

Lehrveranstaltung
Partikelmesstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

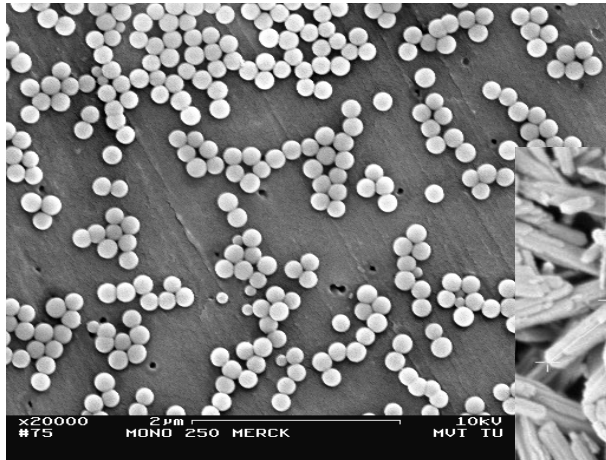
PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2024

2. Eigenschaften von Einzelpartikeln

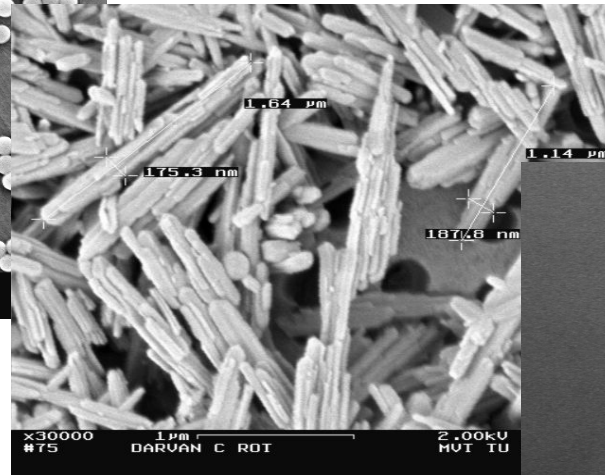
Lernziele zu Kapitel 2

- Wissen:
 - Begriffspaar Aggregat und Agglomerat
 - Überblick zu Äquivalentdurchmessern und charakteristischen Längen
 - Überblick zur Beschreibung der Partikelform
- Fähigkeiten:
 - Berechnung geometrischer Äquivalentdurchmesser
 - vergleichende Einordnung unterschiedlicher Äquivalentdurchmesser

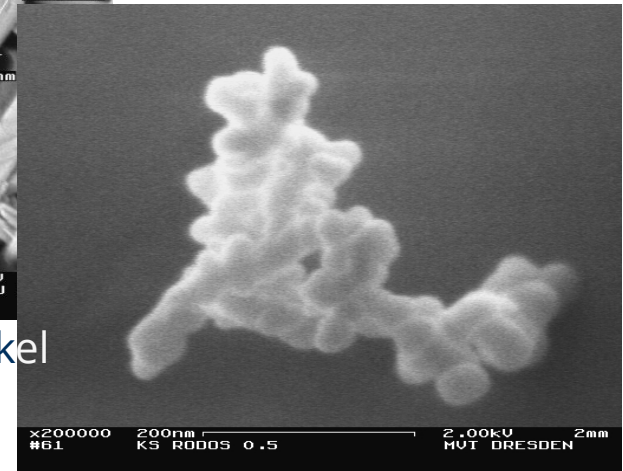
Größe, Form und Struktur



isolierte Kugeln



nichtsphärische Partikel



Partikelaggregate

2.1 Eigenschaften von Einzelpartikeln

– *Partikel* –

Zum Begriff „Partikel“

- Etymologie:
 - entlehnt aus lat. *particula* (Teilchen), Diminutiv von lat. *pars* (Teil)
- Grammatik:
 - das Partikel – weil Diminutiv
 - die Partikel – nur so in Linguistik und Religion
- Bedeutung in Physik und Technik:
 - allgemein: kleines Teilchen der stofflichen Materie
 - PMT: winziges Stück einer Substanz mit definierten physikalischen Grenzen (Elementarteilchen, einzelne Atome oder Moleküle werden nicht betrachtet, Ausnahme: Makromoleküle & Atomcluster)

Partikeltypen

erweiterte Sicht

- Primärpartikel
= kleinste partikuläre Einheiten, die bei der Partikelsynthese entstehen
- konstituierende Partikel
= kleinste erkennbare Partikel
- Aggregat
= feste Zusammenlagerung von Partikeln; große Kontaktkräfte; Auftrennung nur bei hohen Beanspruchungsintensitäten
- Agglomerat
= lockere Zusammenlagerung von Partikeln; schwache Kontaktkräfte; Auftrennung bei geringen Beanspruchungsintensitäten
- Flocke
= lockeres, stark poröses Agglomerat; kein Oberflächenkontakt bzw. relativ schwache Haftkräfte; unmittelbare Strukturänderung und Zerfall bei äußeren Kräften

