

Analyse der Kraftübertragung einer Mehrphasenströmung am Beispiel eines 3-Achsen-Schleifwerkzeuges

Christoph Kühn

Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation
Fachbereich Produktionstechnik
Universität Bremen

29. September 2016



Was ist der Vorteil **kleiner Werkzeugmaschinen**?

- Höhere Energieeffizienz
- Höhere Präzision
- Produktion hochwertiger Werkstücke

Unter **Mikroschleifen** versteht man:

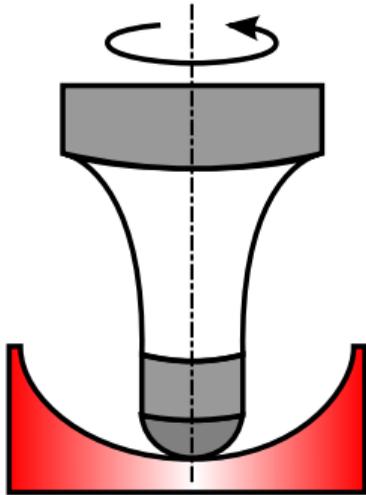
- Die Zerspaltung extrem kleiner Werkstücke
- Die Bearbeitung von komplexen Mikrostrukturen

Bisherige Vorgehensweise:

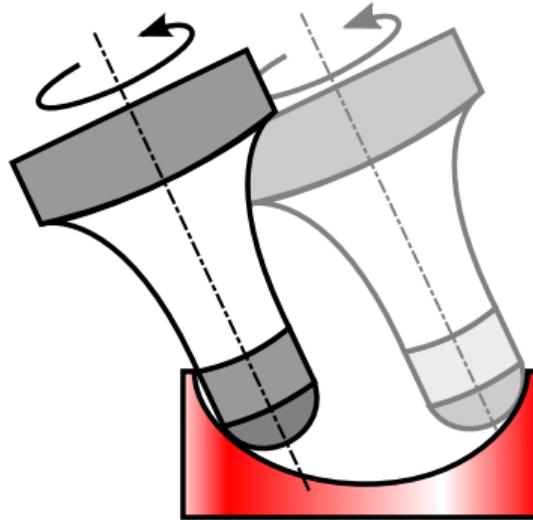
- Miniaturisieren existierender Werkzeuge
- Verkleinerung technologisch begrenzt

⇒ **Neue Konzepte erforderlich um einen technischen Fortschritt zu erzielen**

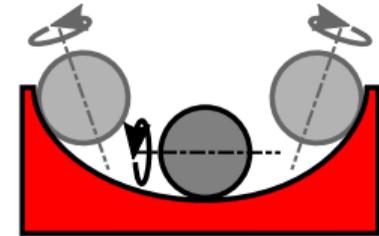




Senkrechte Schleifspindel



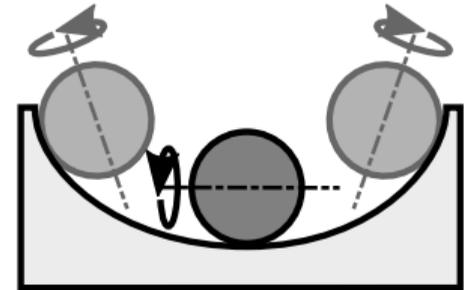
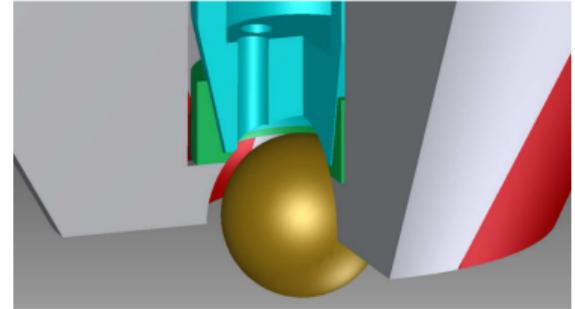
Angewinkelte Schleifspindel



