NETZSCH

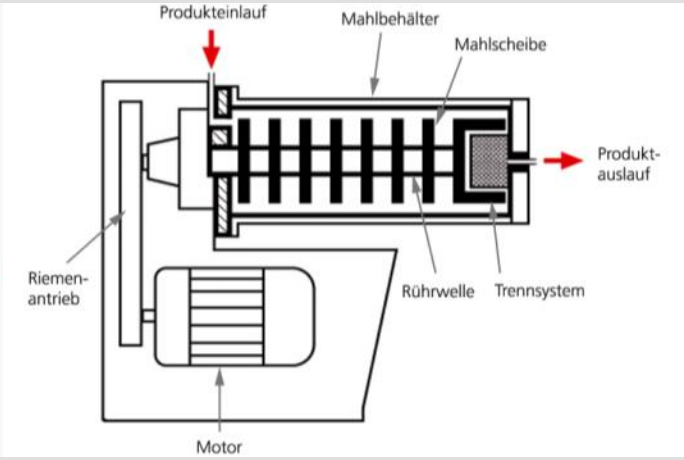
Numerische Berechnung der Mahlkörperbewegungen in einer Rührwerkskugelmühle mit dem DEM-Modell

ANSYS Conference & 33rd CADFEM Users' Meeting
Juni 24 – 26, 2015, Messe Bremen

Witali Sudermann

Unternehmen

- NETZSCH-Gruppe - Mahlen & Dispergieren
  - Nass- und Trockenmahlen, Mischen, Dispergieren, Entlüften und Sichten
    - Keramik und Glas,
    - Lebensmittel (z.B. Kakaomassen),
    - Druckfarben, Pigmente und Farbstoffe,
    - Farben und Lacke (z.B. Dispersionsfarben, Holzlacke, Klarlack),
    - Erze, Mineralien und Metalle
- NETZSCH Feinmahltechnik GmbH, Selb

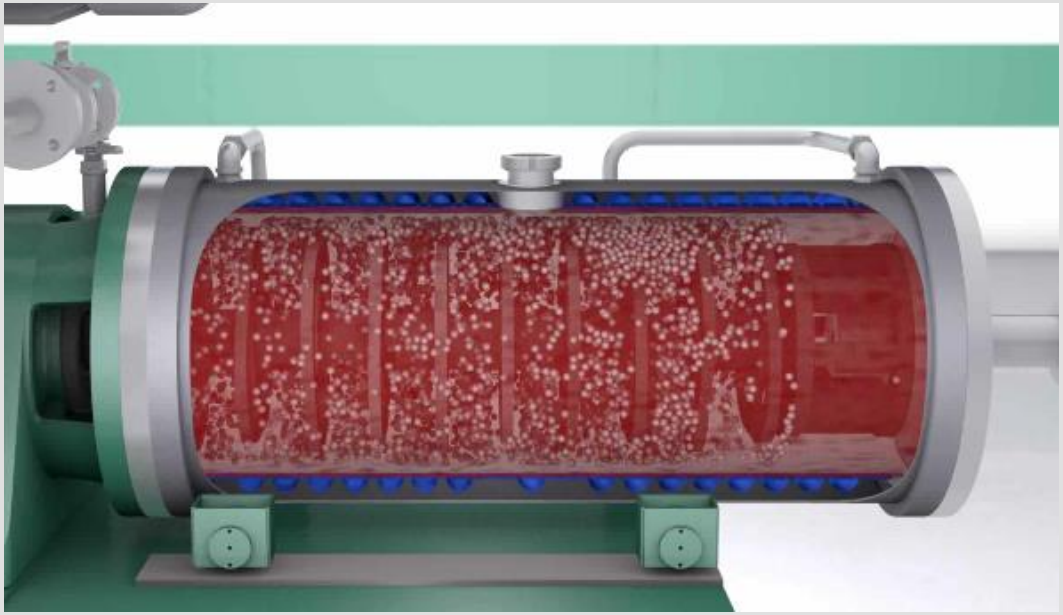


horizontale Rührwerkskugelmühle [Net12]

Ziel der Arbeit

- numerische Strömungssimulation
  - Aufbau eines Modells zur Beschreibung aller erforderlichen physikalischen Vorgänge der Mahlkörper in einer Rührwerkskugelmühle
  - Durchführung der Berechnungen mit ANSYS Fluent 15.0

- Versuchsdurchführung
  - praktische Versuche an einer Rührwerkskugelmühle LME20
  - Abgleich der CFD-Berechnungen mit der Realität

