

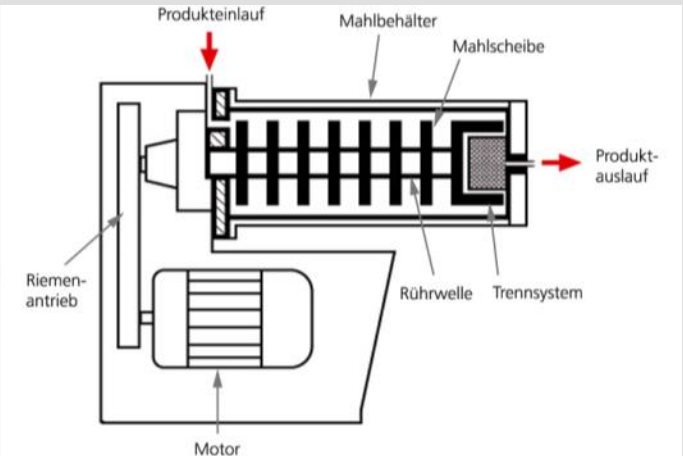
Numerische Berechnung der Mahlkörperbewegungen in einer Rührwerkskugelmühle mit dem DEM-Modell



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

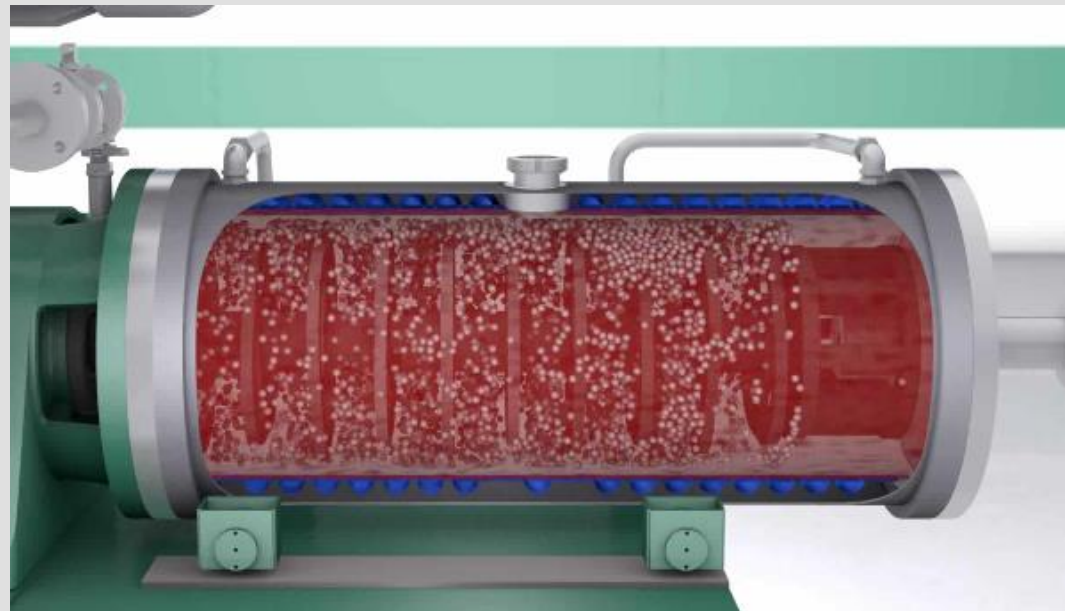
Witali Sudermann

- 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]

