

Simulation von CO₂-Schneestrahldüsen

Clemens Buske
Dr. Volker Kassera



Überblick

- Vorstellung & Einführung CFD
- Vorstellung untersuchter Rund- und Flachdüse
- Simulation der Strömung innerhalb und außerhalb der Düse
- Simulation der partikelbeladenen Strömung
- Abschätzung der Flächenleistung und Düsenvergleich
- Zusammenfassung und Ausblick



Vorstellung

CFD Consultants GmbH

- Hauptsitz in Rottenburg bei Stuttgart
- Niederlassung in Kaiserslautern
- gegründet 1998
- derzeit 10 feste Mitarbeiter
- **unabhängige** CFD Beratung
- über 90 Kunden aus Industrie und Forschung



Computational Fluid Dynamics (CFD)

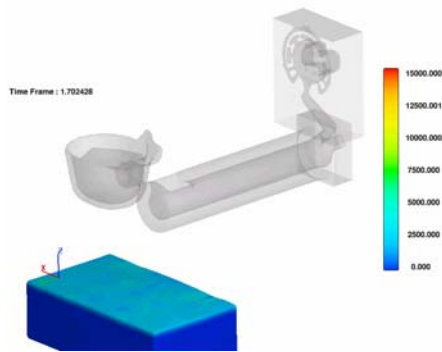
- + Kostengünstige, schnelle Strömungsanalyse verschiedener Konfigurationen
- + Parallele Berechnung aller Strömungswerte an allen Stellen des Berechnungsgebiets
- + Berechnung von Partikeln in Strömung, Turbulenz, chemischen Reaktionen, Akustik, ...
- Modellbildung
- Gutes physikalisches Verständnis
- Verifizierung mit analytischen bzw. experimentellen Ergebnissen



CFD Anwendungsbeispiele

Druckguss-Simulation

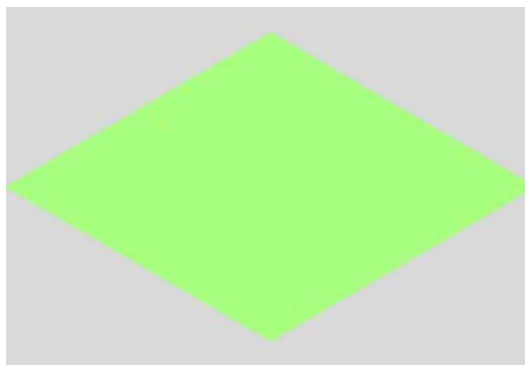
- Simulation der Erstarrung, Abkühlung, Schrumpfung
- Zyklenberechnung
- Modellierung von porösen Medien
- bewegte Objekte (z.B. Modellierung der Gießkolbenbewegung, Flüssigpressen)



CAA (Computational Aeroacoustics)

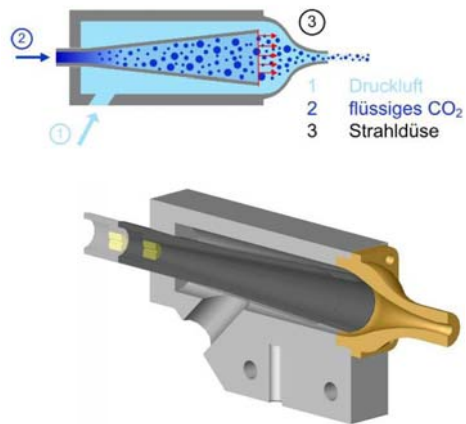
Berechnung von Strömungslärm

- Entstehung und Ausbreitung von Schall
- Richtung und Stärke der Schallausbreitung
- Derzeit in der Forschung
- Module in kommerzieller CFD-Software bereits verfügbar
- Bsp.: Schallausbreitung in 2D Scherschicht ($Ma\ 2$)



