
Analyse und Separation des mechanischen Effektes beim Trockeneisstrahlen

Marcel Manthei



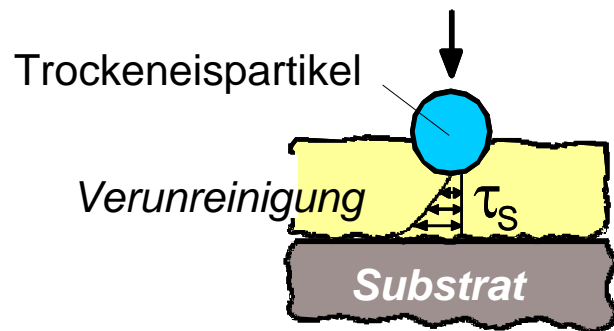
Fraunhofer

Institut
Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik

Gliederung

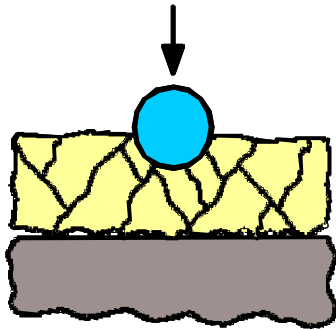
- Stand der Technik
- Ausgangssituation und Zielsetzung
- Vorgehensweise
- Bestimmung der Mohs-Härte von Trockeneis
- Untersuchungen zur Strahlstoßkraft
- Diskussion der Ergebnisse
- Ausblick

Wirkmechanismen Thermischer Effekt



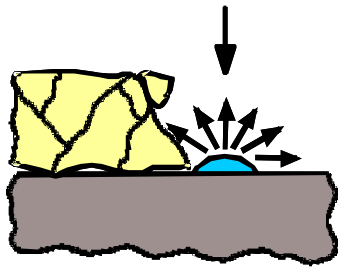
- Schockartige lokale Abkühlung der Verunreinigung
 - Versprödung durch Kälte
 - Spannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen zwischen Verunreinigung und Substrat
- Entstehung von Rissen

Wirkmechanismen Mechanischer Effekt



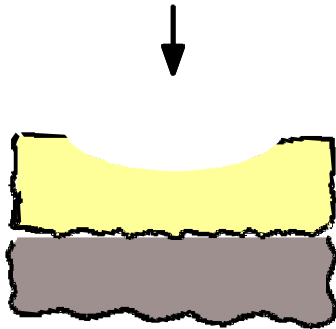
- Aufprall der Pellets:
Geschwindigkeit der Trockeneispartikel bis 300 m/s (Schallgeschwindigkeit), aber geringe Ritzhärte von Trockeneis
- Erzeugung von Druckspannungen
 - Mechanische Abtrennung / Ablösung durch Impulsübertragung
 - Entfernung abgelöster Verunreinigungen und Schichtwerkstoffe durch Druckluftstrom

Wirkmechanismen Sublimationseffekt



- Übergang des Trockeneises zu gasförmigen CO_2
 - Weitere Abkühlung durch Sublimation
 - Schlagartige Volumenvergrößerung beim Phasenwechsel (ca. 700-fach)
 - Entstehung einer Druckwelle
- Ablösung durch Druckstoß

Wirkmechanismen Lösemittelfekt



- Gute Löslichkeit von Kohlenwasserstoffen in flüssigem und überkritischem CO₂
- Beim Auftreffen könnten die Partikel diesen Zustand erreichen
- Auftreten des Effekts ist bisher nicht nachgewiesen

Ausgangssituation und Zielsetzung

- Zusammenwirken der 3 + 1 Effekte maßgeblich für den Trockeneisstrahlprozess
- Anteil der einzelnen Effekte am Gesamtprozess unbekannt
- Abhängigkeit der Effekte von den Strahlparametern unbekannt
- Ziel: Separierte Betrachtung der Effekte beim Trockeneisstrahlen mit Hilfe eines Modellwerkstoffes
- Anschließend Betrachtung von Möglichkeiten zur gezielten Steigerung der einzelnen Effekte