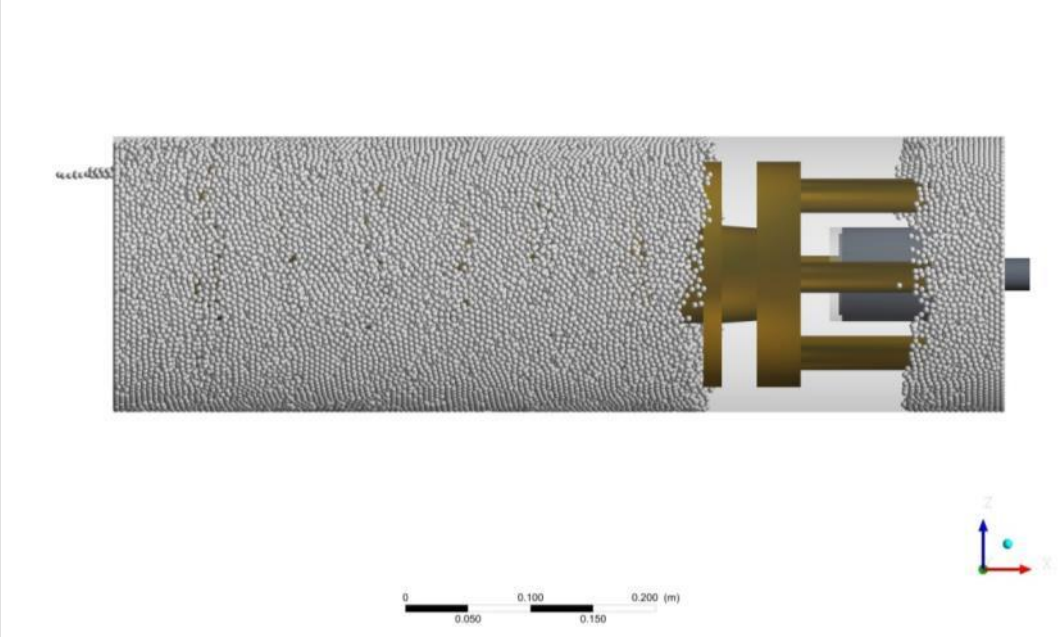


Funktion einer Rührwerkskugelmühle [Net12]

Vergleich Praxis und Simulation

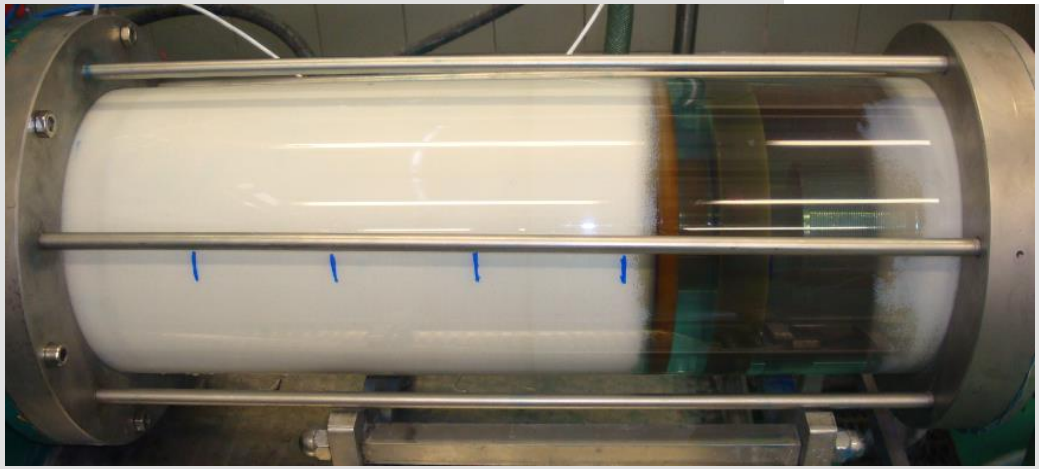
NETZSCH

- LME20
  - zentrische Scheiben
  - Rotor mit runden Stiften
  - Mahlbehälter: 20 Liter
  - Füllgrad: 60%
  - MK: ZrO2 d=1
  - Drehzahl: 1378 min-1
  - Durchsatz: 500 L/h
  - Fluid: Wasser