Düsentechologie der Untersuchung

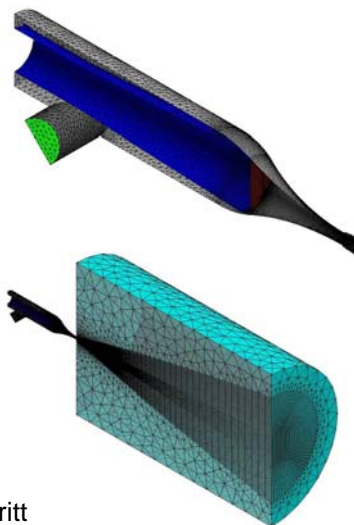
- Entspannung von flüssigem CO₂ in Strahlendruck
- Laval-Prinzip
- Variable Luftzufuhr durch verstellbaren Entspannungsraum



Vernetzung

Runddüse

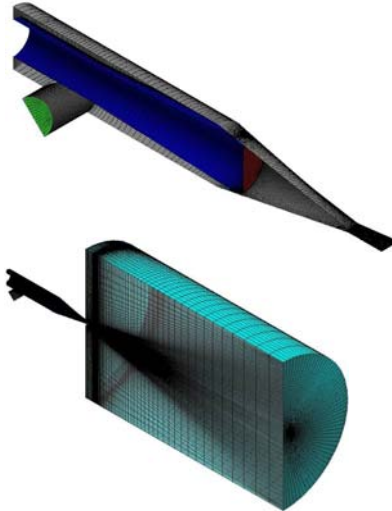
- Symmetrisches Modell
- Düsenaustrittsdurchmesser $d_{\text{Düse}} = 3.6 \text{ mm}$
- Freistrahlgelände:
Länge = $80 d_{\text{Düse}}$
Durchmesser = $55 d_{\text{Düse}}$
- Randbedingungen:
Druckeinlass (grün)
Massenfluss (rot)
Druckauslass (hellblau)
- Verfeinerungen:
Spalt, Düsenverengung, Düsenaustritt



Vernetzung

Flachdüse

- Symmetrisches Modell
- Düsenaustrittsgeometrie
Breite = 10.4 mm
Höhe = 1 mm
- Abmessungen des Freistrahls
wie Runddüse
- Randbedingungen wie Runddüse
- Verfeinerungen wie Runddüse



Simulation

Modellierungen / Vereinfachungen

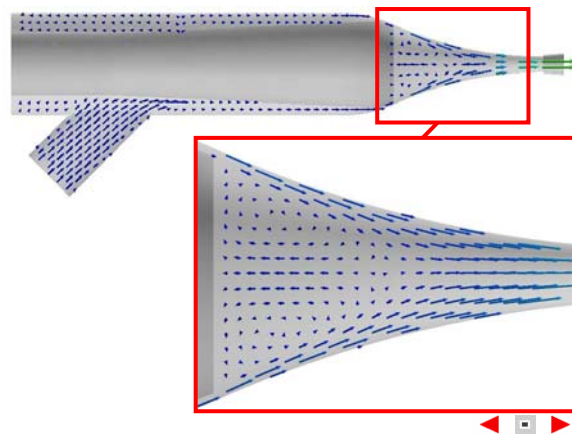
- Stationäre Rechnung
- Keine CO₂-Partikelentstehung bzw. Agglomeration
- Vorgabe homogener Partikelverteilung am Austritt des Entspannungsraums
- 3 separate Partikeldurchmesser
- Keine Partikelstöße untereinander
- Keine Sublimation der Partikel
- Luft-CO₂-Medium als ideales Gas
- Turbulenzmodellierung



Simulation der Strömung innerhalb der Düse

Geschwindigkeitsvektoren – Runddüse

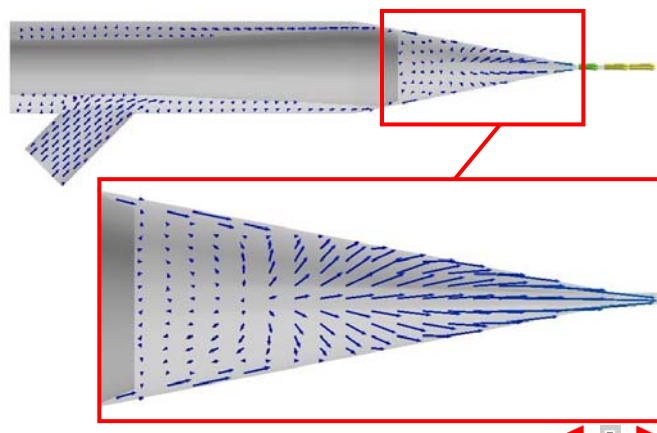
- Rückstromgebiet hinter Entspannungsraum
- Gleichmäßige Randströmung



