Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Entwicklung biobasierter Metallbearbeitungsöle für die kryogene Minimalmengenschmierung (ECO_2il)

Trixi Meier, M. Sc.

Dr.-Ing. Daniel Gross

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Agenda

01 Projektvorstellung

02 Kryogene Minimalmengenschmierung

03 Experimentelle Randbedingungen

04 Ergebnisse

05 Zusammenfassung

Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Projektvorstellung

Projektvorstellung

Allgemeine Informationen

Projektrahmen

- Projektlaufzeit: 01.06.2019 – 31.05.2022
- Zuwendungshöhe: 392.126,09 €

Projektziel

„Das Gesamtziel des Verbundvorhabens besteht darin, biobasierte Schmierstoffe zu entwickeln, die zur Anwendung als Kühlschmierstoff in neuen kryogenen Kühlkonzepten einer Minimalmengen-schmierung für die Bearbeitungstechnologien Drehen, Fräsen und Bohren geeignet sind.“

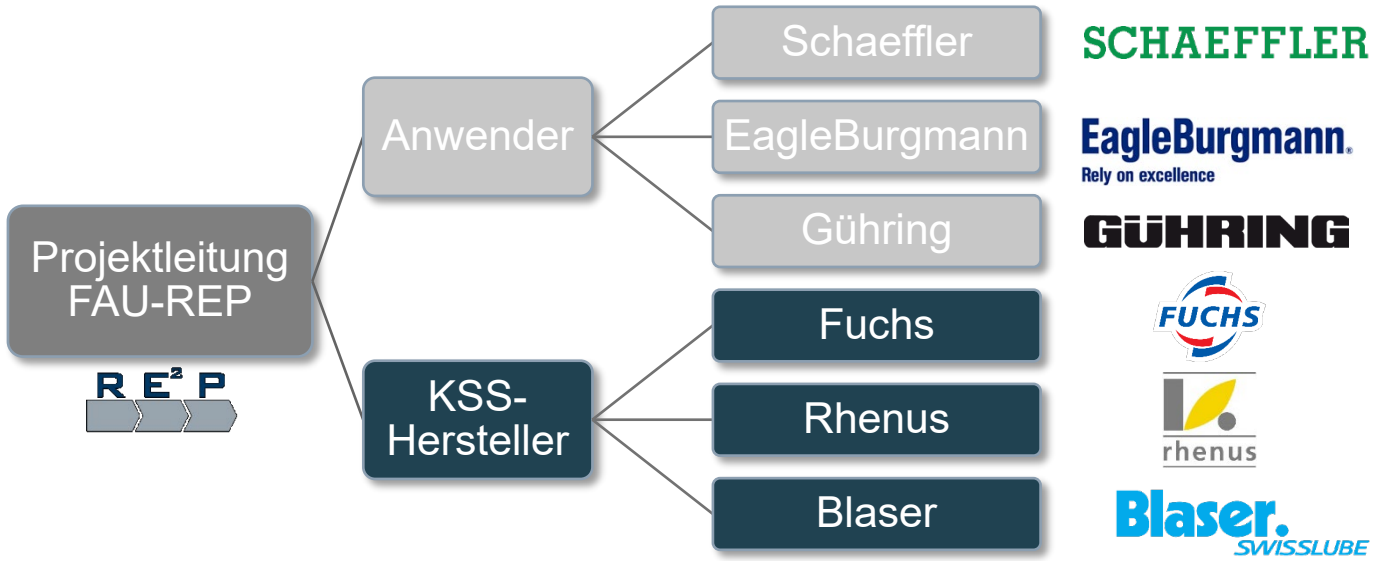
Zuwendungsbescheid vom 01.04.2019

Projektstruktur

- Förderkennzeichen 22005218

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

- Organigramm



Projektvorstellung

Projektinhalt

Arbeitspakete

1. **Definition der Referenzprozesse**
2. **Grundöl-auswahl**
3. **Additiv-auswahl**
4. **Validierung an Referenzprozess**
5. **Dokumentation**