Vorgehensweise mechanischer Effekt

- Ziel: Analyse des mechanischen Effektes durch Vergleich mit beständigen Strahlmittel
- Vorauswahl von alternativen beständigen Strahlmittel aufgrund von Partikelhärte und -größe
- Hierzu Nachweis der Härte von Trockeneis:
 - Literaturnachweis über bisherige Angabe
 - Bestimmung der Mohs-Härte
- Strahlstoßkraft als Maß für die kinetische Energie und damit für den mechanischen Effekt

Vorgehensweise mechanischer Effekt

- Betrachtung der Stoßkraft in Abhängigkeit von den Strahlparametern

Weiterhin geplante Untersuchungen:

- Almentest als Vergleichswert für die Strahlintensität (Maß für die Wirkung aufprallender Partikel auf die Werkstückoberfläche)
- Vergleichende Untersuchungen zur Entschichtungs- bzw. Reinigungsleistung an Modellwerkstoff, um Anteil des Effektes am Gesamtprozess beurteilen zu können

Mohs-Härte Überblick



Trockeneispellets,
Trockeneisblock
Quelle: Linde Gas

- Von Friedrich Mohs Anfang 19. Jhd. entwickelt
- Definiert als Widerstand gegen Ritzen
- Zur Klassifizierung von Mineralien
- Ermöglicht einfache Charakterisierung „vor Ort“
- Quantitativer Vergleich von Mineralien untereinander
- Andere Härteprüfverfahren für Trockeneis ungeeignet
- Härteangabe in der Literatur häufig 2-3 Mohs

Mohs-Härte

Härteskala



Quelle: www.chemie-master.de

Härte	Skalamineral	Chemische Zusammensetzung	Ungefähre Vickershärte
1	Talk (Speckstein)	$Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$	2
2	Gips	$CaSO_4$	35
3	Kalkspat (Calcit)	$CaCO_3$	172
4	Flussspat (Fluorit)	CaF_2	248
5	Apatit	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$	610
6	Feldspat (Orthoklas)	$KAlSi_3O_8$	930
7	Quarz	SiO_2	1120
8	Topas	$Al_2SiO_4(F,OH)$	1250
9	Korund	Al_2O_3	2100
10	Diamant	C	10000

Mohs-Härte

Vorgehensweise



Speckstein



Gips

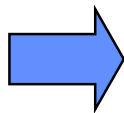


Calcit

- Trockeneisblöcke als Prüfobjekte
- Vergleichsmaterialien:
 - Speckstein, Härte 1
 - Gips, Härte 2
 - Calcit, Härte 3
- Vergleichsmaterialien kühlen
- Jeweils TE mit Vergleichsmaterial ritzen und Gegenprobe
- Mehrmals in unterschiedlicher Richtung ritzen