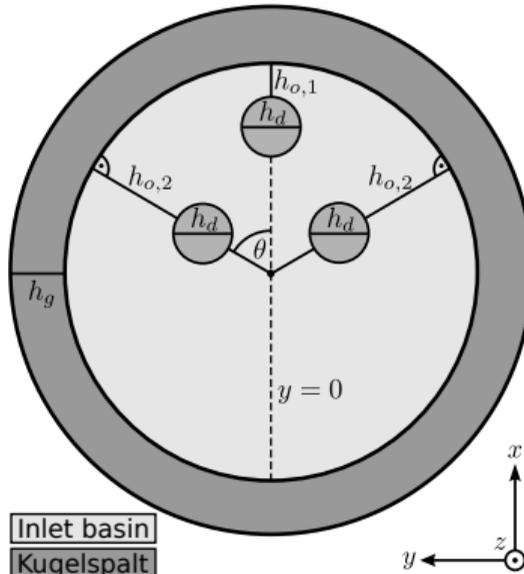
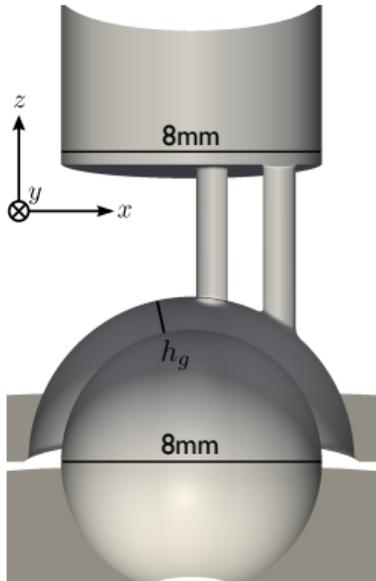
Optimale Schleifkinematik

GrindBall: Achsenloses Mikroschleifwerkzeug zur Bearbeitung von Glas und Keramik

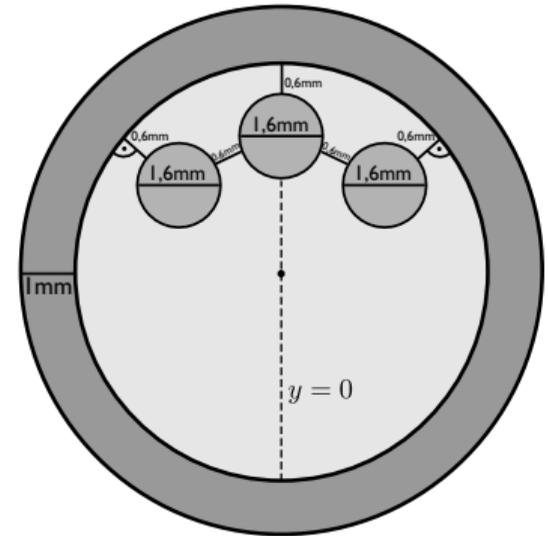
- Magnetisch gelagerte, frei schwebende Schleifkugel
- Pneumatischer oder hydraulischer Antrieb
- Kombination von Antrieb, Lagerung und Kühlung
- Entwicklung in Kooperation aus drei Partnerinstituten:
 - ▶ Auslegung der Geometrie und des Antriebs (ZARM)
 - ▶ Elektromagnetische Lagerung am Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB)
 - ▶ Konstruktion am Labor für Mikrozerspanung (LFM)



