

# Synthese und Eigenschaften von fraktalen Partikelaggregaten

*Beiträge der Dresdner MVT*

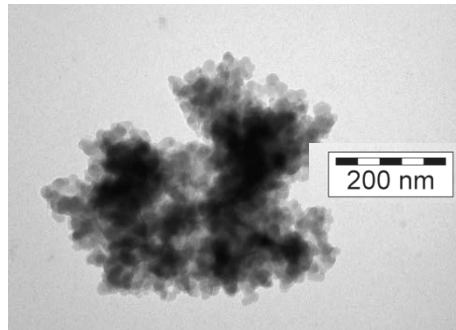
PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick u.a.

PVT-Seminar, 28. April 2023

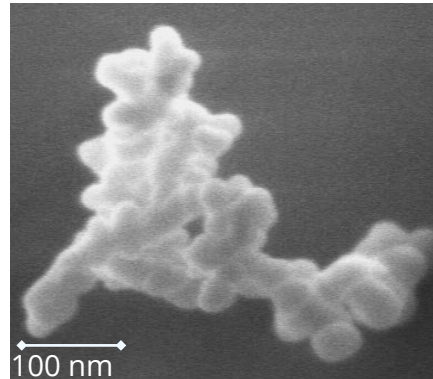
# 1. Einführung

*– Begriffe, Forschung in DD –*

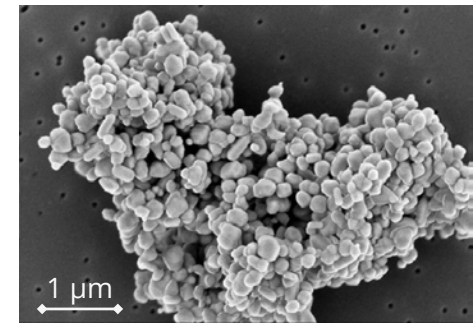
# Partikelaggregate



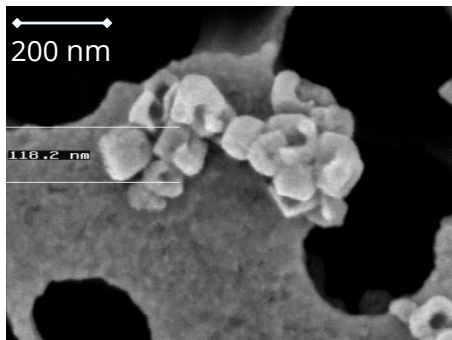
Fällungskieselsäure ( $\text{SiO}_2$ )



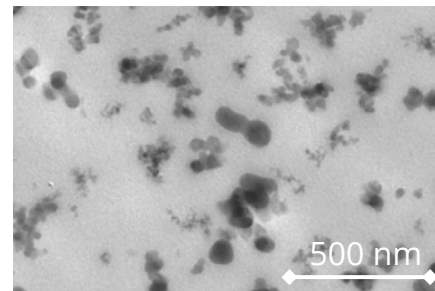
pyrogenes  $\text{SiO}_2$



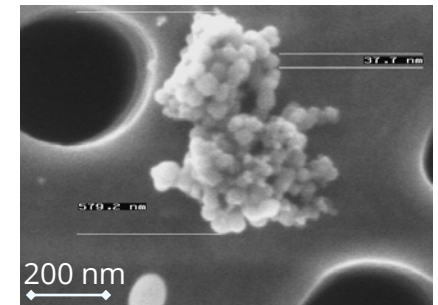
Titanoxidpigmente



gefülltes  $\text{CaCO}_3$



$\text{SiO}_2$ -gefülltes Polymer  
(Bugnicourt, *Polymer*, 48:949, 2007)

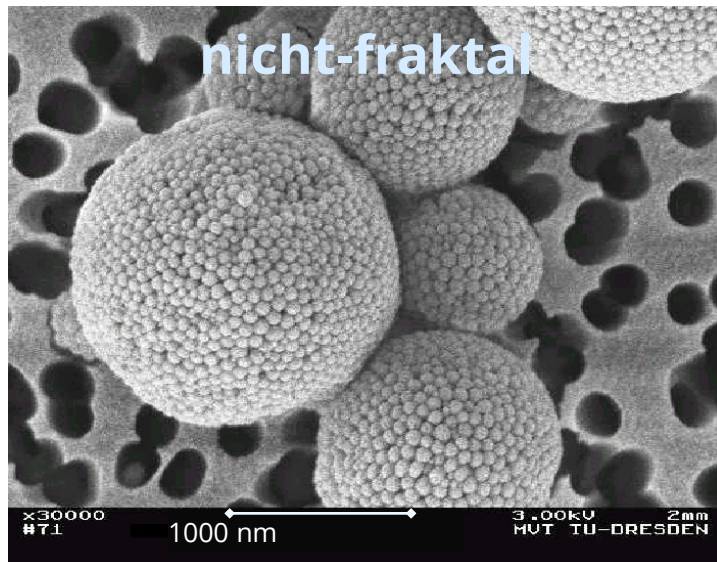


Dieselfußaggregat

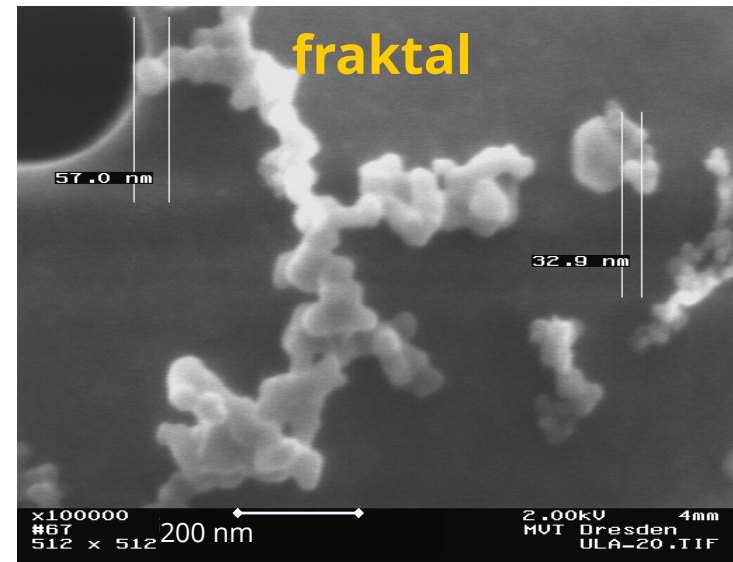
# Begriffspaar *Aggregat* und *Agglomerat*

- 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

# Fraktale Partikelaggregate



dicht gepacktes Sprühagglomerat aus  $\text{SiO}_2$ -Kügelchen



locker gepacktes Ruß-Aggregat eines Verbrennungsabgases

# Forschung an der MVT Dresden zu Partikelaggregaten

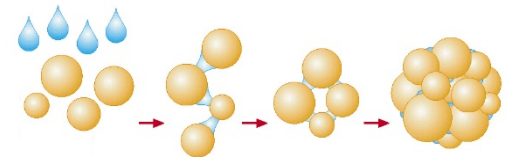
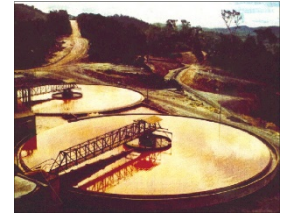
- primärer Blickwinkel: **Granulometrie**
- Fragestellungen
  - Welche Struktureigenschaften sollen wir messen?
  - Mit welchen Messtechniken?
  - Wie können wir Messergebnisse interpretieren?
  - Wie hängen die physikalischen von den Struktureigenschaften ab?
  - Wird die Struktur von der Messung selbst beeinflusst?
  - Wie sollten die Proben für die Messung vorbereitet werden?
  - Bleiben die Proben während einer Analyse stabil?
  - Wie lassen sich die Struktureigenschaften während der Verarbeitung beeinflussen? (Prozessfunktion)
  - In welcher Weise werden die anwendungs- oder physiologisch relevanten Eigenschaften von den strukturellen bestimmt? (Eigenschaftsfunktion)
- außerdem
  - Arbeits-, Umwelt- und Verbraucherschutz → Quantifizierung der Exposition

## 2. Partikelaggregate

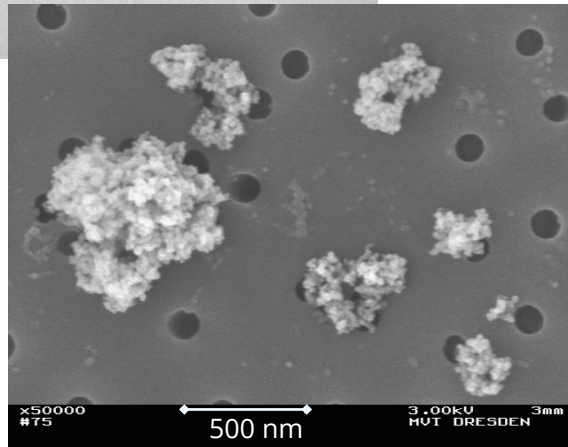
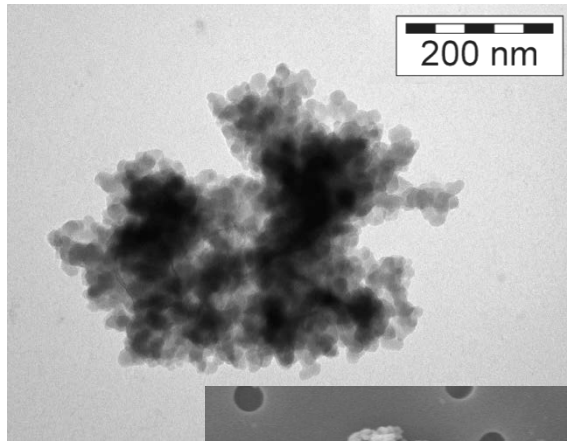
*– Prozesse, Produkte, Anwendungen –*

# Aggregation in technischen Prozessen

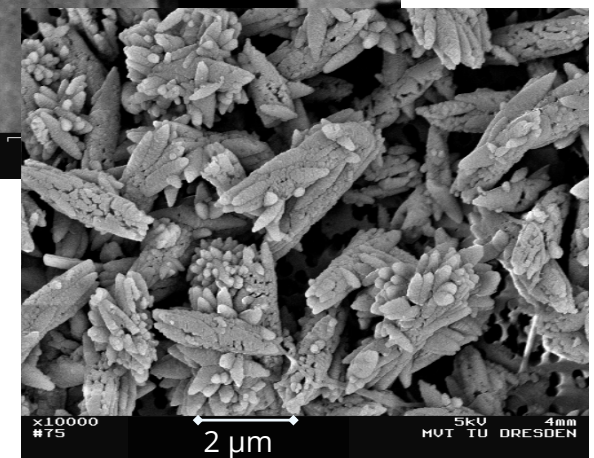
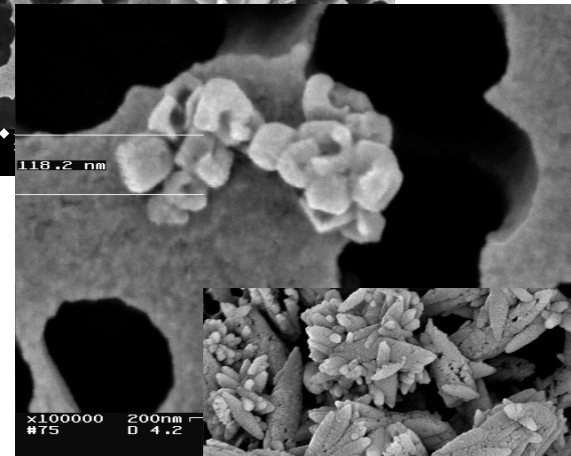
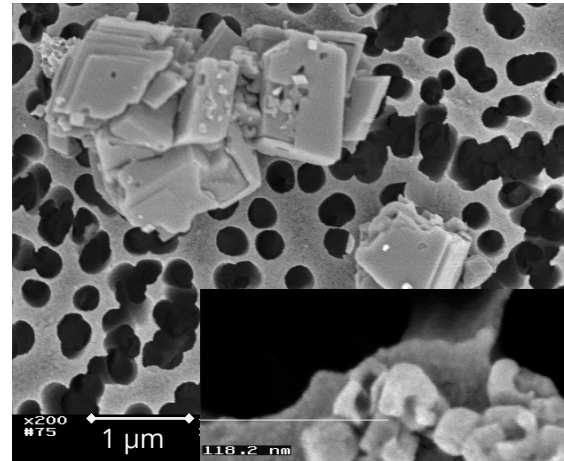
- Koagulation / Flockung
  - Zugabe von Salzen, Polyelektrolyten, Polymeren
  - z.B. zur Abwasserreinigung
- Kristallisation / Fällung
  - Aggregation von gewachsener Kristallisationskeimen
  - z.B. bei Synthese pharmazeutischer Wirkstoffe oder von Farbpigmenten
- Partikelsynthese in Gasphasenreaktionen
  - Aggregation der Nukleationskeime
  - generell: Aerosolpartikel aggregieren
- Granulation / Agglomeration
  - Agglomeration von (grobdispersen) Feststoffpartikeln
  - z.B. Sprühtrocknung