Simulation der Strömung innerhalb der Düse

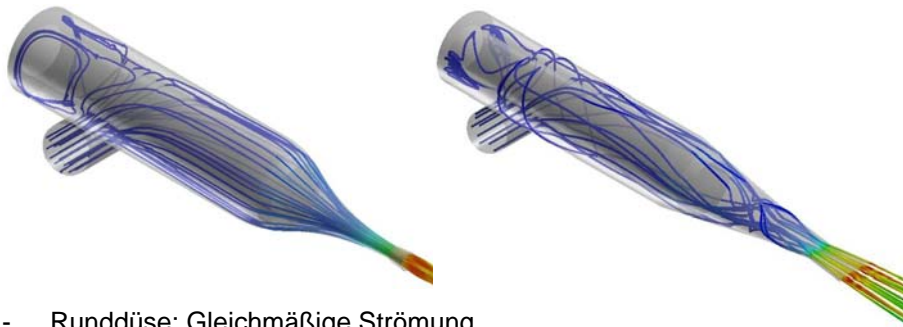
Geschwindigkeitsvektoren – Flachdüse

- Schwächeres Rückströmgebiet hinter Entspannungsraum
- Längswirbel in Düse



Simulation der Strömung innerhalb der Düse

Stromlinien der Rund- und Flachdüse bei 7 bar Strahldruck



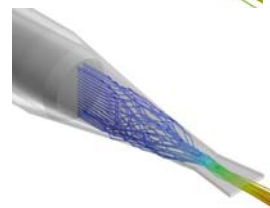
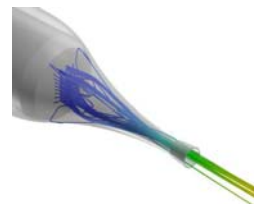
- Runddüse: Gleichmäßige Strömung
- Flachdüse: Turbulentere Strömung



Simulation der Strömung innerhalb der Düse

Schlussfolgerung für Partikelagglomeration

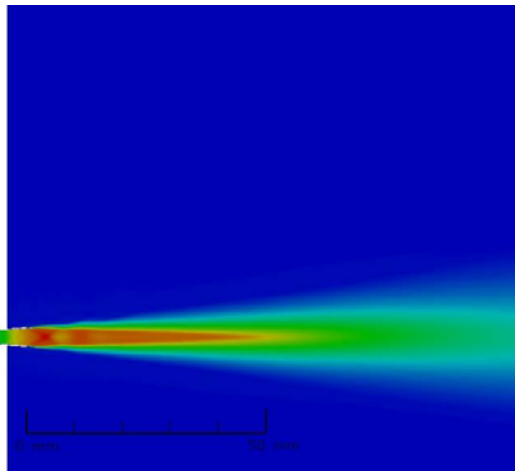
- Rückströmung bei Runddüse:
 - Förderung der Agglomeration
- Erhöhte Turbulenz und fehlende Rückströmung bei Flachdüse
 - Mögliche Minderung der Agglomeration und Förderung von Partikelstößen
 - Kleinere Partikel



