Entwicklung einer ressourceneffizienten Frästechnik mit kryogener Kühlung

Dr. Andrea Stoll

Projektteam:

starrag heckert
Starrag Group

SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke

Dr. Gühring KG

Fraunhofer IWU

Kolloquium blueS
RESSOURCENEFFIZIENTE FERTIGUNGSSYSTEME UND TECHNOLOGIEN
Fraunhofer IWU Chemnitz, 8. Mai 2014

blue

Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

Gefördert aus Mitteln der Europäischen Union

Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

© Fraunhofer IWU

Gliederung

- Motivation / Zielstellung
- Projektverbund
- Lösungsansatz
- Zwischenergebnisse
  - Prozessgrundlagen
  - Werkzeugentwicklung
  - Maschinenkomponentenentwicklung
  - Entwicklung Sicherheitskonzept
- Zusammenfassung
- Ausblick / Weiteres Vorgehen

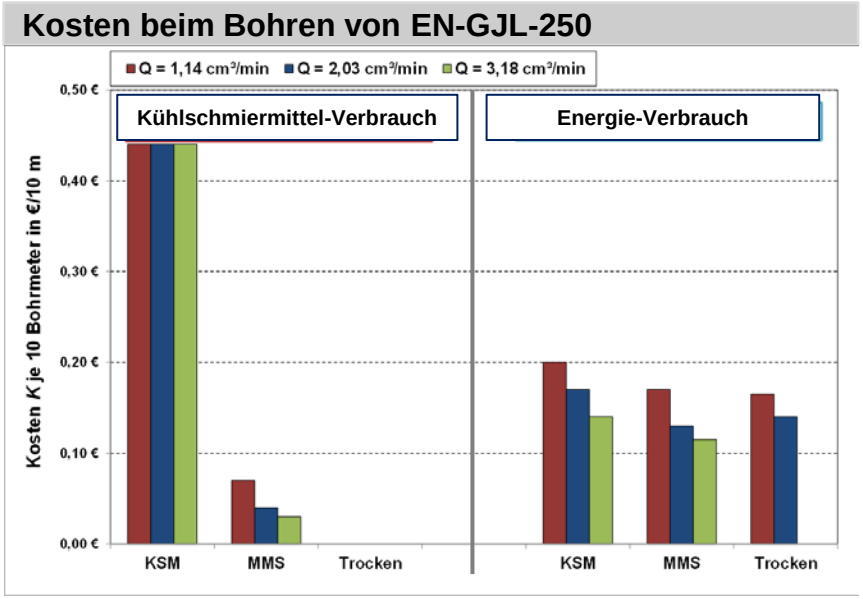
Archivierungsangaben

© Fraunhofer IWU

Motivation

Ausgangssituation / Problemstellung

- Kühlschmierung mit **Emulsion/Öl** ist **ressourcen- und kostenintensiv**
- **Trockenbearbeitung** aufgrund des Werkzeugverschleißes im **Zeitspanvolumen limitiert**
- Auf **Schmierung** kann beim Fräsen von schwer zerspanbaren Werkstoffen neben der **Kühlung** nicht vollständig verzichtet werden



Q = 2,03 cm³/s	$E_{Maschine}$	Standweg
KSM	100 %	100 %
MMS	80 %	57 %
Trocken	96%	11 %

Kühlschmierstoffverbrauch ↓
→ Energie Maschine geringfügig ↓
→ Werkzeugstandzeit signifikant ↓

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Motivation

Ausgangssituation / Problemstellung

- Kühlschmierung mit **Emulsion/Öl** ist **ressourcen- und kostenintensiv**
- **Trockenbearbeitung** aufgrund des Werkzeugverschleißes im **Zeitspanvolumen limitiert**
- Auf **Schmierung** kann beim Fräsen von schwer zerspanbaren Werkstoffen neben der **Kühlung** nicht vollständig verzichtet werden

Motivation

- Nutzung der **Effekte kryogener Kühlschmiermedien** zur **Prozessbeeinflussung** beim Fräsen schwer zerspanbarer Werkstoffe
- Möglichkeit der **Trockenbearbeitung** bei gleichzeitig ausreichender **Kühlschmierung**
- **Reduzierung** der **Fertigungszeiten** und **Kosten** durch Erhöhung der Effektivität
- **Kryogene** Kühlschmierung mittels CO_2-Öl-Gemisch birgt Potential hinsichtlich einer **kostengünstigen, ressourceneffizienten Hochleistungsbearbeitung**

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zielstellung

- **Schaffung verfahrens- und anlagenseitiger Grundlagen** zur wirtschaftlichen Fräsbearbeitung hochfester, schwerzerspanbarer Werkstoffe
- **Prozesssichere** Umsetzung einer **Werkzeug-Innenkühlschmierung** durch die Hauptspindel mittels CO_2-Öl-Gemisch (**gekühlter Ölnebel**) in Serienmaschinen
- Entwicklung effizienter **Werkzeuge und Schnittstellen** unter Berücksichtigung der physikalischen und anwendungsspezifischen Besonderheiten einer CO_2-Kühlschmierung
- Reduzierung des Werkzeugverschleißes bei **erhöhtem Zeitspanvolumen**
- **Steigerung der Produktivität** durch signifikante Senkung des Zeit-, Energie- und Kostenaufwandes beim Fräsen

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Projektverbund

Teilthema 1:	Teilthema 2:	Teilthema 3:
Konzepte für die Entwicklung eines Bearbeitungszentrums zur kryogenen Zerspanung	Integration einer CO_2-Kühlschmierung in das Hauptspindelsystem	Entwicklung tief-temperaturgeeigneter Werkzeuge und Schnittstellen
starrag heckert Starrag Group	SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke	Dr. Gühring KG

Grundlegende wissenschaftliche Prozessuntersuchungen
Verfahrensuntersuchungen unter Laborbedingungen