Meilensteine

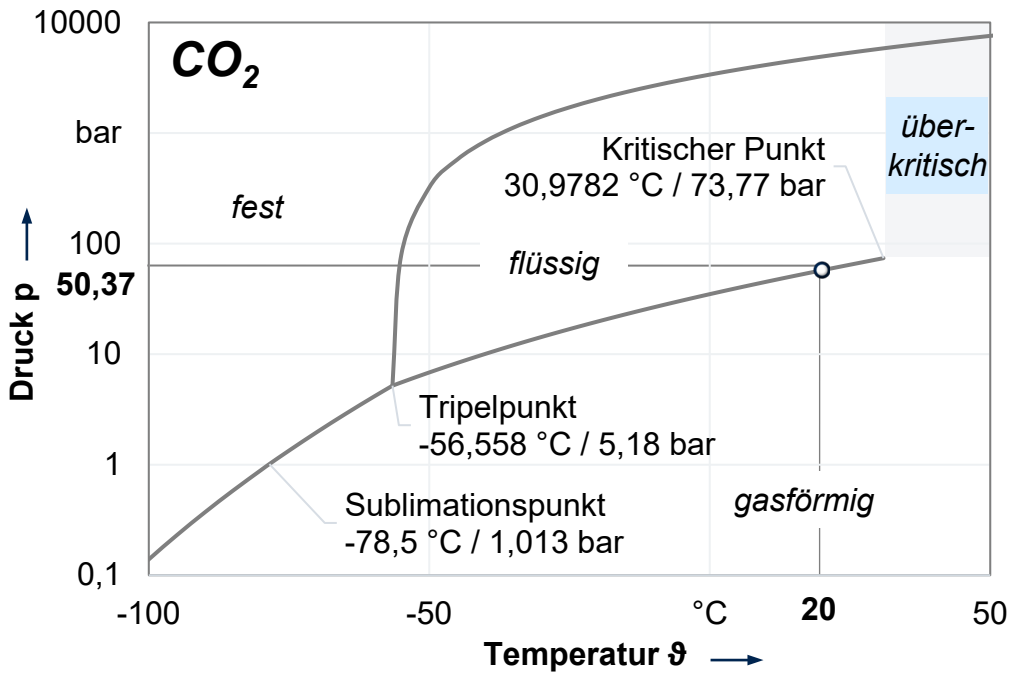
1. Lasten- und Pflichtenheft der Grundöle für Drehen/Fräsen/ Bohren
2. Auswahl/Validierung Grundöl, Lasten- und Pflichtenheft für Additive
3. Ausweisung biobasierter Bearbeitungsmedien für Drehen/Fräsen/ Bohren
4. Quantifizierte Ergebnisse für die Nutzung von biobasierten Schmierstoffen
5. Abschlussbericht

Kryogene Minimalmengenschmierung

Kryogene Minimalmengenschmierung

Kryogene Kühlung mit CO_2 und Minimalmengenschmierung

Kohlenstoffdioxid (CO_2)



Eigenschaften CO_2

- farblos, geruchlos, ungiftig, nicht entflammbar
- Sublimationspunkt bei $\vartheta = -78{,}5$ °C, p = 1,013 bar

Minimalmengenschmierung (MMS)

- gasförmiges Trägermedium für geringe Ölmengen (< 50ml/h)
- Keine primäre Kühlwirkung
- Verlustschmierung
- geringerer Aufwand für Wartung, Pflege, Entsorgung und Bauteilreinigung
- kein direkter Kontakt des Personals mit KSS

Kryogene Minimalmengenschmierung (kMMS)