Simulation der Strömung außerhalb der Düse

Runddüse
7 bar

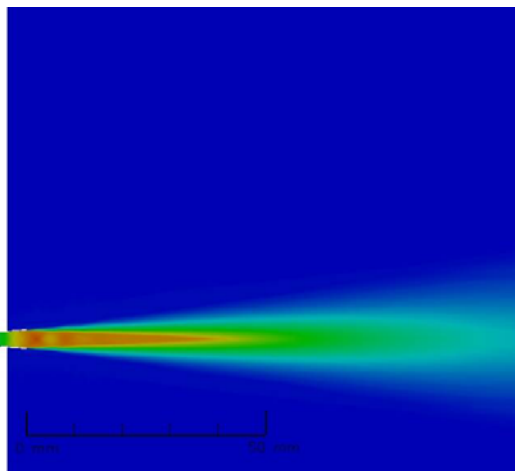
$v_{max} = 576 \text{ m/s}$



Simulation der Strömung außerhalb der Düse

Runddüse
5 bar

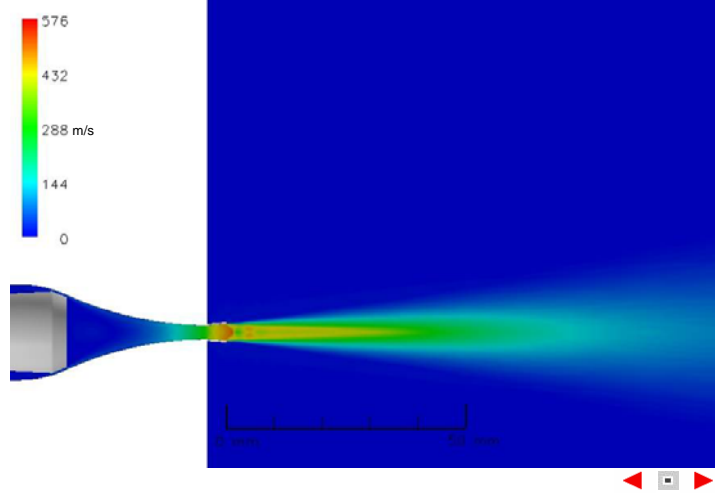
$v_{max} = 521 \text{ m/s}$



Simulation der Strömung außerhalb der Düse

Runddüse
3 bar

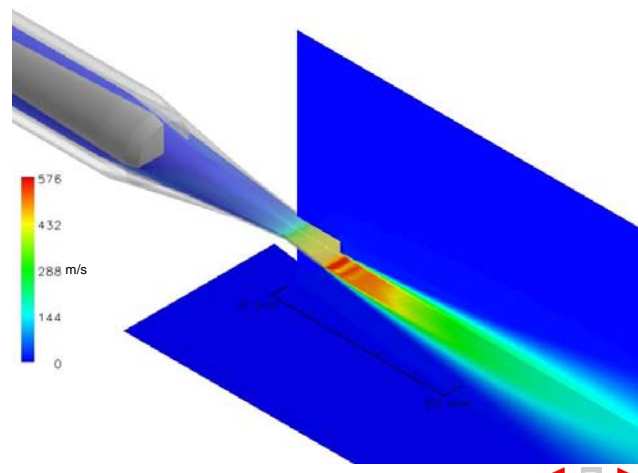
$v_{max} = 515 \text{ m/s}$



Simulation der Strömung außerhalb der Düse

Flachdüse
7 bar

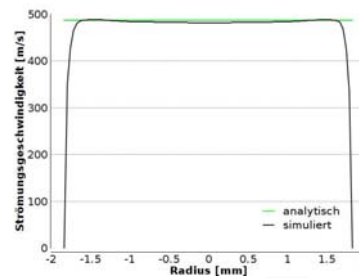
$v_{max} = 560 \text{ m/s}$



Simulation der Strömung außerhalb der Düse

Vergleich der Geschwindigkeiten im Freistrah

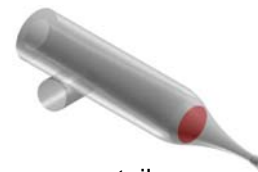
- Halbierung des Strahldrucks → Senkung von v_{\max} um ca. 60 m/s
- Rund- und Flachdüse etwa gleichgroßes Geschwindigkeitsmaximum
- Schnellerer Geschwindigkeitsabfall bei Flachdüse als bei Runddüse
- Validierung:
Gute Übereinstimmung der Geschwindigkeit am Düsenaustritt mit analytischer Lösung