# Fällungsprodukte

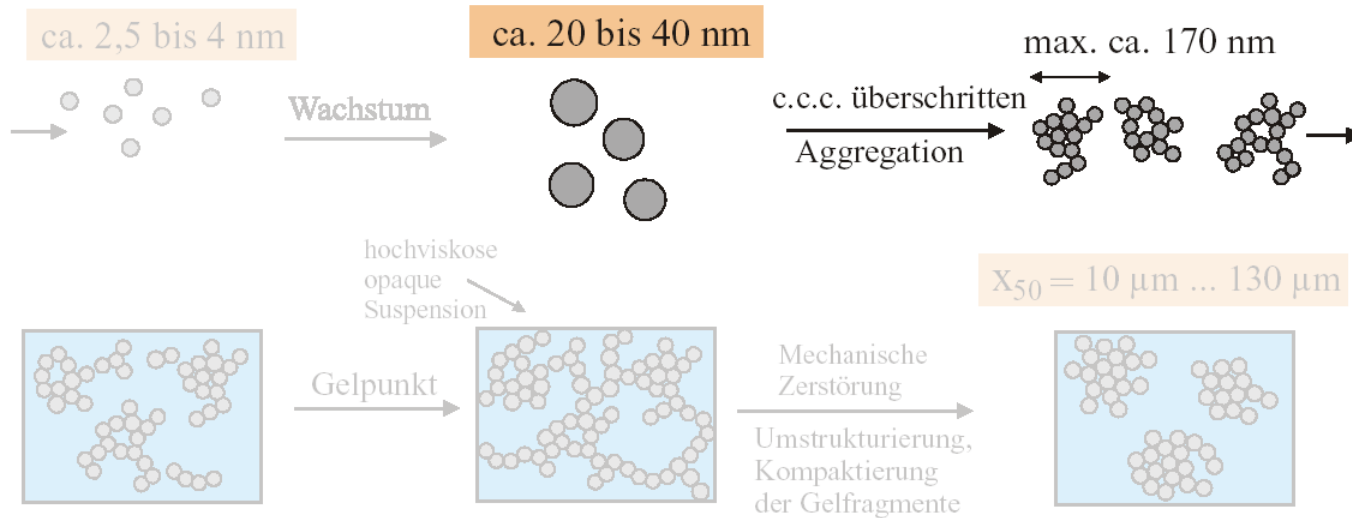
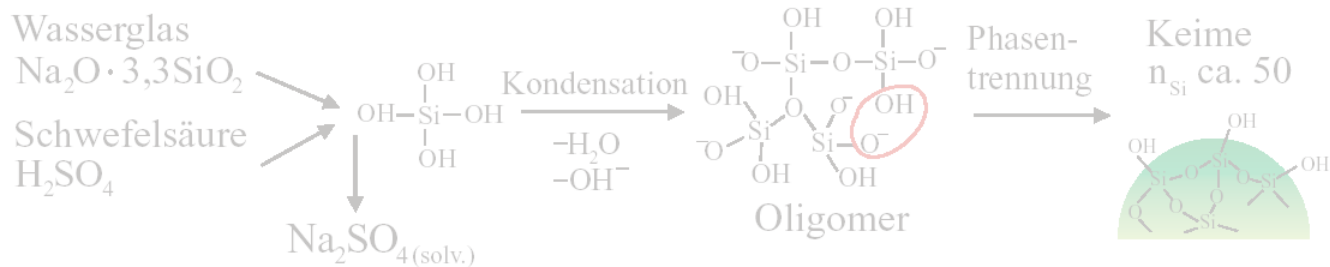


Fällungskieselsäure



gefälltes CaCO<sub>3</sub>

# Ausfällung von amorphem Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>)



J. Schlomach: *Feststoffbildung bei technischen Fällprozessen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2006; S. 6.

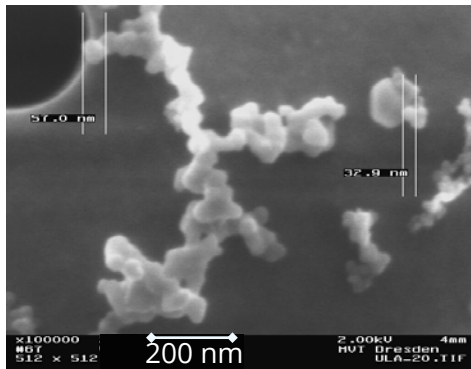
# Pyrogene Pulver

## Quellen/Herkunft:

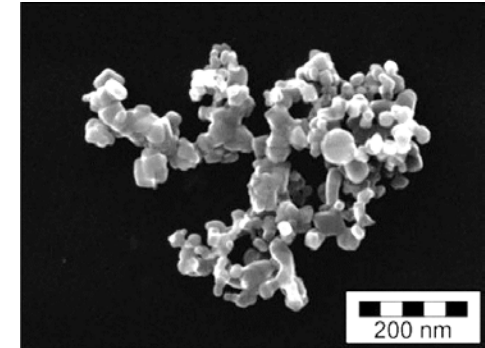
- Verbrennungsprozesse (Dieselruß)
- Massenprodukte der chem. Industrie (Industrieruße, pyrogene Oxide)

## Anwendungen:

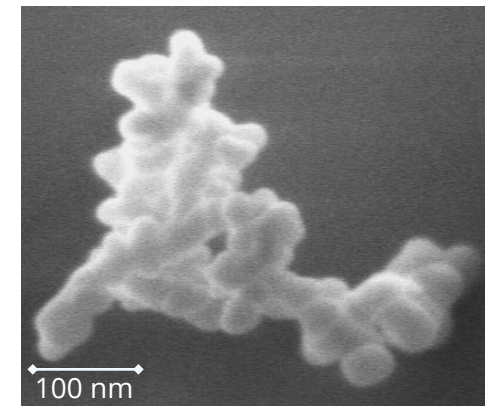
- Füll- und Verdickungsmittel in Farben und Elastomeren
- Poliersuspensionen
- Pigmente



Ruß-Aggregat aus  
Verbrennungsabgas

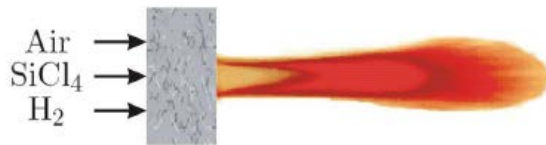


pyrogenes  $\text{TiO}_2$   
(Albers et al., *Cryst. Res. Technol.*, 50(11):846-865, 2015)

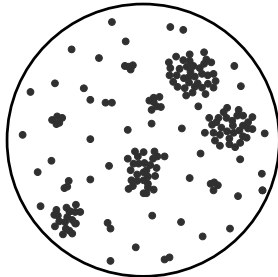


pyrogene  
Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ )

# Bildung von pyrogenem SiO<sub>2</sub>



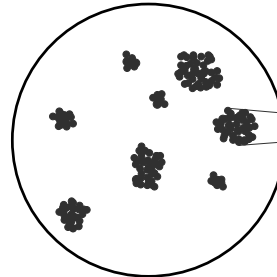
ballist. Polymerisat<sup>n</sup>  
von Monomeren



Keime mit sehr  
rauer Oberfläche

0.1 nm

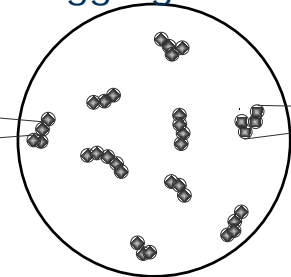
Versinterung



kompakte  
Primärpartikel

1 nm

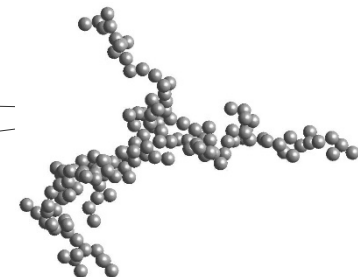
initiale  
Aggregation



erste  
Subcluster

10 nm

DLCA der  
Subcluster

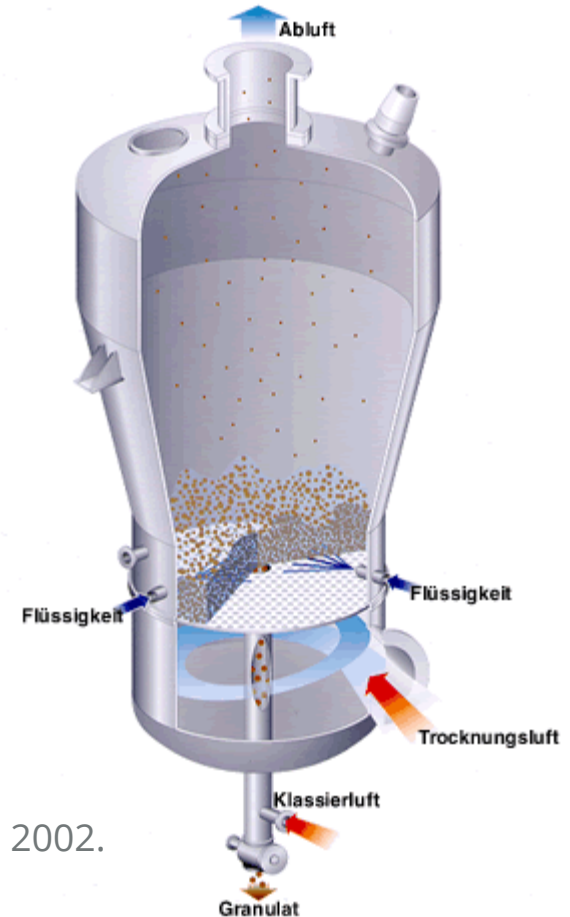
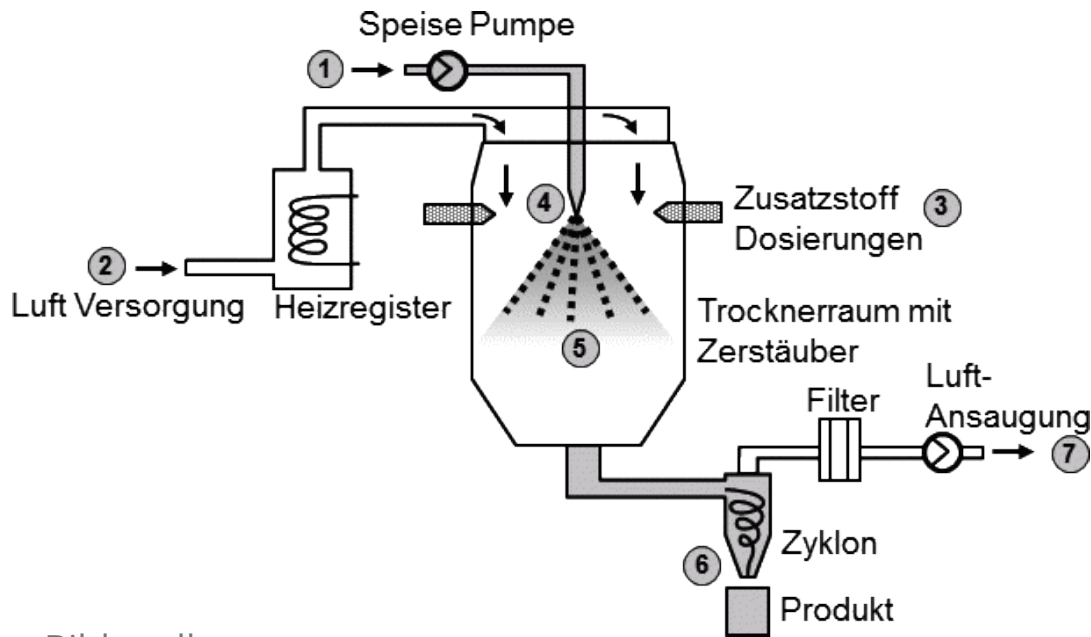


fraktale Aggregate  
mit  $d_f = 1.8$

100 nm

- nach D.W. Schaefer & A.J. Hurd: *Aerosol Sci. Techn.* 12 (1990), 876-890

# Sprühtrocknung und Sprühagglomeration



Bildquellen:

Fraundorfer & Hergeth, *Chem. Ing. Tech.*, 88(6):777-785; 2016.

*Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse.* Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

- typische Produkte:
  - löslicher Kaffee, Milchpulver, Pigmente, Düngemittel, Waschmittel, Medikamente

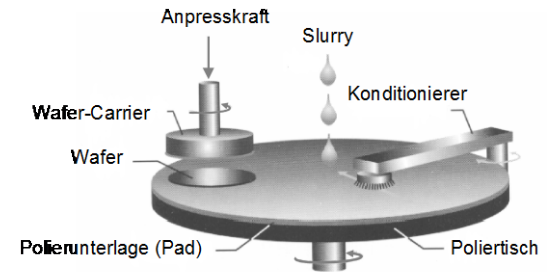
# Anwendungsprodukte mit Partikelaggregaten



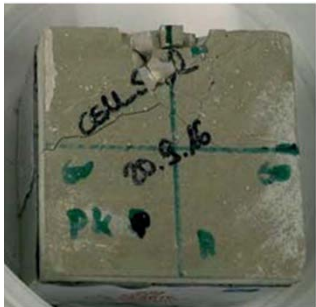
UV-Absorber



Schwebemittel für Farben



Poliermittel für Wafer  
(CMP slurries)



Additive für Baustoffe



Fließhilfsmittel für  
Lebensmittelpulver



Putzkörper in Zahnpasta



Verstärkung von Elastomeren



rheologische Additive  
in Kosmetika

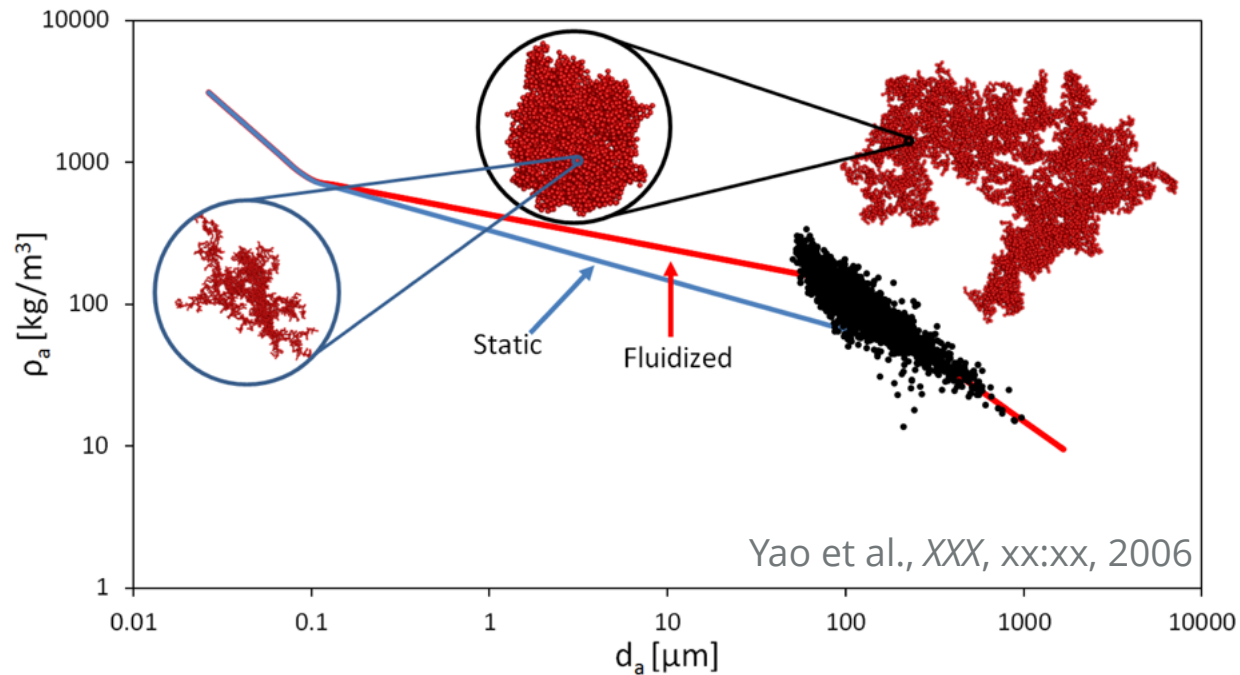
# Ökonomische Relevanz

- Industrieruße
  - globale Jahresproduktion ca. 11 Mio. Tonnen, 13 Mrd. US-Dollar (2019)
  - Füllstoff für Reifen u.a. Polymere, Leitfähigkeitsadditiv, Pigment
- industrielles  $\text{TiO}_2$ 
  - globale Jahresproduktion ca. 4.3 Mio. Tonnen (2018)
  - Weißpigment, Keramikpigment, UV-Absorber, Photokatalysator, ...
- synthetische amorphes  $\text{SiO}_2$ 
  - globale Jahresproduktion ca. 3.9 Mio. Tonnen, 9.2 Mrd. US-Dollar (2018)
  - Füllstoff, rheologisches Additiv, Rieselhilfe, Feuchtigkeitsadsorber, ...
- synthetische Calciumcarbonat
  - globale Jahresproduktion ca. 130 Mio. Tonnen, 28 Mrd. US-Dollar (2018)
  - (billiger) Füllstoff für Kunststoffe, Baumaterialien, Papier, ...
- zum Vergleich: Kaffee
  - globale Jahresproduktion ca. 10 Mio. Tonnen (2018)
  - Grundnahrungsmittel (für einige)

# 3. Morphologie von Partikelaggregate

*– Aggregatstruktur und Aggregationsprozess –*

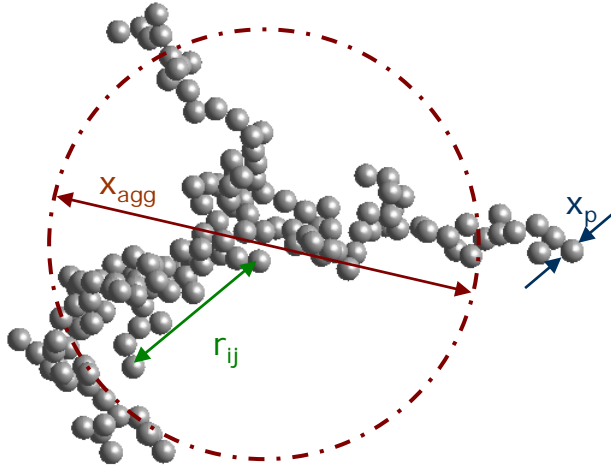
# Hierarchische, multiskalige Struktur



- nanostrukturierte Pulver
  - nanoskalige Primärpartikel
  - meist noch während Synthese aggregiert  $\rightarrow$  Aggregate  $< 1 \mu\text{m}$
  - während Weiterbehandlung (z.B. Filtration) oder Lagerung Agglomeration, nicht selten mehrstufig  $\rightarrow$  Agglomerate im  $1 \mu\text{m} \dots 10 \text{mm}$

# Morphologie der Aggregate und Agglomerate

## Agglomerat „größe“ / Längen:



Primärpartikelgröße  $x_p$

Primärpartikelanzahl  $N$

Zentrumsabstände  $r_{ij}$

Agglomerat „größe“  $x_{agg}$

Agglomeratmasse  $m_{agg} \sim N \cdot x_p^3$

...

## fraktale Struktur:

= Selbstähnlichkeit:  $g \sim r_{ij}^{d-3}$

### Messung:

Abbildende Verfahren (REM, TEM)

Streulicht-Winkelverteilung  $\leftarrow$  **Modell**

= fraktales Wachstum:  $m_{agg} \sim x_{agg}^d$

### Messung von $m_{agg}$ :

z.B. Zentrifugation im elektr. Feld

### Messung von $x_{agg}$ :

Abbildende Verfahren (REM, TEM)

Streulichtintensität  $\leftarrow$  **Modell**

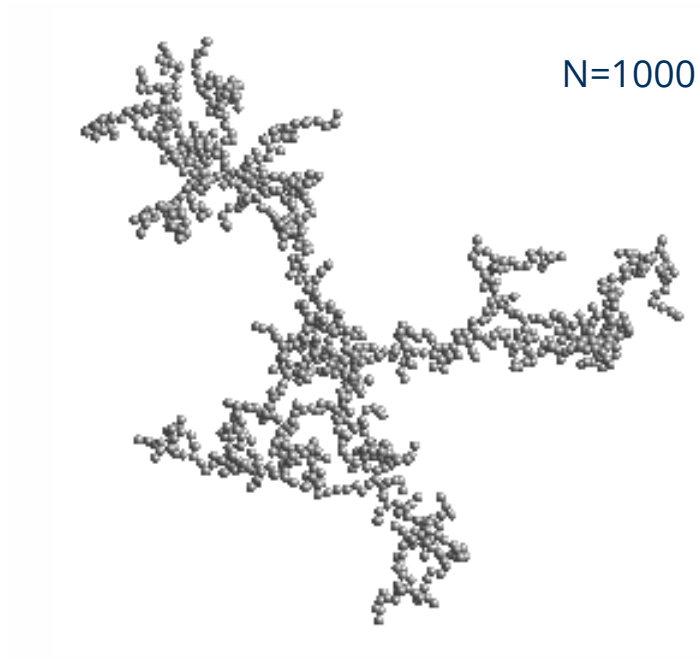
Dynamik  $\leftarrow$  **Modell**

fraktale  
Dimension

# Aggregationsprozess bestimmt Aggregatstruktur

- Einflussfaktoren auf die Aggregation/Agglomeration von Partikeln
  - kinetische Energie von Partikeln
  - Partikelgröße
  - Partikelkonzentration
  - Viskosität des Mediums
  - weit reichende interpartikuläre Kräfte
  - kurz reichende interpartikuläre Kräfte
  - Art der Partikelbindung/-haftung
  - Versinterung der Primärpartikel
  - Verfestigung der Aggregatstruktur
- Aggregationsbedingungen/-mechanismen bestimmen Aggregatstruktur!

# Idealtypen an Aggregaten



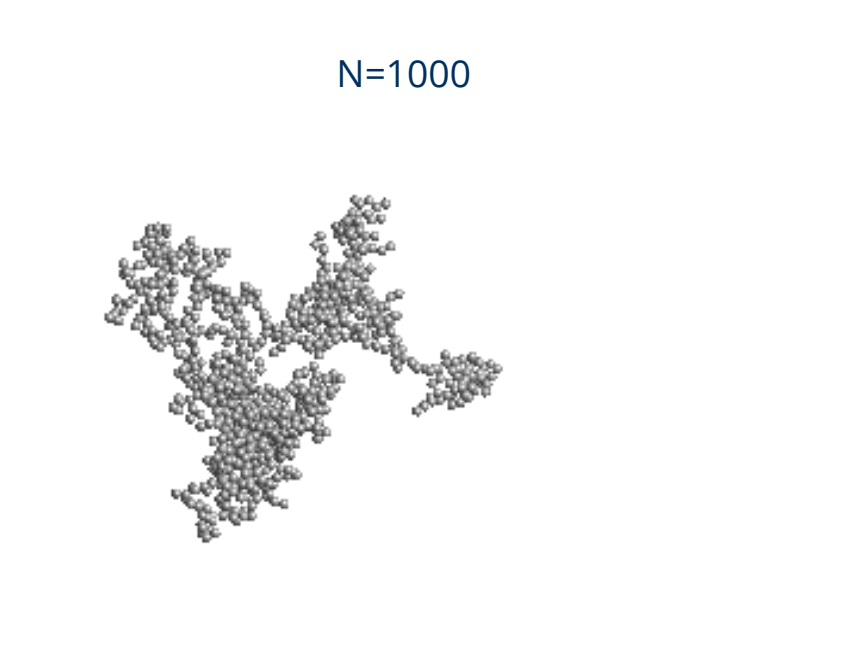
## DLCA:

diffusionslimitierte Aggregation von  
Subclustern & Partikeln

kaum Abstoßung

sehr poröse Aggregate ( $d_f = 1.8$ )

Meakin, *Phys. Rev. Lett.* 51 (1983)



## RLCA:

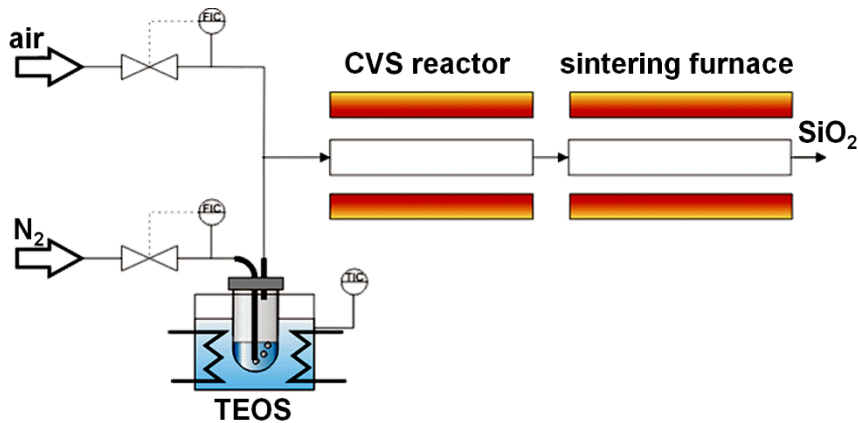
reaktionslimitierte Aggregation von  
Subclustern & Partikeln

starke Abstoßung

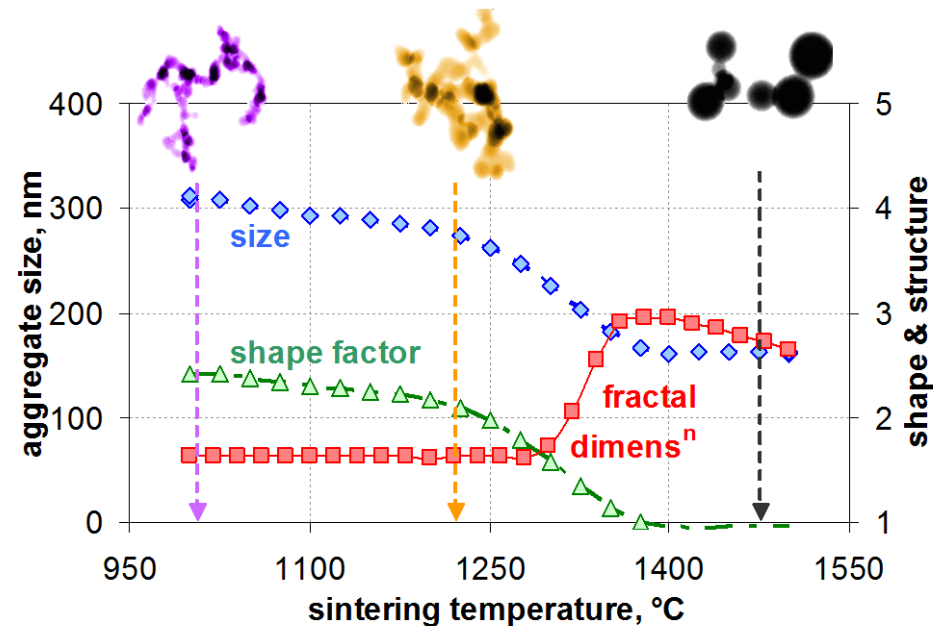
relativ dichte Aggregate ( $d_f = 2.1$ )

