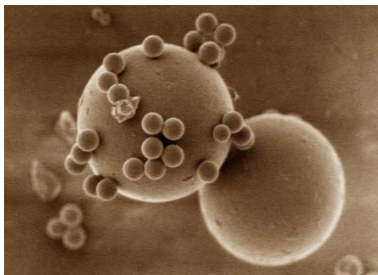
Sandkörner



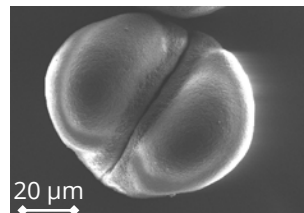
Emulsionstropfen



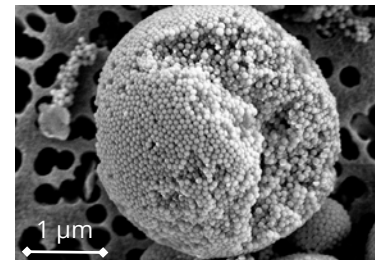
Schleifpartikel



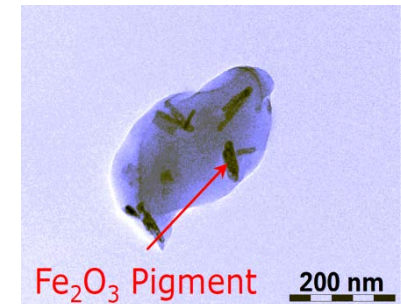
Glaskugeln zum
Sandstrahlen



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 feste Emulsion	Bakterien, Hefezellen Butter
	gasförmig	poröser Festkörper Schwamm (fester Schaum)	Aktivkohle, Zeolithe, Kieselgele Metallschäume, Soufflé

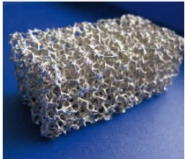
Einteilung disperser Stoffsysteme

weitere Kriterien und Grenzfälle

- Einteilung nach Größe der Partikel
 - molekulardispers: $< 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
 - kolloiddispers: $1 \text{ nm} \dots 1 \text{ }\mu\text{m}$
 - feindispers: $1 \text{ }\mu\text{m} \dots 20 \text{ }\mu\text{m}$
 - grobdispers: $> 20 \text{ }\mu\text{m}$

weitere Begriffe

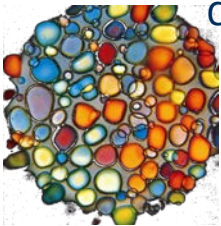
- nanodispers: $1 \text{ nm} \dots 100 \text{ nm}$
- Grenzfälle:
 - nicht-disperse Stoffsysteme, die dennoch relevant für MVT



- bikontinuierliche Stoffsysteme = zwei ineinander verschränkte kontinuierlicher Phasen (z. B. Metallschäume, PTFE-Membranen, Mikroemulsionen)
- Lösungen von Makromolekülen

disperse Stoffsysteme, die mit gängigen Kategorien schwer beschreibbar

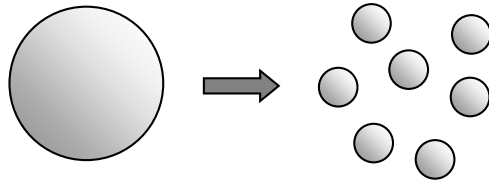
- unterschiedliche disperse Phasen (z.B. Suspo-Emulsionen, Eiscreme)
- disperse Phase ist selbst mehrphasig (z.B. Seifenblasen, multiple Emulsionen)
- Zustand der dispersen Phase ist schlecht definiert (z.B. Milchfett, Makromoleküle)



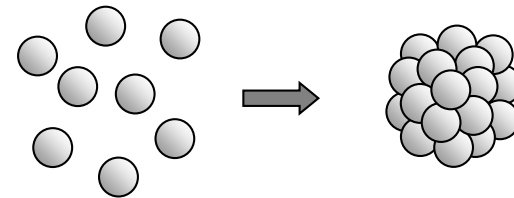
2. Mechanische Verfahrenstechnik – *mechanische Grundprozesse* –