- 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

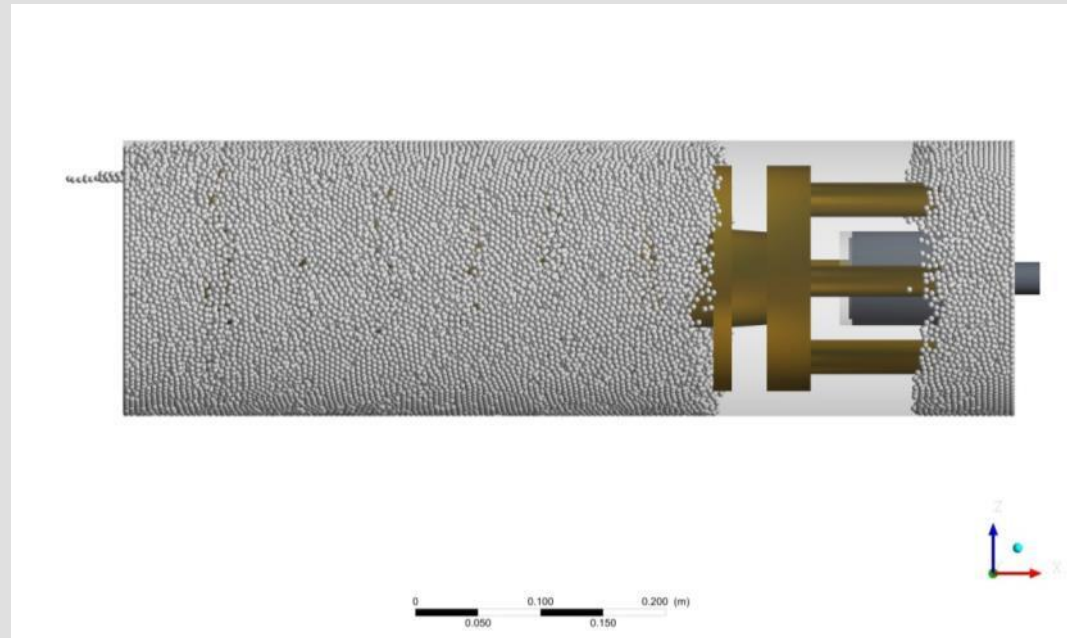
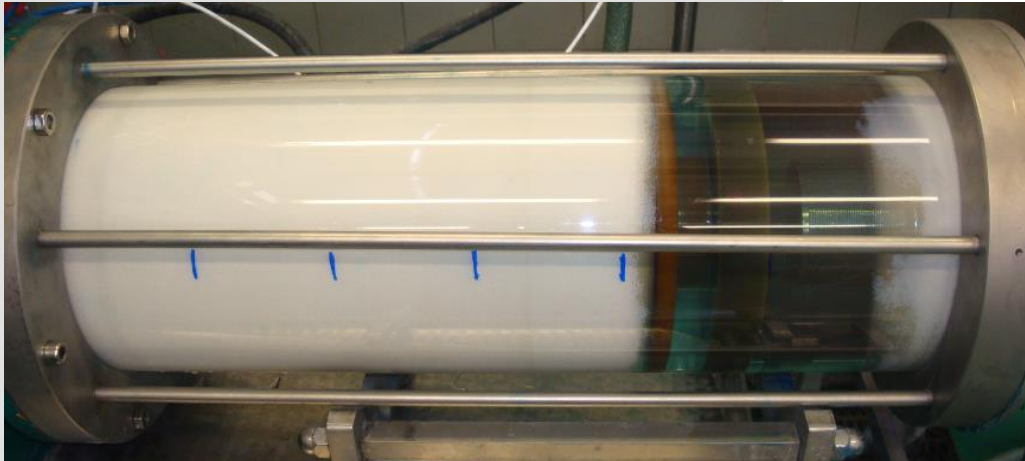


Funktion einer Rührwerkskugelmühle [Net12]