Jullien & Kolb, *J. Phys. A: Math. Gen.* 17(1984)

# Generell: Morphologie resultiert aus Synthese



Babick et al., Chem. Ing. Tech., 90(7):923-936, 2018

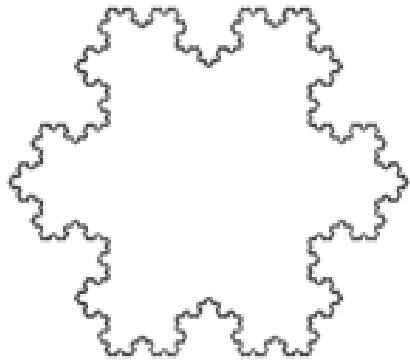


- Erzeugung von SiO<sub>2</sub> durch Verdampfen von TetraEthylOrthoSilikat
- Reaktor erzeugt fraktale, hoch-poröse Aggregate nanoskaliger Partikel
- angeschlossener Sinterofen verdichtet Aggregate bis hin zur vollständigen Koaleszenz

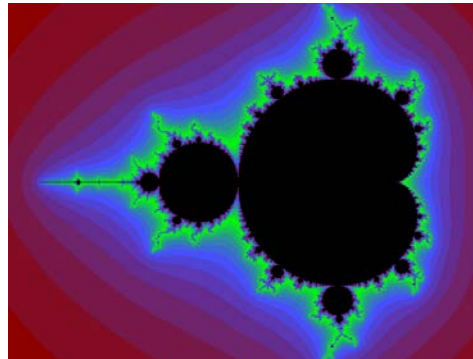
# 4. Fraktale Partikelaggregate

*- Aggregatstruktur und Aggregationsprozess -*

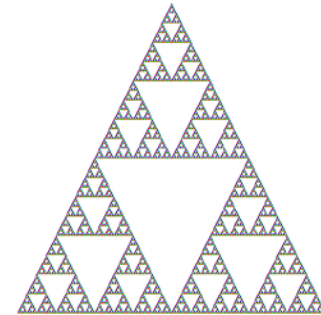
# Fraktale Geometrie



Koch-Kurve



Mandelbrot-Diagramm



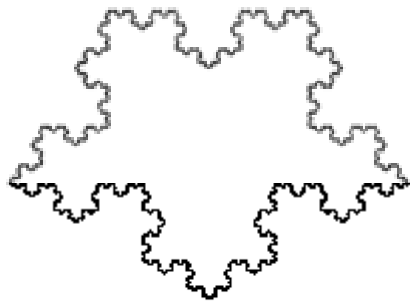
Sierpinski-Dreieck

Potenzgesetz für die Korrelation zw.  
Anzahl & Größe der Grundelemente

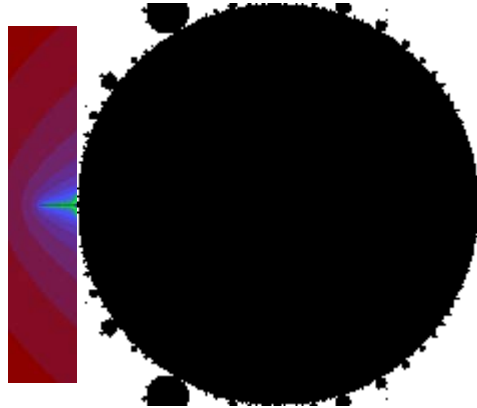
$$N \propto 1/l^D$$

Bildquellen: [http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia\\_Commons](http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia_Commons)

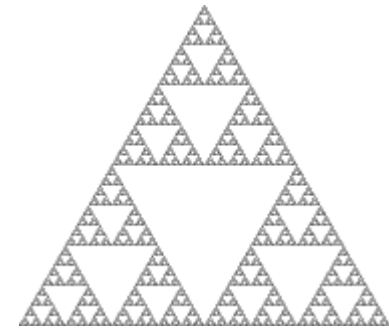
# Selbstähnlichkeit



Koch-Kurve



Mandelbrot-Diagramm



Sierpinski-  
Dreieck

Selbstähnlichkeit: Struktur ist unabhängig vom Betrachtungsmaßstab

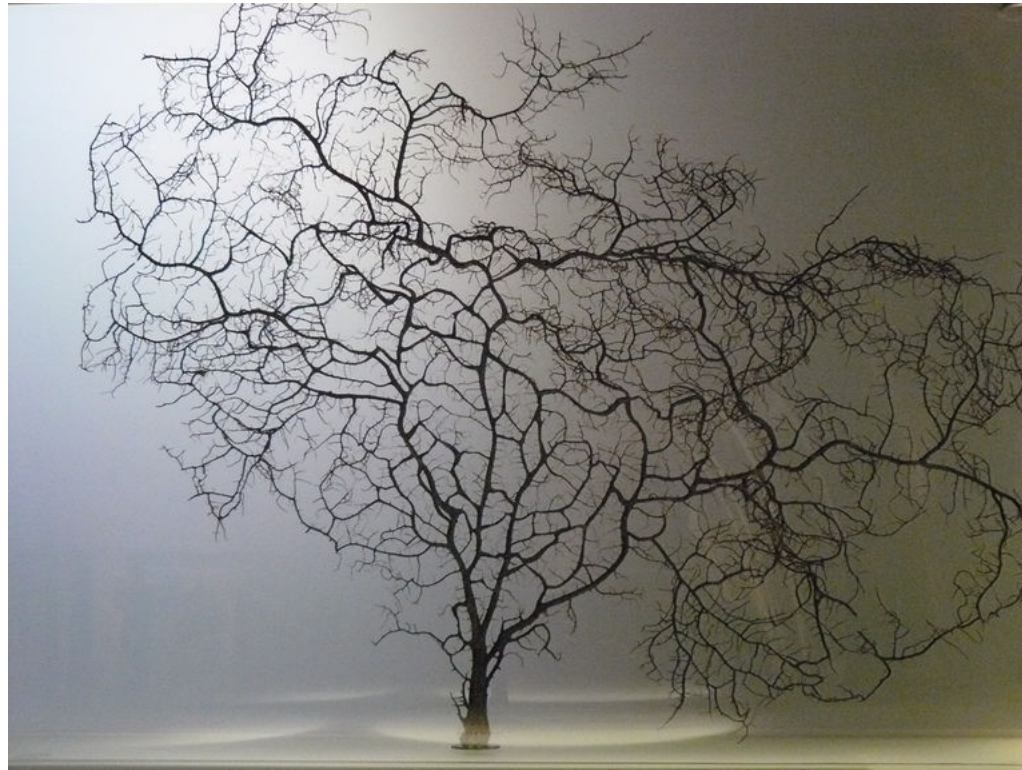
Bildquellen: [http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia\\_Commons](http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia_Commons)

# Gibt es fraktale Strukturen in der Natur?



- Lindenmayer-Systeme: Strukturen basierend auf Formalismen zur Nachbildung von biologischen Wachstumsprozessen

# Gibt es fraktale Strukturen in der Natur?



- *Creixement fractal* (Antonio Gaudi; La Pedrera – Barcelona)

# Fraktalartige Strukturen in der Natur



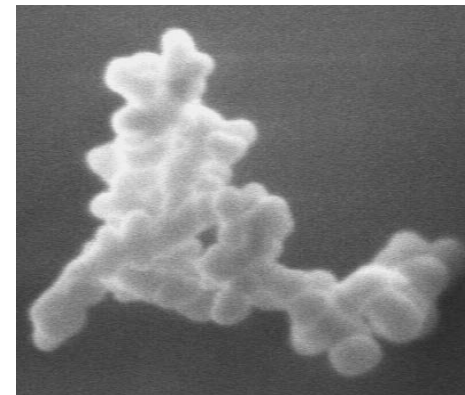
Küstenlinien und natürl.  
Grenzverläufe



Blitze



elektrolytisch  
gefällte Metalle



Partikelaggregate

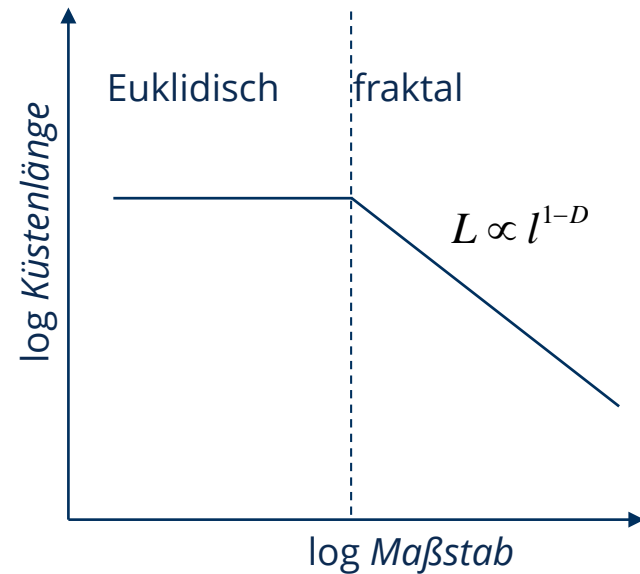
Bildquellen:

[http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia\\_Commons](http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe:Wikimedia_Commons)

[www.natur-struktur.ch/fraktale/fraktalenatur.html](http://www.natur-struktur.ch/fraktale/fraktalenatur.html)

[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DLA\\_Cluster.JPG&filetimestamp=20060519054850](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DLA_Cluster.JPG&filetimestamp=20060519054850)

# Richardson-Diagramm



- Lewis Fry Richardson (1881 – 1953)
- Benoît Mandelbrot (1924 – 2010), *Science* 156(5):1967,636-638

# Massenskalisierung von fraktalen Aggregaten

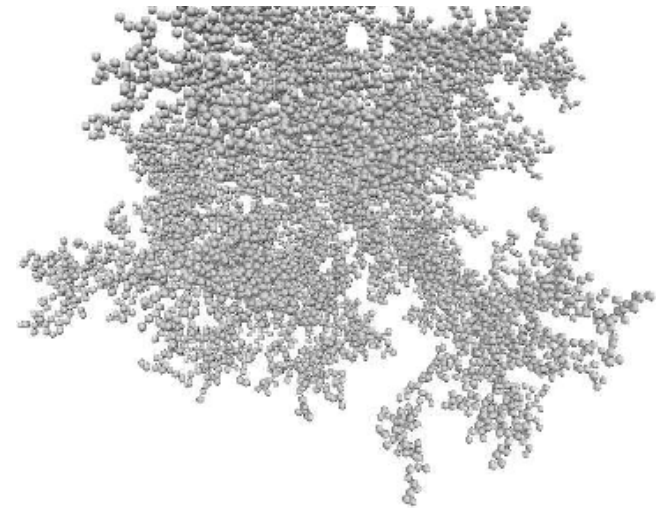
Massenskalisierung nicht-fraktaler Objekte:

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



Massenskalisierung von fraktalen Aggregaten:

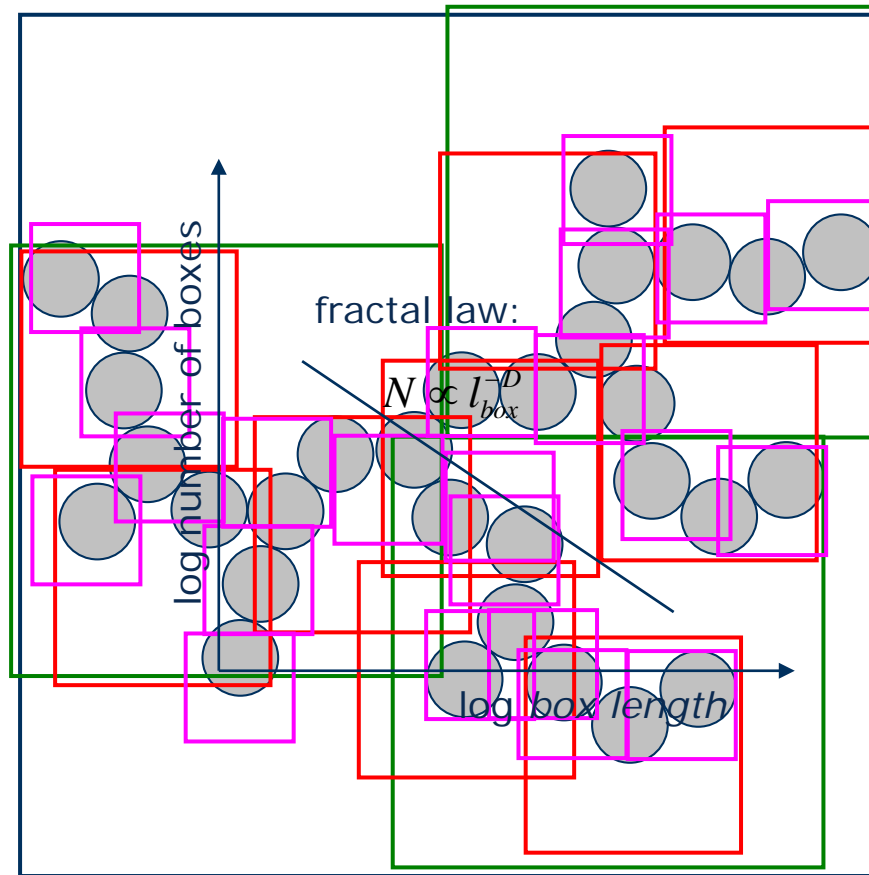
$$\frac{m_{agg}}{m_p} = N_{agg} = k_f \cdot \left( \frac{x_{g,agg}}{x_p} \right)^{D_f}$$



# Bestimmung der fraktalen Dimension

- experimentell an Aggregatsystemen:
  - aus Winkelverteilung von Streulicht
  - aus Korrelation von Äquivalentdurchmessern
- aus Bildanalyse an einzelnen Aggregaten
  - Box-counting (große Aggregate)
  - Paar-Korrelationsfunktion (große Aggregate)
- aus Simulationsexperimenten:
  - Box-counting
  - Wachstum ( $x_{\text{agg}}$  vs.  $N_{\text{agg}}$ )
- Konzept der Fraktalität versagt für kleine Aggregationszahlen!

