
Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirkmechanismen beim Trockeneisstrahlen



Fraunhofer Institut
Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik

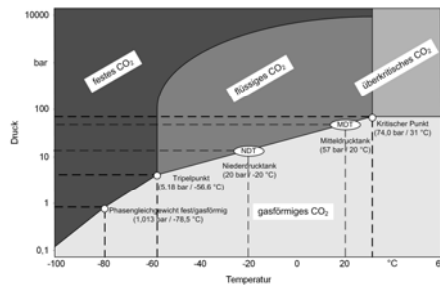
Seite 1 / 23

Gliederung

- Stand der Technik
- Motivation und Zielsetzung
- Mechanischer Effekt
- Thermischer Effekt
- Sublimationseffekt
- Wirkanteile der Mechanismen
- Ausblick

Seite 2 / 23

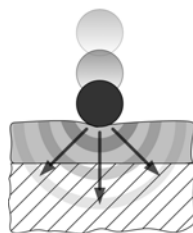
Stand der Technik - Trockeneis



- bei Umgebungsdruck keine flüssige Phase
→ Trockeneis (TE),
Dichte $\approx 1500 \text{ kg/m}^3$
- nicht giftig, kein gefährlicher Stoff,
bakteriostatisch, nicht elektrisch
leitend, chemisch inert
- Bearbeitung empfindlicher
Strahlgüter
- keine Strahlmittelrückstände durch
Sublimation
- Treibhaus-neutrale Nutzung von CO₂

Seite 3 / 23

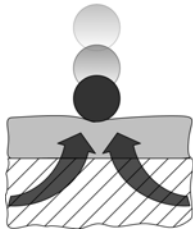
Stand der Technik – Mechanischer Effekt



- Impulsübertragung durch kinetische Energie des
Strahlmittels
- $d_p = 0,4 \dots 0,8 \text{ mm}$
 $v_p = 150 \dots 400 \text{ m/s}$
- Partikelmasse und -geschwindigkeit beeinflussen
andere Effekte
- Partikelhärte unberücksichtigt:
Härte TE 2-3 Mohs (1 Talk, 2 Gips, 3 Kalk)
- Bisher Stoßkraft zur Charakterisierung des mech.
Effektes untersucht (UHLMANN, ELBING, HABERLAND)

Seite 4 / 23

Stand der Technik – Thermischer Effekt



- Versprödung und unterschiedliche Wärmeausdehnung zwischen Schicht und Substrat
- Temperatur TE (1 bar) -78,5 °C
- Spannung proportional Temperaturdifferenz $\sigma = \frac{E \cdot \alpha}{(1-\nu)} \Delta T$
- Abkühlung des Strahlguts vielfach untersucht
- nach DONATH Anteil 60 %

Seite 5 / 23

Stand der Technik – Sublimationseffekt



- Druckstoß durch „explosionsartige“ Volumenerweiterung um Faktor 700
- nach STRATFORD vorherrschender Effekt
- nach REDEKER Sublimation beim Auftreffen 6...8 % durch kurze Stoßdauer
(REDEKER $t_{thep} = 200 \mu s$;
HABERLAND $t_{exp} = 22 \mu s$)

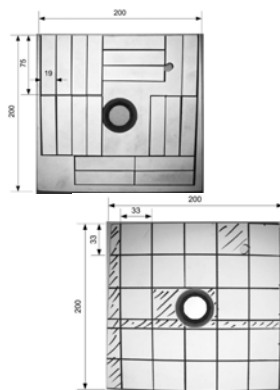
Seite 6 / 23

Motivation

- unterschiedliche Auffassungen bzgl. der Effekte beim Trockeneisstrahlen
- keine allgemeingültigen Methoden zur Analyse der Effekte
- Sublimationseffekt bisher nicht experimentell untersucht
- Wirkanteile der Effekte am Entschichtungsprozess unbekannt

Seite 7 / 23

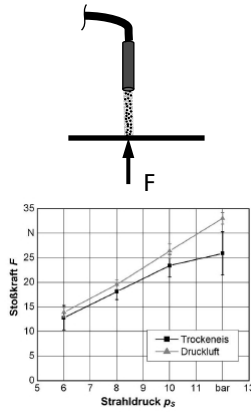
Zielsetzung



- Bereitstellung von Kenntnissen zu den einzelnen Effekten beim Trockeneisstrahlen
- Entwicklung von Methoden zur separaten Analyse der Effekte
- Quantifizierung der Wirkanteile an einem Werkstoffbeispiel
→Entfernen keramischer Wärmedämmschichten