Überblick über die mechanische Grundoperationen

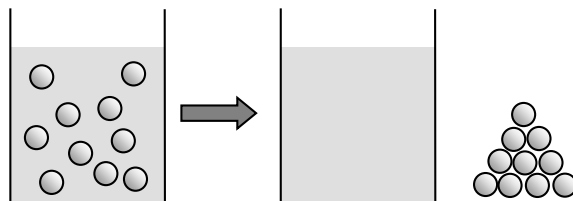
Zerkleinern



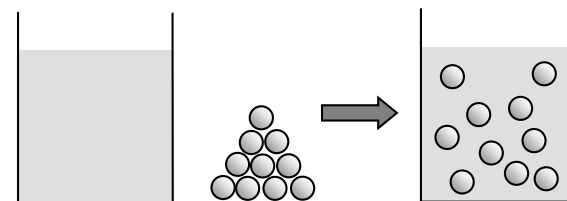
Agglomerieren



Trennen



Mischen

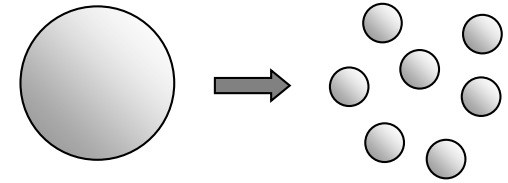


- weitere Aufgaben der MVT:
 - Lagern, Fördern, Dosieren von Schüttgütern
 - Erfassung und Kennzeichnung des dispersen Zustandes → Granulometrie
 - interdisziplinäre Beteiligung an Prozessen der Partikelsynthese

Typische MVT-Prozesse

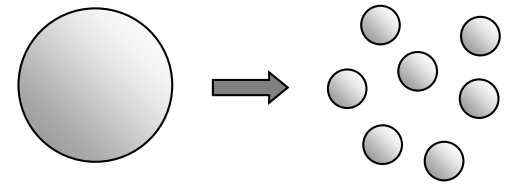
- Zerkleinern:
 - Feststoffmahlung, Emulgieren, Versprühen, Dispergieren, ...
- Agglomerieren:
 - Granulieren, Tablettieren, Flocken, Sintern, ...
- Trennen:
 - Auspressen, Eindicken, Feststoff-/Ölabscheidung, Entgasen, Entstauben; Sortieren, Klassieren ...
- Mischen:
 - Feststoffmischen, Suspendieren, 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

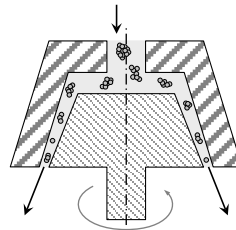
Zerkleinern



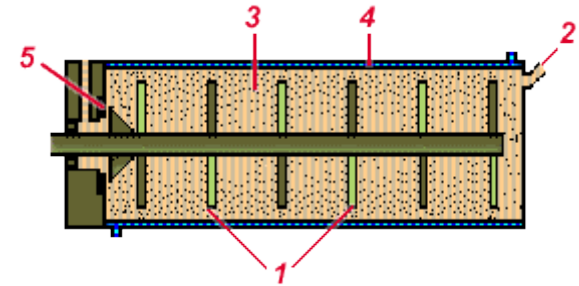
3-Walzen-Stuhl [1]



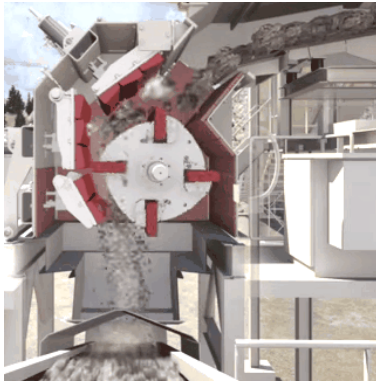
Versprühen [2]



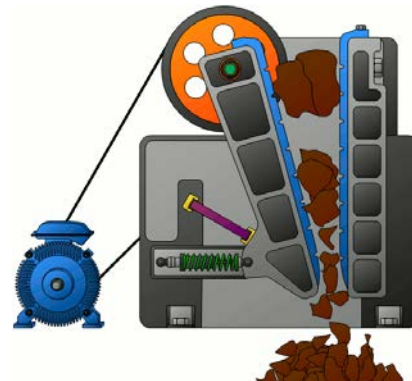
Kolloidmühle [4]



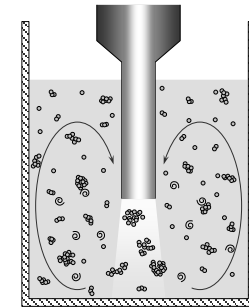
Rührwerkskugelmühle [3]



Hammermühle [5]