Bestimmung optimaler Parameter für maximale Schleifkraft



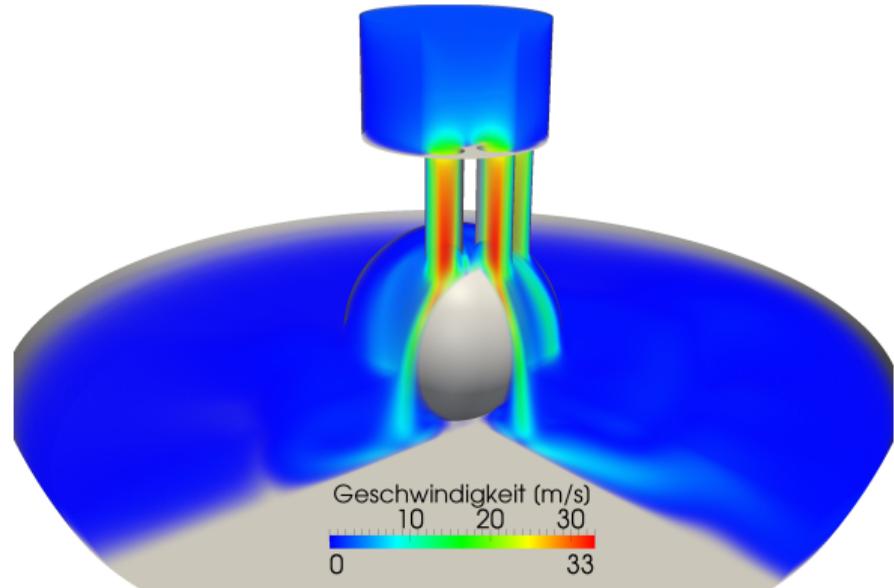
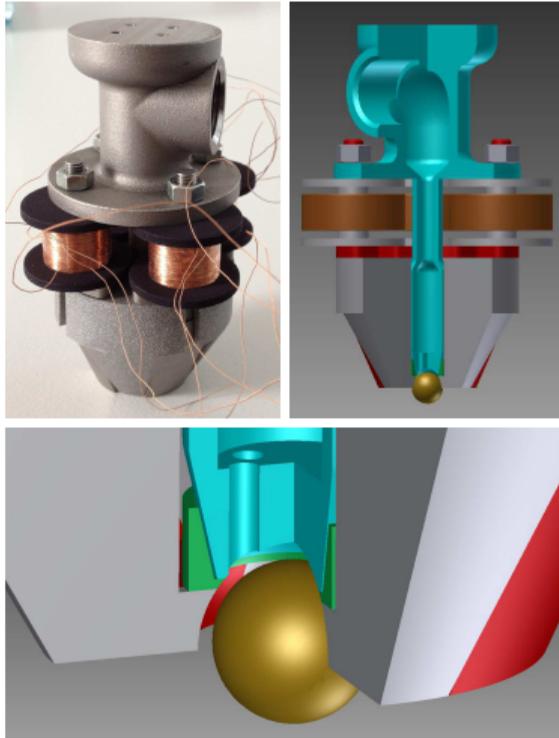
Inlet basin
Kugelspalt



OpenFOAM 2.1.x

- Mesh
 - ▶ Generierung: Maple-Skript & Gmsh
 - ▶ ~ 6 Millionen Zellen
 - ▶ 20 Zellen im Kugelspalt
- Randbedingungen
 - ▶ Inlet: uniformFixedValue [1 bis 7 $l\ min^{-1}$]
 - ▶ Outlet: totalPressure
 - ▶ Kugel: rotatingWallVelocity [0 bis 400 Hz]
- Solver
 - ▶ pimpleFoam
- Turbulenzmodell
 - ▶ laminar ($Re_{max} \approx 350$ mit ISO VG 46)





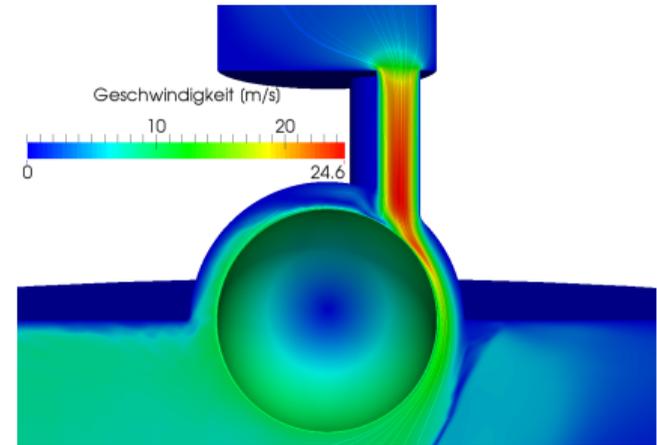
Links: GrindBall ausgelegt für eine 8 mm Schleifkugel (Foto & CAD)

Oben: Simulation mit ISO VG 46 bei $\dot{V} = 7,01 \text{ min}^{-1}$

→ Die Analyse der wirkenden Kräfte auf die Schleifkugel ist entscheidend für die Optimierung

- Druckkräfte
 - ▶ Müssen von der magnetischen Lagerung getragen werden
- Tangentialkräfte
 - ▶ Berechnen sich aus den Geschwindigkeitsgradienten an der Schleifkugel
 - ▶ Bei vorgegebenem Volumenstrom nehmen die Kräfte mit steigender Frequenz ab

⇒ **Die berechneten Kräfte sind diese, welche bei einer sich einstellenden Drehfrequenz und vorgegebenen Volumenstrom wirken würden**



Simulation bei $\dot{V} = 5,01 \text{ min}^{-1}$ und
 $f = 400 \text{ Hz}$

Druckkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_n = \sum_{i=1}^n (p_i - p_{ref}) \underline{\mathbf{n}}_i$$