Begriffspaar *Aggregat* und *Agglomerat*

- Aggregat und Agglomerat
 - Zusammenschluss von Partikeln zu einer mobilen Gesamtheit
- Aggregat
 - relativ fester Zusammenschluss von Primärpartikeln
 - relativ hohe Haftkräfte zwischen den Partikeln
 - oft flächiger Kontakt oder sehr feine Partikel
 - relativ starre Struktur
- Agglomerat
 - relativ lockerer Zusammenschluss von Primärpartikeln oder Aggregaten
 - relative schwache Haftkräfte zwischen den Partikeln
 - oft Punktkontakte und grobe Partikel
 - unter Belastung Verformung und Strukturverdichtung möglich
- in der Praxis nicht immer leicht zu differenzieren

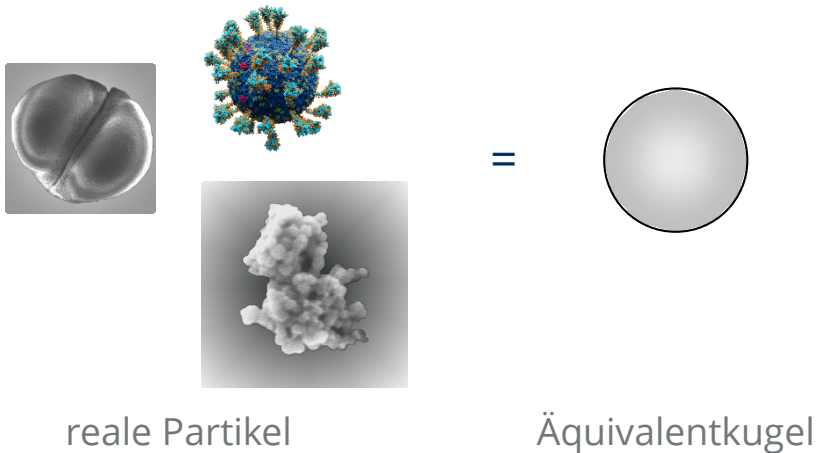
2.2 Eigenschaften von Einzelpartikeln – *Partikelgröße* –

Dispersitätsmerkmale und ‚Feinheit‘ von Partikeln

- Partikelmerkmal:
 - Eigenschaft einzelner Partikel, die unabhängig von der kontinuierlichen Phase oder Messbedingungen
 - ermöglicht eine Ordnung der Partikel nach dieser Eigenschaft
 - z. B. geometrische Abmaße des Partikels und der Partikelprojektion, Partikelmasse, Partikelform, Partikelrauigkeit, Porosität
- Dispersitätsmerkmal
 - Partikelmerkmal oder eine Eigenschaft einzelner Partikel, die einem Partikelmerkmal zugeordnet werden kann
 - i. allg. von kontinuierlichen Phase oder Messbedingungen abhängig
 - z. B. Sinkgeschwindigkeit, Lichtabschattung, Schallstreuung, Siebmaschenweite
- Feinheitsmerkmal
 - Dispersitätsmerkmal, das mit dem Volumen, der Oberfläche oder dem Abstand zweier Oberflächenpunkte eines Partikels bzw. mit der Fläche, dem Umfang oder dem Abstand zweier Umfangspunkte einer Partikelprojektion eindeutig zusammenhängt
 - *d. h. weder Form- noch Strukturmerkmal*

„Partikelgröße“

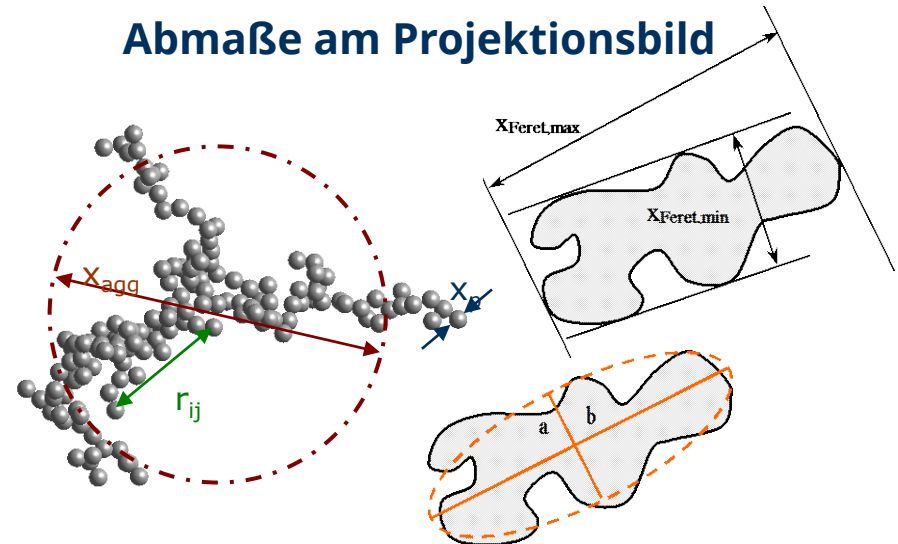
Äquivalentdurchmesser



Äquivalenz bezüglich geometrischer oder physikalischer Partikelmerkmale, z.B.