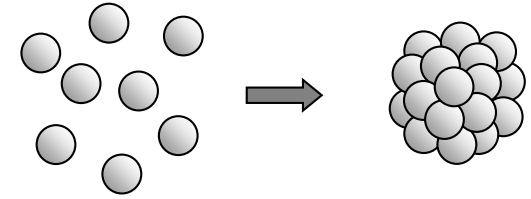


Backenbrecher [6]



Ultraschalldispargierung [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



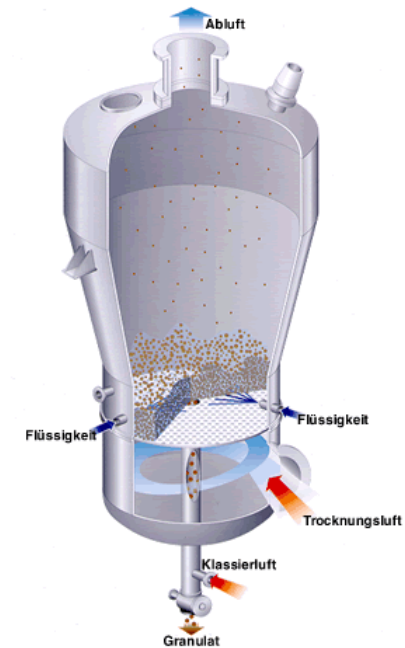
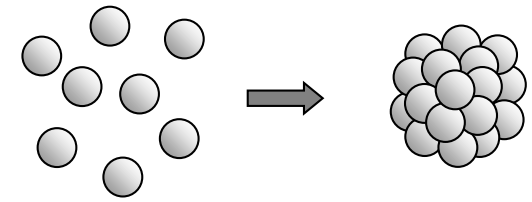
Aufbauagglomeration
mit Granulierteller [11]



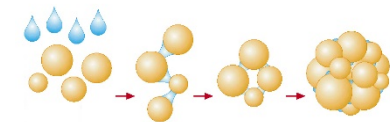
Pressagglomeration
(Tabletten, Brikettes) [12]



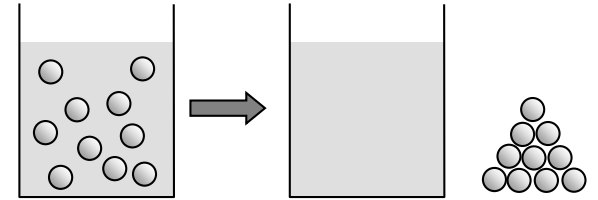
Flockung feiner Trübstoffe [13]



Sprühagglomeration [14,15]



Trennen



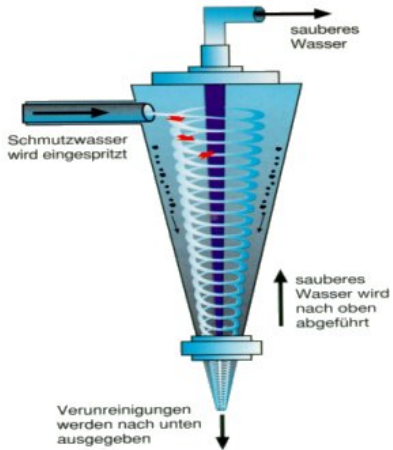
- Ziele

- 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

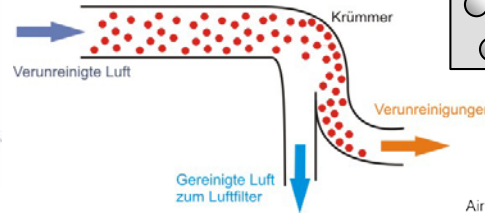
Trennen



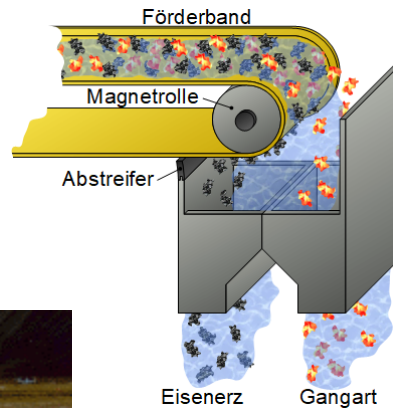
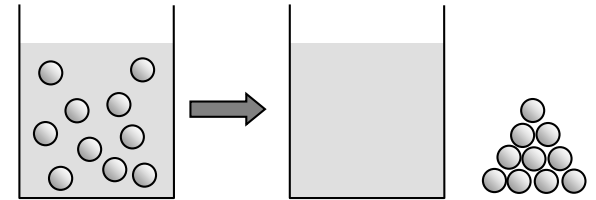
Fest-Flüssig-Trennung mit Hydrozyklon [23]