# Box-counting



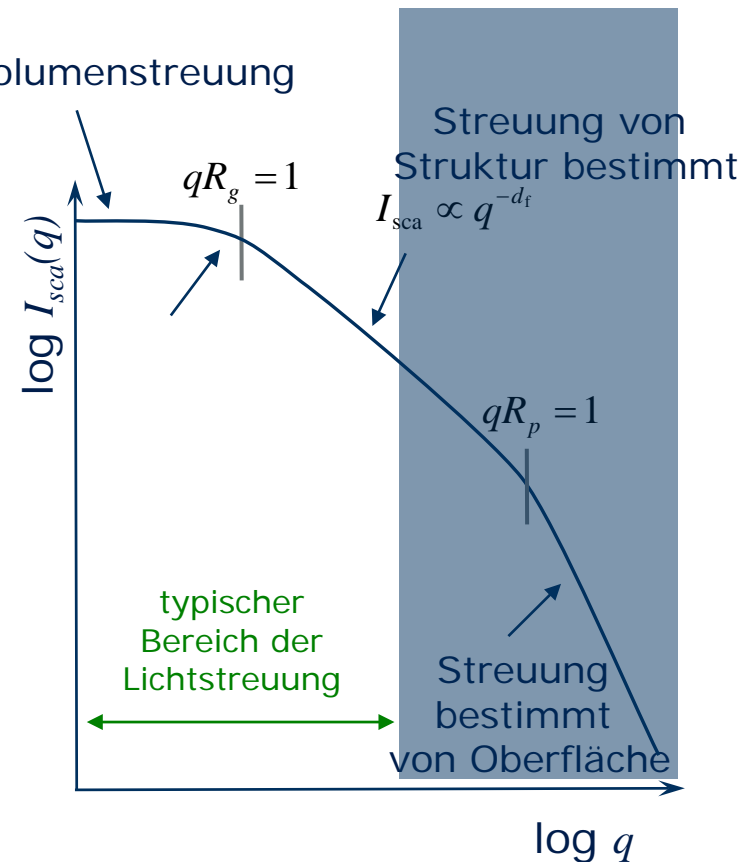
- fraktale Skalierung der Kästchenzahl
- eine andere Fraktalität als jene der Massenskalierung

# 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.  $\text{SiO}_2$ -Aggregate mit  $x_p \leq 100$  nm
  - z.B.  $\text{TiO}_2$ -Aggregate mit  $x_p \leq 50$  nm



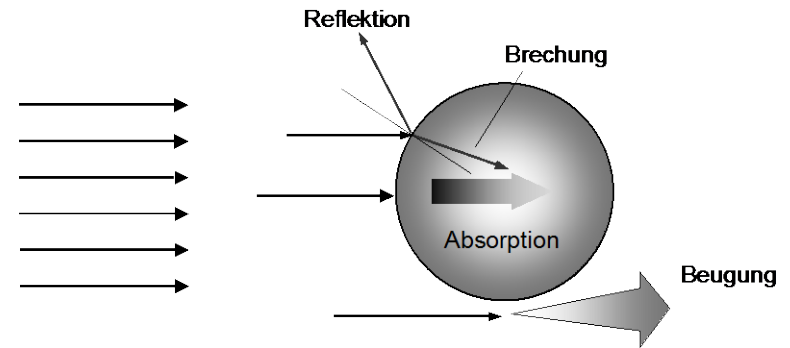
# 5. Theoretische Grundlagen

*– Berechnung der physikalischen Eigenschaften –*

# Optische Eigenschaften

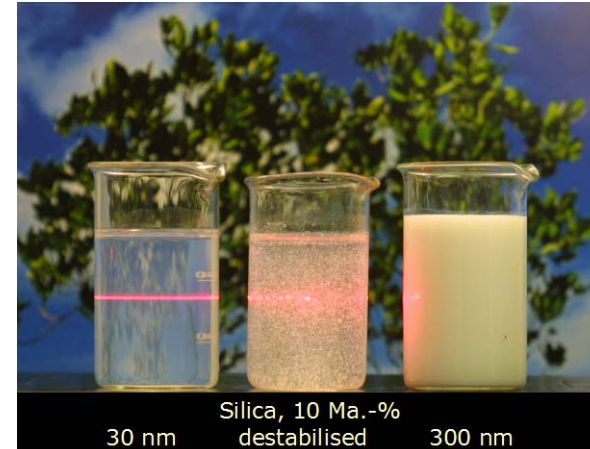
- des Einzelpartikels/-Aggregates

- Reflektion
- Brechung
- Beugung
- Absorption
- Streuung

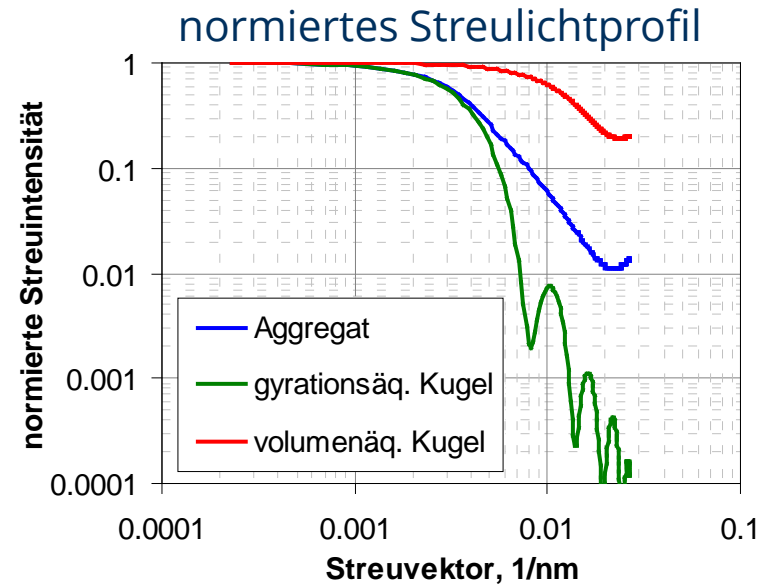
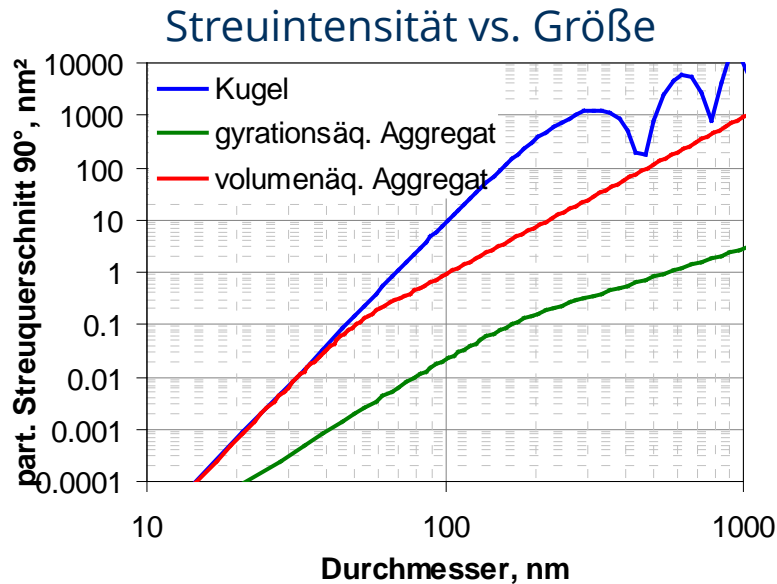


- des Partikelsystems

- Tyndall-Effekt
- Streuung
- Trübung/Opaleszenz/Extinktion
- Polarisation/Depolarisation
- Dekohärenz



# Vergleich von Aggregat und kompakter Kugeln



- Aggregatstreuung weniger stark als bei Äquivalentkugeln
- „glatte“ funktionale Abhängigkeiten von Größe und Streuwinkel

# Modellierung der Aggregatstreuung

- Streuung am Einzelpartikel:
  - Effekt: Überlagerung der Streufelder von jedem Volumenelement
  - Basis: Maxwell-Gleichungen
  - analytische Lösung durch Lorenz und Mie (Reihenentwicklung)
  - Näherungen/Grenzfälle, e.g. Rayleigh, Rayleigh-Debye-Gans
- Streuung am Aggregat:
  - Effekt: **Mehrfachstreuung** und **Interferenz** der Partikelstreufelder
  - neu: anisometrische Form → Orientierungsmittelung
  - analytische Lösungen → T-Matrix, verallgemeinerte Mie-Theorie (Xu ´95)
  - Vereinfachungen: keine Mehrfachstreuung; nicht-versinterte Kugeln → Rayleigh-Debye-Gans

# Rayleigh-Debye-Gans (RDG) Theorie

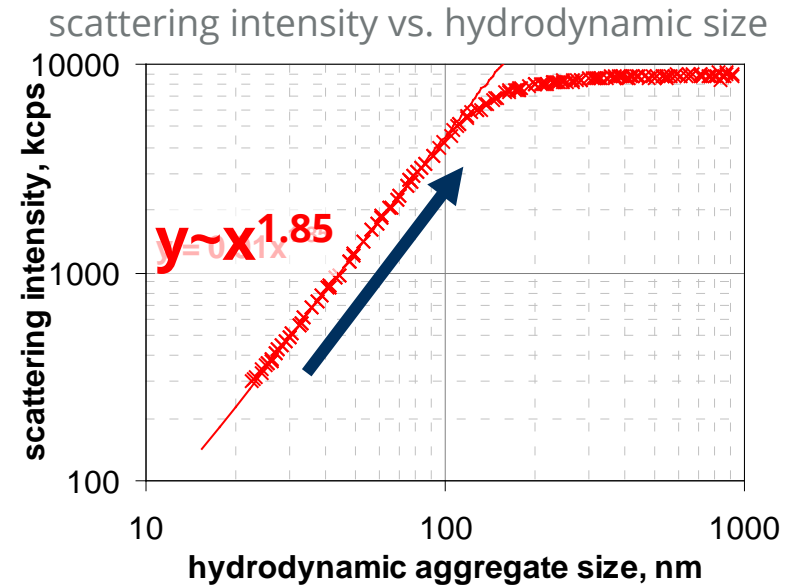
- RDG-Theorie
  - gültig für "kleine" Objekte mit "geringem" optischen Kontrast
  - Vorhersage für kleine Aggregate:

$$I_{\text{sca}} \propto c_{V,\text{solid}} \cdot x_{\text{agg}}^{d_f}$$

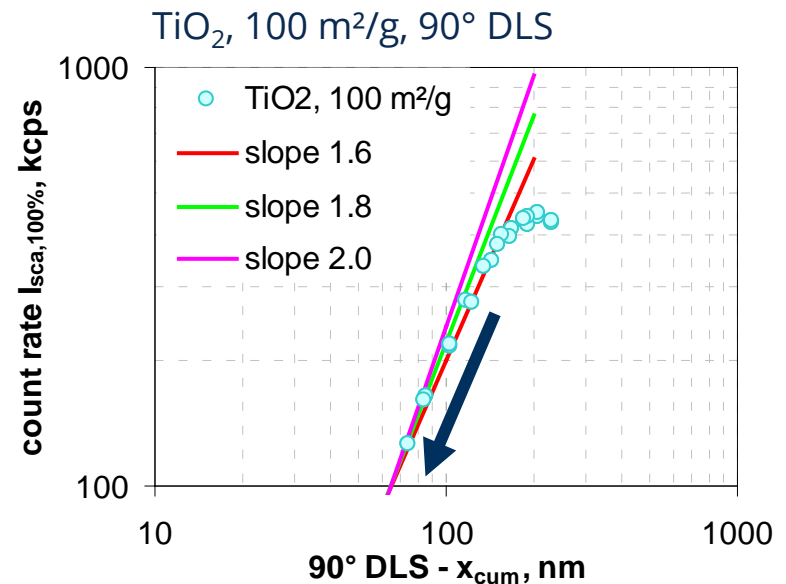
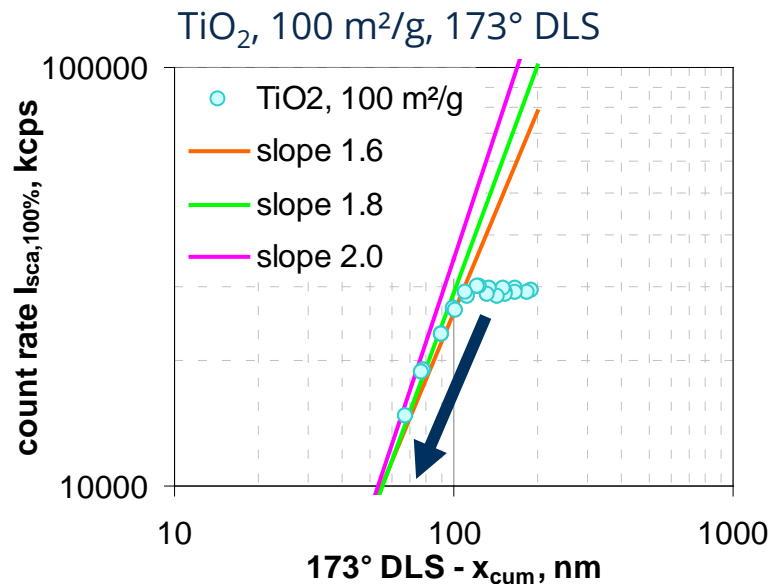
- Vorhersage für große Aggregate:

$$I_{\text{sca}} \propto c_{V,\text{solid}}$$

- Aggregationsexperiment
  - kolloidales SiO<sub>2</sub>, 5-7 nm
  - 0.1 Ma.-% in 9 Ma.-% NaCl
  - Messung mit DLS (173°)
- Experiment stützt theoretische Vorhersage