- Masse, Volumen
- Mobilität, Diffusion
- Sinkgeschwindigkeit
- Lichtstreuung

Abmaße am Projektionsbild

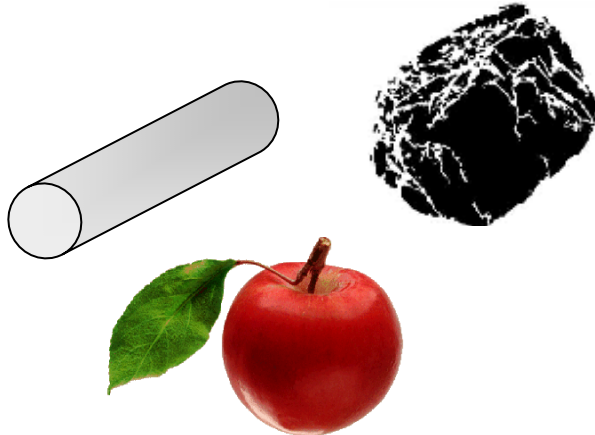


typische Abmaße

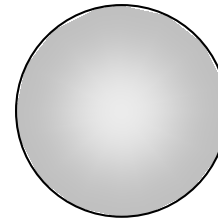
- Durchmesser & Länge von Fasern
- Primärpartikeldurchmesser
- Tangentenabstand
- Sehnenlängen
- Projektionsflächen

„Größe“ = Äquivalentdurchmesser

reale Partikel



Modellpartikel
(Kugel)

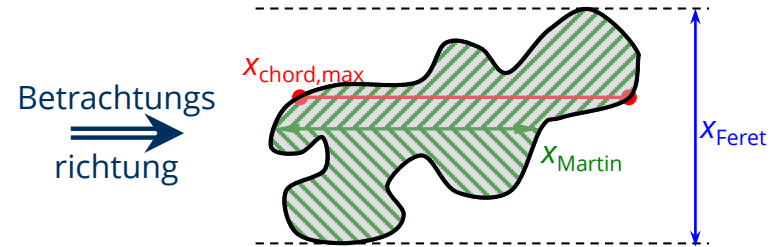


Äquivalentdurchmesser =

Durchmesser einer Kugel die in einem bestimmten geometrischem oder physikalischem Merkmal (z.B. Volumen, Sinkgeschwindigkeit) dem zu beschreibenden Partikel gleicht

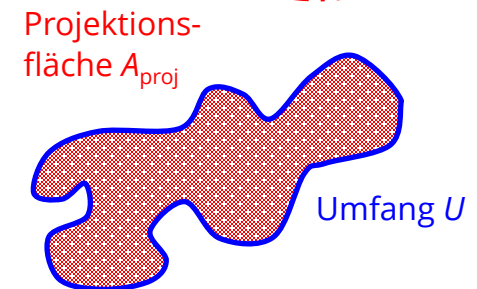
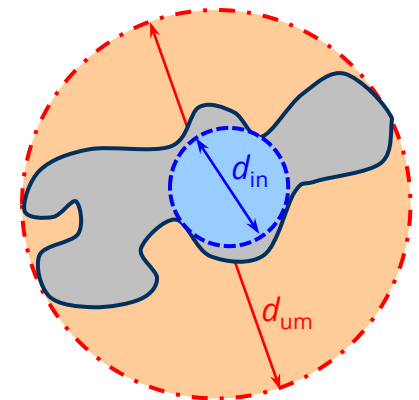
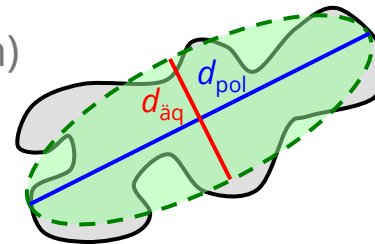
Charakteristische Längen am Projektionsbild

- Feret-Durchmesser x_{Feret} :
1D-Projektion in Messrichtung
- Martin-Durchmesser x_{Martin} :
halbiert Fläche in Messrichtung
- größte Sehnenlänge $x_{\text{chord,max}}$
in Messrichtung



von x_{Feret} , x_{Martin} & x_{chord} interessieren min., max. und mittlere Werte

- Durchmesser des größten Inkreis d_{in}
- Durchmesser des kleinsten Umkreis d_{um}
- Legendre-Ellipse (flächen+trägheitsgleich)
 - Äquatordurchmesser $d_{\text{äq}}$
 - Poldurchmesser d_{pol}
- Umfang U
 - umfangsäquivalenten Durchmesser
- Projektionsfläche A_{proj}
 - projektionsflächenäq. Durchmesser