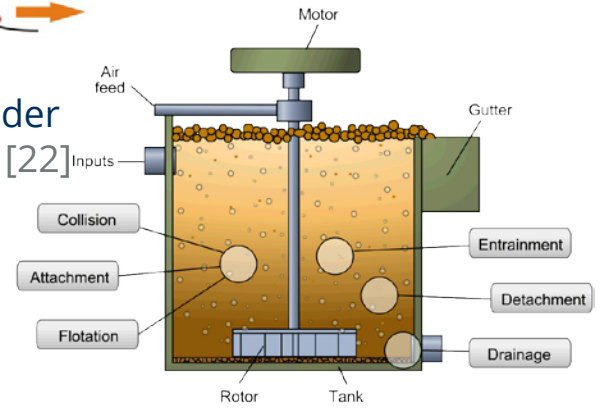
Filtration (Beutelfilter) [21]



Umlenkabscheider zur Enstaubung [22]



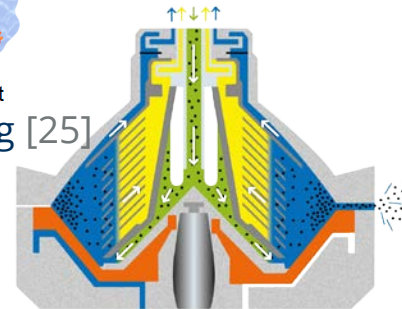
Magnetsortierung [25]



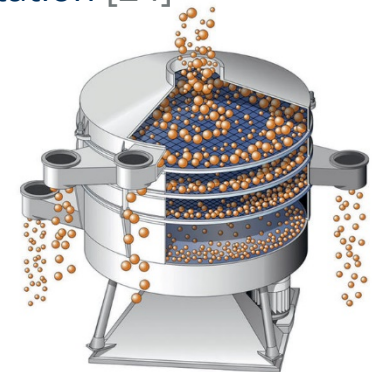
Flotation [24]



Windsichten [26]

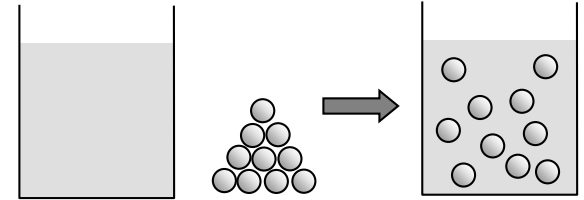


Fest-Flüssig-Trennung mit Zentrifugen [27]



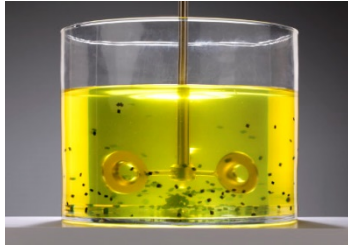
Siebklassierung [28]

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*)

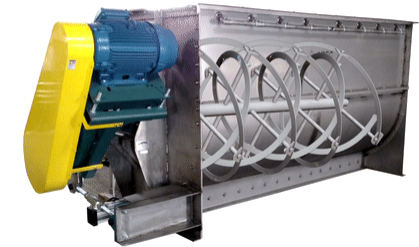
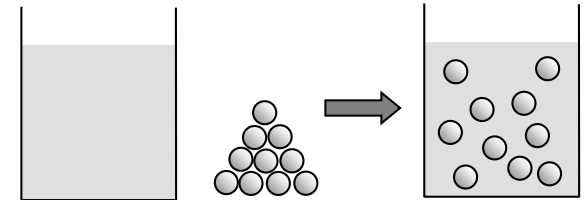
Mischen



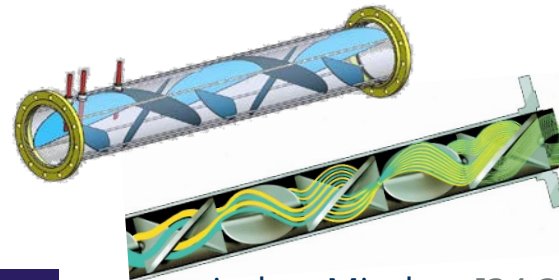
Suspendieren von Partikeln [31]