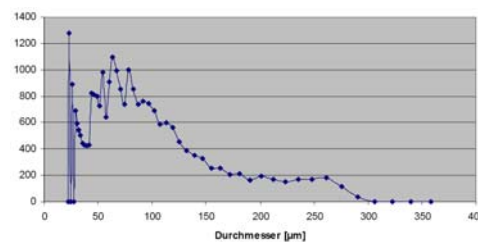
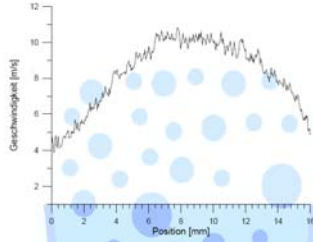
Simulation partikelbeladener Strömung

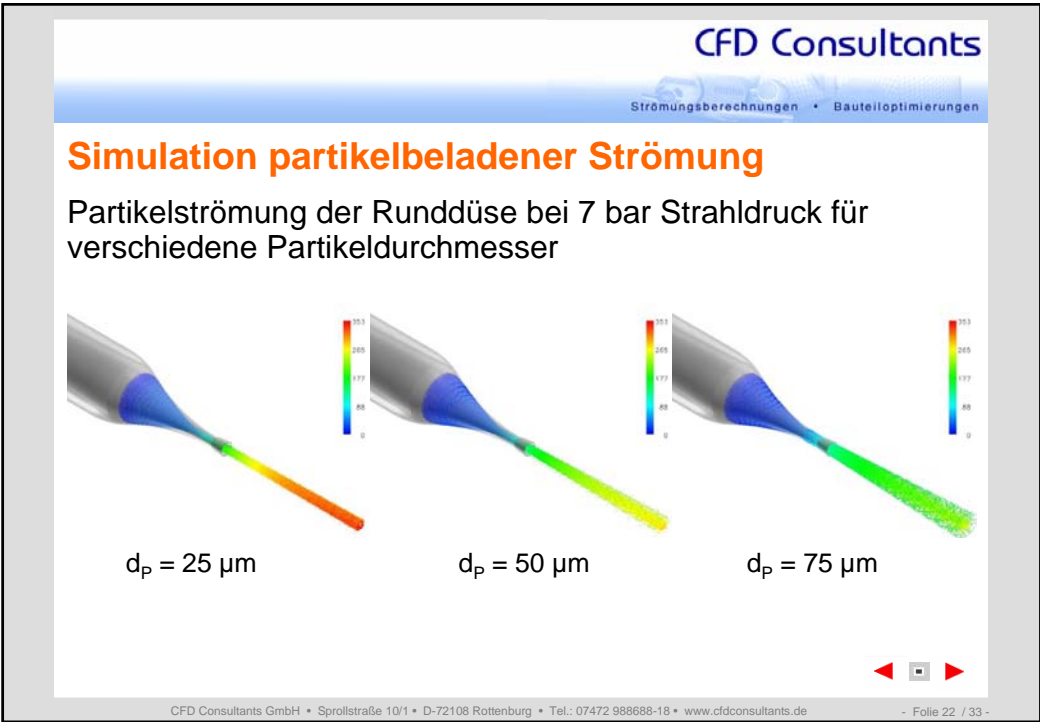
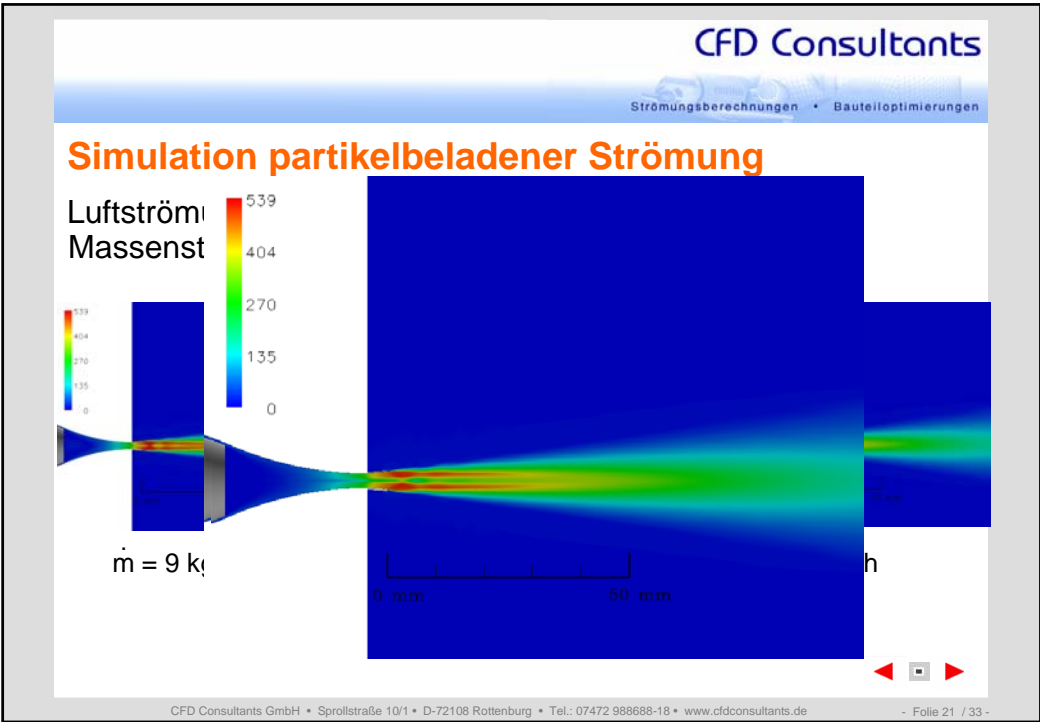
Massenstrom-Randbedingung