Simulation

Praxisversuch

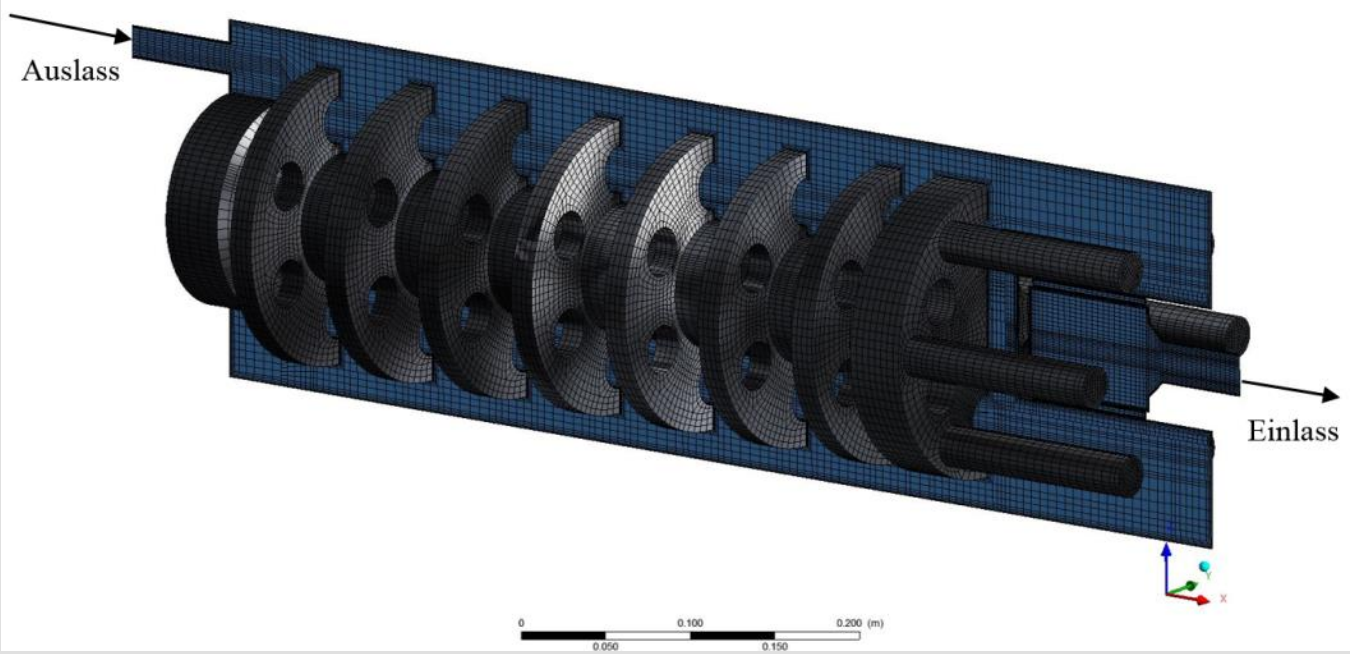


Numerische Berechnungen

NETZSCH

- Rechengitter
  - ca. 635.000 Hexaeder
  - drei Teilgitter
  - Kopplung der Gitter durch „Interfaces“
  - Stator-Rotor-Prinzip
  - Randschichtauflösung bezüglich des k-omega-SST-Modells