Relationen zwischen den Größenangaben

- für konvexe Körper gilt:

$$\text{Oberfläche} = 4 \times \text{mittlere Projektionsfläche}$$

das heißt, in diesem Fall ist $x_S = x_{\text{proj,st}}$

- für nichtsphärische Partikel gilt

$$x_{\text{Stokes}} < x_V < x_S < x_U$$

- für Aggregate und Agglomerate gilt

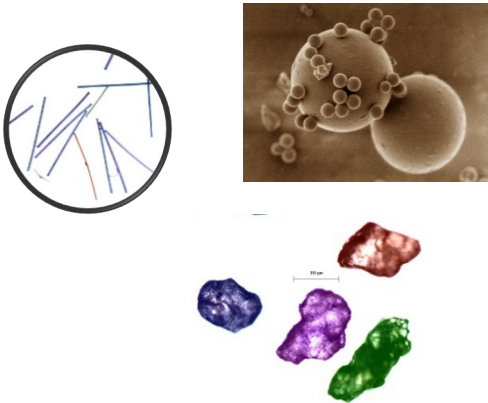
$$x_{\text{Stokes}} < x_{\text{hd}} < x_{\text{env}} \quad (x_{\text{hd}} \text{ hydrodynam. Durchm.}, x_{\text{env}} \text{ } \varnothing \text{ der einhüllenden Kugel)}$$

2.3 Eigenschaften von Einzelpartikeln – Partikelform –

zum Begriff „Partikelform“

Einfluss der Betrachtungsebene

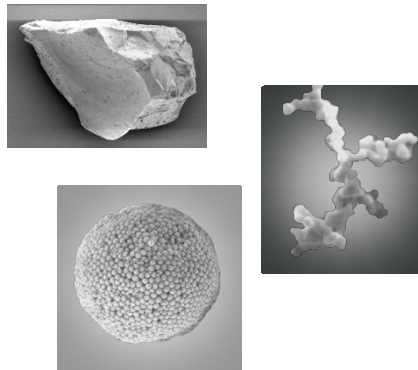
makroskopisch:



Verhältnis der äußeren Abmaße

- faserförmig, flach, ...
- Sphärizität
- Seitenverhältnis

mesoskopisch:



Morphologie auf mittlerer Größenskale

- Rundheit von Ecken,
- Konkavitäten
- Agglomeratstruktur (fraktal, dicht gepackt)
- Porosität

mikroskopisch:



Strukturen, die viel kleiner als Partikelabmessungen

- Rauheit
- Oberflächenstruktur

Formparameter dreidimensionaler Partikel

- Sphärizität nach Wadell: $\Psi = \left(\frac{x_V}{x_S} \right)^2$
- Heywood-Faktor für beliebige Äquivalentdurchmesser x_α : $f_\alpha = \frac{S_V}{6/x_\alpha}$
- dynamischer Formfaktor χ :
(insbesondere für Aerosole)
$$\chi = \frac{F_{W,Partikel}}{F_{W,Kugel}(x_V)} = \frac{x_{mob}/C(x_{mob})}{x_V/C(x_V)}$$
$$\chi = \frac{x_V^2 \cdot C(x_V)}{x_{St}^2 \cdot C(x_{St})} = \frac{\rho_P}{\rho_0} \frac{x_V^2 \cdot C(x_V)}{x_{ad}^2 \cdot C(x_{ad})}$$

Formparameter aus Projektionsbildern

Makroform

- Zirkularität
- Seitenverhältnis der Feret-Durchmesser
- Seitenverhältnis der Legendre-Ellipse
- Kompaktheit
- Irregularität
- Elongation von Fasern