Fraunhofer IWU

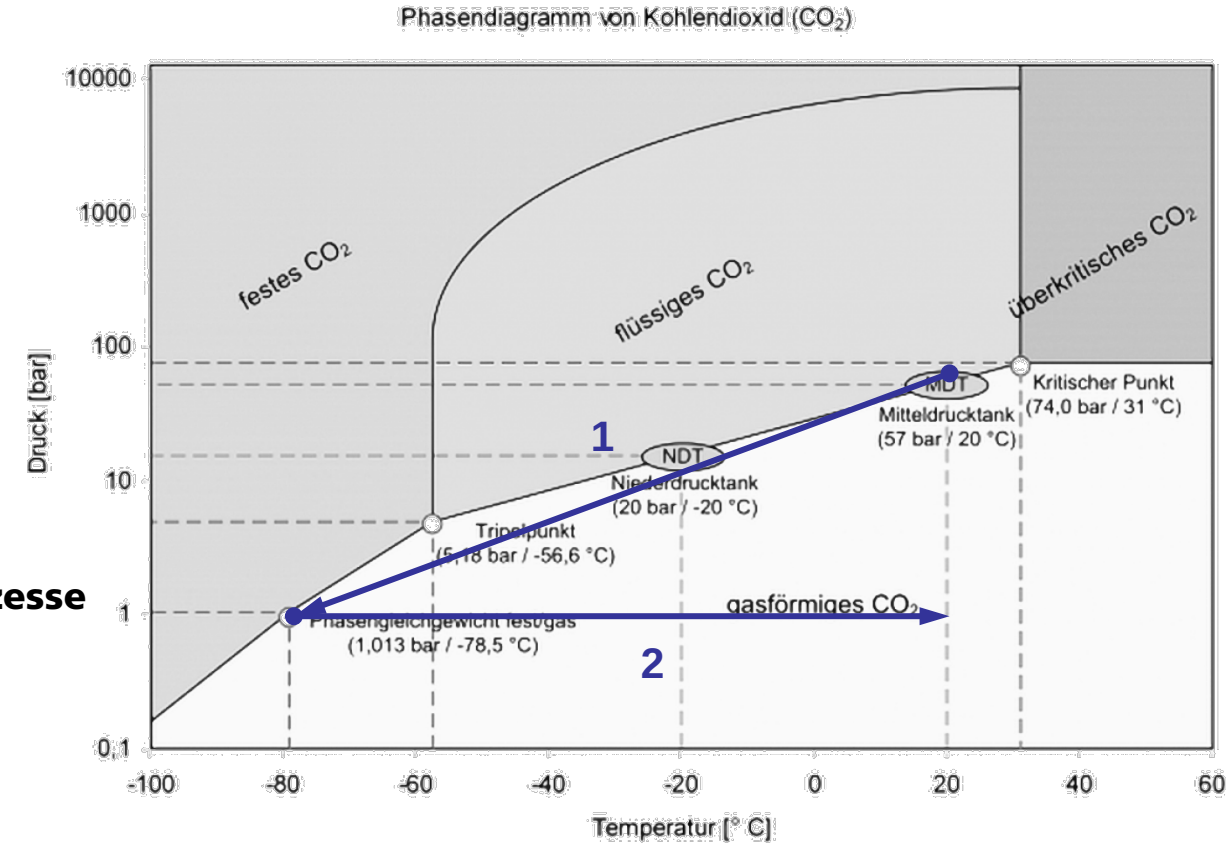
Lösungsansatz

Identifikation der physikalischen Einflussfaktoren Druck, Temperatur, Aggregatzustand

1 Kälteerzeugung durch
Entspannung des **flüssigen** CO_2 auf Atmosphärendruck; Bildung **fester** CO_2-Schnee (-78,5°C)

2 Wärmeübertragung durch

- **Temperaturdifferenz** der Systeme (CO_2 – Schnittzone)
- **Phasenumwandlungsprozesse** (Sublimation des festen CO_2)



Quelle: Krieg/Bilz/Mankiewicz

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Lösungsansatz

- **Entwicklung eines Versuchsstandes**
  - ➔ Untersuchung der Wirkmechanismen eines CO_2-Öl-Gemisches
  - ➔ Durchführung und Bewertung von Verbrauchsanalysen
  - ➔ Spezifizierung von Werkzeug- und Schnittstellenentwicklungen

  Herausforderung:

  - **Strömungs- und Mischungsverhaltens** eines **mehrphasigen** CO_2-Öl-Gemisches
  - **verlässliche** Verbrauchsangaben
  - Bewertung des Kühlmittelstrahles (Einfluss **Zuführungsquerschnitt**, **Strahlaufbau**)

- **Werkzeug- und Schnittstellenentwicklung**
  - ➔ Entwicklung Kühlkanalsystem für innere Zuführung des CO_2-Öl-Gemisches
  - ➔ Entwicklung Kühlschmiermittel-Übergabeeinheit für kryogene Kühlschmierung
  - ➔ Schneidstoffspezifikation

  Herausforderung:

  - **Keine Berechnungsgrundlagen** zur Simulation mehrphasiger CO_2-Öl-Gemische verfügbar
  - **Fertigungstechnische Gestaltung der Zuführung** mehrphasiger CO_2-Öl-Gemische
  - **CO_2-gerechte** Schneidstoffabstimmung

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Lösungsansatz

- **Prozess- und Verfahrensentwicklung**
  - ➔ Entwicklung von Bearbeitungstechnologien und -strategien

  Herausforderung:

  - Realisierung einer **prozesssicheren** und **wirtschaftlichen** Bearbeitung
  - Einhaltung der **Bauteilgenauigkeiten**

- **Maschinenkomponentenentwicklung**
  - ➔ Entwicklung von Lösungen zur Integration einer CO_2-Innen-Kühlschmierung in das Hauptspindelsystem von Bearbeitungszentren
  - ➔ Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheitskonzeptes
  - ➔ Konzeptentwicklung für ein Bearbeitungszentrum zur kryogenen Zerspanung