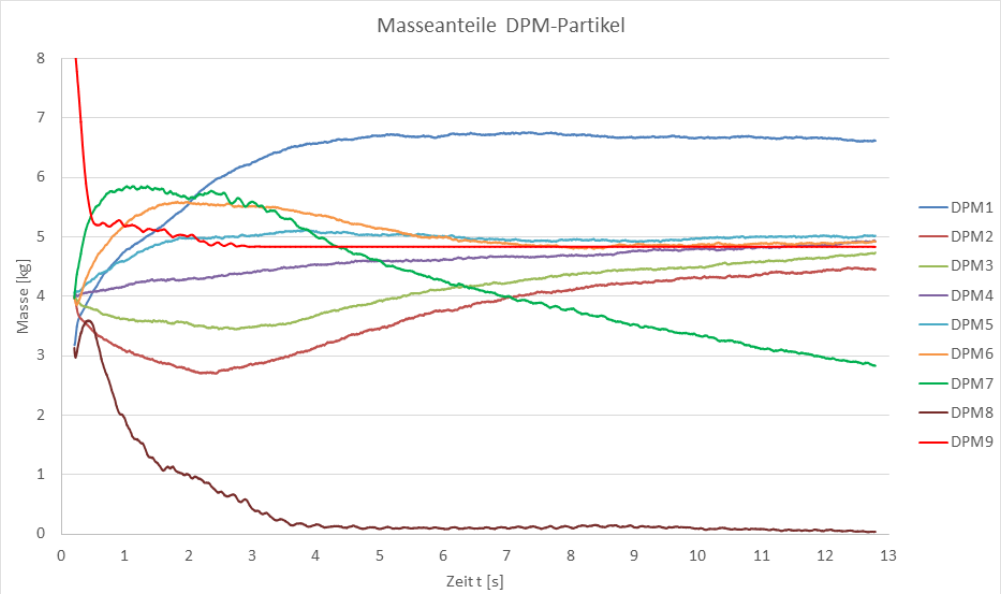
- Vernetzungstool
  - ICEM CFD

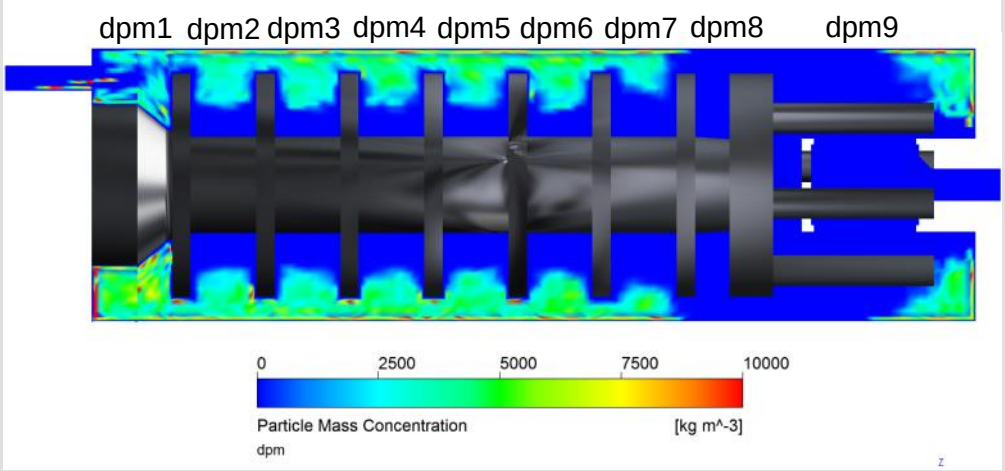


Rechengitter LME20

Konvergenzanalyse

- Berechnung der Mahlkörperbewegungen
  - Anzahl der Pakete: 300.000
  - Anzahl der Mahlkugeln: ca.12 Mio.
  - Rechendauer: 2 Wochen
  - Kapazität: 32-Kerne





Masseanteile und Verteilung der Mahlkörper in den Vermahlungs-kammern

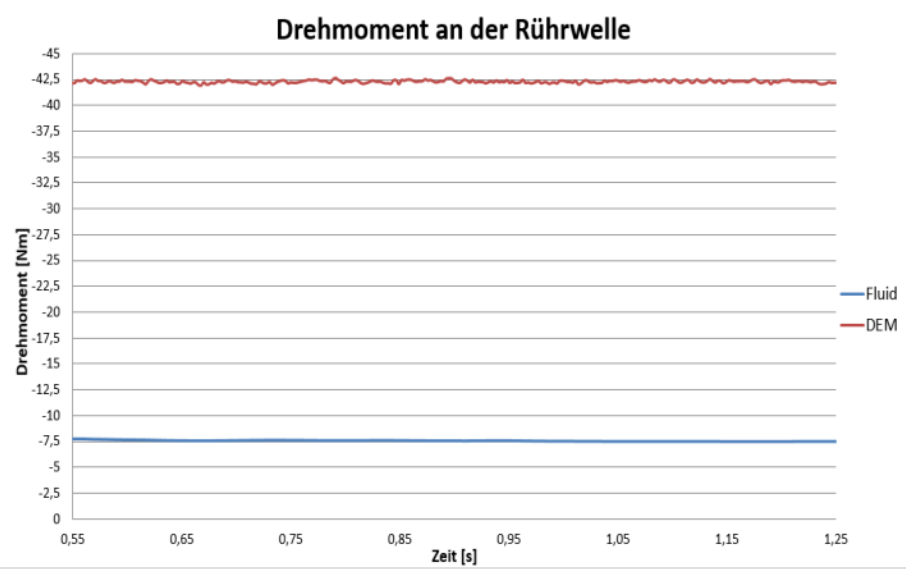
Vergleich Praxis und Simulation

NETZSCH

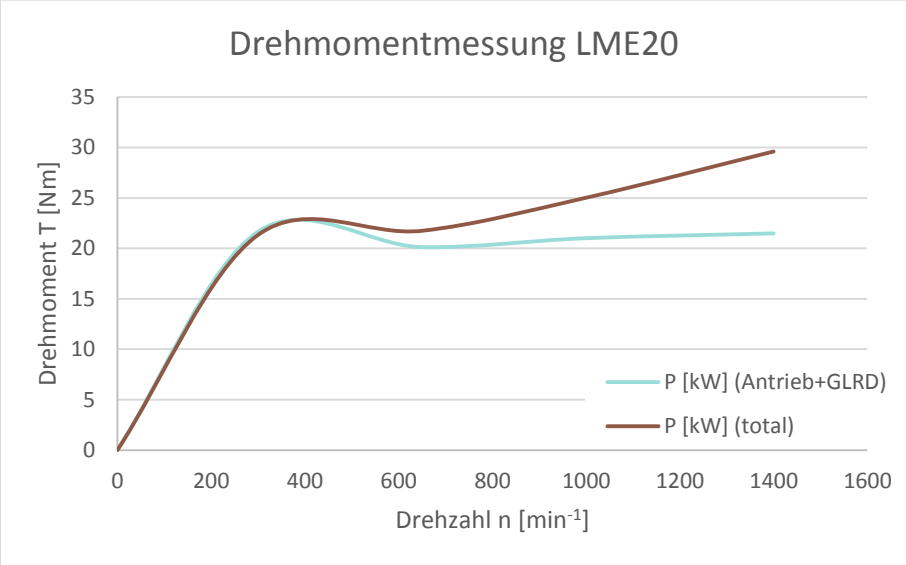
- Drehmoment an der Rührwelle
  - Drehzahl: 1378 min^{-1}

	ohne Mahlkugeln	mit Mahlkugeln
Drehmoment (Versuch)	8,1 Nm	33,1 Nm
Drehmoment (CFD)	7,6 Nm	42,3 Nm