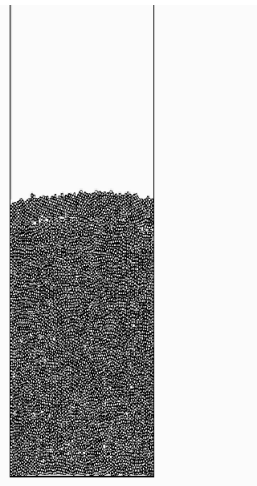
Taumelmischer [32]



Trogmischer [33]



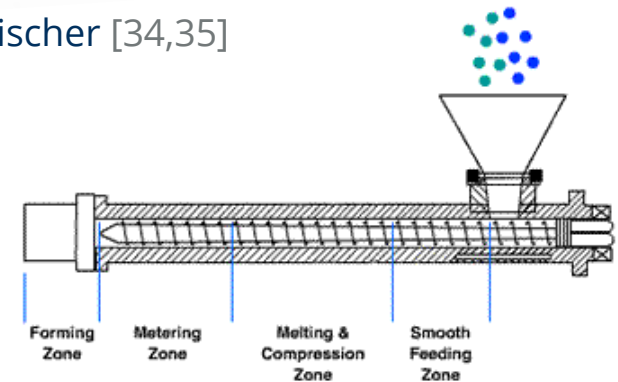
statischer Mischer [34,35]



Fluidisieren [36]



Schneckenmischer [37]



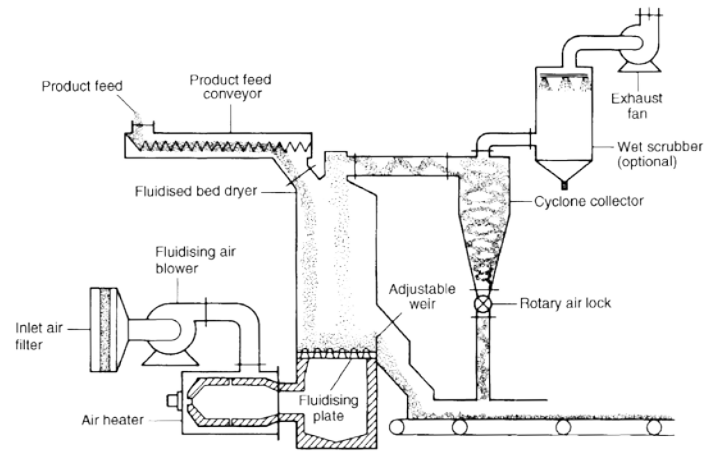
Extruder [38]

Weitere partikeltechnologische Prozesse



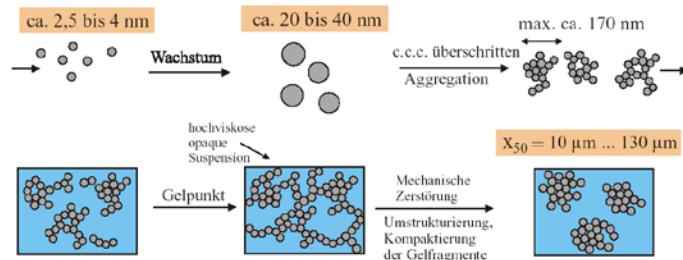
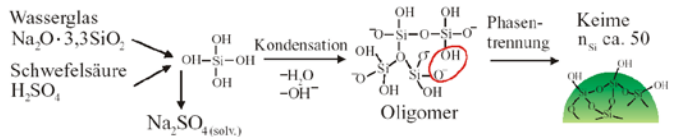
Silolagerung von Schüttgütern

(<https://www.mesima.de/Pictures/Products/Agrar/ALC-Animation.gif>)



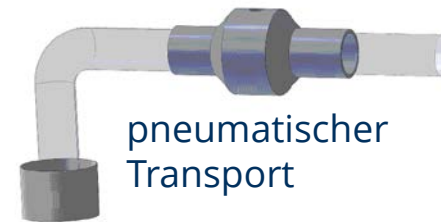
Wirbelschichttrocknung von Schüttgütern

(Richardson, *Particle Technology and Separation Processes*. Butterworth-Heineman, 2002; S. 947)



Partikelsynthese mittels Kristallisation

(Schlach: Dissertation, Uni Karlsruhe 2006, S. 6)



pneumatischer Transport

H.-J. Herrmann:

<http://www.icp.uni-stuttgart.de/movies/>



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)

2. Mechanische Verfahrenstechnik

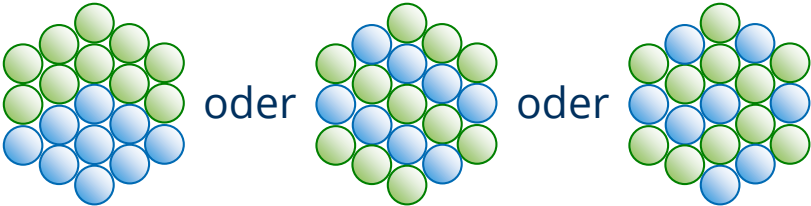
– Produkt- und Prozessmodell –

Mischungs- und Dispersitätszustand

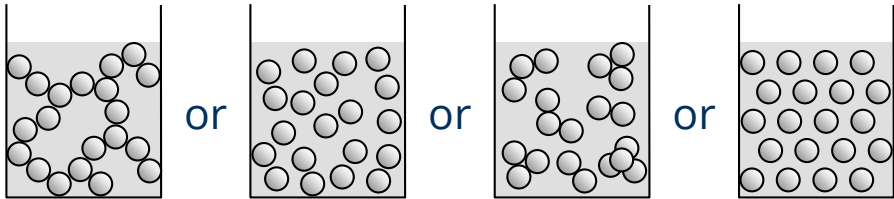
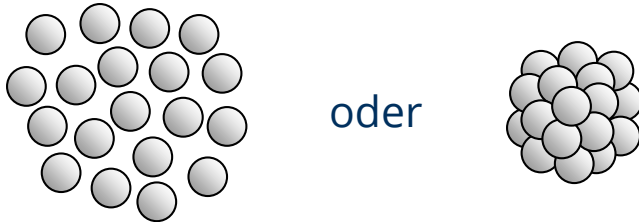
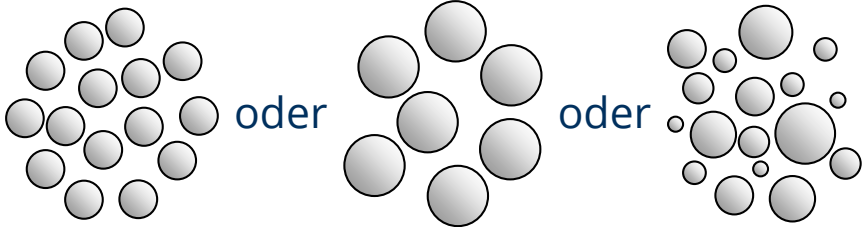
- Mischungszustand:
 - = globaler Ordnungszustand aller dispersen Phasen im Verhältnis zur kontinuierlichen Phase und im Verhältnis zueinander
 - z.B. relevant für folgende Fragen:
 - ζ wie homogen sind Farbpartikel in einer Beschichtung verteilt?
 - ζ wie stark streut der Wirkstoffgehalt in den Tabletten einer Charge?
 - ζ in welchem Maße ist das Fruchtfleisch frisch gepresster Säfte nach einer bestimmten Lagerzeit aussedimentiert?
- Dispersitätszustand:
 - die Feinheit sowie der lokale wie auch der globale Ordnungszustand der dispersen Phase
 - beinhaltet u.a. Aussagen zu:
 - Größe der einzelnen Partikel
 - Form und Porosität der einzelnen Partikel
 - Größe und Struktur agglomerierter Partikelstrukturen
 - Struktur und Verteilung raumfüllender Netzwerke (Schäume, Gele)

Mischungs- und Dispersitätszustand

Mischungszustand



Dispersitätszustand



Dispersitätszustand und Produkteigenschaften

- Dispersitätszustand beeinflusst ...
 - die Abscheidecharakteristik der Partikelsysteme
(z.B. bei Entstaubung und Klärung von Abwässern)
 - die Dosierbarkeit von Pulvern
(i.d.R. je feiner die Partikel, desto kohäsiver und schlechter dosierbar)
 - das Fließverhalten von Suspensionen
(z.B. höhere Viskosität infolge von Agglomeration)
 - die optische Eigenschaften von Farbanstrichen
(Farbton, Deckkraft)
 - das Zünd-, Lösungs-, Explosionsverhalten von Stäuben
(je feiner, desto reaktiver)
 - sensorische Eigenschaften
(z.B. „Cremigkeit“, „Frische“ von Eis oder Schokolade)
 - toxikologische Eigenschaften
(z.B. Einatembarkeit, Akkumulation in inneren Organen)
 - Verhalten in der Umwelt
(z.B. Transport in Atmosphäre, Böden, Fließgewässern)