- Vorgabe von Partikeln am Entspannungsraumaustritt
- Messergebnisse:
Partikelgeschwindigkeit 8 m/s



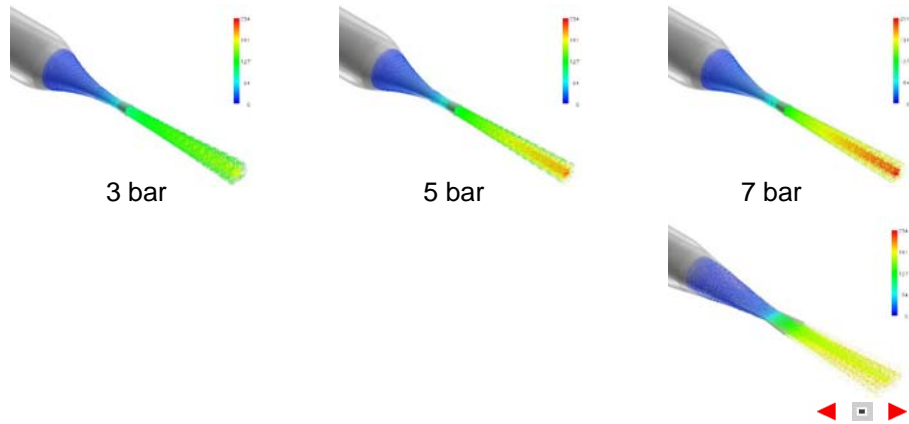
Partikeldurchmesserverteilung
25, 50, 75 μm





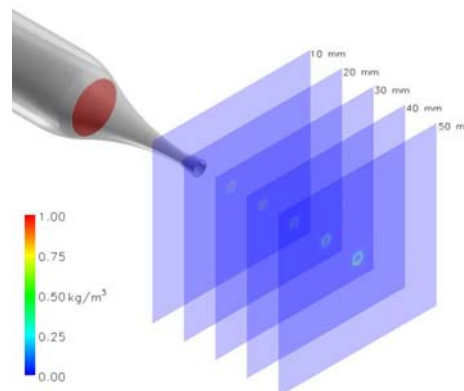
Simulation partikelbeladener Strömung

Partikelströmung von 75 µm Partikel bei verschiedenen Strahldrücken und Düsen



Abschätzung der Flächenleistung

- Abschätzung der Flächenleistung über kinetische Energie der Partikel
- Bestimmung der Orte, an denen die meisten Partikel auftreffen für verschiedene Abstände
- Bestimmung der Partikelgeschwindigkeiten
- Bestimmung der kinetischen Energie der Partikel hinter der Düse