■ 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

Praxisversuch



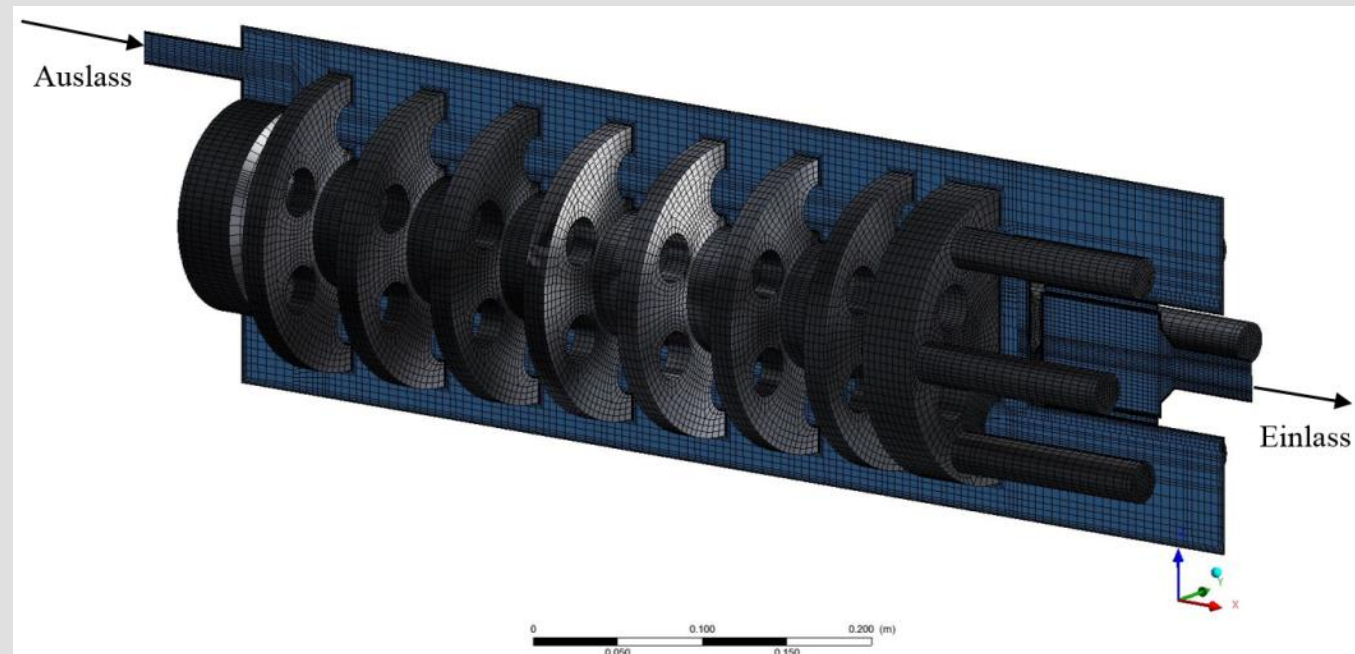
Simulation

■ 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

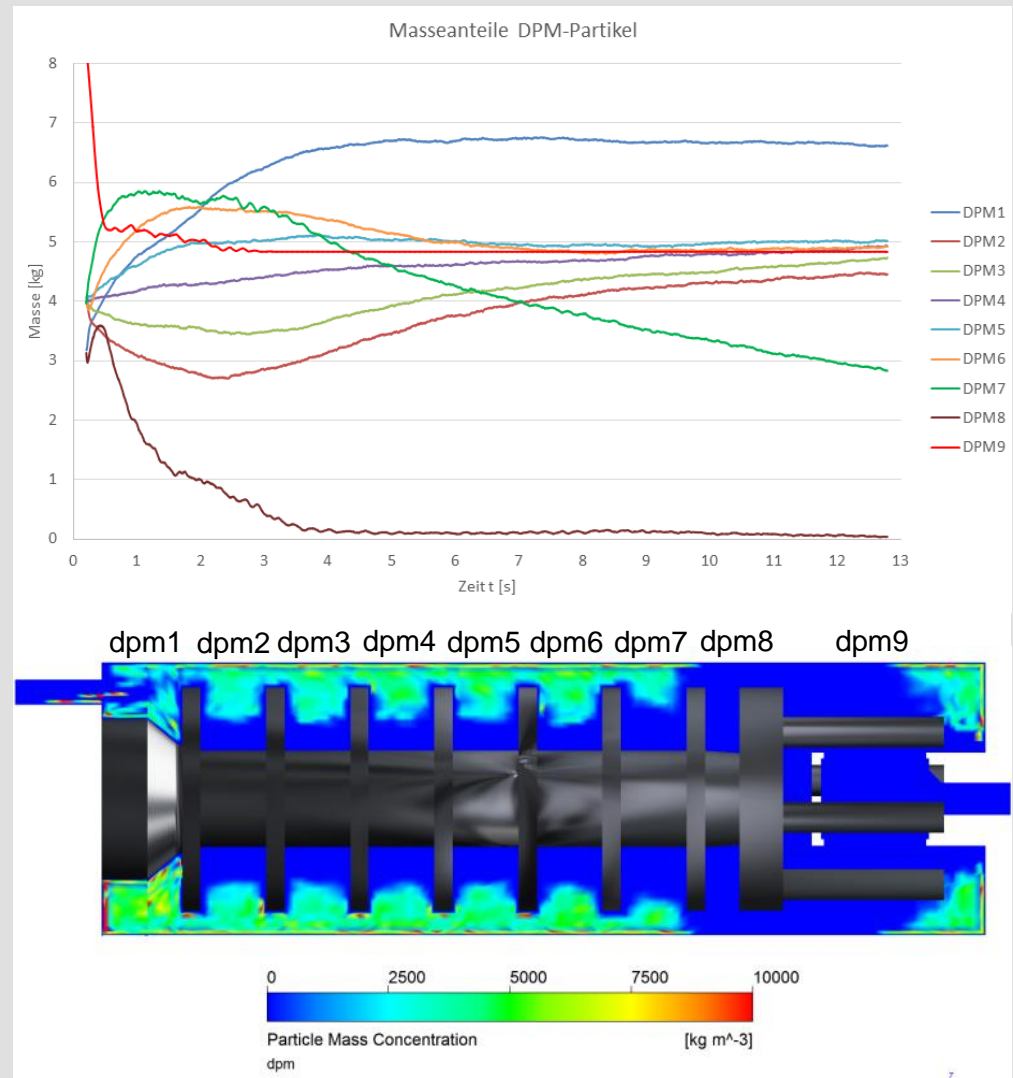