Seite 8 / 23

Mechanischer Effekt – Stoßkraft



Analytisch $F = \frac{dl}{dt} = \frac{d}{dt}(m v) = \dot{m} v = \rho A v^2$

$\rho_{DL} \approx 1,2 \frac{kg}{m^3}$ $\bar{\rho}_{TES} \approx 1,37 \frac{kg}{m^3}$

Nach UHLMANN: $v(p_s) = 76,17 p_s^{0,55}$

→ linearer Anstieg der Stoßkraft mit dem Druck

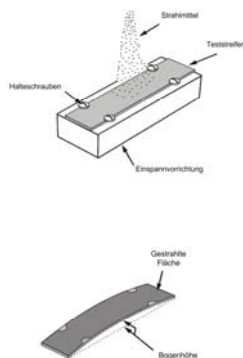
Werte experimentell bestätigt

Einfluss DL überwiegt → kein Einfluss Trockeneis

Ergebnis: Messung der Strahlstoßkraft ungeeignet zur Quantifizierung des mechanischen Effektes

Seite 9 / 23

Mechanischer Effekt – Strahlintensität



Indirektes Messverfahren zur Messung der mechanischen Leistung

Intensität = Leistung / Fläche
abhängig von Partikelform, -größe und -härte

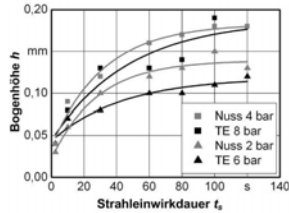
Höhe h der Erhebung Maß für die Strahlintensität

kein Ergebnis mit Standardplättchen

Verwendung von Aero-Almenplättchen (AA)

Seite 10 / 23

Mechanischer Effekt – vergleichbares Strahlmittel



■ gemessene Mohs-Härte von TE 1,5 Mohs

→ kein Strahlmittel mit vergleichbar geringer Härte

Strahlmittel	Mohs Härte	Korngröße d_p [mm]
Zink-Draht-Korn	2,5	0,8
Nusschalen	2,5-3,5	0,45 ... 1,0
Duroplast A-UF	3,5	0,5 ... 0,8
Duroplast A-SUPER	4	0,6 ... 1,0

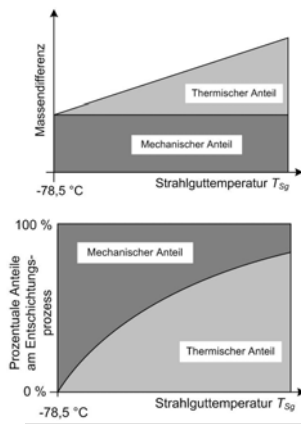
Seite 11 / 23

Mechanischer Effekt – Zusammenfassung

- Stoßkraft nicht zur Analyse des mech. Effekt geeignet
- Almentest mit AA Teststreifen als strahlgutunabhängige Methode zur Analyse des mechanischen Effekts qualifiziert
- Mohs-Härte von TE 1,5 Mohs; kein Strahlmittel mit ähnlicher geringer Härte verfügbar; Nusschalengranulat als alternatives Strahlmittel für Entschichtungsversuche identifiziert
- vergleichbare Abtragsleistungen beim Trockeneisstrahlen und Strahlen mit Nusschalengranulat lassen auf hohen Wirkanteil des mechanischen Effekts beim Trockeneisstrahlen schließen

Seite 12 / 23

Thermischer Effekt

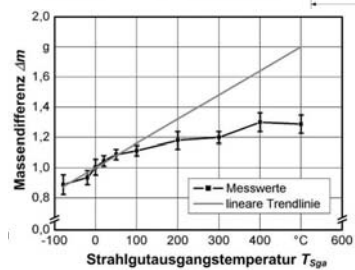
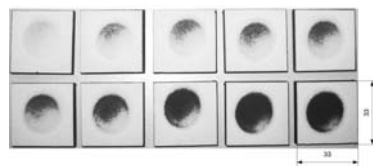


- Strahlguttemperatur abhängig von den Einstellparametern
- höhere Abtragsleistung bei höherer Strahlguttemperatur
- Einstellparameter Strahlgutausgangstemperatur T_{Sga} ausschließlich Einfluss auf thermischen Effekt, bei $T_{Sga} = -78,5\text{ °C}$ Anteil Null