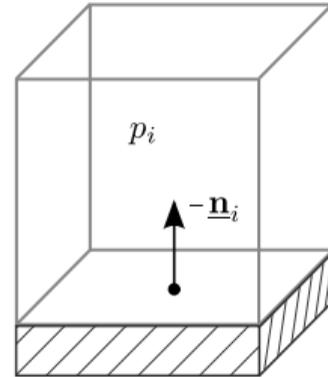
Tangentialkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_t = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{n}}_i \cdot \underbrace{\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)}_{2\tilde{\underline{\mathbf{S}}}_i}$$

Dichtebeständigkeit: $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$

Momente:

$$\underline{\mathbf{M}}_x = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{r}}_i \times \underline{\mathbf{F}}_x$$



- $\underline{\mathbf{n}}_i$ Normalenflächenvektor
- p_{ref} Referenzdruck (def. = 0)
- r_i Hebelarm

Druckkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_n = \sum_{i=1}^n (p_i - p_{ref}) \underline{\mathbf{n}}_i$$

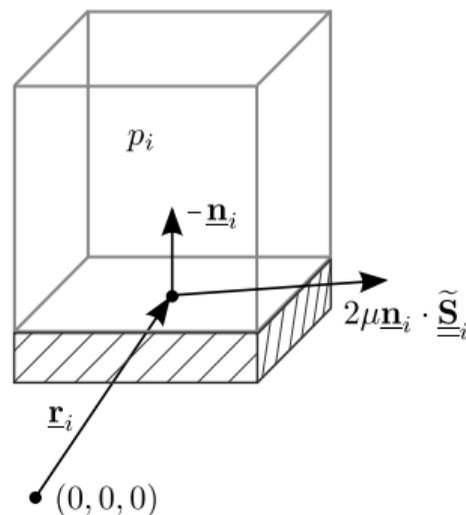
Tangentialkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_t = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{n}}_i \cdot \underbrace{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)}_{2\tilde{\underline{\mathbf{S}}}_i}$$

Dichtebeständigkeit: $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$

Momente:

$$\underline{\mathbf{M}}_x = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{r}}_i \times \underline{\mathbf{F}}_x$$



- $\underline{\mathbf{n}}_i$ Normalenflächenvektor
- p_{ref} Referenzdruck (def. = 0)
- r_i Hebelarm

Druckkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_n = \sum_{i=1}^n (p_i - p_{ref}) \underline{\mathbf{n}}_i$$

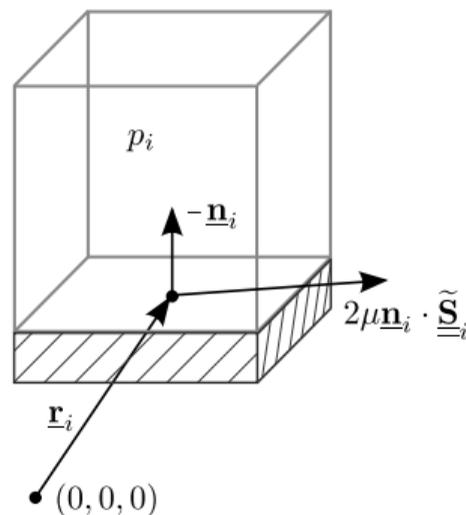
Tangentialkraft:

$$\underline{\mathbf{F}}_t = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{n}}_i \cdot \underbrace{\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)}_{2\tilde{\underline{\mathbf{S}}}_i}$$

Dichtebeständigkeit: $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$

Momente:

$$\underline{\mathbf{M}}_x = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{r}}_i \times \underline{\mathbf{F}}_x$$



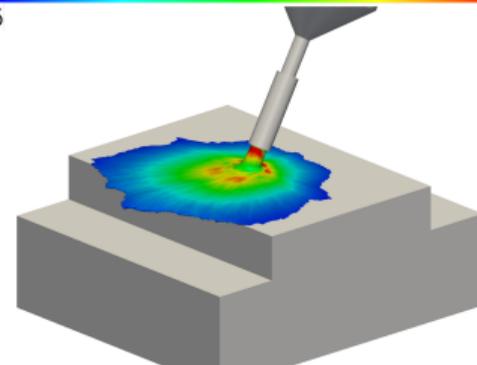
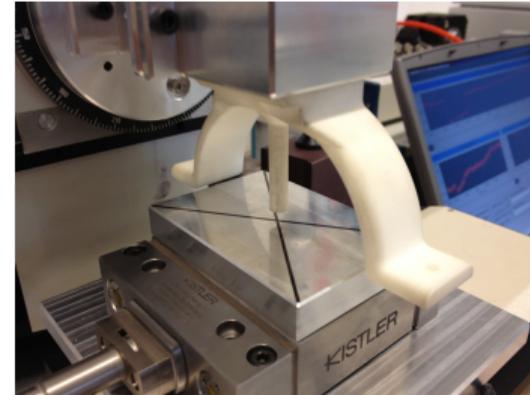
- $\underline{\mathbf{n}}_i$ Normalenflächenvektor
- p_{ref} Referenzdruck (def. = 0)
- r_i Hebelarm