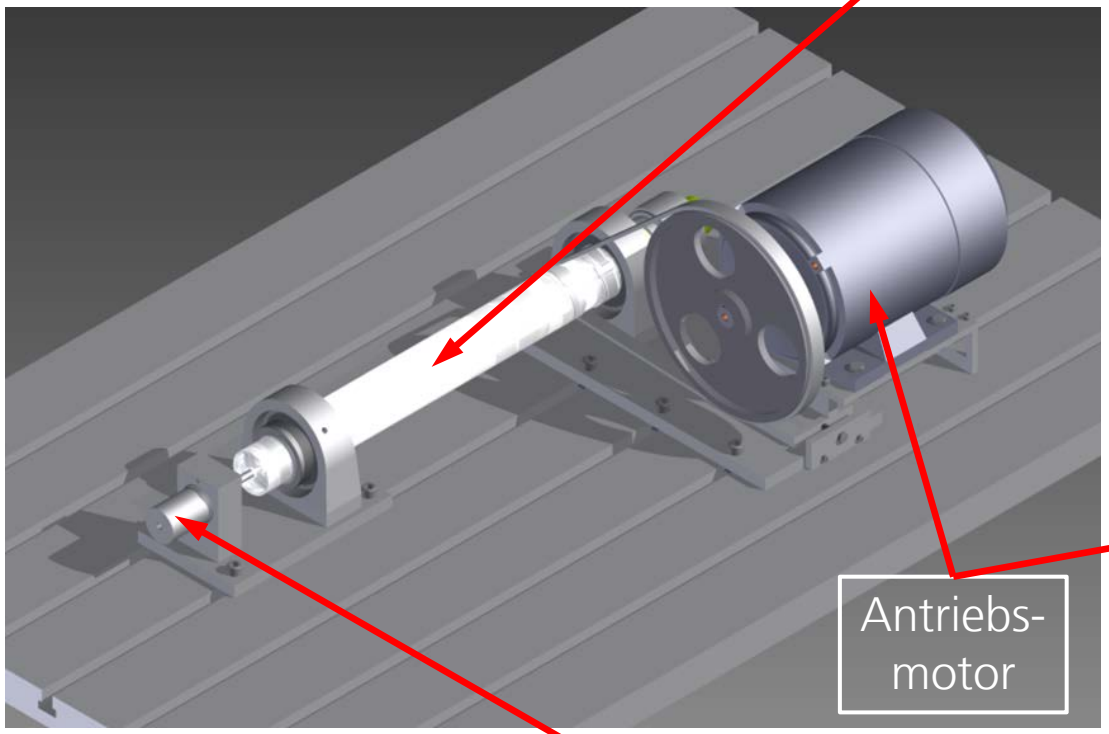
  Herausforderung:

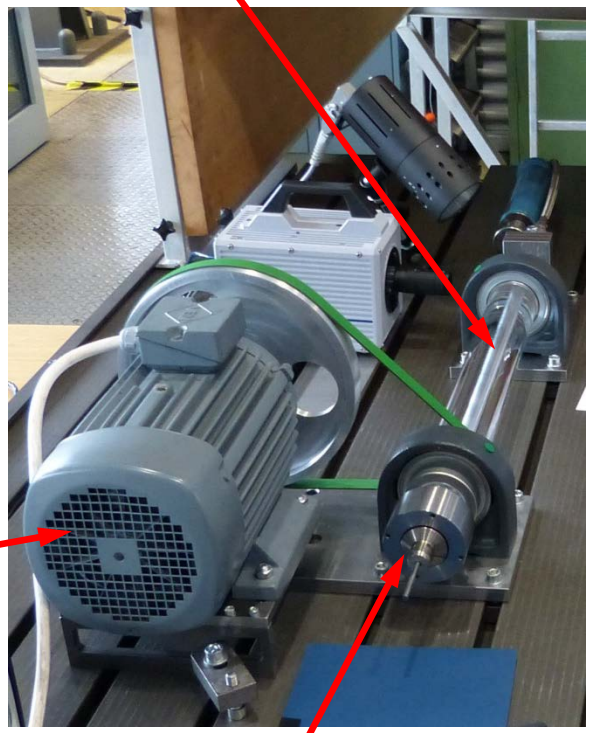
  - Sicherheitskonzept für **gefahrlosen Einsatz eines CO_2-Öl-Gemisches** zur Zerspanung in BAZ
  - **Werkzeug- und Temperaturüberwachungsstrategien**
  - Strategien zur **Temperaturkompensation** einzelner Maschinenelemente

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Prozessgrundlagen

Versuchsstand





Plexiglas-Spindel

Antriebs-motor

HSK-Werkzeugaufnahme

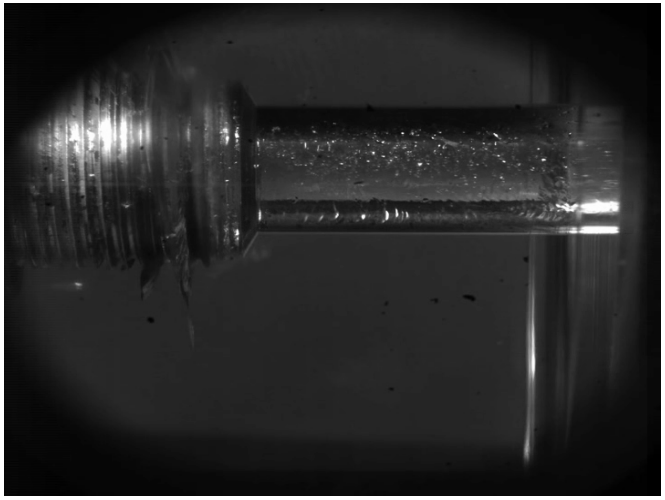
blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

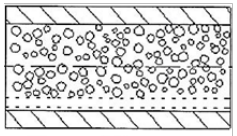
Zwischenergebnisse - Prozessgrundlagen

Strömungsverhalten von flüssigem CO_2 in der Spindel

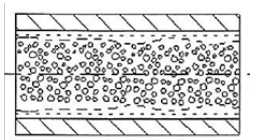
Einflussfaktor: Art der Einleitung in die Drehdurchführung