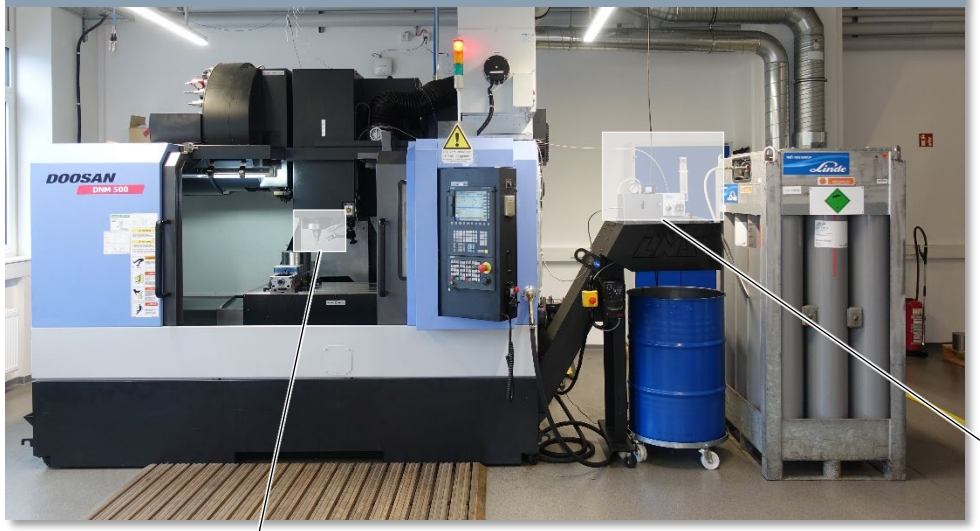
- flüssiges kryogenes Trägermedium für geringe Ölmengen (< 50ml/h)
- Prozessschmierung und -kühlung (interne oder externe Zuführung, ein- oder zweikanalige Zuführung von kryogenem Medium und Öl)
- Reduktion der Prozesswärme und des temperaturinduzierten Verschleißes
- Erhöhung des Zeitspanvolumens