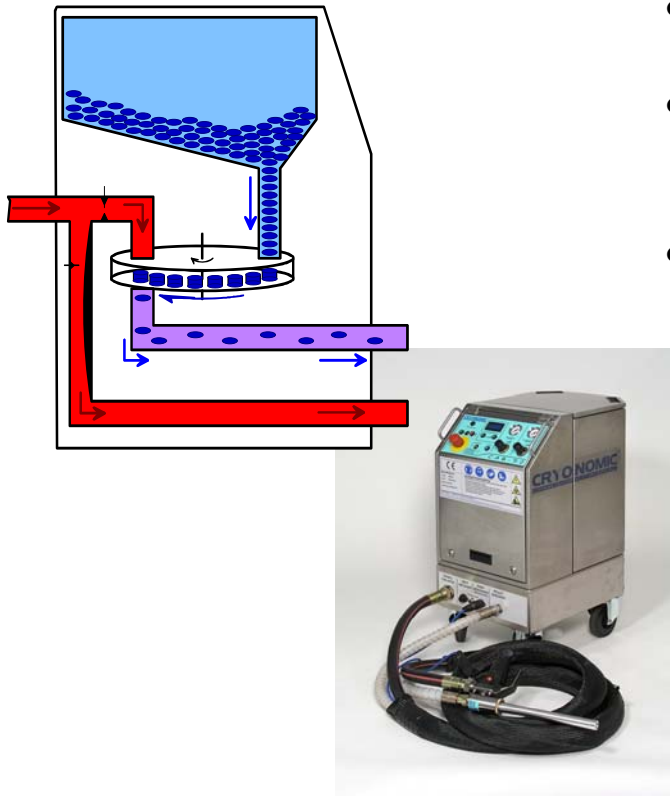
Mohs-Härte Ergebnisse

- Trockeneis konnte mit Speckstein nicht geritzt werden, ritzt selbst aber Speckstein
- Trockeneis konnte mit Gips geritzt werden, teilweise wurde der Gips dabei beschädigt
- Ritzen von Gips mit Trockeneis ergibt keine sichtbare Kerbe
- Trockeneis konnte mit Calcit geritzt werden, jedoch Calcit nicht mit Trockeneis
- Trockeneis ritzt Material mit Härte 1 und Material mit Härte 2 ritzt Trockeneis



Härte von Trockeneis: 1,5 Mohs

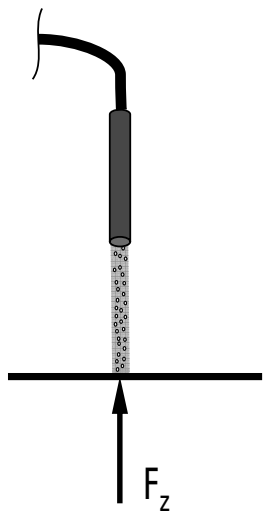
Anlagentechnik



- Injektor Zweischlauchanlage
- Massenstrom über Drehzahl der Dosierscheibe regulierbar
- Transport- und Strahldruck unabhängig voneinander einstellbar

Strahlstoßkraft

Motivation

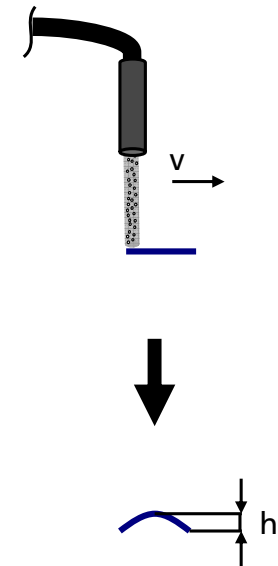


Stoßkraft

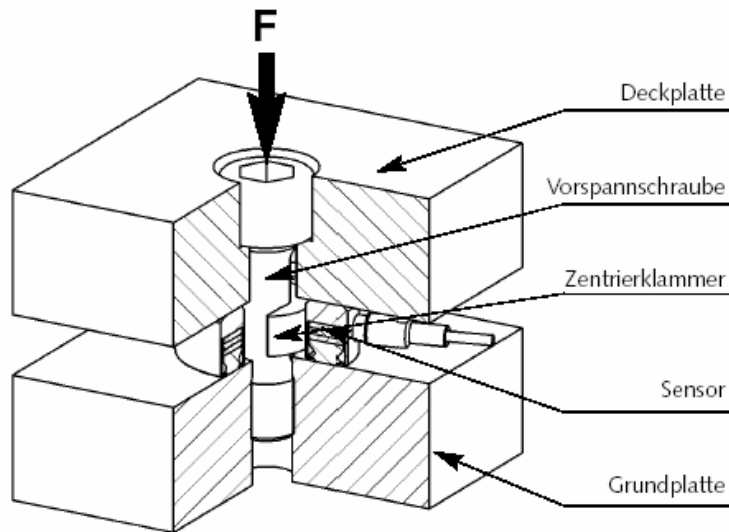
- Direktes Messverfahren
- Unabhängig von der „Homogenität“ des Strahls
- Stoßkraft resultiert aus kinetischer Energie
- Unabhängig von Partikelhärte

Almenintensität

- Indirektes Messverfahren
- Hängt von Partikelgröße, -form und -härte ab
- Keine genormten Prüfplättchen für das Trockeneisstrahlen verfügbar
- Voruntersuchungen mit Originalplättchen ohne Erfolg