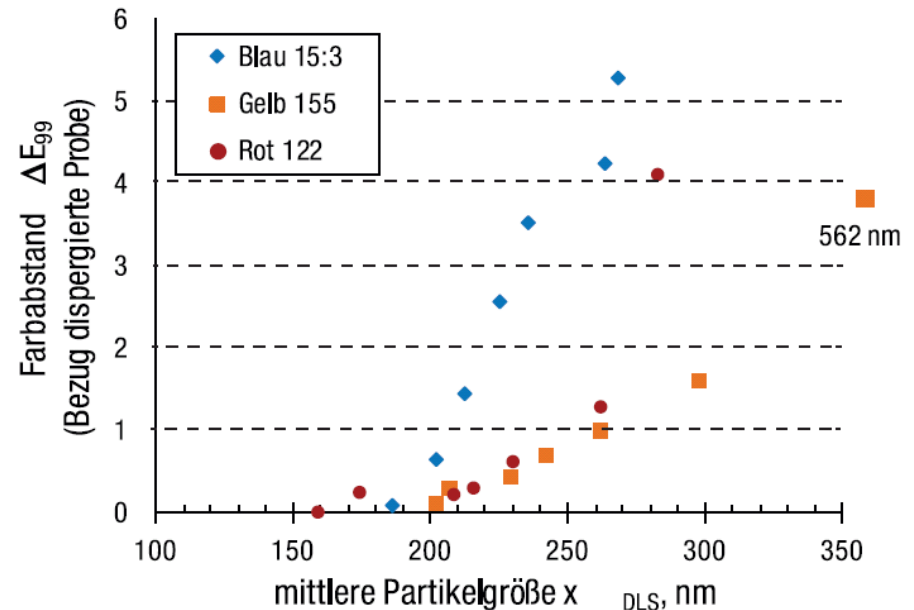
Produktmodell und Prozessmodell

Beispiel: Einfluss der Dispergierung auf die Farbwirkung

Ausstrichtest für ein Blaupigment



Produktmodell: Farbton vs. Partikelgröße



Farbe des getrockneten Anstrichs im Vergleich mit einem Farbnorm

- Ausstrichtest: Dispergieren, Mischen, Ausstreichen, Trocknen, Messen
- Produktmodell: Rückführung auf Eigenschaften der flüssigen Paste