Experimenteller Aufbau

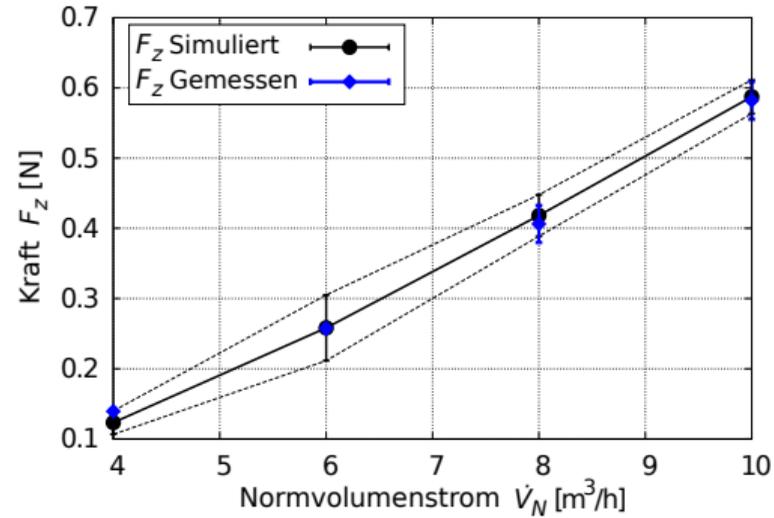
- Luft strömt aus einer Düse auf einen Kistler MiniDyn 9256C2 Mehrkomponenten-Dynamometer
- Vier Volumenströme (4, 6, 8 und 10 m³/h)
- Drei Anstellwinkel (90°, 60° und 45°)

OpenFOAM 2.1.x

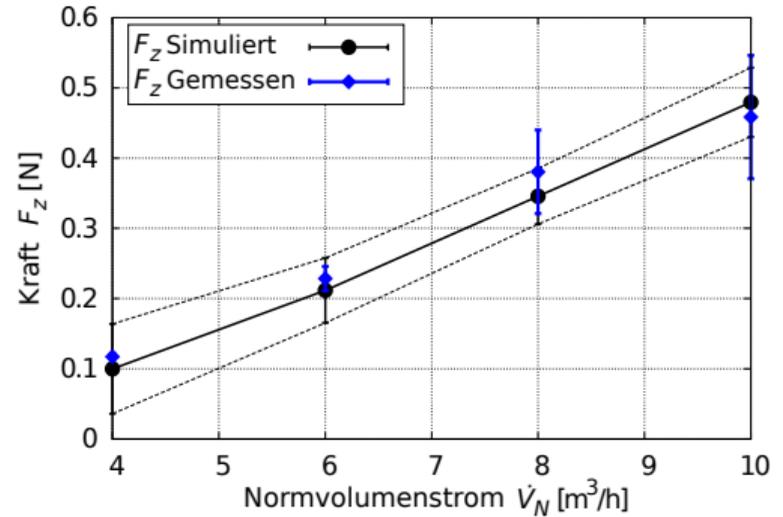
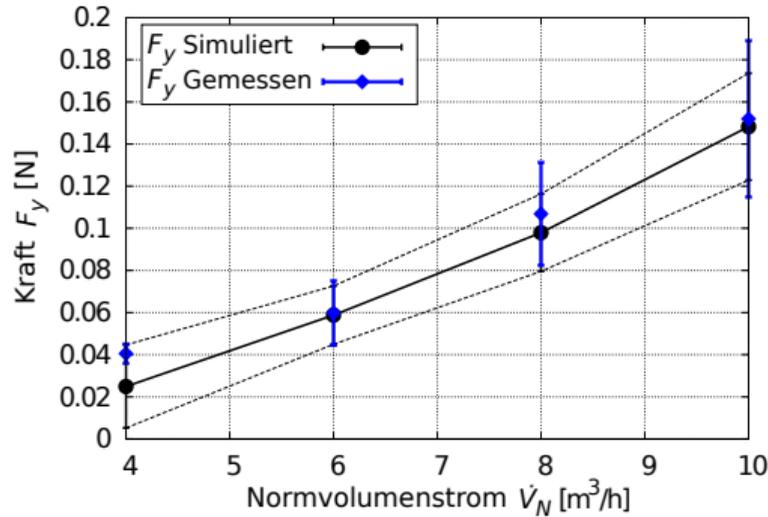
- Mesh
 - ▶ Generierung: snappyHexMesh
 - ▶ 9 Millionen Zellen ($5 \leq y^+ \leq 100$)
- Solver
 - ▶ rhoPimpleFoam
- Turbulenzmodellierung
 - ▶ Large Eddy Simulation
 - ▶ Subgrid-Modell: compressible Smagorinsky