# Streuung an Aggregaten von pyrogenen Pulvern



Theorie ...

für kleine Aggregate:  $I_{sca} \propto c_{V,solid} \cdot x_{agg}^{d_f}$

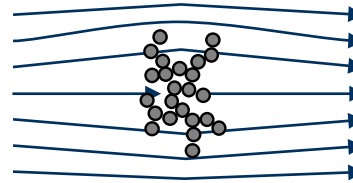
für große Aggregate:  $I_{sca} \propto c_{V,solid}$

wird vom Experiment gestützt ( $d_f \approx 1.8$ )

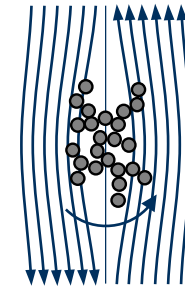
wird ebenfalls vom Experiment gestützt

# Mobilitätsbasierte Eigenschaften

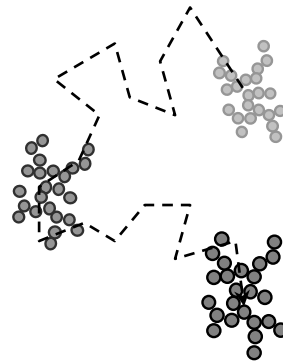
- der einzelnen Aggregate
  - hydrodynamische Kräfte & Drehmomente
  - Brownsche Bewegung
  - Migrationsgeschwindigkeit
  - Beschleunigung
- des Partikelsystems
  - Kollektivdiffusion
  - Zonensedimentation
  - Viskosität/Rheologie



hydrodynam.  
Widerstand



hydrodynam.  
Drehmoment



Diffusion

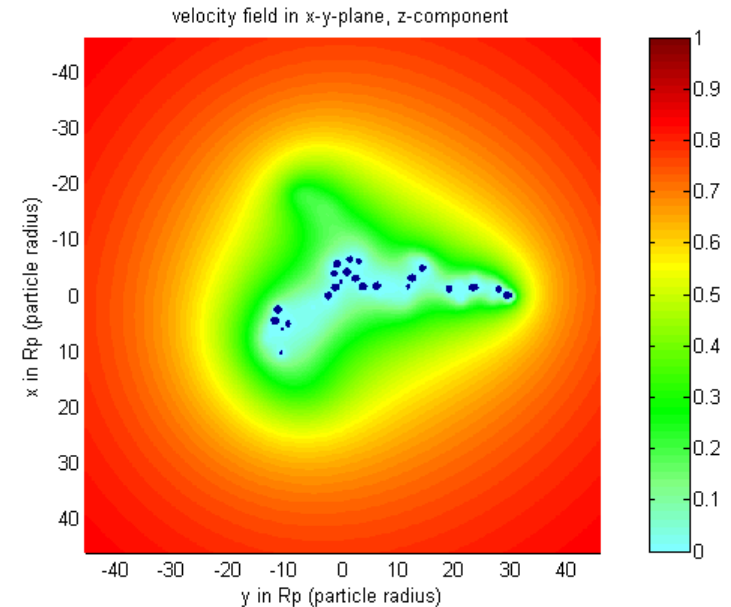


Sedimentation

# Modellierung der Aggregatmobilität

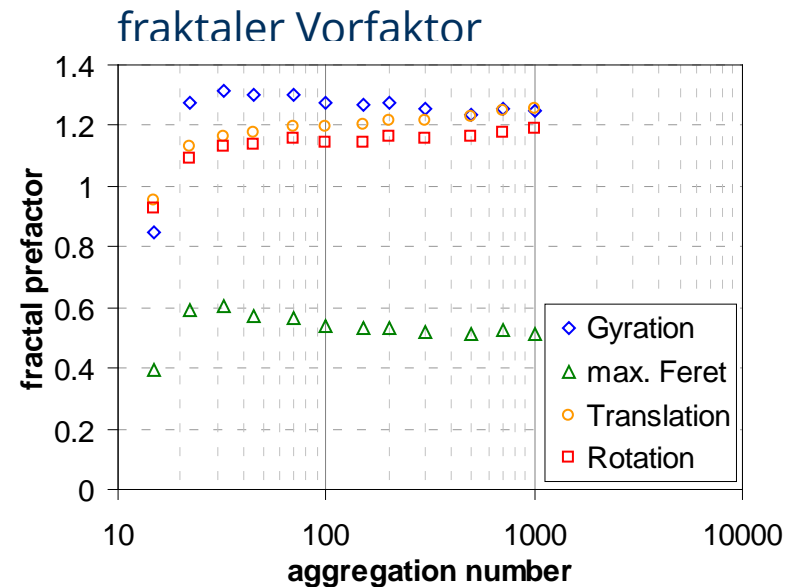
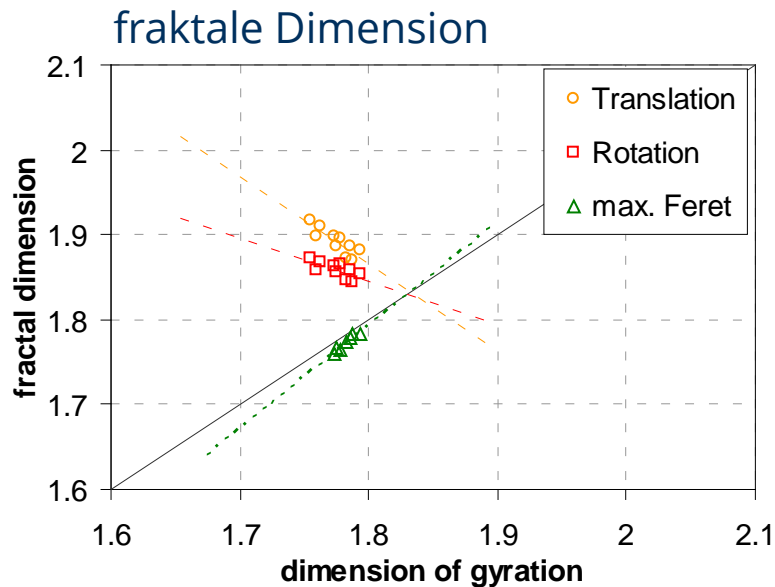
(Kätzel et al., *Part. Part. Syst. Charact.*, 25(1):9-18, 2008; Babick et al., *Powder Technol.*, 217:39-45, 2012)

- Ansatz:
  - Multipolentwicklung der hydrodynam. Felder bei Agglomeratdurchströmung
  - n. Filippov, *JCIS*, 229(1):184-195, 2000
- Vorteile:
  - genauer als approximative Ansätze wie Kirkwood-Riseman-Theorie
  - auch anwendbar im aerodynamischen Übergangsbereich
  - Software umfangreich erprobt
- aber: hoher Rechenaufwand



DLCA-Agglomerat, N= 150,  
Strömung in die Betrachtungsebene

# Hydrodynamik von DLCA-Aggregaten

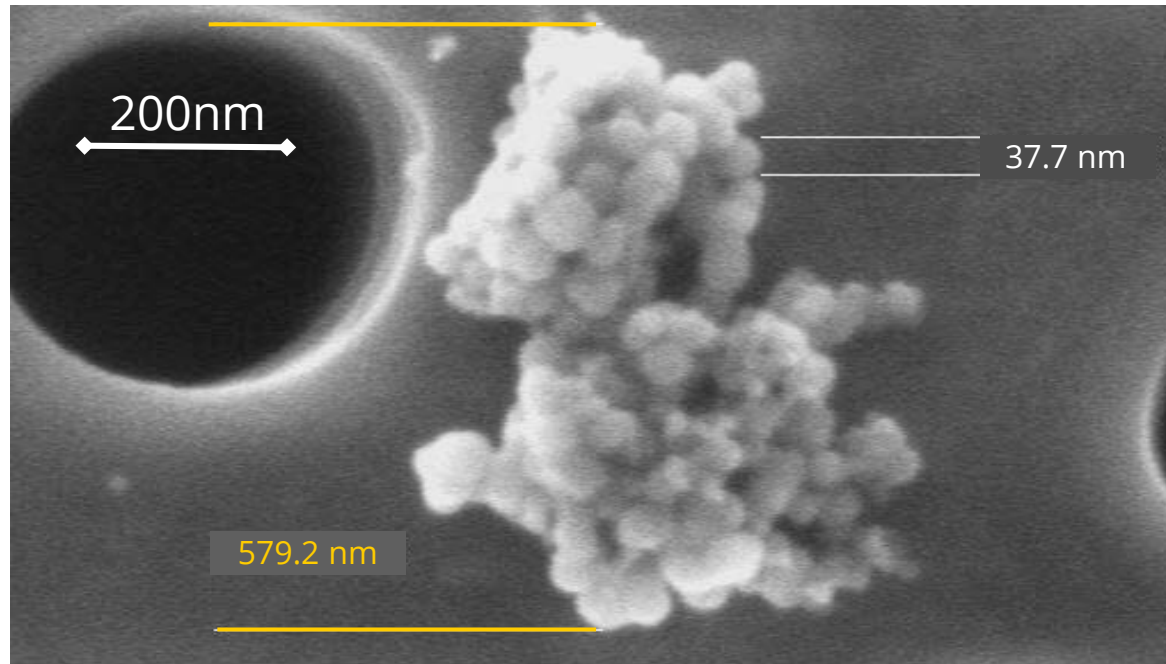


- hydrodynamische Äquivalentdurchmesser spiegeln Fraktalität
- fraktale Dimensionen konvergieren für große Aggregationszahlen
- hydrodynamische Dimensionen sind ähnlich

# 6. Messtechnische Relevanz

*– Partikelgrößenanalyse für nanostrukturierte Pulver –*

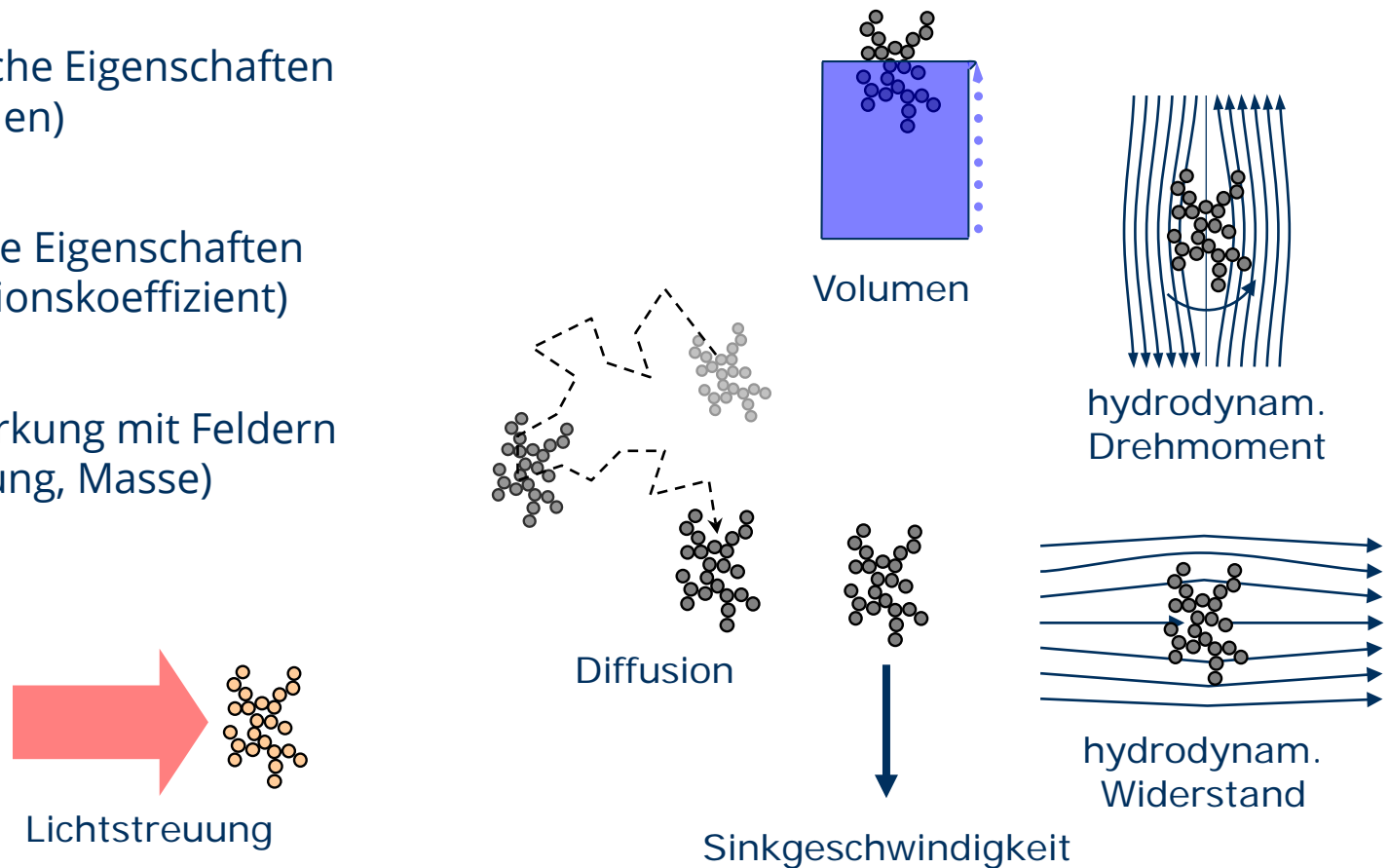
# Wie „groß“ ist das abgebildet Rußagglomerat?