Rechengitter LME20

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 Vermahlungskammern

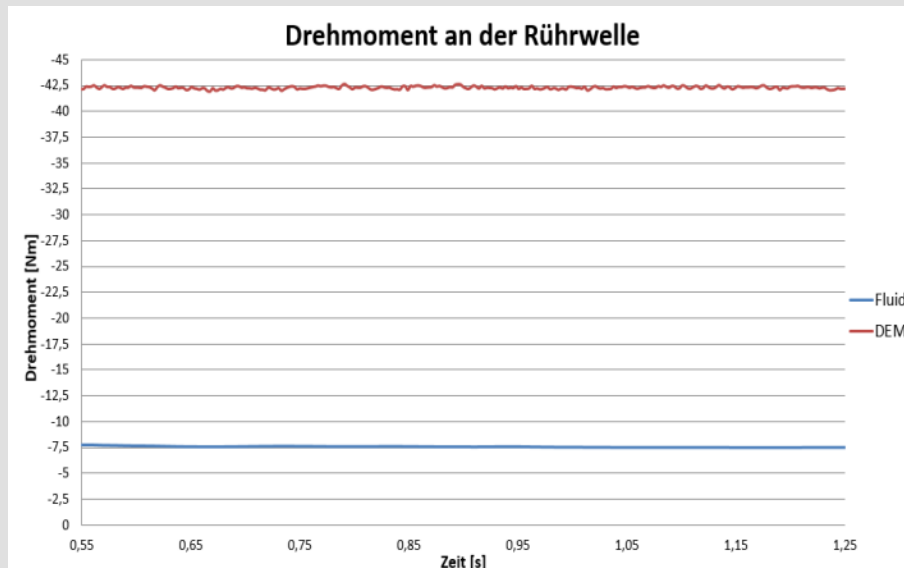


Drehmoment an der Rührwelle

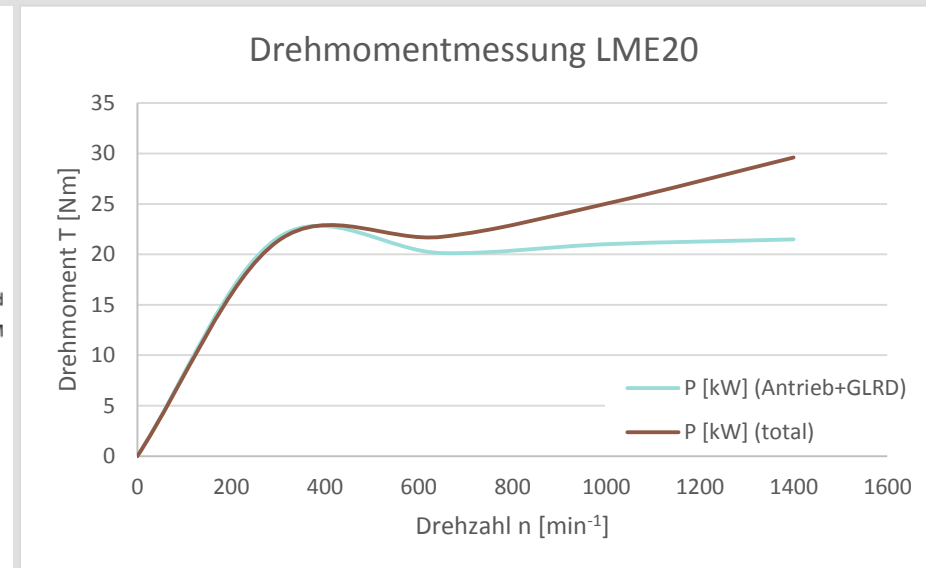