Mesoform

- Solidität
- Konvexitätsgrad

$$C = \frac{x_P}{x_U}$$

$$\alpha_{\text{Feret}} = x_{\text{Feret,min}} / x_{\text{Feret,max}}$$

$$\rho_{\text{ellips}} = d_{\text{pol}} / d_{\text{äq}}$$

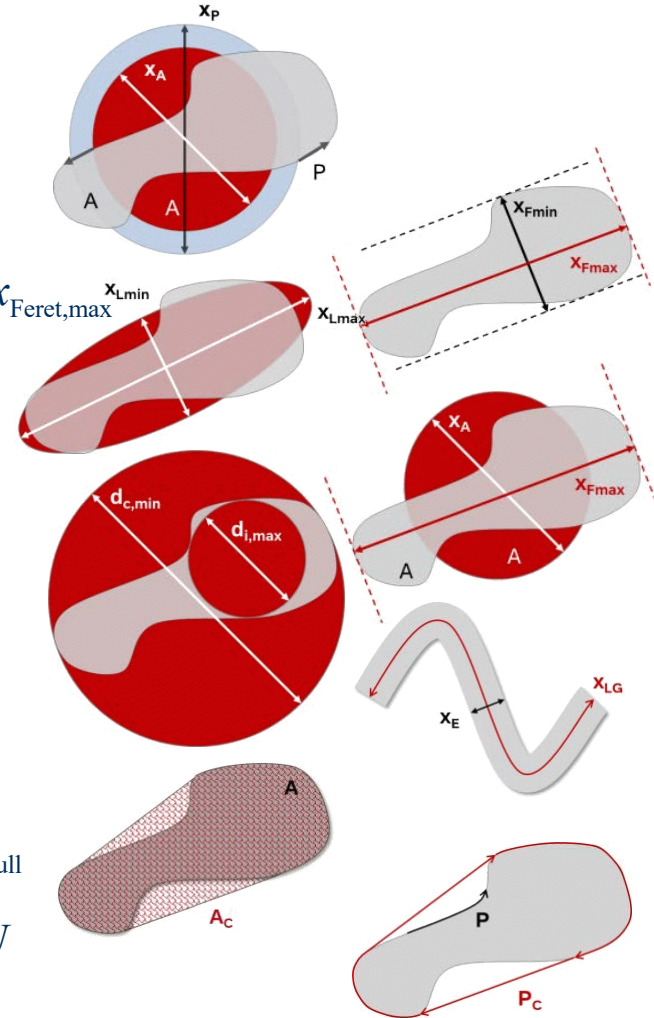
$$K = x_{\text{pr}} / x_{\text{Feret,max}}$$

$$I = d_{\text{in}} / d_{\text{um}}$$

$$E = d_{\text{Faser}} / l_{\text{Faser}}$$

$$S = A_{\text{proj}} / A_{\text{convexHull}}$$

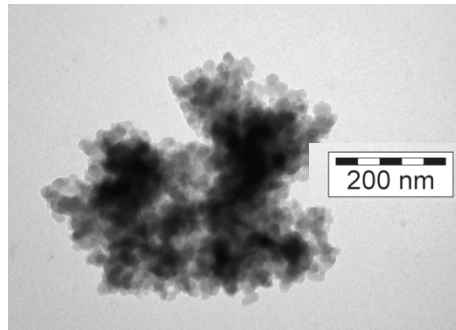
$$Cx = U_{\text{convexHull}} / U$$



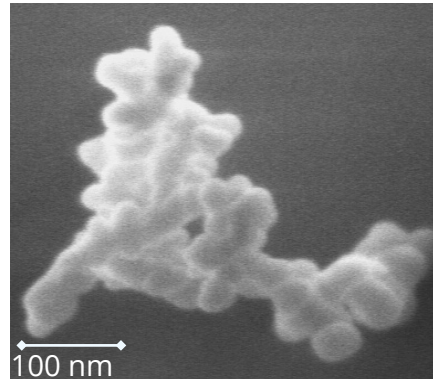
2.4 Eigenschaften von Einzelpartikeln

– Struktur von Agglomeraten und Aggregaten –

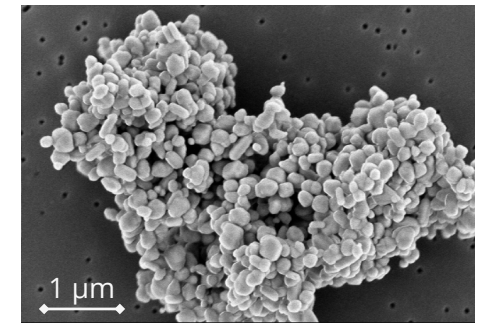
Partikelaggregate



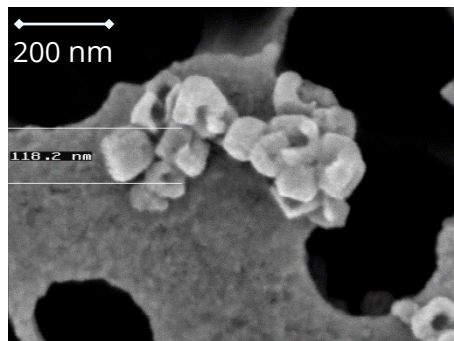
Fällungskieselsäure (SiO_2)



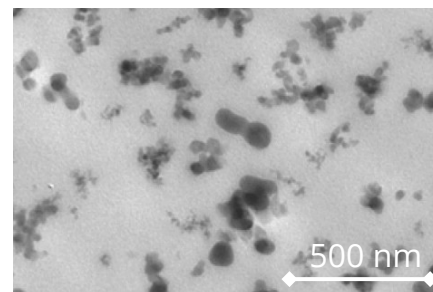
pyrogenes SiO_2



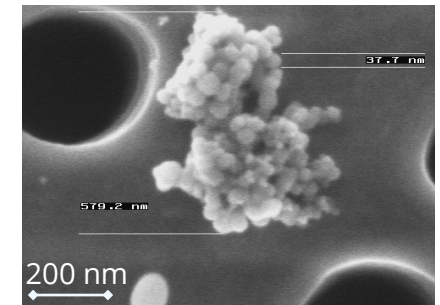
Titanoxidpigmente



gefälltes CaCO_3



SiO_2 -gefülltes Polymer
(Bugnicourt, *Polymer*, 48:949, 2007)