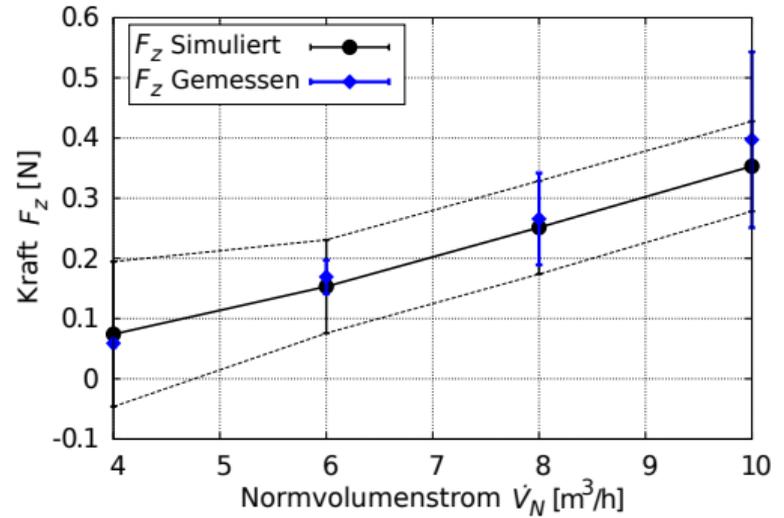
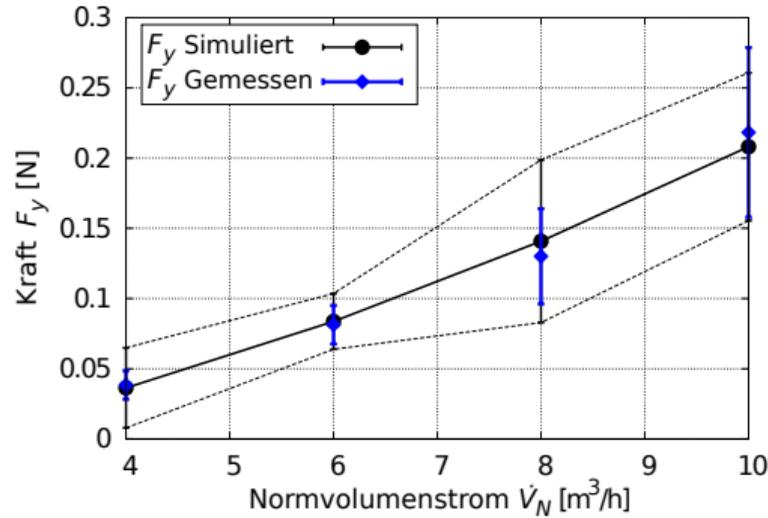
90° Fall



60° Fall



45° Fall



Mehrphasenströmungsuntersuchung mit interFoam

- Der Volumenanteil α einer Phase wird nach der Volumen-of-Fluid Methode konvektiv transportiert
- Die effektive Dichte wird bei der Lösung der Navier-Stokes-Gleichung verwendet

→ Die Kräfteberechnung ist nicht in der Lage das Dichtefeld aus den Mehrphasensolver **interFoam** zu laden!