Radialer Anschluss



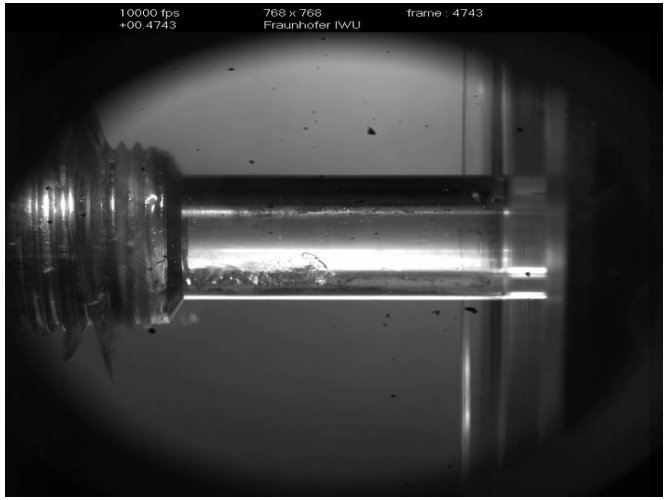


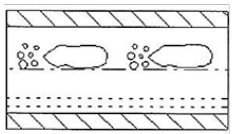
Blasenströmung



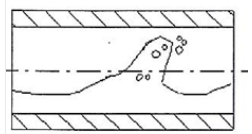
Ringströmung

Axialer Anschluss





Propfenströmung



Schwallströmung

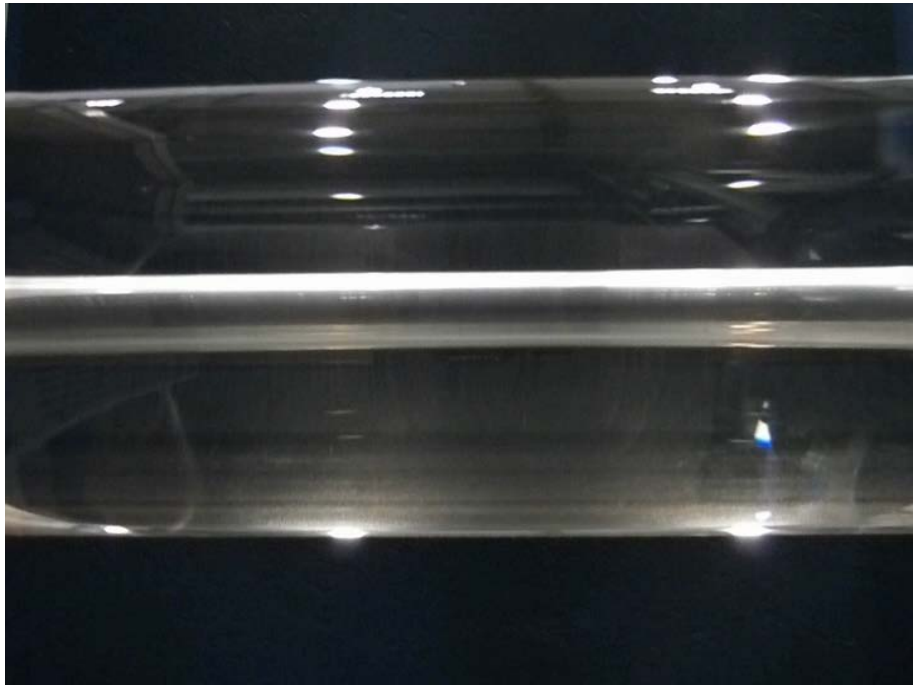
- **Keine Propfenbildung**
- **feinere Verteilung der Flüssigkeitstropfen**

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Prozessgrundlagen

Strömungsverhalten von flüssigem CO_2 in der Spindel

Einflussfaktor: Flüssigkeitsverteilung bei rotierender Spindel



- **Spiralförmige Verteilung** des flüssigen CO_2 an der **Spindel-Innenwand**

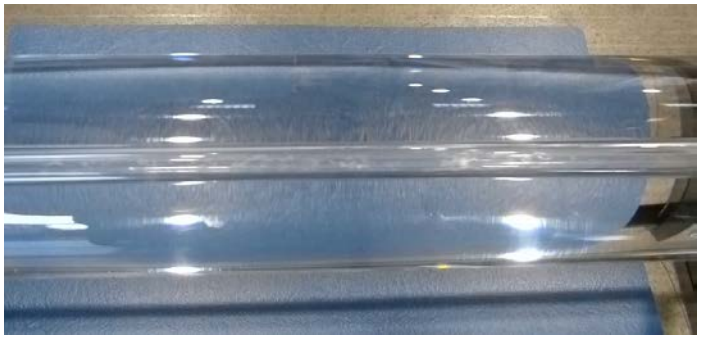
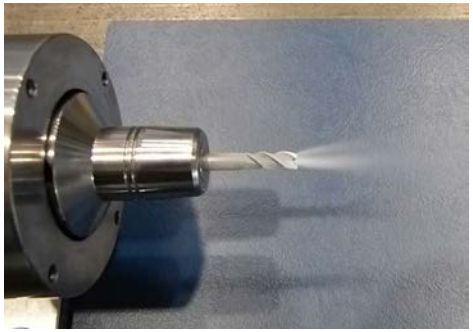
➔ **Mischung von CO_2 und Schmiermedien in rotierender Spindel problematisch**

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Prozessgrundlagen

Strömungsverhalten von flüssigem CO_2 in der Spindel

Einflussfaktor: Druck des gasförmigen CO_2 zur Strahlstabilisierung (gerätebedingt)

	Spindelrohr	Werkzeugaustritt
p = 27,6bar		
p = 37,9 bar		

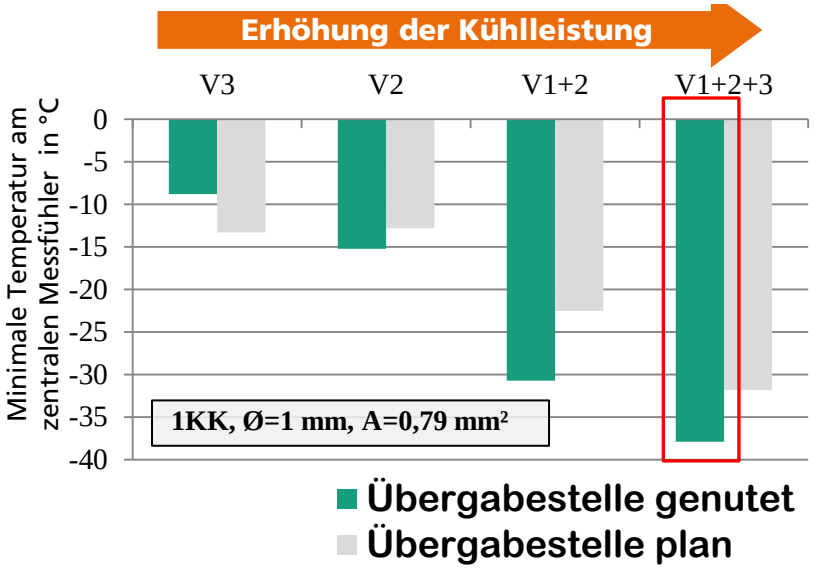
- **Mindestdruck** zur Stabilisierung des Schneestrahls **erforderlich**