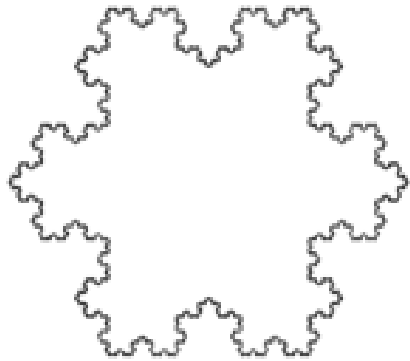


Dieselrußaggregat

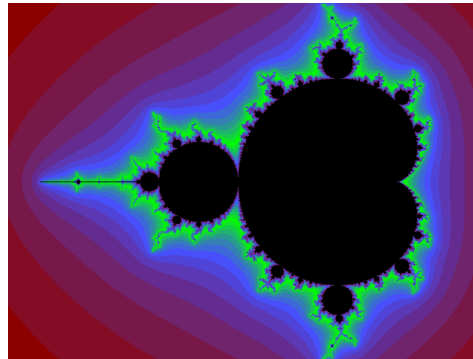
Struktur von Partikelagglomeraten und -aggregaten

- „Größe“:
 - äußere Durchmesser, Äquivalentdurchmesser, Aggregationszahl, ...
- verbale Strukturbeschreibung:
 - dicht gepackt, offenporig, hoch-porös, fraktalartig, ...
- Struktur via exakte räumliche Position aller Partikel \mathbf{r}_k (bezogen auf Schwerpunkt und definierte Orientierung)
- Struktur als Verteilung der Partikelabstände → Paarkorrelationsfunktion
- Strukturbeschreibung aus Streuexperimenten (mit Licht, Röntgen- oder Neutronenstrahlung)
- Struktur von dicht gepackten Agglomeraten als Porosität bzw. Zwischenraumvolumen und Porengröße
- Strukturbeschreibung als Größenabhängigkeit von Masse oder Dichte
- Strukturbeschreibung via Korrelation von Äquivalentdurchmessern (z.B. bezüglich Masse und Mobilität)
- Strukturbeschreibung via fraktale Dimension