Experimentelle Randbedingungen

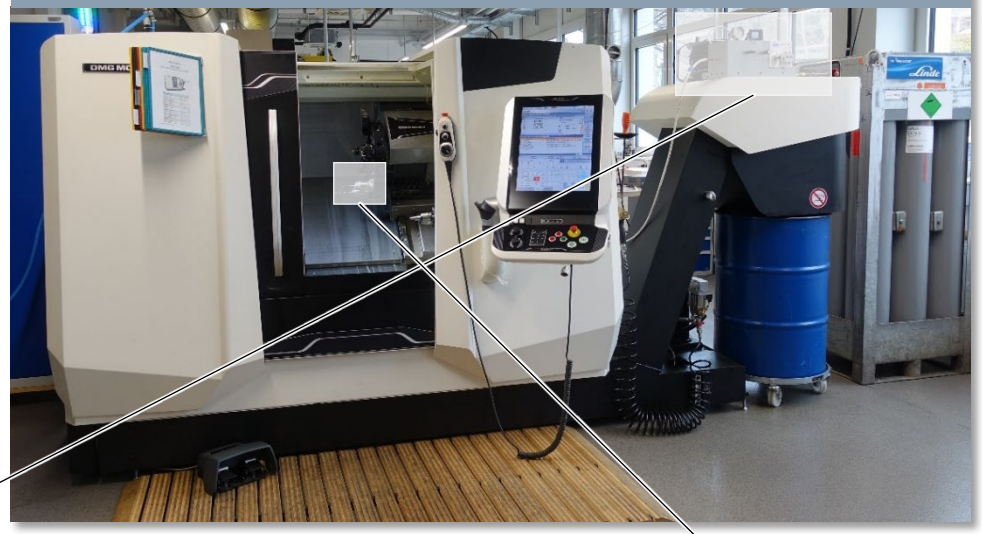
Experimentelle Randbedingungen

Bearbeitungsmaschinen und kMMS-Mischsystem

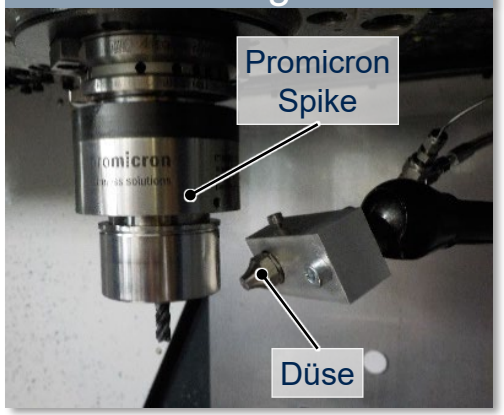
Fräsmaschine DOOSAN DNM 500