Bilder und Diagramme: Nogowski et al., *Farbe und Lack*, 123(August):42-47, 2018

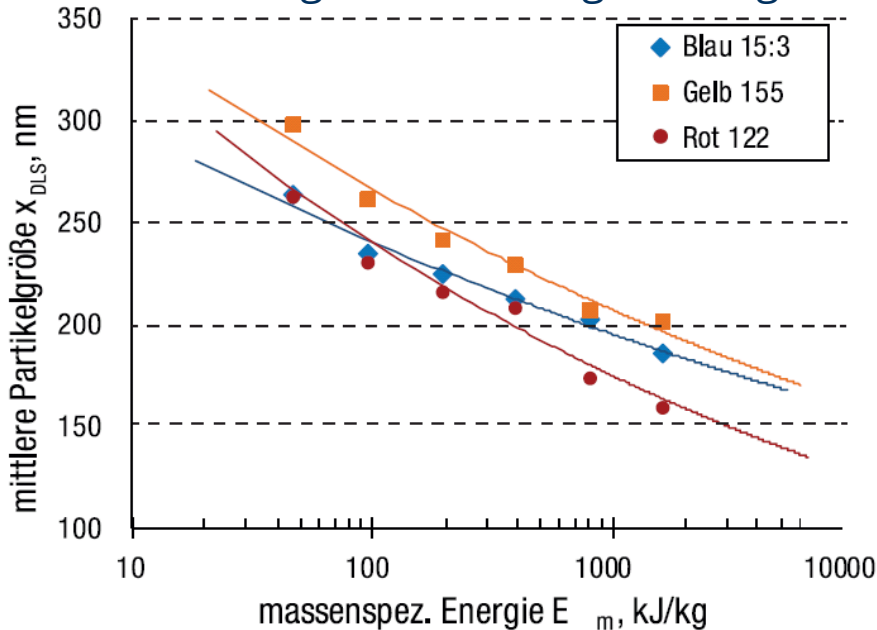


Produktmodell und Prozessmodell

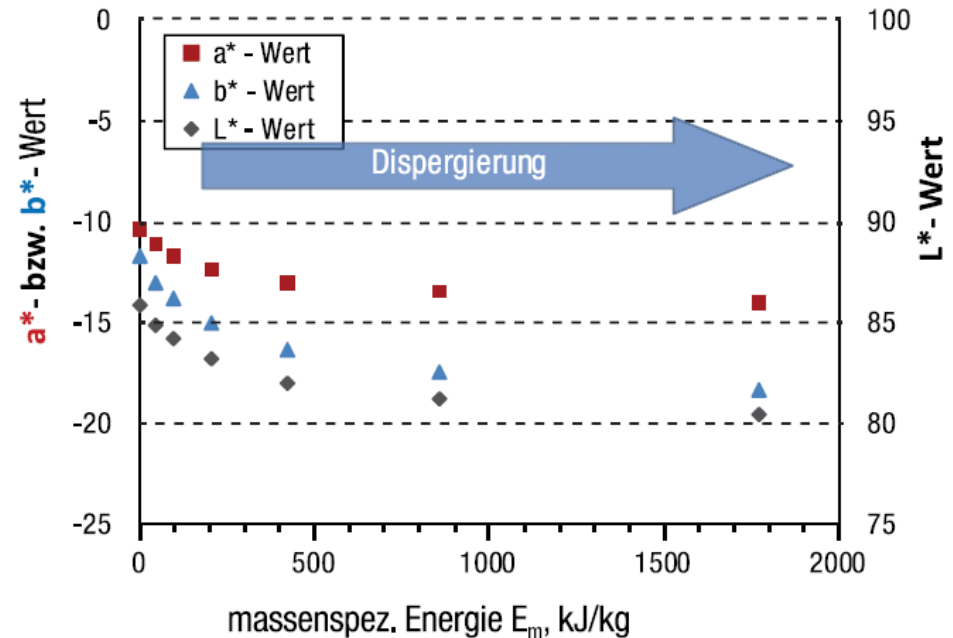
Beispiel: Einfluss der Dispergierung auf die Farbwirkung

Prozessmodell:

Partikelgröße vs. Energieeintrag



Beeinflussung der Produktqualität durch den Prozess



- Dispergierprozess: Scheibendispergierer (Parameter: Geometrie, Zeit & Drehzahl)
- Prozessmodell: Korrelation zw. Prozessparameter und Suspensionseigenschaften

Bilder und Diagramme: Nogowski et al., *Farbe und Lack*, 123(August):42-47, 2018

2. Mechanische Verfahrenstechnik

– *Literaturverweise* –

Lehrbücher zur Mechanischen Verfahrenstechnik

auf Deutsch:

- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer, **2009**;
[doi:10.1007/978-3-540-32552-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32552-9)
- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik Bd. 1 & 2*. Springer, Berlin, **1997**.
[doi:10.1007/978-3-662-08600-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08600-1) & [doi:10.1007/978-3-662-08599-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08599-8)
- F. Löffler, J. Raasch: *Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Vieweg, Wiesbaden, **1992**.
- M. Zogg: *Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik*. Teubner, Stuttgart, **1987**.

in English:

- J. F. Richardson, J. H. Harker, J. R. Backhurst. *Particle Technology and Separation Processes*. In series: *Coulson and Richardson's Chemical Engineering, vol. 6*, 4th ed.; Butterworth-Heinemann, Oxford, **2002**.

Taschenbücher/Handbücher zur VT und MVT

Verfahrenstechnik:

- K. Schwister (Hrsg.): *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2000/2007/**2017**; ISBN 978-3-446-44778-3
- *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl.; Springer, Berlin & Heidelberg **2013**;
[doi:10.1007/978-3-642-19981-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3).

Mechanische Verfahrenstechnik:

- H. Schubert (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1 und 2*. Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352)
- H. Schubert (Hrsg.): *Mechanische Verfahrenstechnik*. Aus der Reihe: *Verfahrenstechnik*. Dt. Verl. der Grundstoffindustrie, Leipzig, **1990**.