CFD-Ergebnisse zu Drehmoment



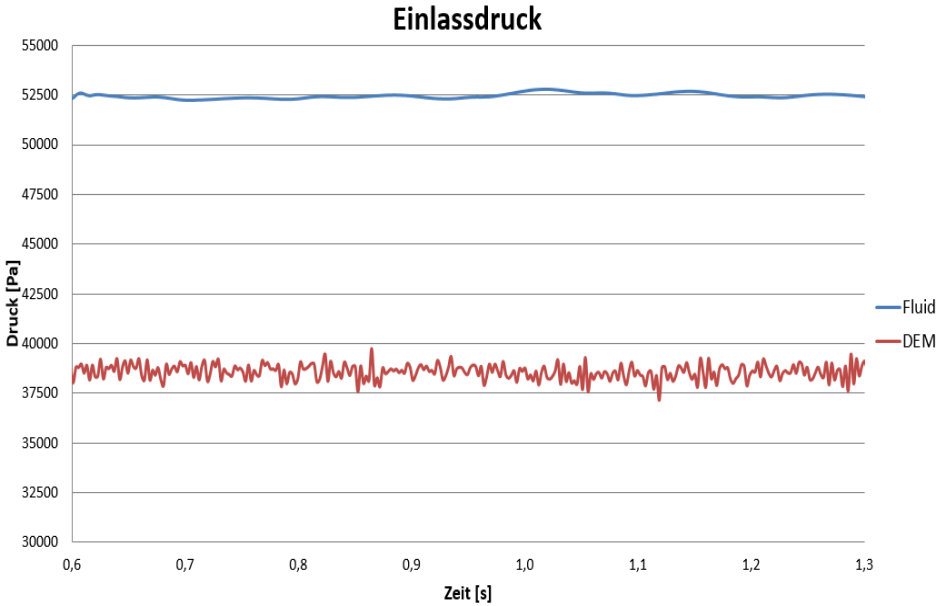
Drehmomentkennlinie im Leerlauf (Praxis)