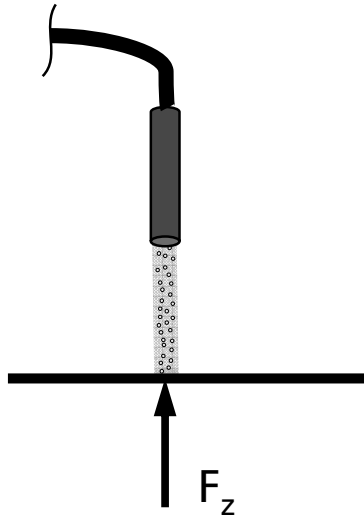
Strahlstoßkraft Messprinzip



- Kraftmessung mit Hilfe eines Quarz-Messensors
- Kraftänderung bewirkt Ladungsänderung
- Ladungsänderung ist proportional zur Größe der Kraft
- Umwandlung der Ladung in elektr. Spannung über einen Ladungsverstärker
- Messwertaufnahme mit Hilfe eines PC

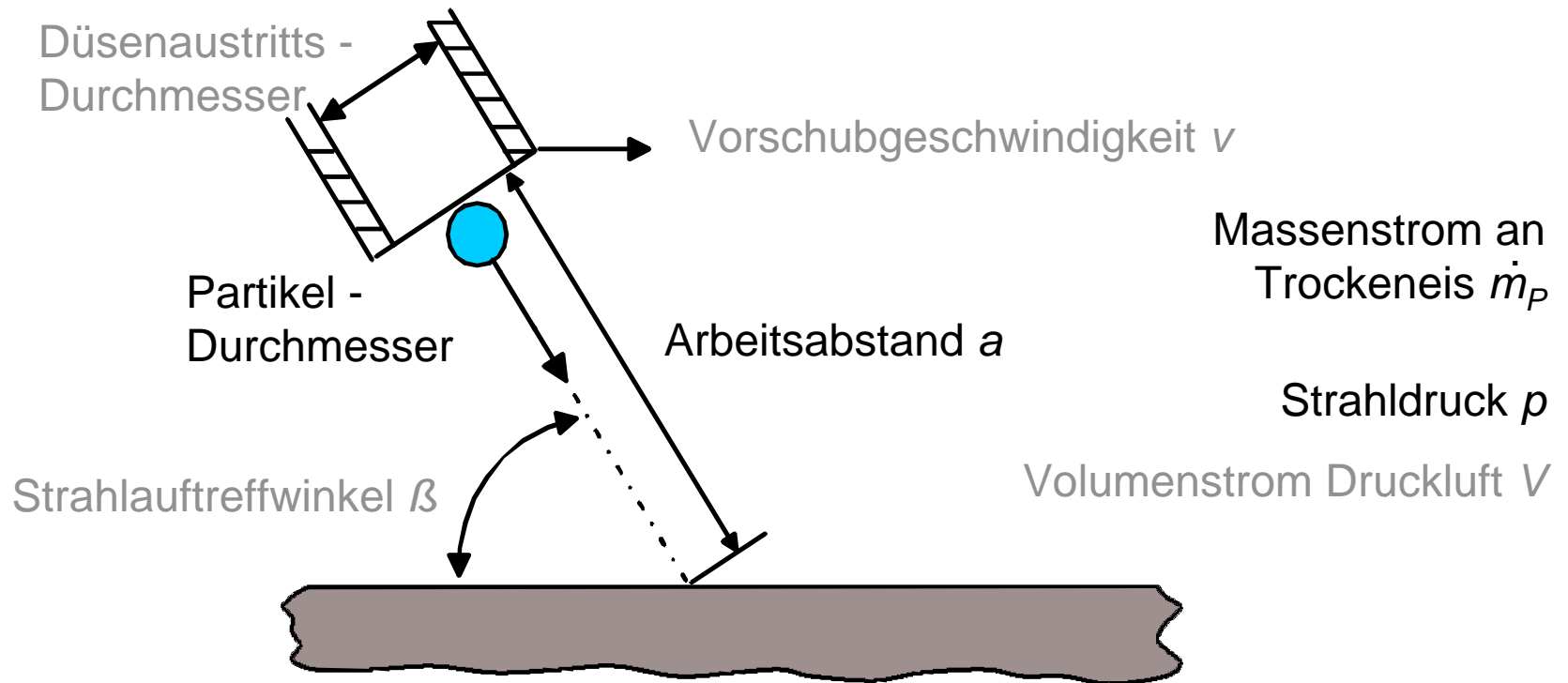
Quelle: Kistler Instrumente AG, Schweiz

Strahlstoßkraft



- Stoßkraft entspricht der Kraft, die der Trockeneisstrahl beim Auftreffen auf eine Oberfläche ausübt