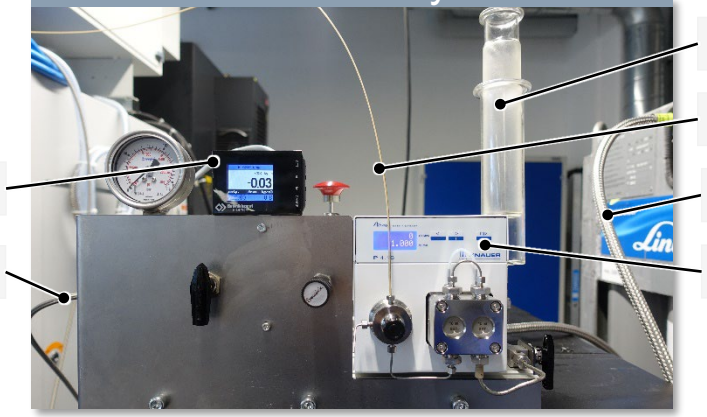
Drehmaschine DMG CLX 350



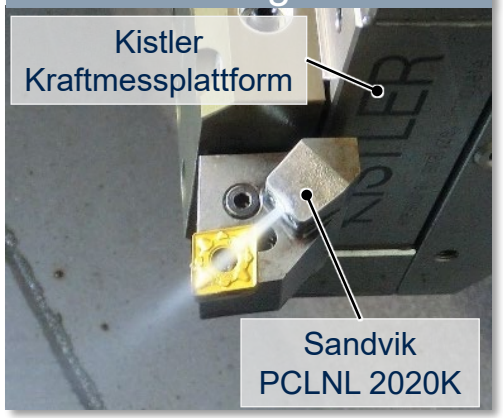
Werkzeughalter



kMMS-Mischsystem

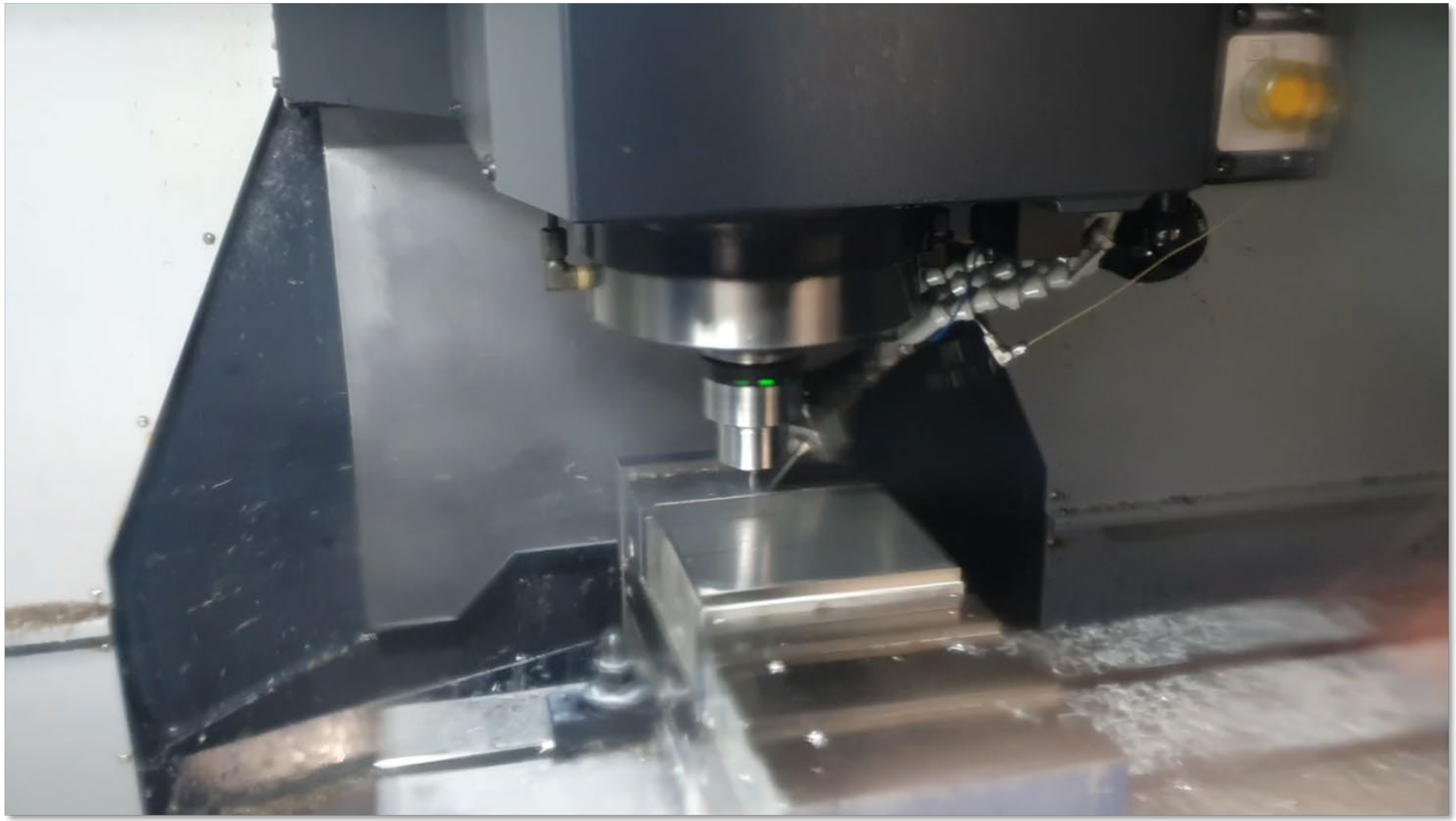


Werkzeughalter