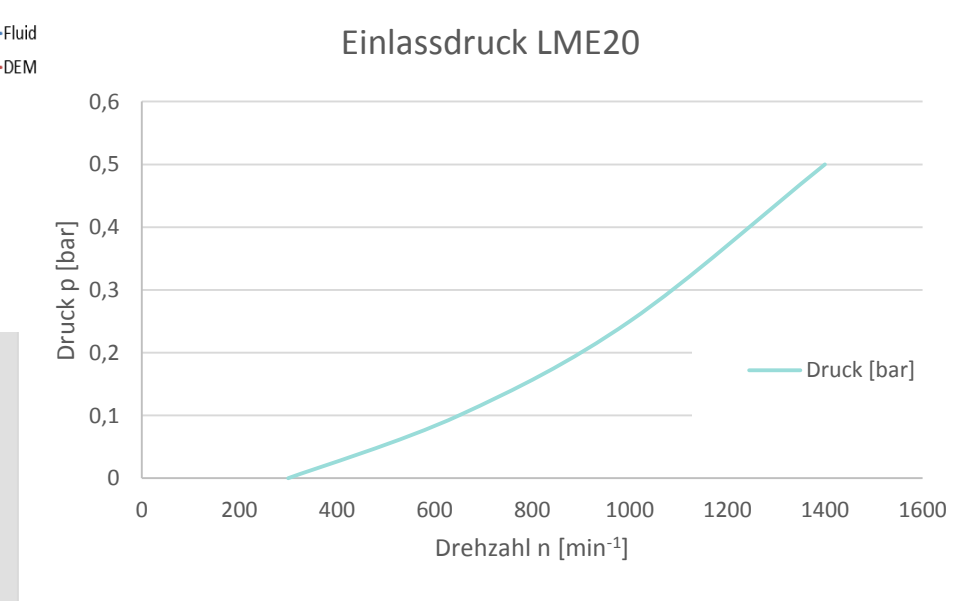
Vergleich Praxis und Simulation

NETZSCH

- Einlassdruck
  - Drehzahl: 1378 min^{-1}
  - Produktdurchsatz: 500 l/h

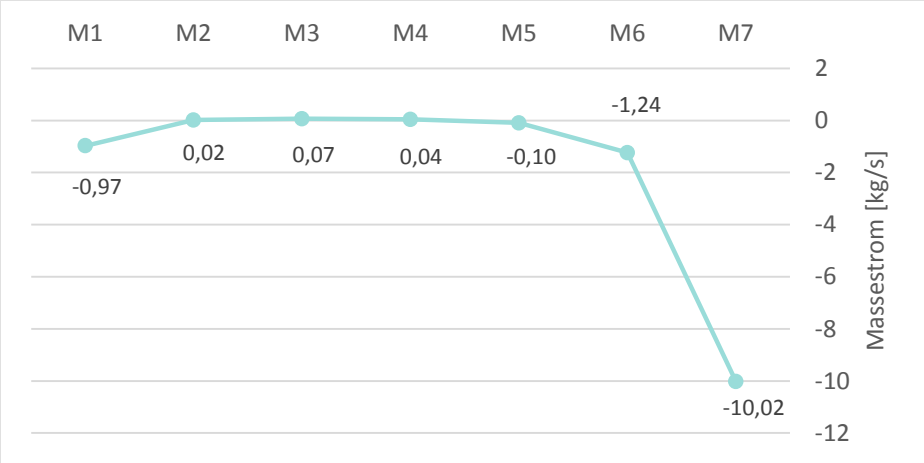


Druckausbildung am Einlass (CFD-Berechnung)



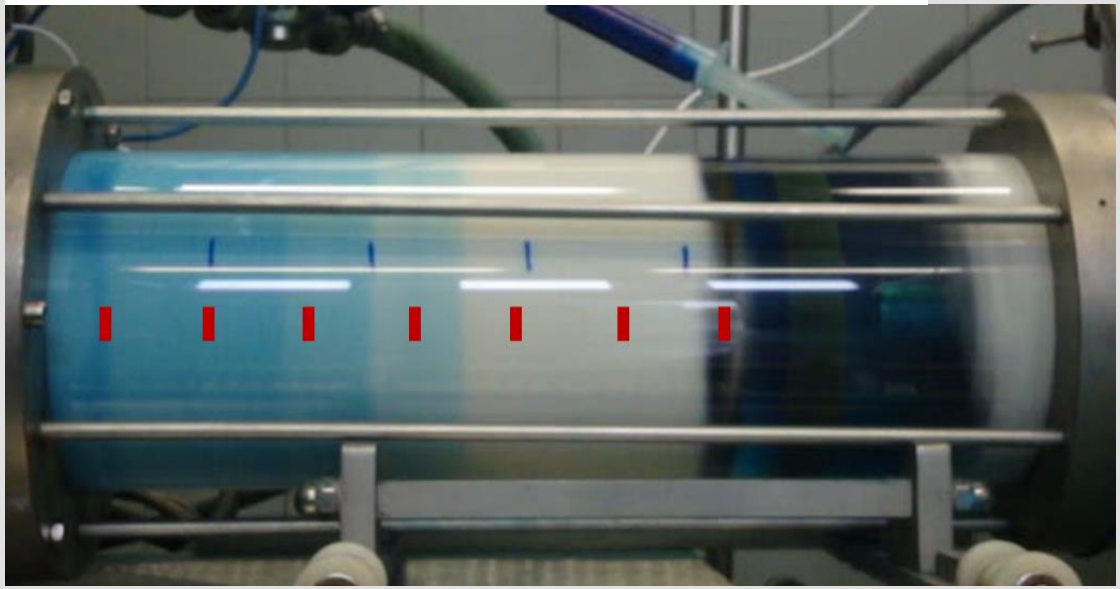
Druckverlauf am Einlass der LME20 in Abhängigkeit von der Drehzahl (Praxis)

Massestrome



Massestrome am äußeren Strömungsquerschnitt der Mahlscheiben

– Produktdurchsatz: 0,139 kg/s (= 500 kg/h)



Farbtest im Betrieb

Modellbildung der dispersen Phase

NETZSCH

- Partikelmodelle (ANSYS Fluent)
  - diskrete Partikel Methode (DPM)
    - Basis für weitere Partikelmodelle
    - Volumenanteile der Partikelphase sollen weniger als 10 – 12 % betragen
    - Ungeeignet für flüssig-flüssig Gemische
    - Beispielanwendungen: Sprühtrocknen, Sedimentationsvorgänge, …
  - diskrete Elemente Methode (DEM)
    - wird als Kollisionsmodell genannt
    - Berücksichtigung der dynamischen Effekte zwischen den Partikeln
    - für dichte Partikelphase geeignet, bei denen die Kollisions- und Kontaktdominanz überwiegt
    - Verdrängung des Trägermediums wird vernachlässigt
  - dichte diskrete Partikel Methode (DDPM)
    - basiert auf dem Euler-Ansatz
    - kann als Erweiterung beim DEM-Modell eingesetzt werden
    - Berücksichtigung der Volumenanteile