- Annahme: Stoßkraft ist die Summe der Kraft aus der Druckluft und der Kraft durch die Pellets
- Genauer Stoßvorgang unbekannt
- Stoßkraft nahezu unabhängig von Härte
- Vermutungen:
 - $F_z \approx \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(m \cdot v) = \dot{m} \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2$
 - Stoßkraft steigt mit Druck
 - Stoßkraft steigt mit Pelletmassenstrom
 - Stoßkraft wird durch größere Partikel erhöht

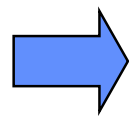
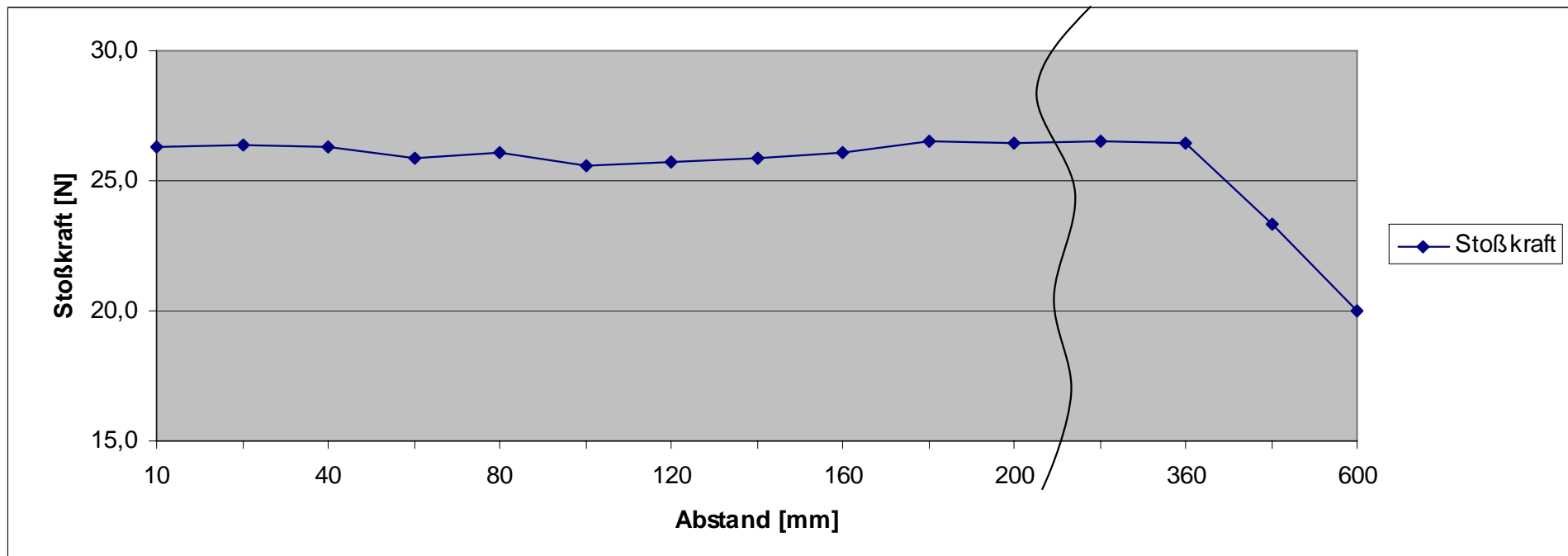
Strahlstoßkraft Einstellparameter