- „Partikelgröße“: mehrere richtige Werte für ein Partikel möglich
- Gegenfrage: wofür wird dieser Wert gebraucht?  
(Sinkverhalten, katalytische Aktivität, Farbstärke)

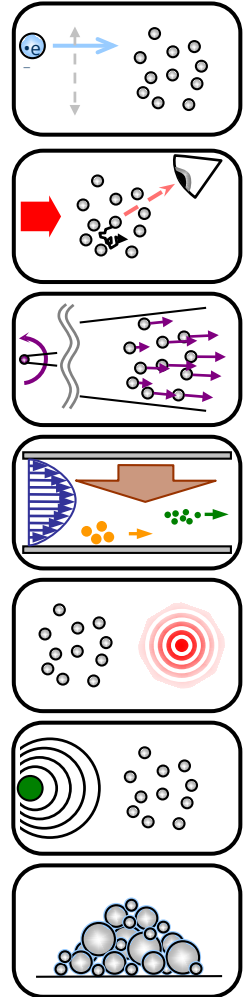
# Eigenschaften von Partikelaggregaten

- geometrische Eigenschaften (z.B. Volumen)
- dynamische Eigenschaften (z.B. Diffusionskoeffizient)
- Wechselwirkung mit Feldern (z.B. Streuung, Masse)



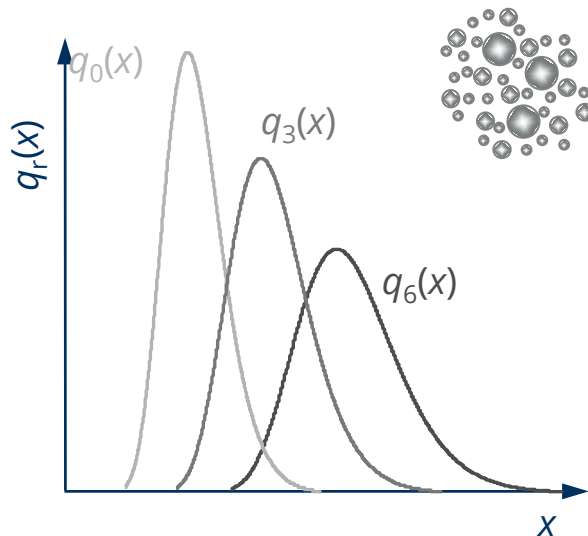
# Techniken zur granulometrischen Charakterisierung

- Bildanalyse
  - Rasterelektronen- / Rasterkraftmikroskopie (SEM / SFM)
- zählende & fraktionierende Techniken für Aerosole
  - Differentielle elektrische Mobilitätsanalyse (DEMA)
  - Flugzeitzähler (TOF)
  - Trägheitsabscheidung
- zählende & fraktionierende Techniken für Suspensionen und Emulsionen
  - Partikeltrajektorienanalyse (PTA)
  - Techniken der Feld-Fluss-Fraktionierung (FFF)
  - Analytische Zentrifugation (AC)
- spektroskopische Techniken
  - Dynamische Lichtstreuung (DLS)
  - Ultraschallspektroskopie (USSp)
  - winkelaufgelöste Lichtstreuung (ALS)
- integral Techniken
  - Gasadsorptionsanalyse nach BET-Methode



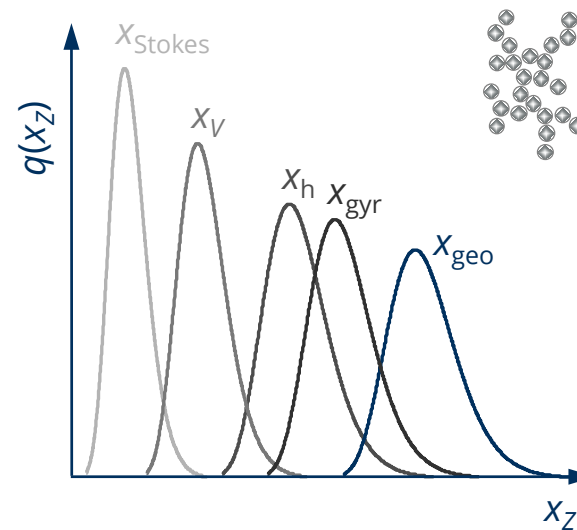
# Mengenart und Äquivalentdurchmesser

Einfluss der Mengenart  
(polydisperse Probe)



MA = kumulierbare Größe  
(z.B. Anzahl, Oberfläche, Masse;  
Trübung, Streuintensität)

Einfluss des Äquivalentdurchmessers  
(nicht-sphärische Partikel und Aggregate)

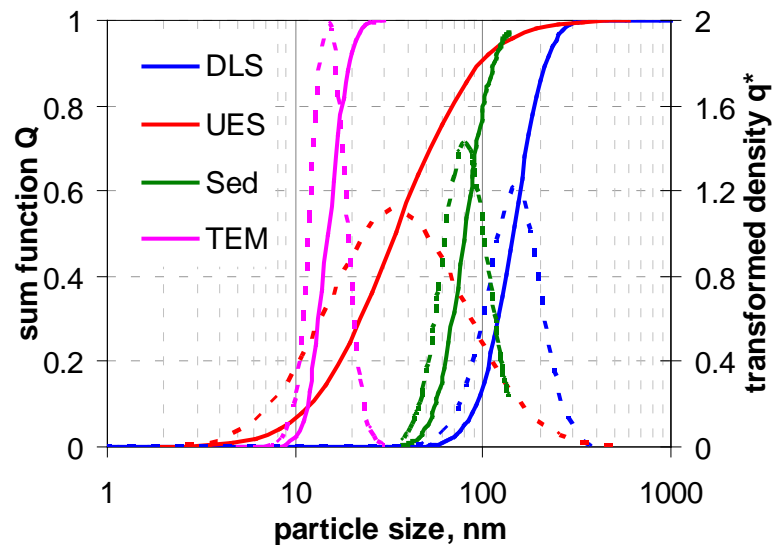


Äquivalentd. = Durchmesser einer  
Kugel, die dem Partikel in einem  
festgelegtem Merkmal gleich

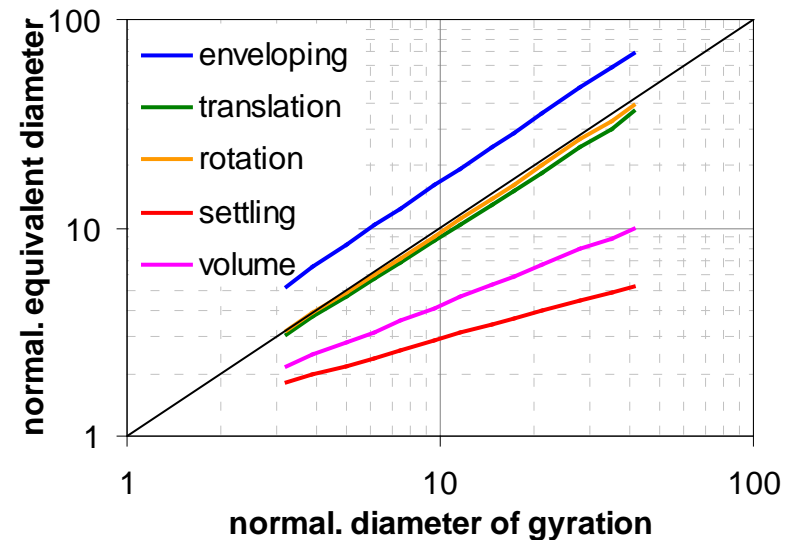
# Nanostrukturierte Pulver: Signifikante Abweichungen zwischen den Messtechniken

Hinze et al., *Chem. Ing. Tech.*, 72:322-332, 2000

Babick et al., *Part. Part. Syst. Charact.*, 29:104-115, 2012



Verteilung unterschiedlicher Äquivalentdurchmesser, gewichtet in unterschiedlichen Mengenarten

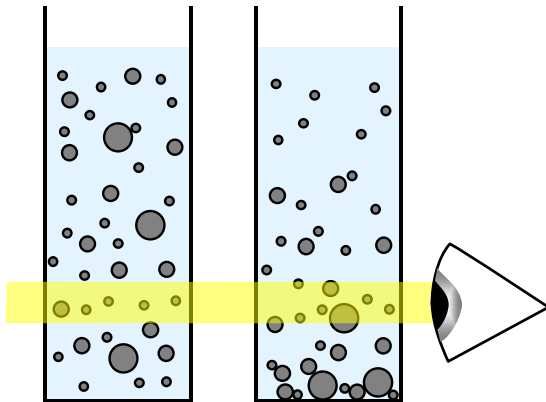


Vergleich der Äquivalentdurchmesser

# Ausgewählte Charakterisierungsmethoden

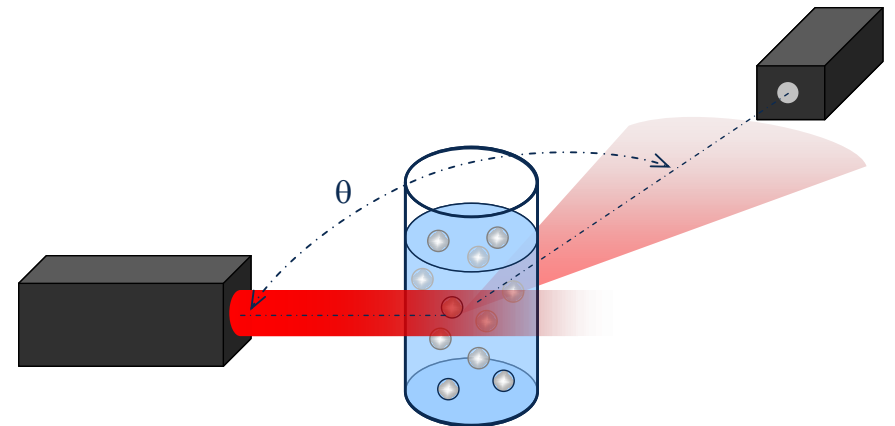
## Photosedimentation:

- Merkmal: Stokes-Durchmesser
- Wichtung: Lichtextinktion
- Konzentrationseinfluss!



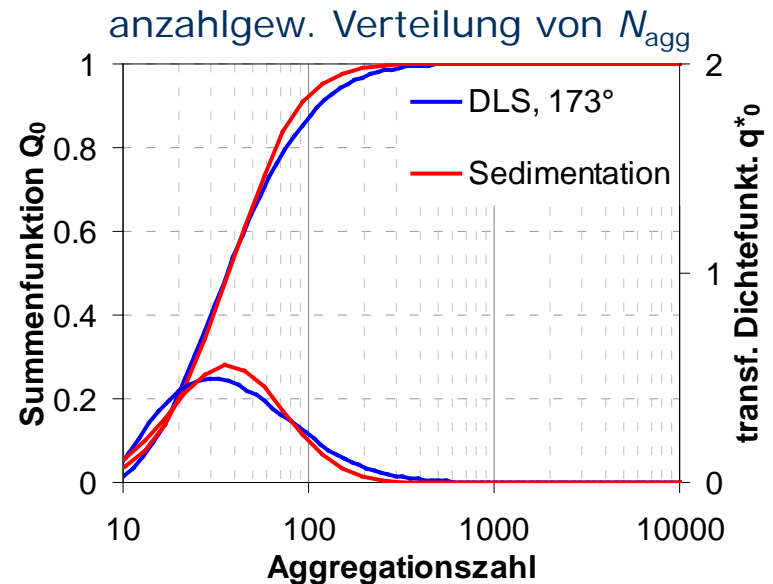
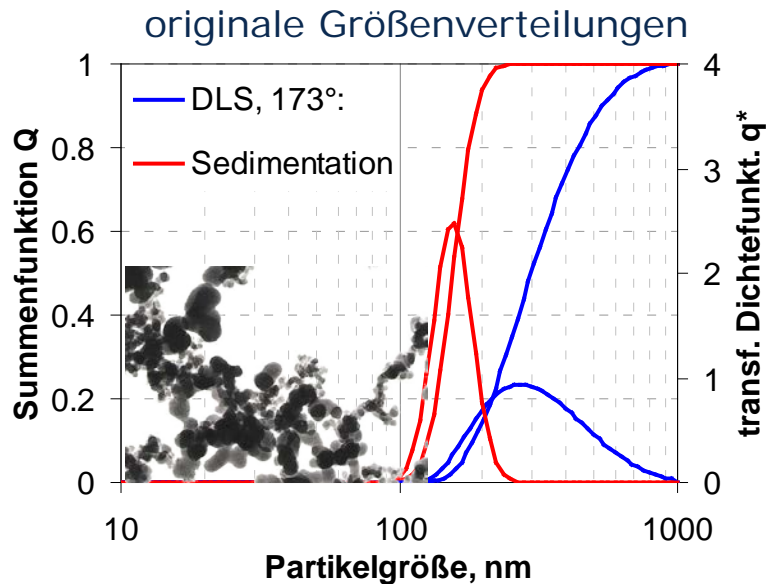
## Dynamische Lichtstreuung:

- Merkmal: hydrodyn. Durchmesser
- Wichtung: Streulichtintensität
- Beachte Partikelrotation!