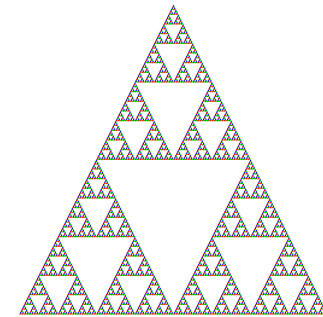
Fraktale Geometrie



Koch-Kurve



Mandelbrot-Diagramm



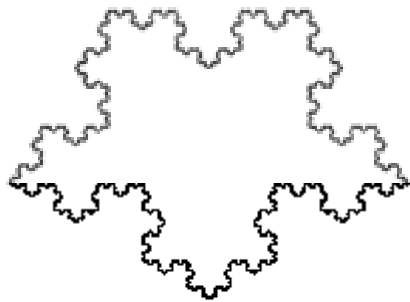
Sierpinski-Dreieck

Potenzgesetz für die Korrelation zw.
Anzahl & Größe der Grundelemente

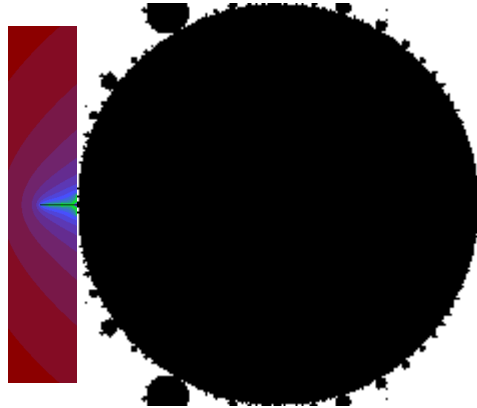
$$N \propto 1/l^D$$

Bildquellen: http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia_Commons

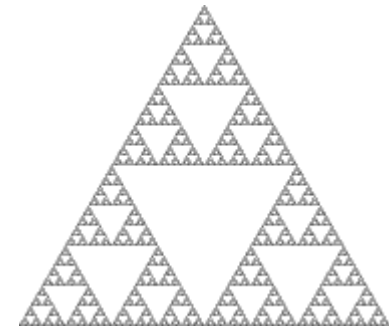
Selbstähnlichkeit



Koch-Kurve



Mandelbrot-Diagramm



Sierpinski-Dreieck

Selbstähnlichkeit: Struktur ist unabhängig vom Betrachtungsmaßstab

Bildquellen: http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia_Commons

Massenskalisierung von fraktalen Aggregaten

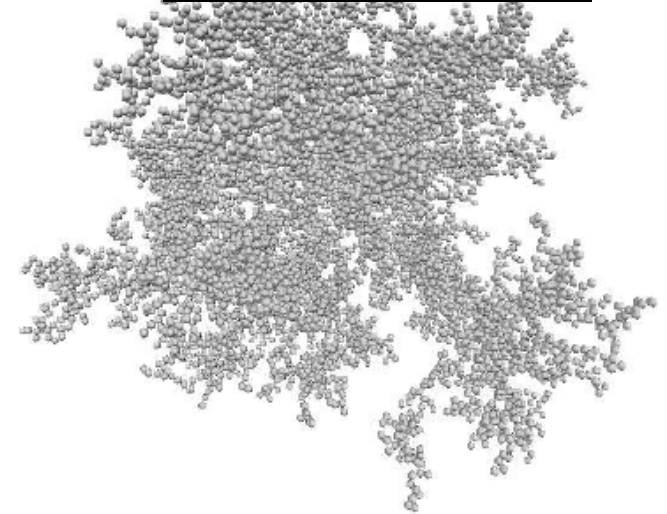
Massenskalisierung nicht-fraktaler Objekte:

$$\frac{m_2}{m_1} \approx \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{D_f}$$

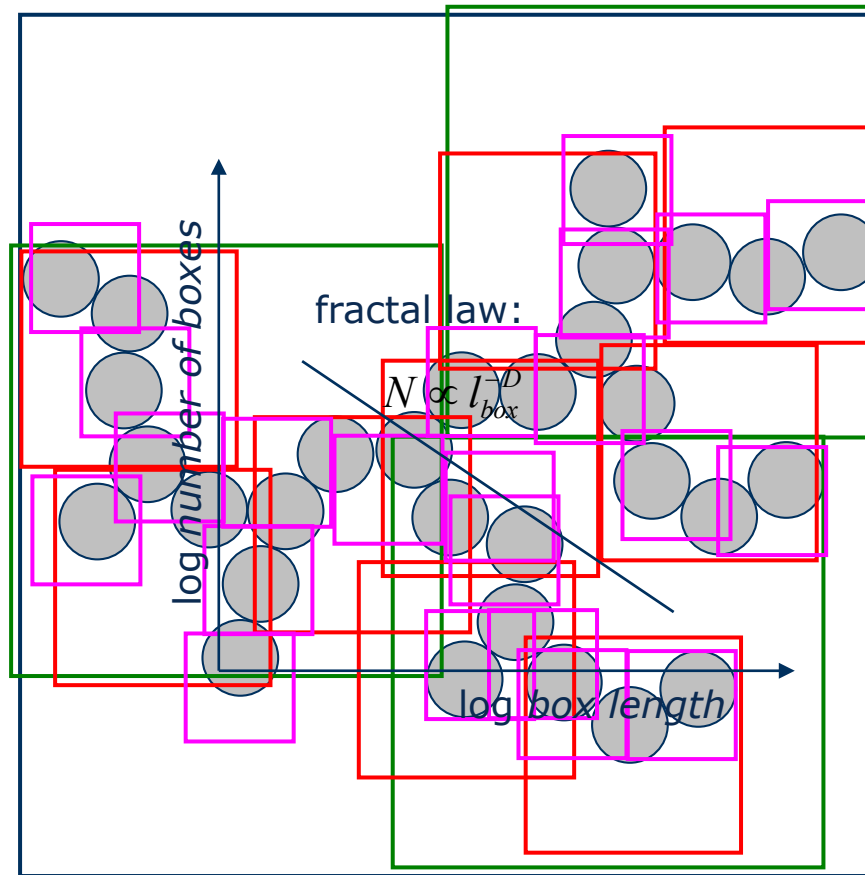


Massenskalisierung von fraktalen Aggregaten:

$$\frac{m_{agg}}{m_p} = N_{agg} = k_f \cdot \left(\frac{x_{g,agg}}{x_p} \right)^{D_f}$$