Modellbildung der dispersen Phase

NETZSCH

- Diskrete Elemente Methode (DEM)
  - Ist eine Erweiterung des DPM-Modells
  - Partikel werden als bewegte Massepunkte ($V_p = 0$) angenommen und haben keine Auswirkungen auf die Verdrängung des Trägermediums ($\alpha_c \rightarrow 1$)
  - bis ANSYS Fluent 16.0 erfolgt keine Berücksichtigung der Rotationsbewegungen
  - Vernachlässigung der Grenzschichtströmung sowie der Wirbelablösung an den Partikeln

- Impulserhaltungsgleichung

$$m_p \frac{\partial \boldsymbol{u_p}}{\partial t} = \boldsymbol{F}_{n,k} + \boldsymbol{F}_{t,k} + \sum \boldsymbol{F}$$

  - Ergänzung der Impulserhaltungsgleichung durch Normal- und Tangentialkraft
  - Einsatz des „soft sphere“ Modells zur Ermittlung der Normalkräfte

Modellbildung der dispersen Phase

NETZSCH

- „soft sphere“ Modell
  - vereinfachtes Kollisionsmodell
  - Ermittlung der Überlappung δ als eine Größe für die Verformung eines Kollisionspaares
  - Feder-Dämpfer-System

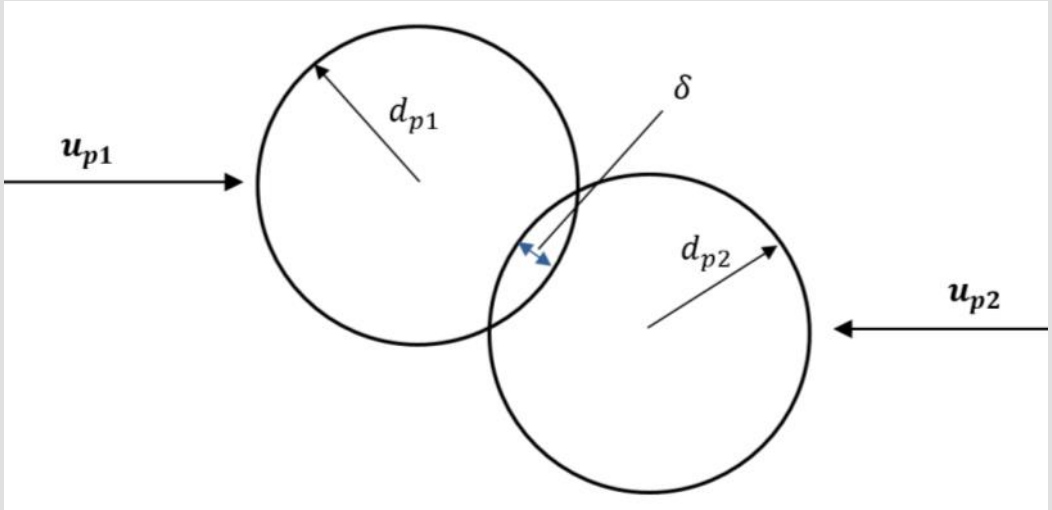
$$\rightarrow \boldsymbol{F}_1 = \left[k\delta + \eta_F\left(\boldsymbol{u}_{p,12} \cdot \boldsymbol{e}_{12}\right)\right]\boldsymbol{e}_{12}$$

- Ermittlung der Federkonstante
  - nach ANSYS [ANS12]

$$k = \frac{1}{12}\frac{\pi \boldsymbol{u}_{p,12}^2}{\varepsilon_d^2} d_p \rho_p$$