# Messergebnis für pyrogenes SiO<sub>2</sub>

(Babick et al., *Part. Part. Syst. Charact.*, 29(2):116-127, 2012)

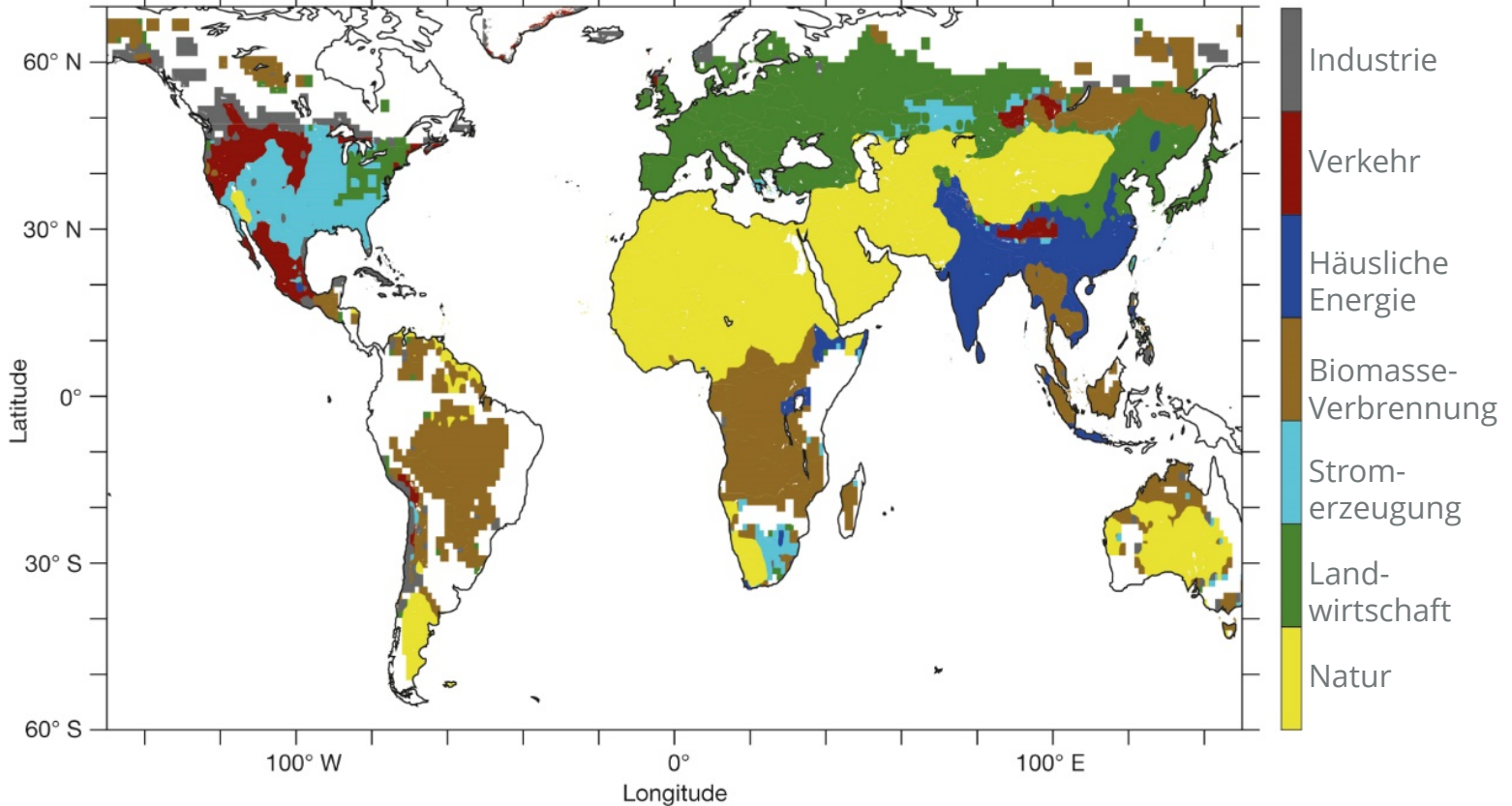


- pyrogenes SiO<sub>2</sub> 50 m<sup>2</sup>/g, Hintergrund: 0.001 M KNO<sub>3</sub>, pH 9
- Vorkenntnisse zur Auswertung: i) DLCA-Struktur →  $d_f = 1.8$ , ii) BET →  $x_p$

# 8. Staubung und Freisetzung

# Sterblichkeitsrate infolge atmos. Luftverschmutzung

Lelieveld et al., *Nature*, 525, 367-371, 2015; doi:10.1038/nature15371



- Verschmutzung: mineral. & kohlenstoffhaltiger Feinstaub,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$
- partikuläre Verschmutzung relevant: auch am Arbeitsplatz und im Haushalt

# Staubung und Freisetzung von feinen Partikeln

(Göhler & Stintz, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 617:012029, 2015)

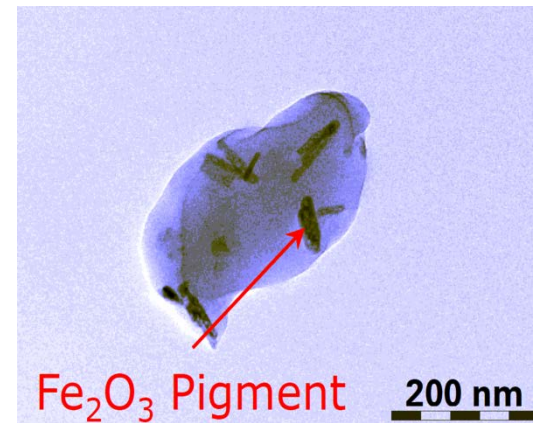
- “Staubung”verhalten
  - beliebte Kenngröße für Pulver
  - Messgrößen, Messbedingungen & Pulverbeanspruchungen variieren
  - oft basierend auf Massenanteilen und dem aerodynamischen Äquivalentdurchmesser
- MVT Dresden:
  - *Staubungskennwert* aus Partikelgrößenverteilung
  - bei definierter schwacher Beanspruchung und moderater Partikelkonzentration
  - nicht-invasive Partikelgrößenanalyse
  - muss ergänzt werden um anzahlbasierte Quantifizierung freigesetzter Feinstaubpartikel
  - **generell**: reale Beanspruchungsszenarien müssen bei Freisetzungsanalyse abgebildet werden



# Freisetzung von Nanopartikeln (bei Beanspruchung von Oberflächen)

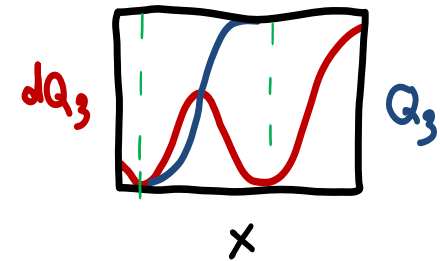
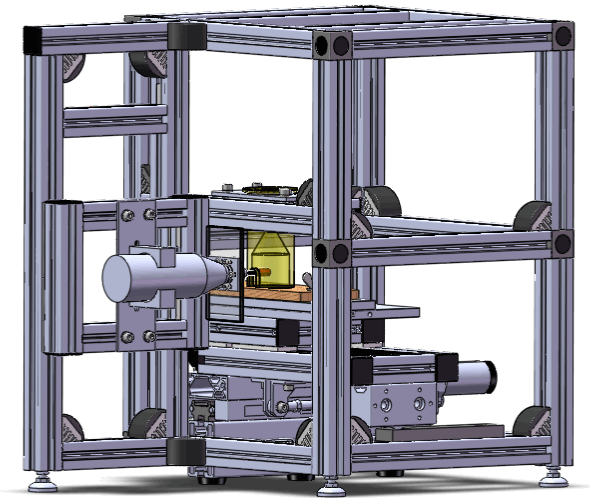


- Nanopartikel enthalten in
  - Autolacken
  - Anstrichfarben
  - Kompositwerkstoffen
- mögliche Freisetzung durch
  - Abrieb
  - Bohren, Fräsen, ...
  - Verwitterung der Matrix
- relevant weil
  - Gefährdung durch Nanopartikel noch nicht verstanden



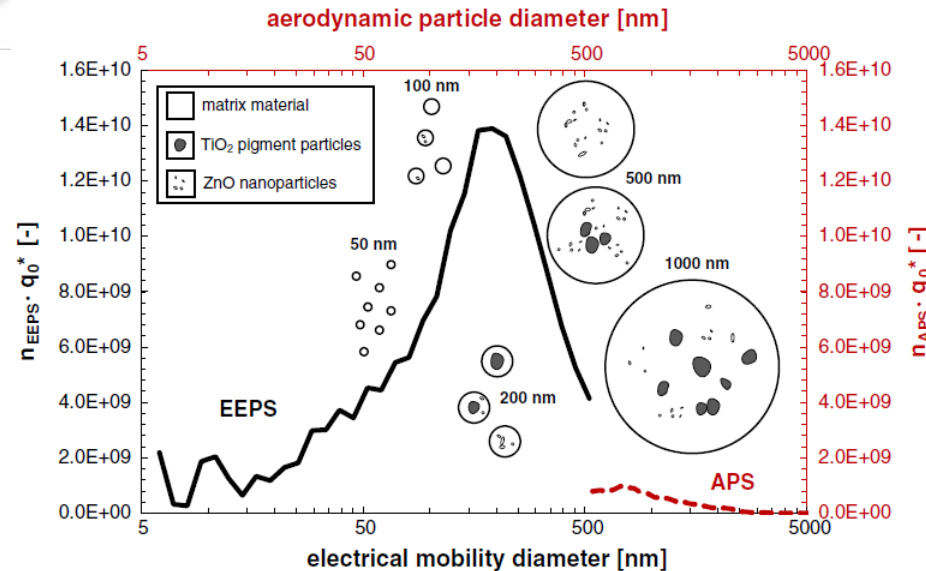
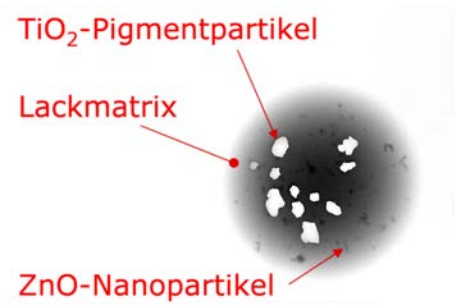
# Nachstellung von Beanspruchungsszenarien

- Versuchsaufbau:
  - Freisetzung + Aerosolmesstechnik



# Freisetzung von Partikeln beim Versprühen von Lacken

(Göhler & Stintz, *J. Nanopart. Res.*, 16:2520, 2014)



- Versprühen von Lacken mit nanopartikulären Additiven und Farbpigmenten
- Aerosolpartikel: Kompositpartikel aus Matrixmaterial und partikulären Zuschlägen

# Abschluss

# Zusammenfassung

- Fazit: umfangreiche Arbeiten zur Charakterisierung und Nutzung aggregierten Partikelsystemen an der MVT Dresden
- Voraussetzung:
  - Verständnis für Messtechnik, deren Verfügbarkeit
  - theoretische Analysen der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen
  - Standardisierung und Harmonisierung mit anderen Wissenschaftsbereichen
- Anschluss:
  - Staubung und Freisetzung, Ausbreitung und Exposition, toxikologische Studien
  - Stabilitätsbewertung und Vorhersage
  - Lichtausbreitung in nanostrukturierten Photokatalysatorschichten...
- Zukunft
  - physikalische Eigenschaften von dicht gepackten Suspensionen/Partikelschichten (z.B. Streuung, Permeabilität, Homogenität)
  - nichtsphärische Primärpartikel
  - mehrparametrische Darstellung des Dispersitätszustandes

# Doktoranden und Beststudenten



Uwe Kätzel: Charakterisierung pyrogener Pulver



Karin Schießl: Berechnung der Wechselwirkung zwischen Aggregaten



Edith Willmes: optische Eigenschaften von Stäbchenaggregaten



Lena Schricker: Cunningham-Korrektur für Nanopartikelaggregate



Karina Paciejewska: Suspensionsstabilität von Nanomaterialien



André Nogowski: Charakterisierung von Nanopartikeln in Böden und Fließgewässern



Renato Retamal Marín: nanostrukturierte Materialien in Formulierungen der Lebensmittel und Kosmetikindustrie



Christian Ullmann: nanostrukturierte Materialien in Formulierungen der Farben und Lacken



Lars Hillemann: Charakterisierung von Aerosolen



Daniel Göhler: Freisetzung, Ausbreitung und Exposition von Nanomaterialien



Lê Hoài Nga: nanostrukturierte Photokatalystoren in Suspensionsreaktoren



PHAN Duy Dũng: nanostrukturierte Photokatalystoren in Membranreaktoren



***Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!***