- Drehzahl: 1378 min^{-1}

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

CFD-Ergebnisse zu Drehmoment

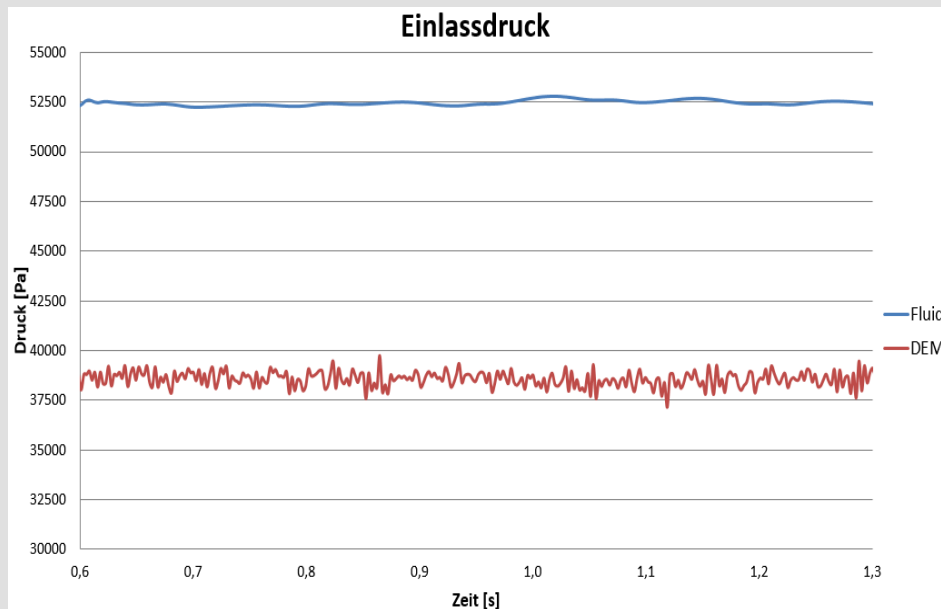


Drehmomentkennlinie im Leerlauf (Praxis)