⇒ **Anpassungen bei der Berechnung der Tangentialkraft**

$$\underline{\mathbf{F}}_t = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{n}}_i \cdot \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

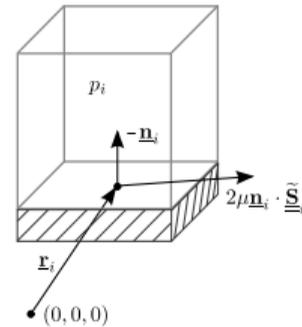
```

1  const volSymmTensorField::GeometricBoundaryField& devRhoReffb
2      = -rho()*nu()*dev(twoSymm( fvc::grad(U_)));
3
4  vectorField fT(Sfb[patchI] & devRhoReffb[patchI]);
5  ...
6  force_[1][0] += sum(fT);

```

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \underline{\mathbf{U}} \cdot \nabla \alpha = 0$$

$$\rho_{eff} = \rho_1 \alpha + \rho_2 (1 - \alpha)$$

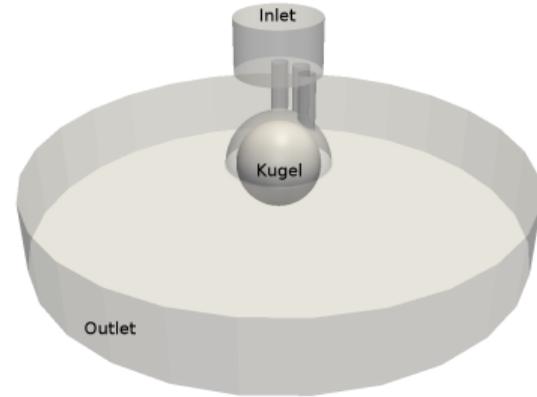


Anpassungen zur Kräfteberechnung an Mehrphasenströmungen

```
1 Foam::tmp<Foam::volScalarField> Foam::forces::rho() const
2 {
3     if (rhoName_ == "multiPhase")
4     {
5         const immiscibleIncompressibleTwoPhaseMixture& mixture =
6             obr_.lookupObject<immiscibleIncompressibleTwoPhaseMixture>("transportProperties");
7
8         const dimensionedScalar& rho1 = mixture.rho1();
9         const dimensionedScalar& rho2 = mixture.rho2();
10
11         const volScalarField& alpha1(mixture.alpha1());
12         const volScalarField& alpha2(mixture.alpha2());
13
14         const fvMesh& mesh = refCast<const fvMesh>(obr_);
15
16         return tmp<volScalarField>
17             (
18                 new volScalarField
19                     (
20                         IOobject
21                         (
22                             "rho",
23                             mesh.time().timeName(),
24                             mesh
25                         ),
26                         alpha1*rho1 + alpha2*rho2
27                     )
28             );
29     }
30     ...
```

OpenFOAM 2.4.x

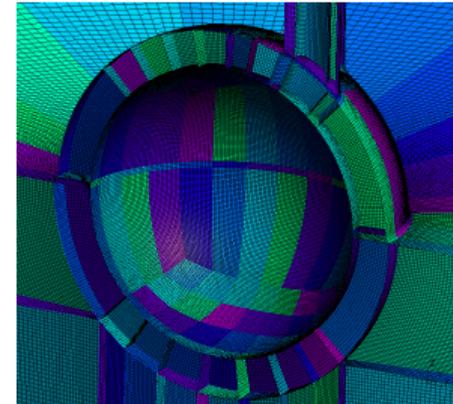
- Solver
 - ▶ interFoam
- Randbedingungen
 - ▶ Inlet: *flowRateInletVelocity*
Volumenströme von 1 bis 7 l min^{-1}
 - ▶ Kugel: *rotatingWallVelocity*
Frequenzen von 0 bis 400 Hz
 - ▶ Outlet: *totalPressure*



Phaseneigenschaften bei 20 °C:

	kin. Viskosität	Dichte
Luft	$15.3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$1.204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
ISO VG 46	$138 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$880 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

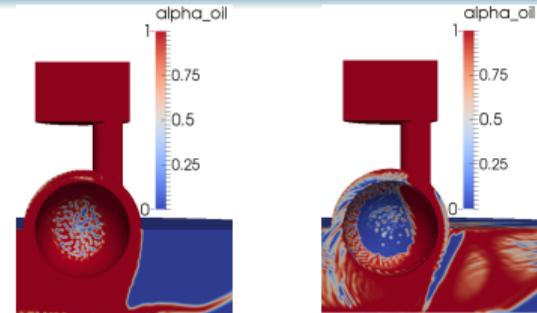
Oberflächenspannung: $0.03 \frac{\text{N}}{\text{m}}$