  - nach Hertzsche Kontaktheorie

$$\tilde{k} = \frac{\sqrt{2r_p}E}{3(1-\sigma^2)}$$



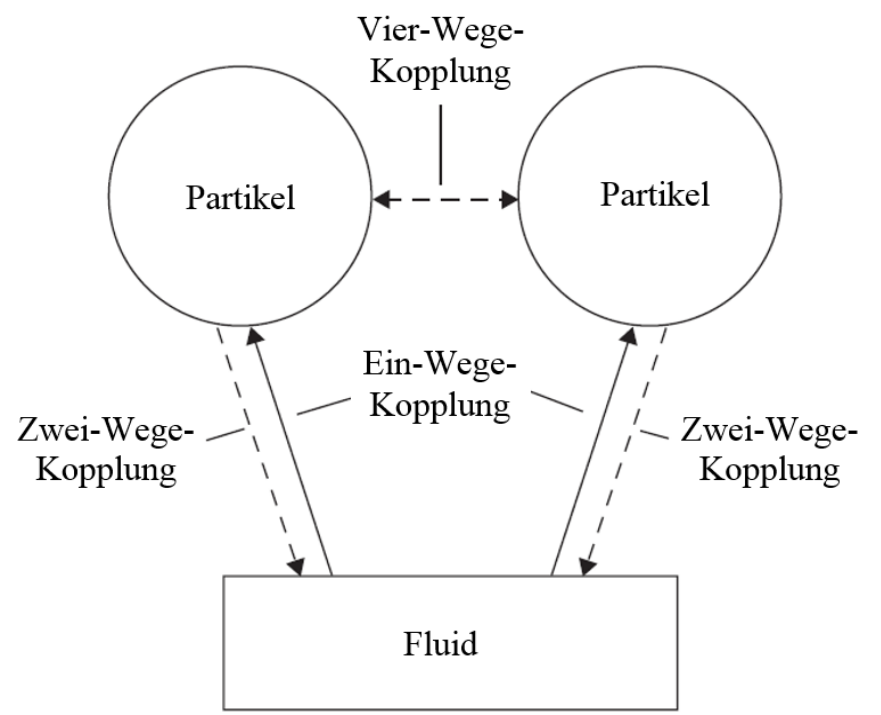
Deformation eines kollidierenden Partikelpaares (angelehnt an [ANS12])

Modellbildung der dispersen Phase

- Phasenkopplung
  - Zwei-Wege-Kopplung
    - Wechselwirkungen zwischen der kontinuierlichen und dispersen Phase
    - Implementierung des Rückimpulses als Quellterm in die NSG

$$\boldsymbol{F} = \sum \left(\frac{18\mu C_w Re}{\rho_p d_p^2 24} \left(\boldsymbol{u}_p - \boldsymbol{u}_c \right) \right) \dot{m}_p \Delta t$$

  - Vier-Wege-Kopplung
    - Entspricht dem Kollisionsmodell
    - Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln



Kopplungsarten (angelehnt an [Cro05])

Zusammenfassung

- das DEM-Modell ermöglicht realitätsnahe Abbildung der Mahlkugelbewegungen
- ermöglicht einen Einblick in den Vermahlungsprozess
  - Analyse des Strömungsverhaltens
  - Mahlkugel- und Kollisionsverteilung

- Die Genauigkeit der Mahlkugelverteilung ist von der Diskretisierung der Partikelphase abhängig
- Das Verhalten der Mahlkörper ist von der Federkonstante und den Reibbeiwerten abhängig
- Die Größe der Partikelpakete und Gitterelemente müssen gegenseitig abgestimmt werden
- Die Gittererzeugung ist mit einem sehr hohen Aufwand verbunden

Ausblick

NETZSCH

Hard- und Software

- CFD-Rechencluster mit 32 CPUs und 512 GB RAM
  - Auslastung des Rechners bei 50 Mio Partikeln bis ca. 80%
- Erweiterung des Rechners auf 64 CPUs

- Durchführung der Berechnungen mit ANSYS Fluent 15.0
  - Update auf Fluent 16.0 → 17-fache Rechenbeschleunigung bezüglich des DEM-Modells
  - zum Teil eine vollständige Auflösung der Partikelphase möglich

Ziel

- Einbindung der CFD-Berechnungen in die Entwicklungsphase
- Funktionsnachweis und Optimierung vor dem Prototypenbau
- numerische Versuchstechnik

  → zuerst rechnen und dann Prototypenbau

Kontaktdaten

NETZSCH

Feinmahltechnik GmbH

Sedanstraße 70

95100 Selb

Tel.: +49 9287 797-278

E-Mail: witali.sudermann@netzsch.com

Homepage: www.netzsch.com

Unterstützt durch

CFX Berlin Software GmbH

Karl-Marx-Allee 90A

10243 Berlin

Quellen

[ANS12] **ANSYS, Inc.** *ANSYS FLUENT Theory Guide.* Canonsburg, USA : s.n., 2012

[Cro05] **Crowe, Clayton T.** *Multiphase Flow Handbook.* Boca Raton : CRC Press, 2005

[Dur06] **Durst, Franz.** *Grundlagen der Strömungsmechanik - Eine Einführung in die Theorie der Strömungen von Fluiden.* Erlangen : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

[Mar11] **Martin, Helmut.** *Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik - Grundlagen und Methoden.* Berlin : Springer-Verlag, 2011

[Net12] **Netzsch-Feinmahltechnik GmbH.** [Online] www.netzsch.com

[Pas04] **Paschedag, Anja R.** *CFD in der Verfahrenstechnik - Allgemeine Grundlagen und mehrphasige Anwendungen.* Weinheim : WILEY-VCH Verlag, 2004

[Sch12] **Schwarze, Rüdiger.** *CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen.* Freiberg : Springer-Verlag, 2012

[Yeo10] **Yeoh, Guan Heng und Tu, Jiyuan.** *Computational Techniques for Multi-Phase Flows.* Burlington : Elsevier, 2010.