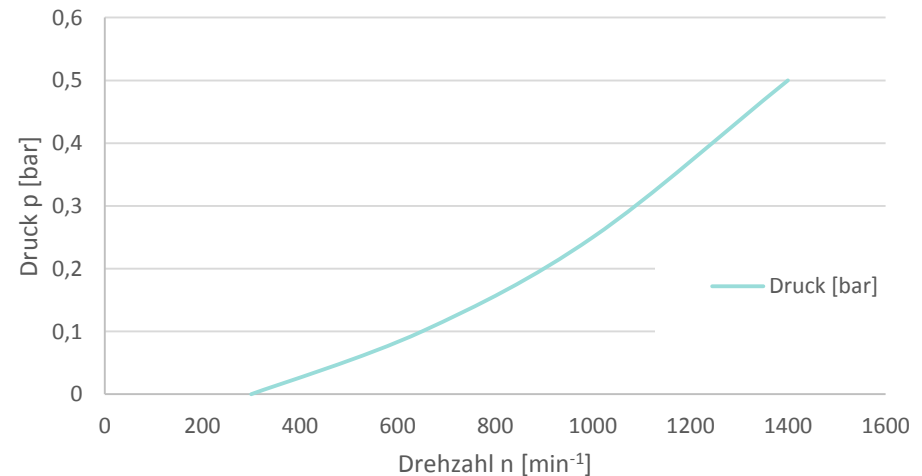
Einlassdruck

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

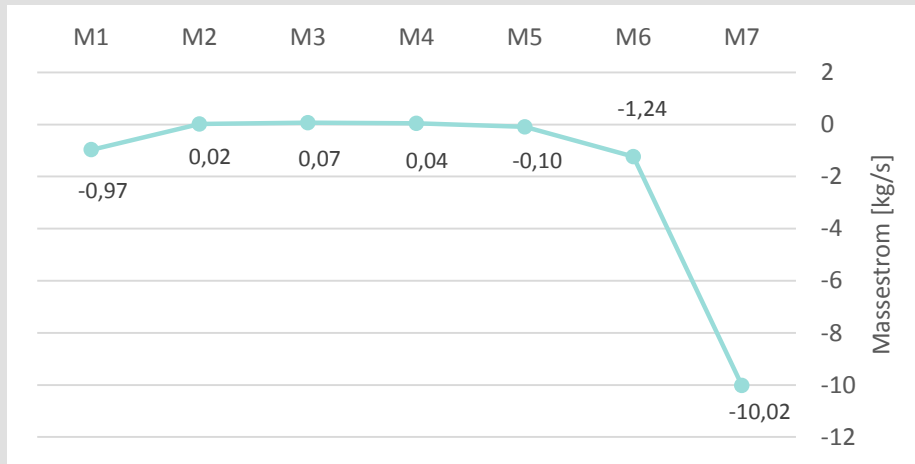


Druckausbildung am Einlass
(CFD-Berechnung)

Einlassdruck LME20

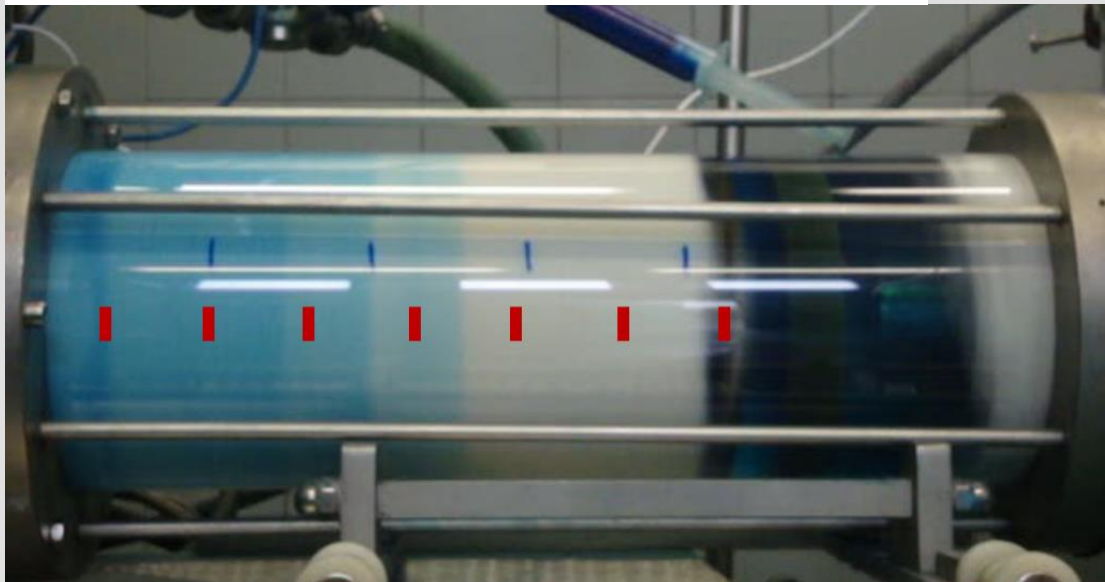


Druckverlauf am Einlass der LME20 in
Abhängigkeit von der Drehzahl (Praxis)



Masseströme am äußeren Strömungsquerschnitt der Mahlscheiben

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



Farbtest im Betrieb

- 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

- 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

$$m_p \frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} = \mathbf{F}_{n,k} + \mathbf{F}_{t,k} + \sum \mathbf{F}$$

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

- „soft sphere“ Modell

- vereinfachtes Kollisionsmodell
- Ermittlung der Überlappung δ als eine Größe für die Verformung eines Kollisionspaares
- Feder-Dämpfer-System