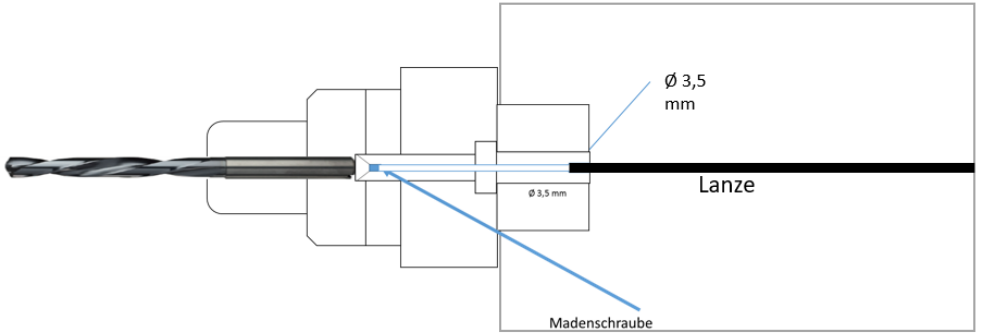
Experimentelle Randbedingungen

Externe Zuführung: Fräsen mit kMMS von 1.4404



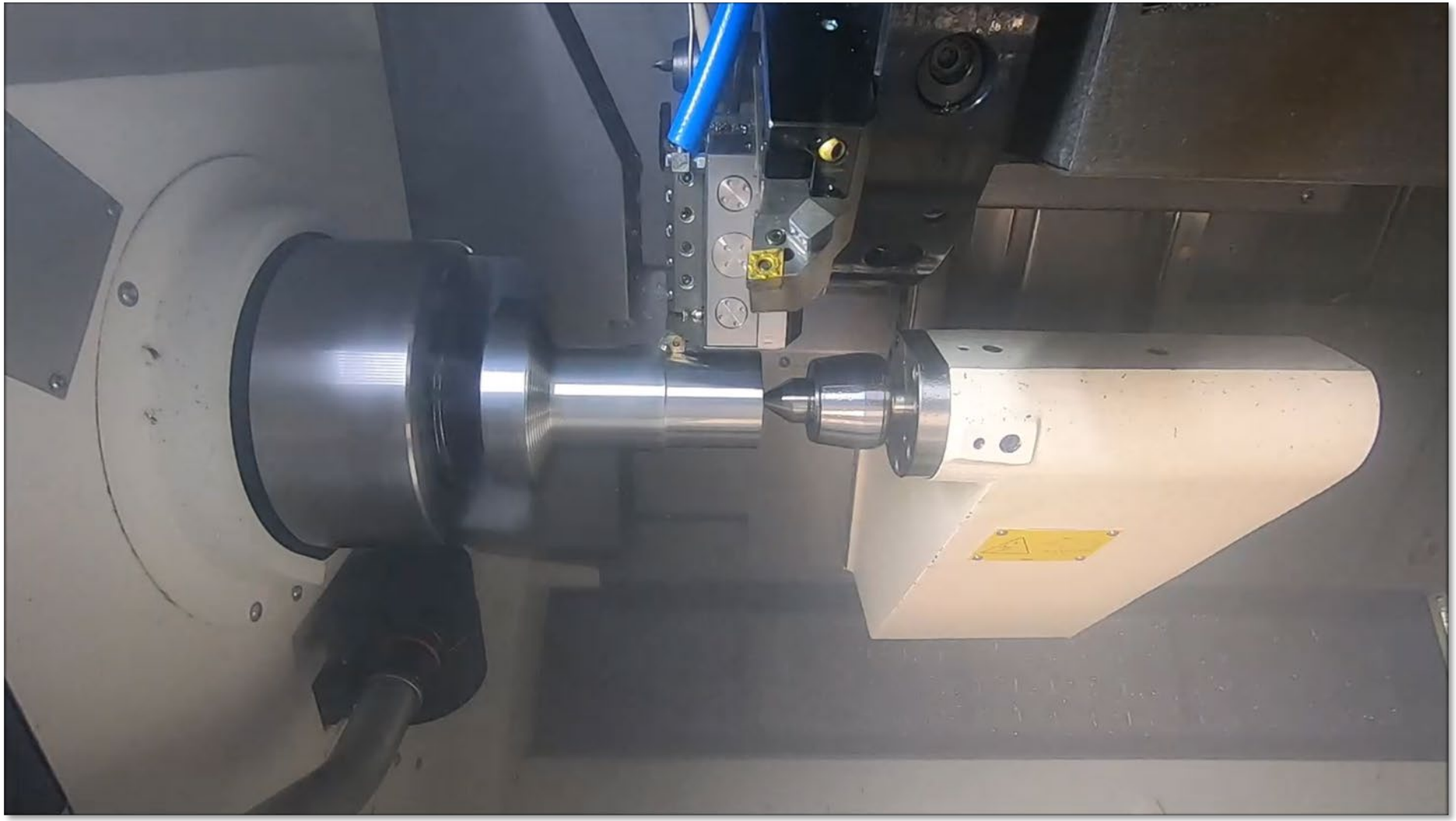
Experimentelle Randbedingungen