Box-counting



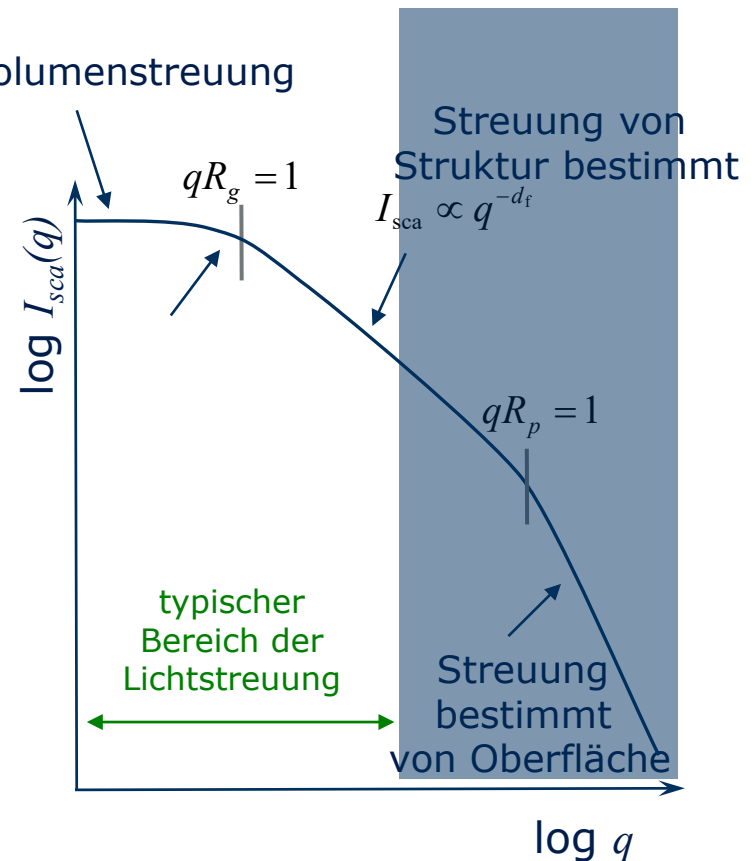
- fraktale Skalierung der Kästchenzahl
- eine andere Fraktalität als jene der Massenskalisierung

Aggregatstreuung im RDG-Limit

- Rayleigh-Debye-Gans:
 - schwache Streuer ohne Wechselwirkung Volumenstreuung
 - Interferenz der Streufelder
 - Streuung aus Aggregatstruktur berechenbar:

$$I_{sca} = I_{sca,1} \cdot N^2 \cdot S(\mathbf{q})$$

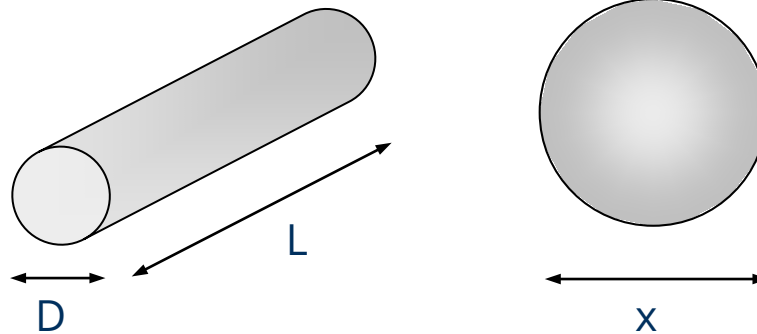
- statische Streutechniken:
 - SLS, SAXS, SANS
 - Intensität I_{sca} vs. Streuvektor q
- Anwendungsbereich:
 - z.B. SiO_2 -Aggregate mit $x_p \leq 100$ nm
 - z.B. TiO_2 -Aggregate mit $x_p \leq 50$ nm



2.5 Eigenschaften von Einzelpartikeln

– *Selbststudium* –

Übung: Äquivalentdurchmesser von Zylindern



räumliche Äquivalenz

$$\text{Volumen: } V_{\text{Zyl}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 L \stackrel{!}{=} V_{\text{Kugel}} = \frac{\pi}{6} \cdot x^3 \Rightarrow x_V = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot D^2 L}$$

$$\text{Oberfläche: } S_{\text{Zyl}} = \frac{\pi}{2} D^2 + \pi \cdot DL \stackrel{!}{=} S_{\text{Kugel}} = \pi \cdot x^2 \Rightarrow x_S =$$

Äquivalenz am Projektionsbild (stabilste Lage)

$$\text{Projektionsfl.: } A_{\text{Pst,Zyl}} = DL \stackrel{!}{=} A_{\text{Pst,Kugel}} = \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \Rightarrow x_{\text{Pst}} =$$

$$\text{Umfang: } U_{\text{Zyl}} = 2 \cdot (D + L) \stackrel{!}{=} U_{\text{Kugel}} = \pi \cdot x \Rightarrow x_U =$$

Literatur

Dispersitätseigenschaften

Bücher und Buchkapitel:

- H. Schubert (Hrsg.), *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1*; Kap. 2.1.3, S. 20-28; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352)
- M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*; Kap.2.3 & 2.4, S. 11-25; Springer, **2009**; [doi:10.1007/9783-540-32552-9](https://doi.org/10.1007/9783-540-32552-9)

Artikel und Normen:

- R. Hogg, Issues in particle sizing. *KONA Powder Part. J.*, 26:81-93, **2008**; [doi:10.14356/kona.2008009](https://doi.org/10.14356/kona.2008009)