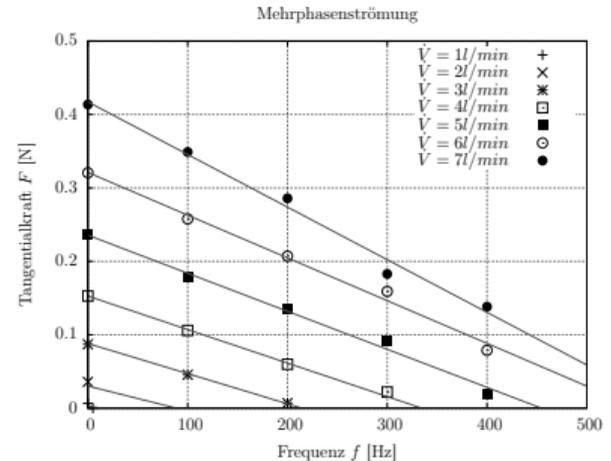
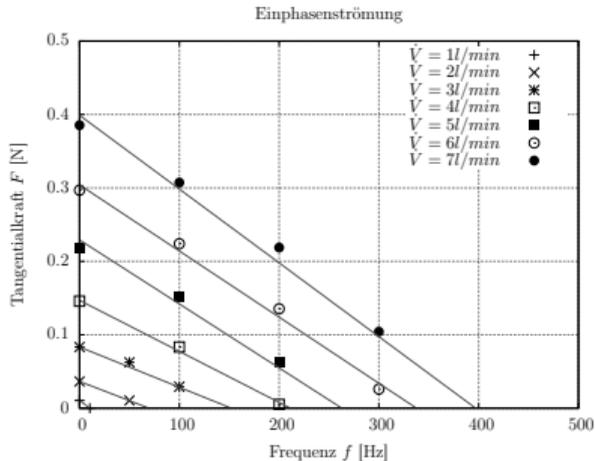
Untersuchung der Mehrphasenströmung

- Die stationäre Kräfteübertragung bei $f = 0$ bleibt praktisch unverändert
- Mit steigenden Frequenzen fällt die Tangentialkraft weniger stark ab
 - Ursache ist die verringerte Reibung mit der Luftphase

⇒ Die Schleifleistung erhöht sich!

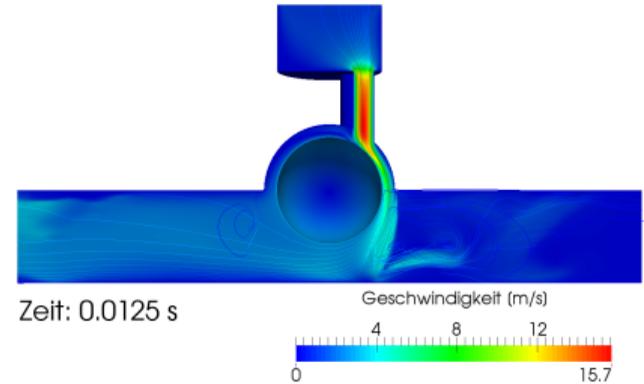


Simulationen bei $\dot{V} = 3,0 \text{ l/min}^{-1}$ und $f = 100 \text{ Hz}$ (links),
 $\dot{V} = 5,0 \text{ l/min}^{-1}$ und $f = 400 \text{ Hz}$ (rechts)



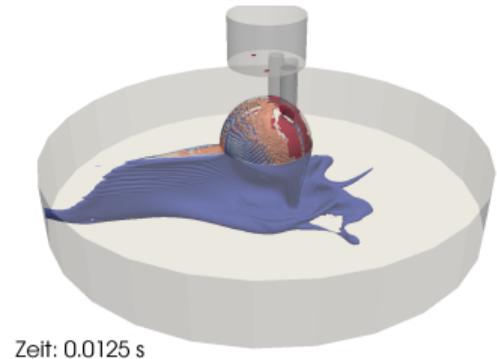
Einphasenströmung

- Entwicklung eines 8mm Schleifwerkzeuges
 - ▶ Optimierung der der Geometrie in Hinblick auf maximale Schleifkräfte
- Validierung der Kräfteberechnung



Mehrphasenströmung

- Modifikation der Kräfteberechnung, durch einlesen des korrekten Dichtefeldes
- Erhöhte Kraftübertragung in Mehrphasenströmungen



Simulation bei $\dot{V} = 3,0 \text{ l min}^{-1}$ und $f = 100 \text{ Hz}$

Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!