Stoßkraft

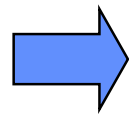
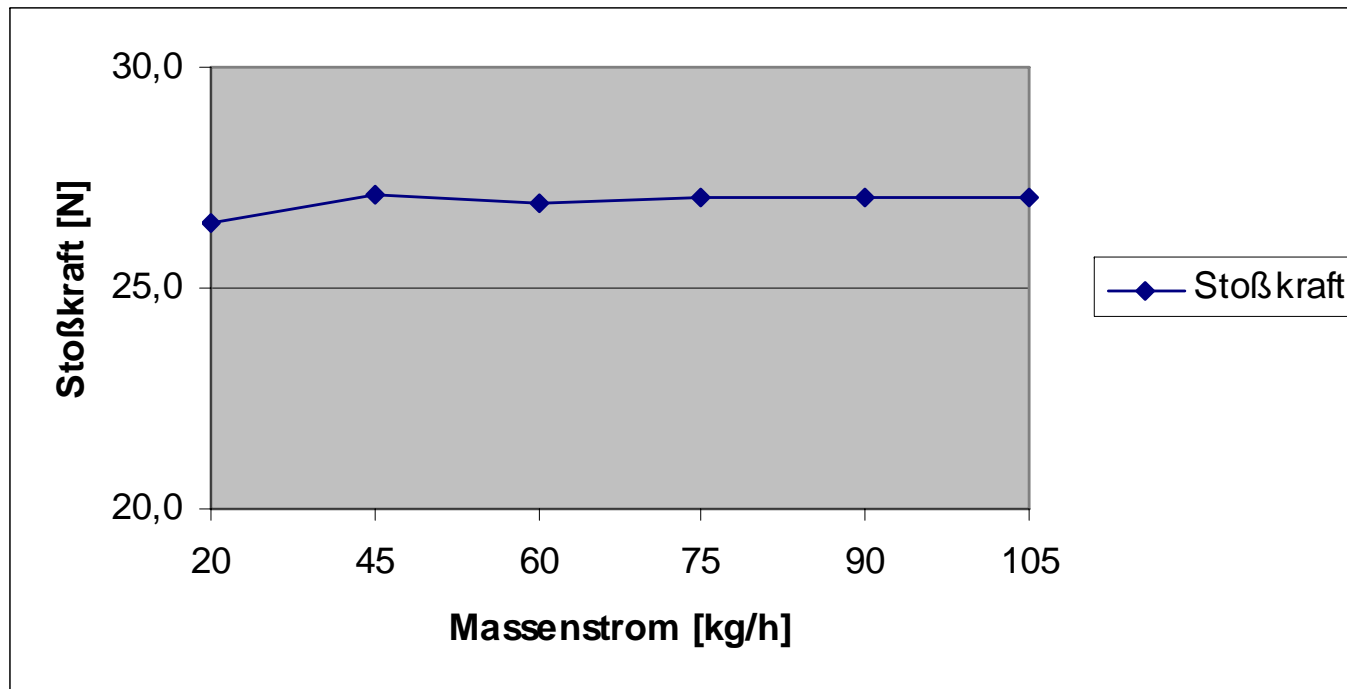
- Für jeden untersuchten Parameter 5 Messreihen, anschließend Betrachtung des arithmetischen Mittelwerts
- Messdauer je Messreihe 15 s
- Standardparameter:
 - Strahldruck 10 bar
 - Transportdruck 2,5 bar
 - Strahlabstand 100 mm
 - Massenstrom an CO₂-Pellets 75 kg/h
- Parameter ausgewählt nach „Anwendungsnahe“