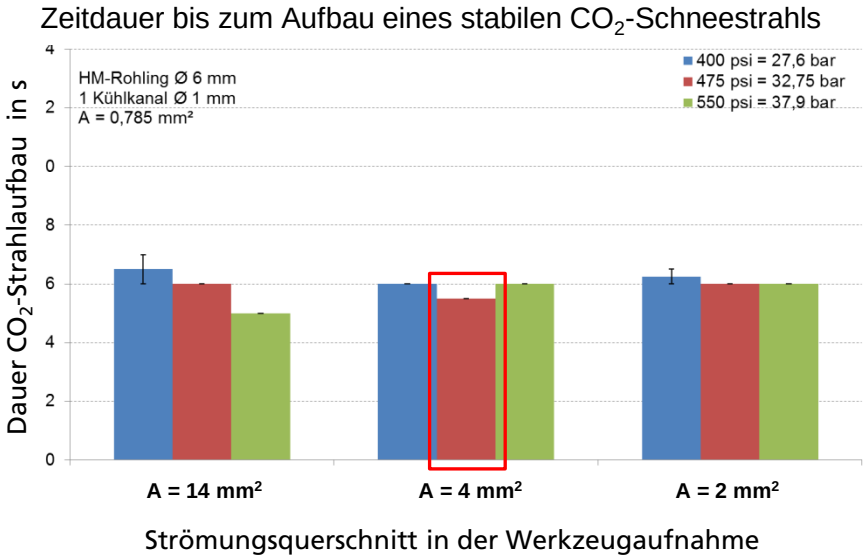
➔ Gasförmiges CO_2 bestimmt maßgeblich den Gesamt-CO_2-Verbrauch

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Werkzeugentwicklung

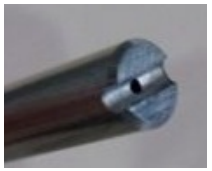
Gestaltung der Kühlschmiermittelzufuhr





FAZIT:

➔ **Übergabestelle** zur Werkzeugaufnahme **genutet**



➔ **1 zentraler Kühlkanal** zur besseren CO_2-Einleitung

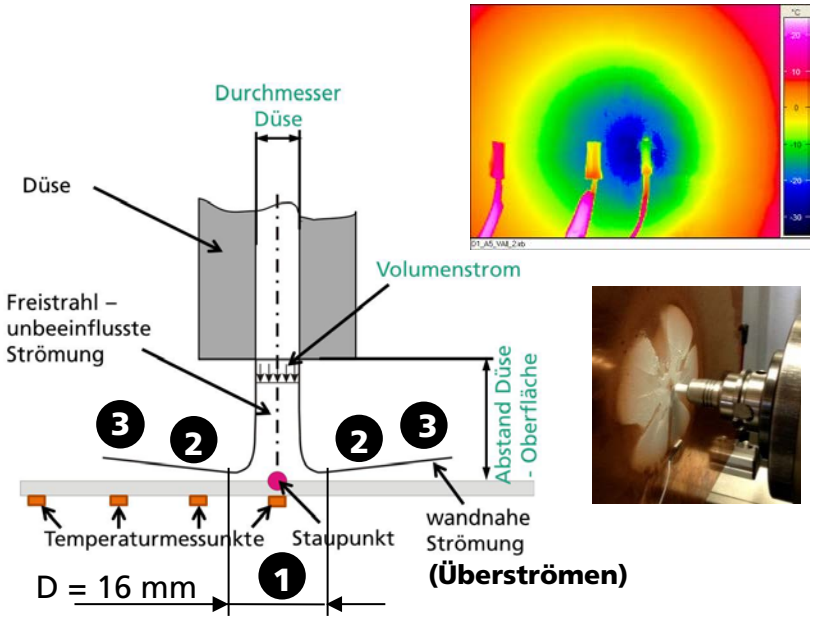
➔ **Strömungsquerschnitt** in der Werkzeugaufnahme → **4 mm²**

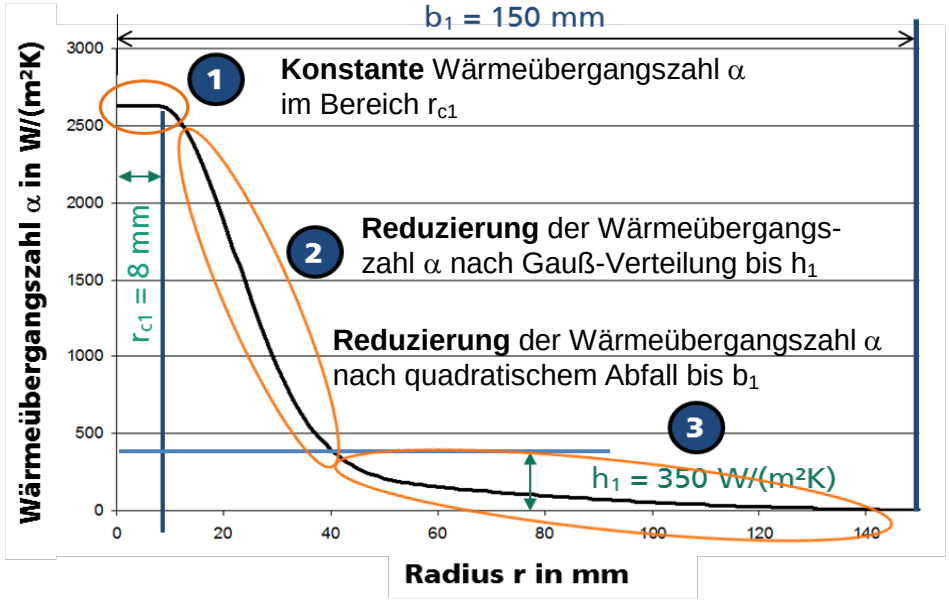
blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Werkzeugentwicklung

Gestaltung der Kühlschmiermittelzufuhr

Ermittlung der Wärmeübergangszahl





- ➔ **Minimal** erreichte **Temperatur im Staupunkt** -30 °C
- ➔ **Reduzierter Wärmeübergang** im **überströmten Bereich** durch Schnee- bzw. Eisschicht
- ➔ **Werkstück- / Düsenabstand** hat nur einen **geringen Einfluss**

FAZIT:

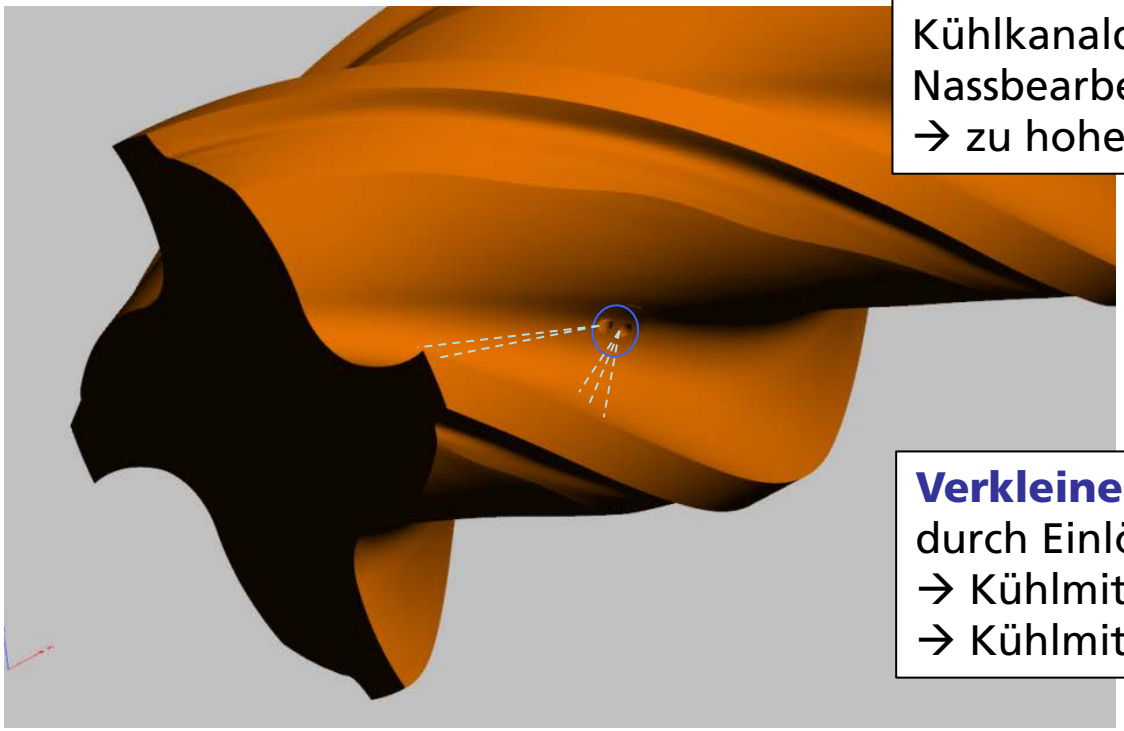
➔ **Realisierung eines Prallstrahles** je Schneide

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zwischenergebnisse - Werkzeugentwicklung

Werkzeugauslegung unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs und Strömungsverhaltens

Adaptiertes Werkzeug



Ansatz:
Kühlkanaldurchmesser bei Werkzeugen für Nassbearbeitung zu groß
→ zu hoher CO_2-Verbrauch

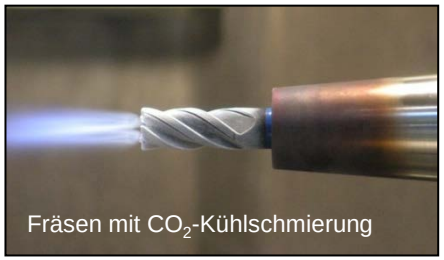
Verkleinerung des Kühlkanalaustrittes
durch Einlöten von Reduzierhülsen
→ Kühlmittelstrahl **Spanfläche**
→ Kühlmittelstrahl **Schneidenecke**

Zwischenergebnisse - Werkzeugentwicklung

Werkzeugauslegung unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs und Strömungsverhaltens

Fräsen von Guss GJV 450

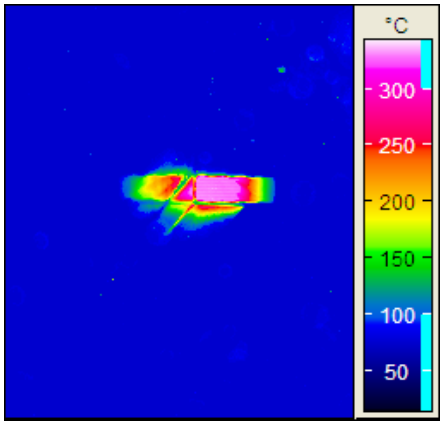
Bearbeitungsparameter:
v_c = 200m/min; f_z = 0,2mm; a_p = 1mm; a_e = 12mm