Interne Zuführung: Bohren mit kMMS von 1.4404



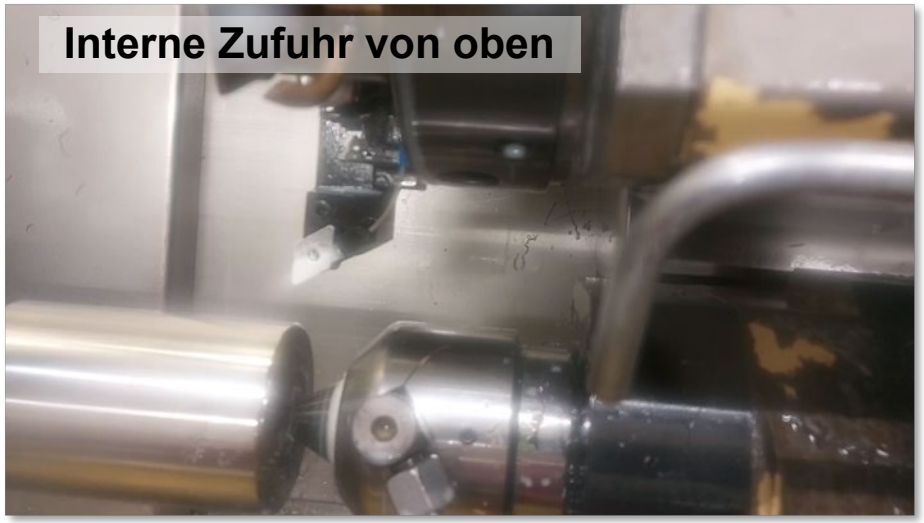
Experimentelle Randbedingungen

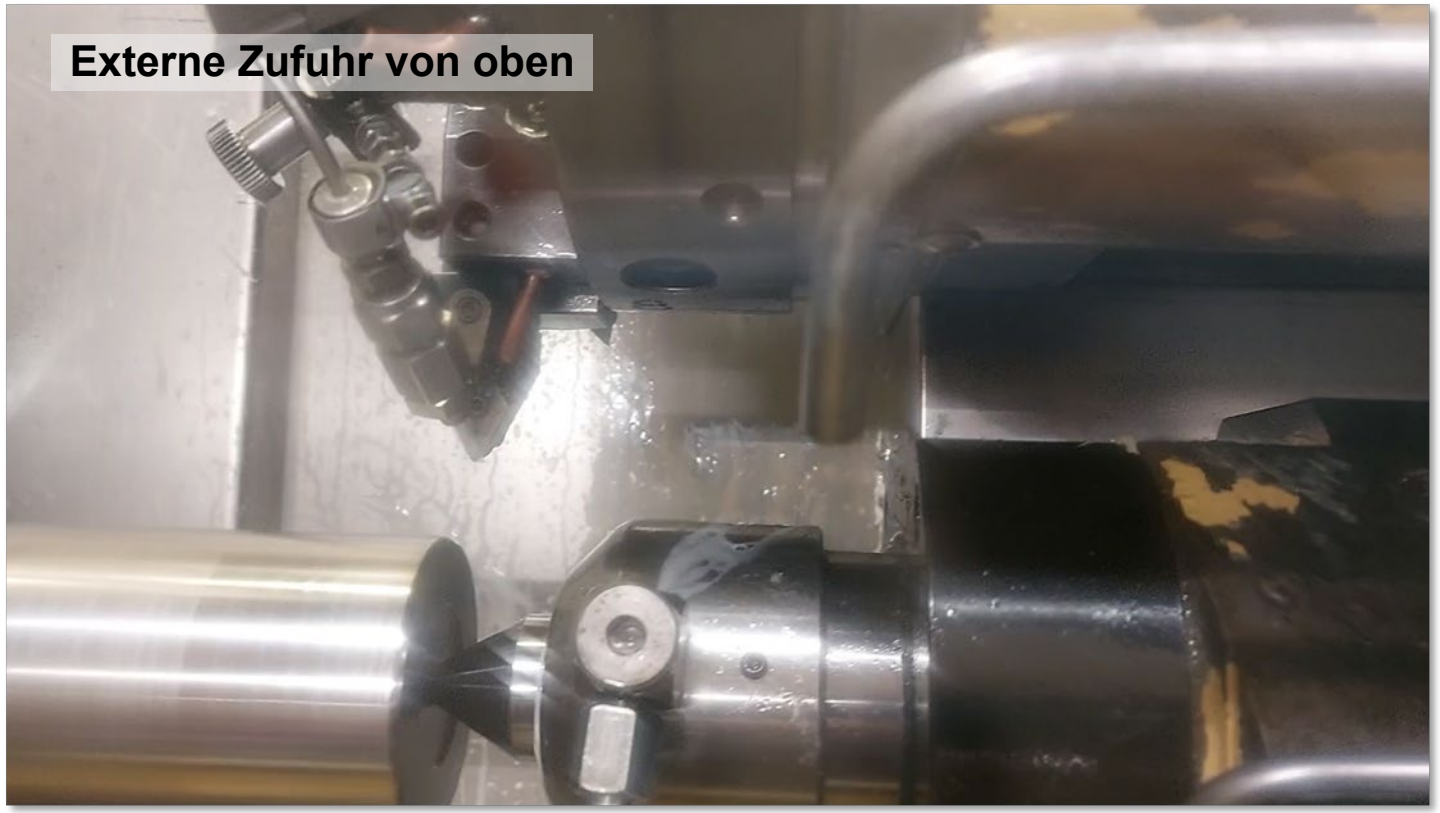
Interne Zuführung: Schruppdrehen mit kMMS von 1.4404