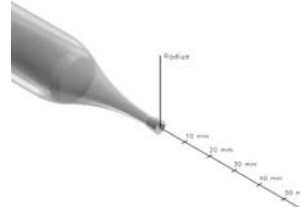
→ Räumliches Energiemaximum für verschiedene Konfigurationen

Abschätzung der Flächenleistung

Statistische Auswertung - Abhängigkeiten

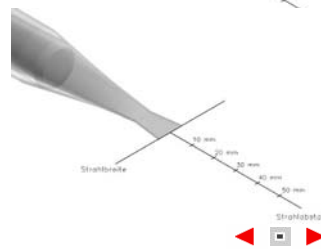
Runddüse:

- Abstand vom Düsenaustritt
- Abstand von Strahlachse (Radius)
- Strahldruck



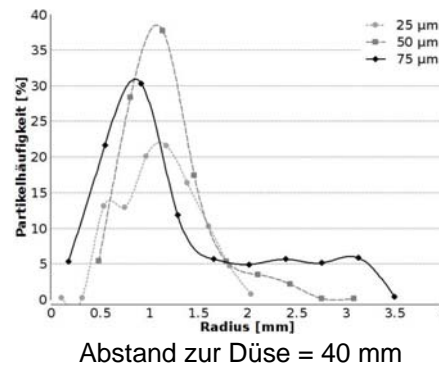
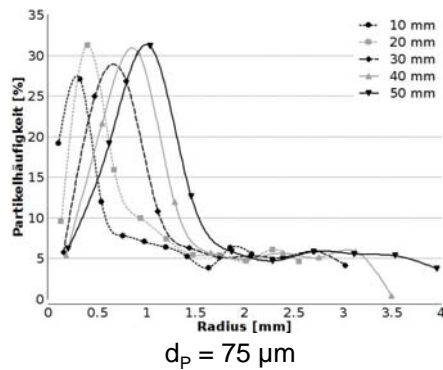
Flachdüse:

- Abstand vom Düsenaustritt
- Abstand von Strahlachse (Strahlbreite)



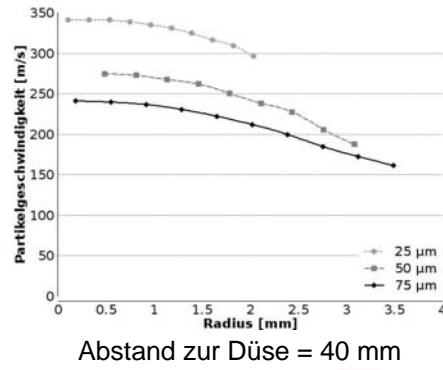
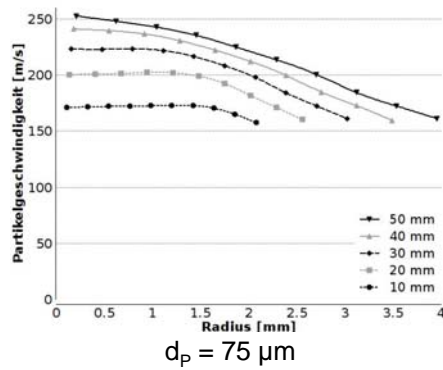
Abschätzung der Flächenleistung

Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Partikel bei Runddüse und 7 bar Strahldruck



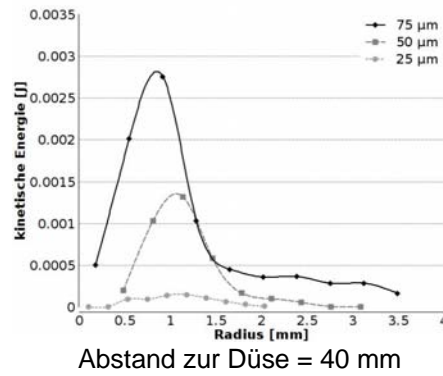
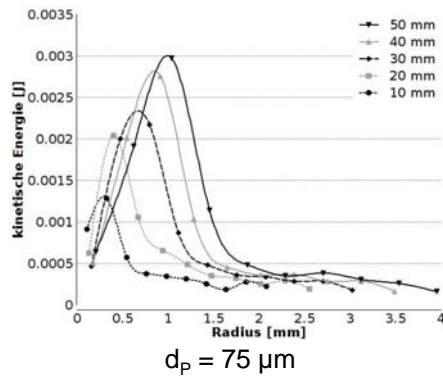
Abschätzung der Flächenleistung