Aufnahmen mit Wärmebildkamera

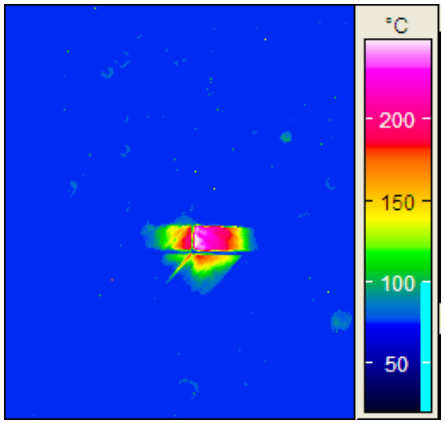
Reduzierung der Prozesstemperatur

ϑ_{max} = 335,4°C



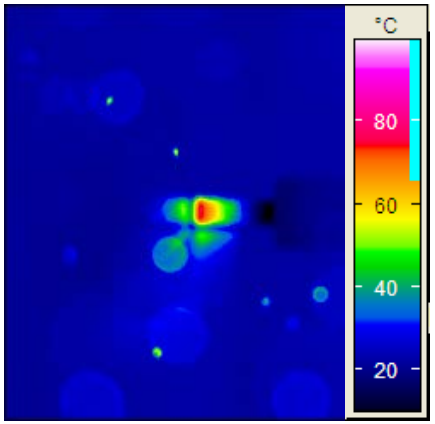
Trockenbearbeitung

ϑ_{max} = 250,4°C



Bearbeitung mit MMS

ϑ_{max} = 75,8°C



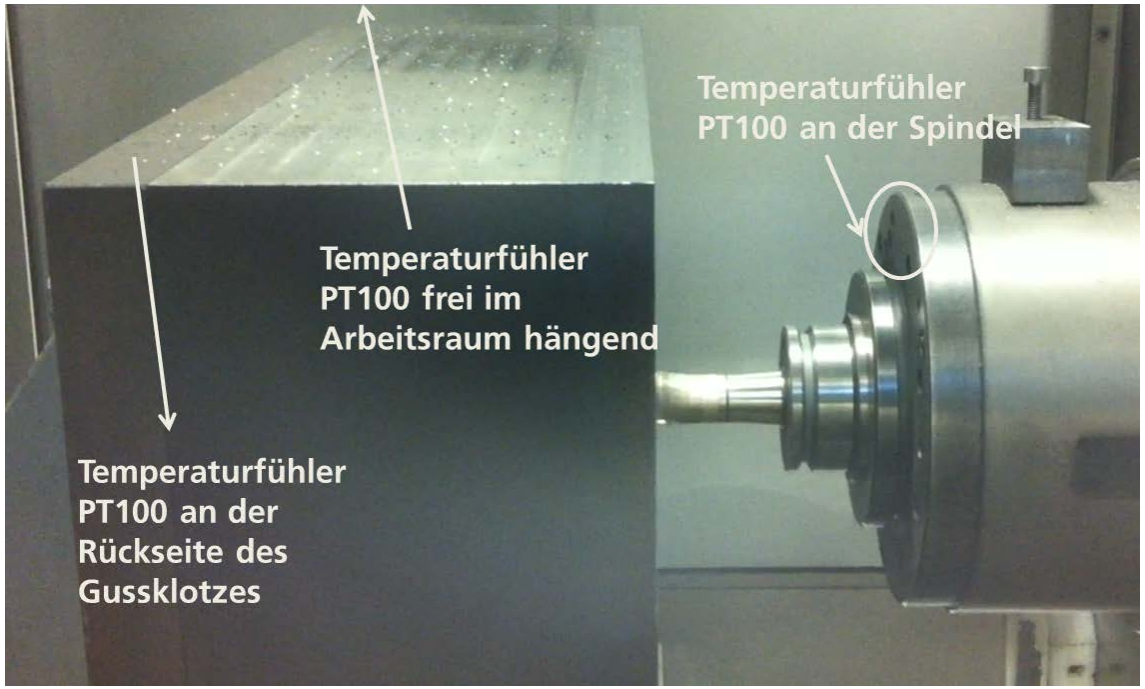
Bearbeitung mit CO_2

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zwischenergebnisse - Maschinenkomponentenentwicklung

Thermische Beeinflussung

Temperaturmessung im Fräsbearbeitungszentrum



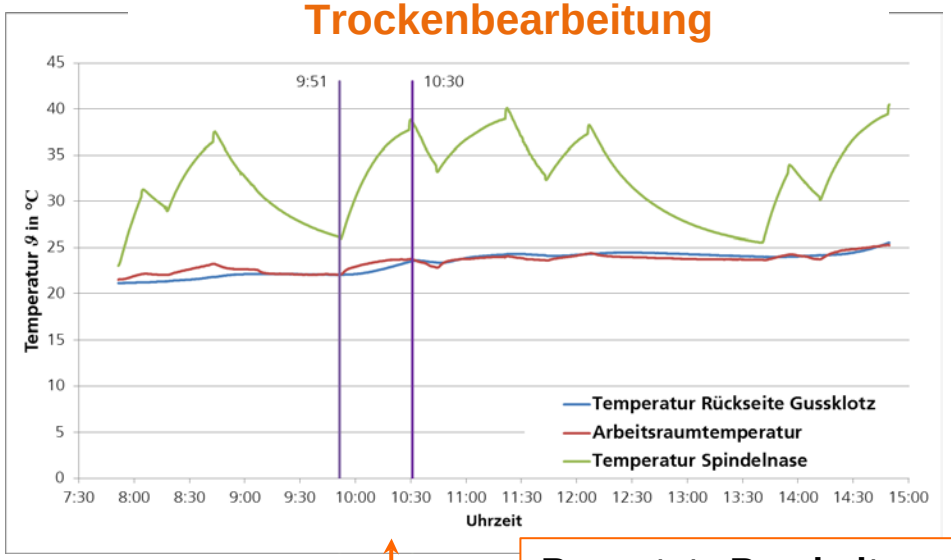
blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU

Zwischenergebnisse - Maschinenkomponentenentwicklung

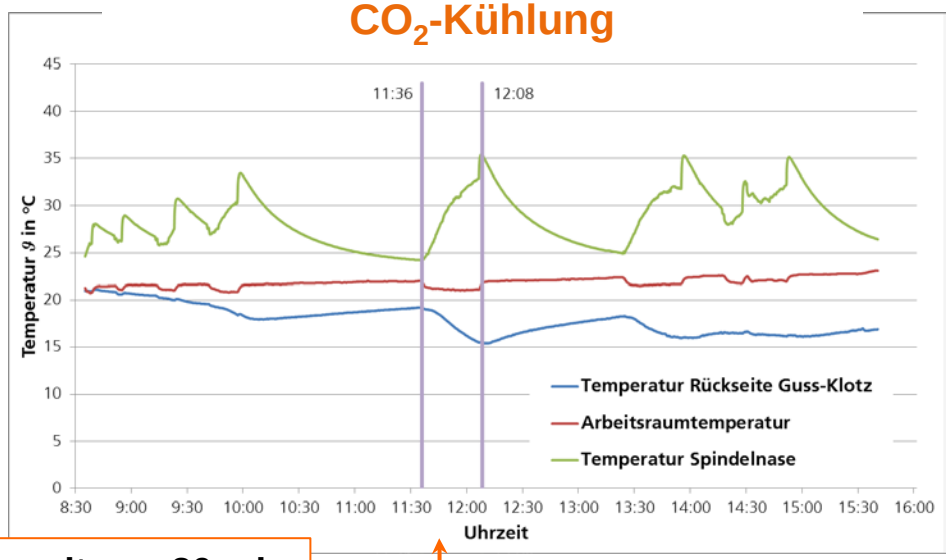
Thermische Beeinflussung

Temperaturmessung im Fräsbearbeitungszentrum

Trockenbearbeitung



CO_2-Kühlung



Bewertete Bearbeitungszeit: ca. 30 min

- Spindelerwärmung bei CO_2 –Einsatz geringer als bei Trockenbearbeitung
- Keine thermische Beeinflussung im Arbeitsraum durch CO_2 –Einsatz
- Abkühlung der Werkstückrückseite (Gussblock) durch CO_2 –Einsatz innerhalb 30min um 4°C

➔ **Keine signifikante thermische Beeinflussung** der Werkzeugmaschine durch den Einsatz einer CO_2-Kühlung

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zwischenergebnisse - Maschinenkomponentenentwicklung