→ Entschichten von temperierten Strahlgutproben

Seite 13 / 23

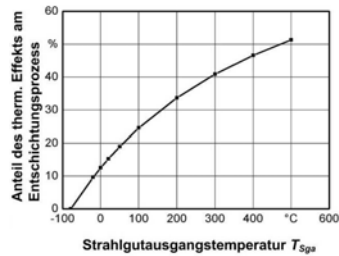
Thermischer Effekt – Separation



- Vergleich des Abtrags bei unterschiedlich temperierten Proben mit einer keramischen Wärmedämmschicht
- Durch begrenzte Schichtdicke:
 - degressiver Anstieg
 - lineare Extrapolation

Seite 14 / 23

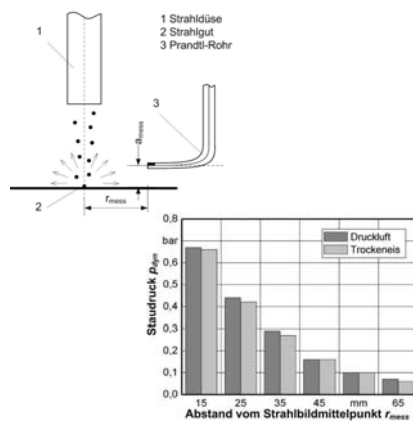
Thermischer Effekt – Zusammenfassung



- separate Analyse des thermischen Effekts durch Variation der Strahlgutausgangstemperatur möglich
- bei $T_{Sga} \leq 50$ °C lineare Steigerung der Abtragsleistung, bei $T_{Sga} > 50$ °C Teilbereiche der WDS vollständig abgetragen
- Wirkanteil des thermischen Effekts steigt von 15 % bei $T_{Sga} = 20$ °C auf 51 % bei $T_{Sga} = 500$ °C

Seite 15 / 23

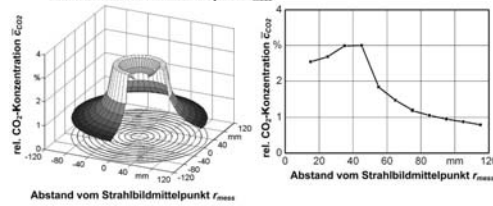
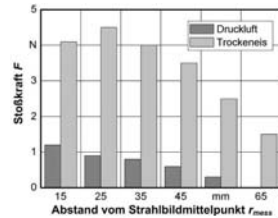
Sublimationseffekt – Druckstoß



- Sublimation bewirkt Druckstoß parallel zur Strahlgutoberfläche durch Volumenerweiterung
- Messbar durch Vergleich Staudruck Druckluft- / Trockeneisstrahlen $f(r_{mess})$
- Steigerung Staudruck bei niedrigem Strahl Druck und hohem Trockeneismassenstrom feststellbar

Seite 16 / 23

Sublimationseffekt – Sublimationsgrad



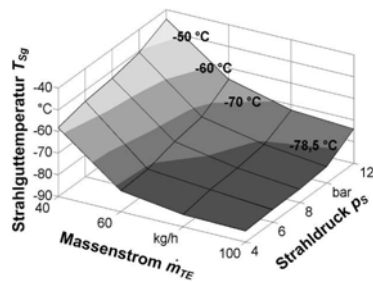
- Vergleich Stoßkraft Druckluft- / Trockeneisstrahlen $f(r_{mess})$
- keine vollständige Sublimation beim Auftreffen

$$s = \frac{C_{CO_2, mess}}{C_{CO_2, voll, mess}}$$

- $s (r_{mess} = 15 \text{ mm}; a_{mess} = 0 \text{ mm}) = 37,8 \%$
- keine Steigerung mit Erhöhung von T_{Sg}

Seite 17 / 23

Sublimationseffekt – Absenkung der Strahlguttemperatur



- bisherige Auffassung: $T_{Sg, min} = -78,5 \text{ °C}$
- bei niedrigem Strahlrdruck und hohem Trockeneismassenstrom $T_{Sg} < -78,5 \text{ °C}$
- Vermutung:
Partialdruck $CO_2 < 1 \text{ bar}$
 $\rightarrow T_{Sub} < -78,5 \text{ °C}$
- Beweis:
Modellversuch $T_{min} = -94,5 \text{ °C}$