Strahlstoßkraft Ergebnisse



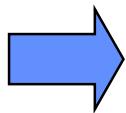
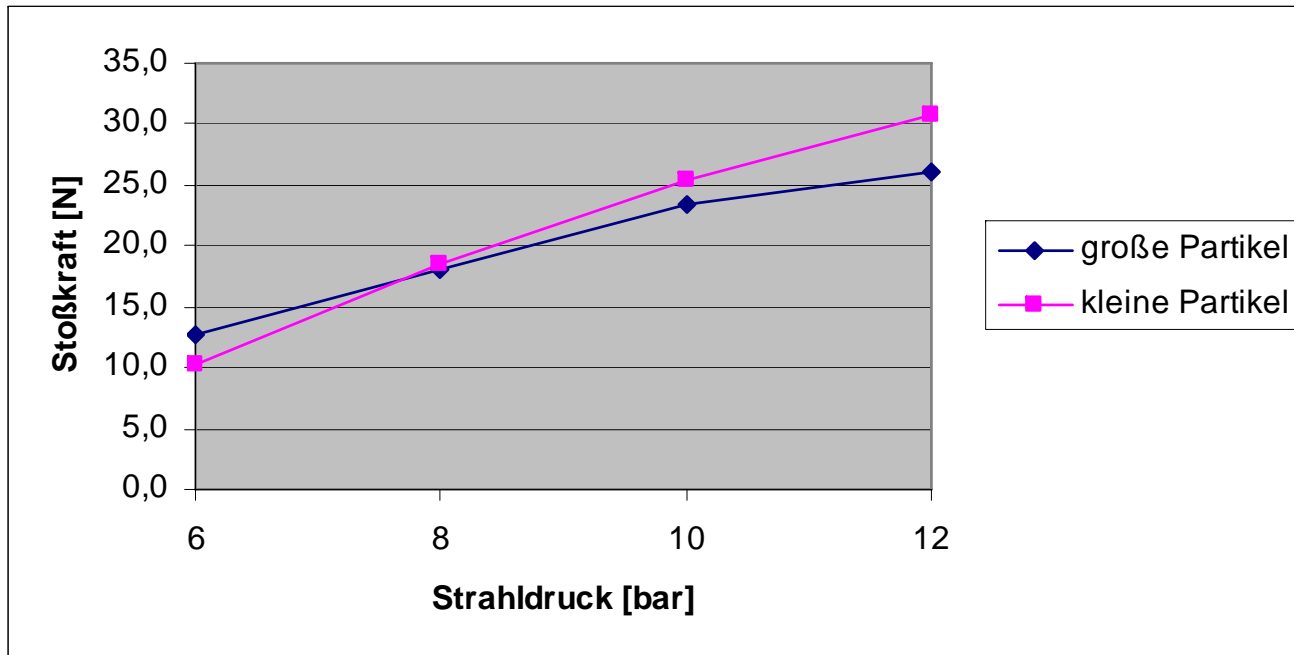
Stoßkraft ist unabhängig vom Strahlabstand

Strahlstoßkraft Ergebnisse



Stoßkraft ist unabhängig vom Massenstrom

Strahlstoßkraft Ergebnisse



Stoßkraft steigt mit zunehmendem Druck

Zusammenfassung

- Die Härte von Trockeneis beträgt 1,5 Mohs
- Unabhängigkeit der Stoßkraft vom Abstand wie erwartet
- Lineares Ansteigen der Stoßkraft mit dem Strahldruck

- Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Stoßkraft erkennbar
- kein Zusammenhang zwischen Massenstrom und Stoßkraft

Diskussion der Ergebnisse

Mögliche Erklärungsansätze:

1. Stoßkraftmessung ist grundsätzlich ungeeignet zur Charakterisierung des mechanischen Effektes
2. Partikelstöße werden vom Druckluftstrom überlagert und können daher nicht mit dem Kraftsensor erfasst werden
3. Mechanischer Effekt hat nur geringfügigen Anteil am Gesamtprozess

Ausblick



- Untersuchungen zur Strahlintensität um die bisherigen Ergebnisse zu bestätigen oder weiter in Frage zu stellen
- Weitere Möglichkeiten zur Charakterisierung des mechanischen Effektes untersuchen, beispielsweise die Aufrauung von Oberflächen
- Untersuchungen zur Stoßkraft mit beständigen Strahlmitteln
- Mögliche alternative Strahlmittel: Kunststoffe mit geringer Mohs-Härte, Nusschalen- oder Maiskolbengranulat
- Vergleichende Entschichtungsversuche