Entwicklung eines Sicherheitskonzepts

Mögliche Gefährdungen beim Umgang mit Kohlenstoffdioxid (CO_2):

- Gasförmiges CO_2 ist etwa 1,5 mal schwerer als Luft
  ➔ **Ansammlung am Boden und in Schächten**
- Gefahr der elektrostatischen Aufladung des Gemisches CO_2-Gas / CO_2-Schnee
  ➔ **Absaugung erforderlich**
- **1 Liter** flüssigem CO_2 ergeben **ca. 640 Liter** gasförmiges CO_2

Anforderungen an BAZ:

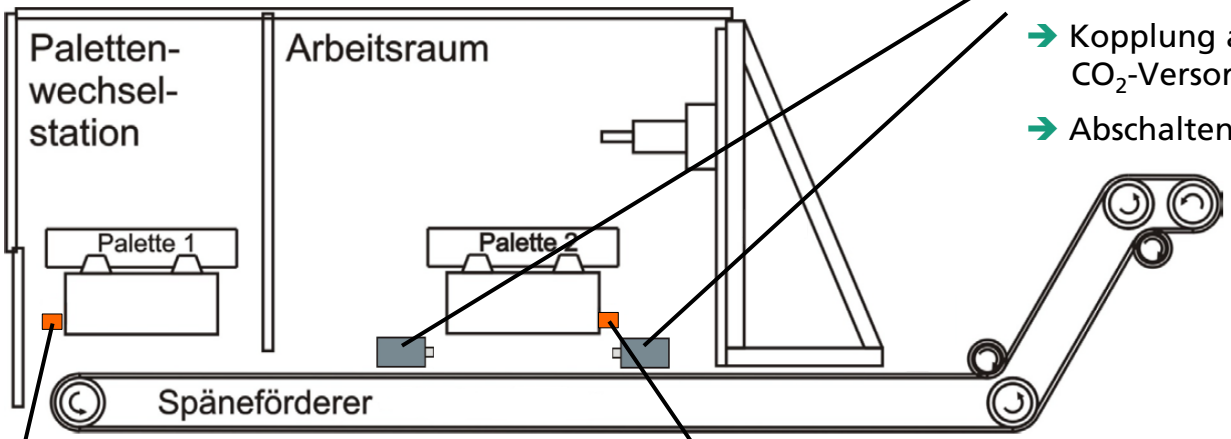
- **Arbeitsraumüberwachung**
  ➔ Sensor
  ➔ Warngrenze
  ➔ Softwaretechnische Sicherheitseinschränkungen
- **Abdichtung**
  ➔ Palettenwechsler
  ➔ Späneförderer
- **Absaugung**

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zwischenergebnisse - Maschinenkomponentenentwicklung

Entwicklung eines Sicherheitskonzepts

CO_2-Überwachung und Absaugung



CO_2-Absaugung

- ➔ Kombinierte Absaugung mit elektrostatischer Filterung
- ➔ Kopplung an den Startbefehl der CO_2-Versorgungseinrichtung
- ➔ Abschalten bei Freigabe der Türöffnung

CO_2-Warngerät

- ➔ Überprüfung auf CO_2-Konzentration
- ➔ Kopplung an die Türöffnung der Palettenwechselstation

CO_2-Warngerät

- ➔ Überprüfung auf CO_2-Konzentration
- ➔ Kopplung an die Türöffnung des Arbeitsraumes

- **Keine Überschreitung** der CO_2-Konzentration von gesundheitlich bedenklichen Grenzwerten **außerhalb des Bearbeitungszentrums**
- **Kritische** CO_2-Konzentrationen über 2% **in Bodennähe** im Umfeld des Späneförderers

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Zusammenfassung - Zwischenstand

- **Schaffung neuartiger Prozessgrundlagen** wie
  - Klärung des **Strömungs- und Mischungsverhaltens** eines CO_2-Öl-Gemisches
  - **Temperaturverhalten** von Werkzeug, Werkzeugspannmittel und Hauptspindelsystem
  - Bewertung des **Kühlmittelstrahles** (Zuführungsquerschnitte, Strahlaufbau, Schnittstellen)
  - Verlässliche **Verbrauchsangaben**
  - Entwicklung **neuartiger** Ansätze zur Bereitstellung eines **CO_2-Öl-Gemisches**
- Entwicklung einer **optimalen Kühlschmiermittelzufuhr** zur Schneide
  - Schnittstellen (Übergabe WZ – WZ-Aufnahme, WZ-Aufnahme – Hauptspindel)
  - Kühlschmierkanalgestaltung und –anordnung im Fräswerkzeug
- **Keine signifikante thermische Beeinflussung** der Hauptspindel und des Maschinenarbeitsraums durch die CO_2-Kühlung
- **CO_2-Überwachung** und **–Absaugung** erforderlich

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Ausblick / Weiteres Vorgehen

Ansatz:

- **Prozesssicherheit** → Stabiler Kühlschmierstrahl zur gezielten Prozessbeeinflussung
- **Serientauglichkeit** → Minimierte Bereitstellungszeiten für CO_2-Öl-Gemisch
  → Automatischer Werkzeugwechsel
- **Ressourceneffizienz** → Trockenbearbeitung bei effizienten Werkzeugstandzeiten
  → Reduzierte Fertigungszeiten durch erhöhte Schnittparameter

Weiteres Vorgehen:

➔ Bereitstellung eines neuartig erzeugten CO_2-Öl-Gemisches
- Einbringen Öl / flüssiges CO_2 über Hochdruckzerstäubung
- Erzeugung eines **gekühlten Ölnebels**

➔ Optimierung der Spindeldurchführung für das CO_2-Öl-Gemisch
- Kein Leerlaufen des Systems bei Werkzeugwechsel – **minimierte Bereitstellungszeiten** des CO_2-Öl-Gemisches
- Herausforderung – Herstellen der Dichtheit (Druckverluste)

➔ Verfahrensuntersuchungen beim Fräsen

➔ Konzeptentwicklung für ein BAZ zur kryogenen Zerspanung

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen. EFRE
starrag heckert
Starrag Group
SN-Spindeltechnik Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer IWU

Ausblick / Weiteres Vorgehen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

blue
Freistaat Sachsen
Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Europa fördert Sachsen.
EFRE
starrag
Starrag Group
heckert
SN-Spindeltechnik
Steffen Nitschke
Dr. Gühring KG
Fraunhofer
IWU