Seite 18 / 23

Sublimationseffekt – Zusammenfassung

- Auswirkung des Sublimationseffekt über Messung des Staudrucks experimentell nicht nachweisbar
 - keine vollständige Sublimation der Trockeneispartikeln beim Auftreffen
 - Anteil des sublimierten Trockeneises durch Messung der rel. CO₂-Konzentration bestimmt; Sublimationsgrad nahe des Auftreffpunkts 37,8 %
 - Strahlguttemperaturen kleiner als -78,5 °C aufgrund des geringen Partialdrucks des CO₂ möglich
- Sublimation des Strahlmittels wesentlicher Verfahrensvorteil
- Beitrag an Entschichtung vernachlässigbar

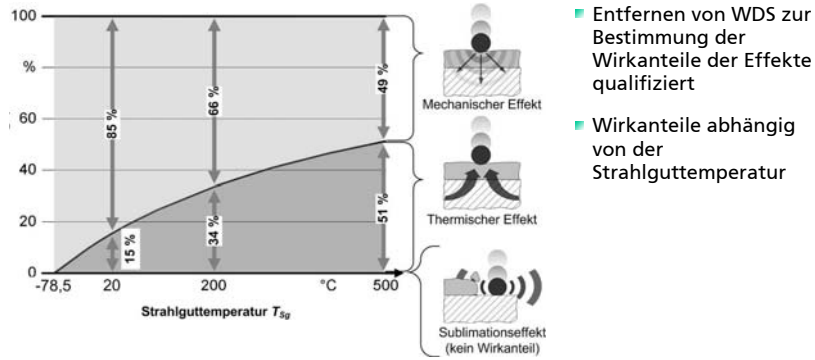
Seite 19 / 23

Zusammenfassung

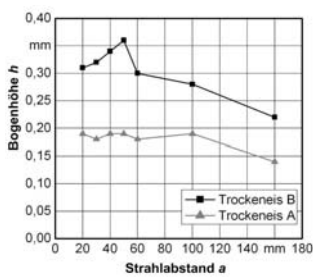
- Erweitertes Prozessverständnis des Trockeneisstrahlens
- Härte von Trockeneis beträgt 1,5 Mohs; kein anderes Strahlmittel mit ähnlich geringer Härte bekannt
- Almentest (AA) als strahlgutunabhängige Methode zur Analyse des mechanischen Effekts anwendbar
- Thermischer Effekt durch Variation der Strahlgutausgangstemperatur quantifizierbar
- Beitrag des Sublimationseffekts am Entschichtungsprozess nicht nachweisbar; Anteil des beim Auftreffen sublimierenden Trockeneises < 37,8 %
- Strahlguttemperaturen kleiner -78,5 °C möglich

Seite 20 / 23

Wirkanteile der Effekte am Beispiel einer keramischer Wärmedämmschicht



Ausblick



- Werkzeug jedes Strahlverfahrens ist Strahlmittel
- Erkenntnisstand zu Trockeneispellets unzureichend
- Beispiel: Bogenhöhe in Abhängigkeit vom Strahlabstand
 - Identische Anlagentechnik und Einstellparameter
 - Trockeneispellets unterschiedlichen Alters
- hohe Sensitivität des Almentests
- Untersuchung der Eigenschaften und Einflussparameter auf das Strahlmittel Trockeneis notwendig
- Steigerung des mechanischen Effekts durch Trockeneis mit höherer Härte und Dichte möglich?

Seite 22 / 23

Literatur

STRATFORD, S.: Perspectives on Surface Preparation with CO₂ Blasting. In: *SSPC 90 : Proceedings of the seminars (Nashville, Tennessee/USA, 1990)*, S. 149-155

DONATH, S.: *Rückstandsfreies Strahlverfahren mit CO₂-Pellets zum Entlacken*. Berlin : Kommunikation Technik, 1991 (Schriftenreihe Praxis-Forum, Fachbroschüre Oberflächentechnik)

REDEKER, C.: *Abtragen mit dem Trockeneisstrahl*. Hannover, Universität, Diss., 2003 (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 639)

HABERLAND, J.: *Reinigen und Entschichten mit Trockeneisstrahlen : Grundlegende Untersuchung des CO₂-Strahlwerkzeuges und der Verfahrensweise*. Bremen, Universität, Diss., 1999 (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 502)

UHLMANN, E.; AXMANN, B.; ELBING, F.: Trockeneisstrahlen : Neue Erkenntnisse durch Hochgeschwindigkeits-Videographie. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* (1998), Nr. 7, S. 46-51

UHLMANN, E.; AXMANN, B.; ELBING, F.: Stoßkraftmessung beim Strahlen mit CO₂-Pellets. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 93 (1998), Nr. 6, S. 240-243

Seite 23 / 23