Partikelgeschwindigkeit bei Runddüse und 7 bar Strahldruck



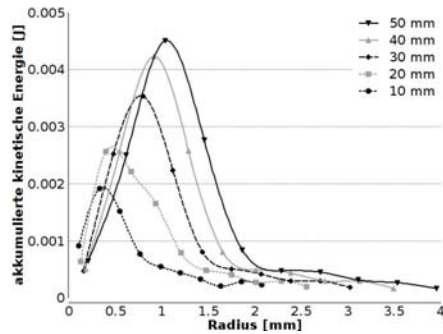
Abschätzung der Flächenleistung

Kinetische Energie der Partikel bei Runddüse und 7 bar Strahldruck



Abschätzung der Flächenleistung

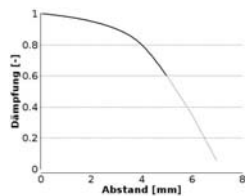
Aufsummierte kinetische Energie aller Partikel bei Runddüse und 7 bar Strahldruck



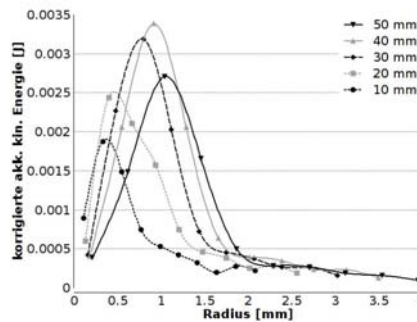
Abschätzung der Flächenleistung

Korrektur der aufsummierten kinetischen Energie

- Partikel sublimieren mit Abstand zur Düse
- Berücksichtigung durch Dämpfungsfaktor

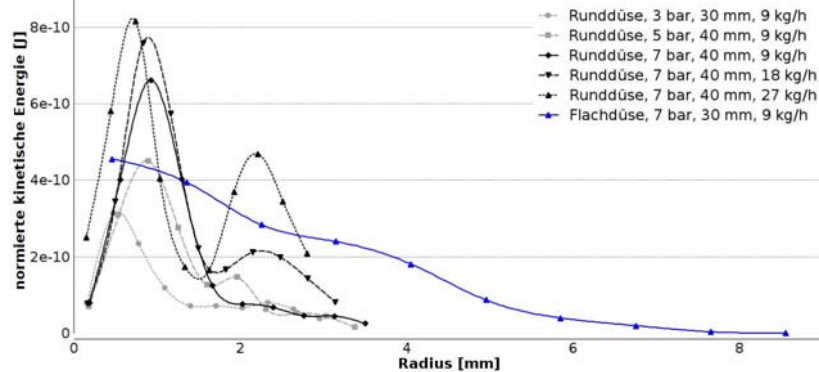


- Maximum für Runddüse bei 7 bar Strahldruck: 40 mm Abstand, 1 mm Radius



Vergleich der Düsen

Normierte, korrigierte Energiemaxima für verschiedene Konfigurationen



Zusammenfassung und Ausblick

- Runddüse weist stärkeres Rückströmgebiet als Flachdüse auf
- Große Partikel bestimmen im Wesentlichen die Abtragsleistung
- Strahldruckänderung bei Runddüse kaum Auswirkung auf Größe der Abtragfläche, wohl aber auf Abtragungsgeschwindigkeit
- Flachdüse verteilt Energie deutlich breiter
→ Höhere Flächenleistung zu erwarten
- Validierung der Korrekturfunktion
- Validierung der Partikelgeschwindigkeiten und Abtragsbreite
- Untersuchung weiterer Düsengeometrien
→ Senkung der Turbulenz und Steigerung der Rückströmung bei Flachdüse durch Adaption an Runddüseninnengeometrie



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

**CFD Consultants GmbH
Sprollstraße 10/1
72108 Rottenburg**

**phone: 07472 – 988 688 – 18
mail: vk@cfdconsultants.de**