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

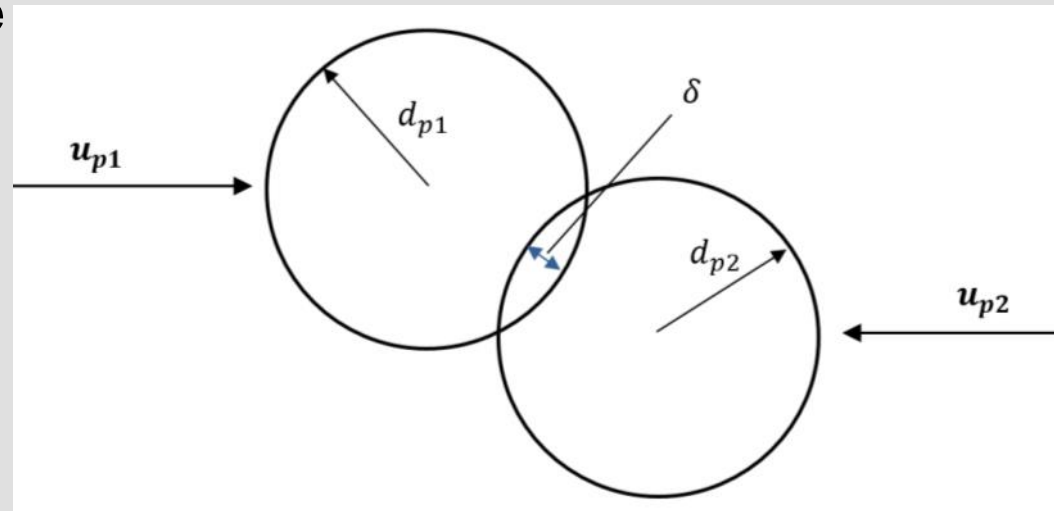
- Ermittlung der Federkonstante

- nach ANSYS [ANS12]

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

- nach Hertzsche Kontakttheorie

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



Deformation eines kollidierenden Partikelpaares (angelehnt an [ANS12])

■ Phasenkopplung

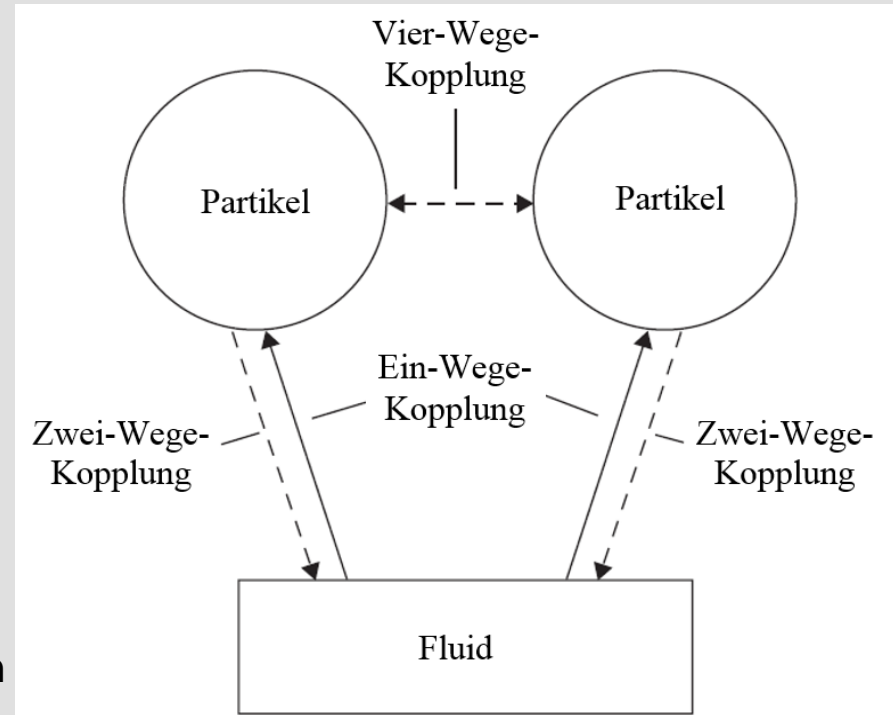
- Zwei-Wege-Kopplung

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

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

- Vier-Wege-Kopplung

- Entspricht dem Kollisionsmodell
- Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln



Kopplungsarten (angelehnt an [Cro05])

- 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

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

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

- [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.