Experimentelle Randbedingungen

Interne/Externe Zuführung: Schlichtdrehen mit kMMS von 1.3505





Experimentelle Randbedingungen

Grundöle und Additive

Grundöle

Name	Beschreibung	Anteil RRM (Renewable Rawmaterial)
KW 02	Hydrocracköl	0 %
KW 01	renewable	75 – 99 %
NE 01	Triglyceride	100 %
NE 02		100 %
NE 03		100 %
SE 01	Monoester	75 – 99 %
SE 09		>50 %
SE 11	Ester	unbekannt

SE: Synthetischer Ester **KW:** Kohlenwasserstoff
NE: Natürlicher Ester

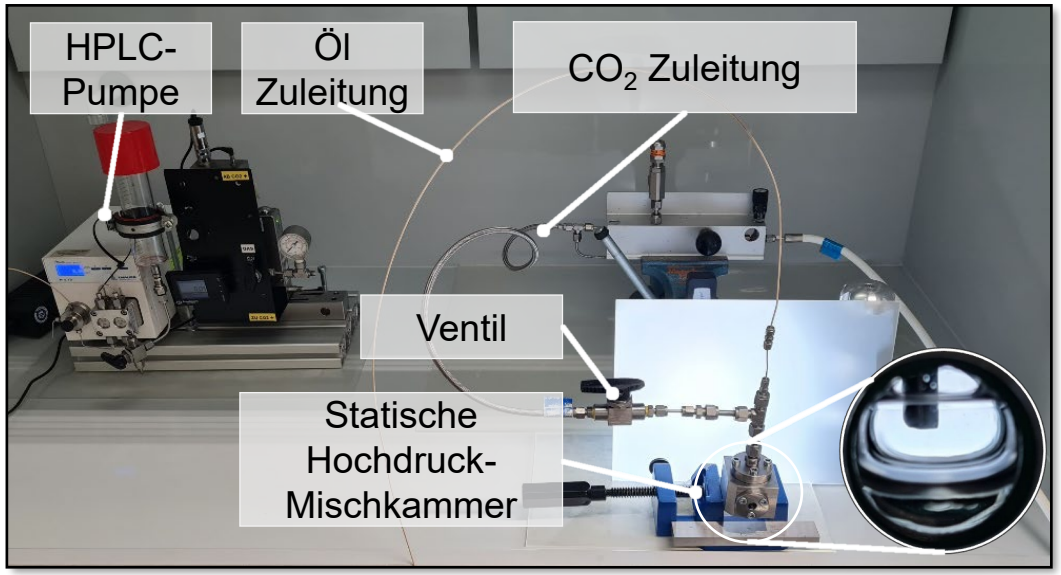
Additivierte Öle

Name	Beschreibung	Additive	
		Schwefel	Phosphor
KW 0201	Hydrocracköl	x	
KW 0101	renewable	xx	x
NE 0101	Triglyceride	xx	x
NE 0102		x	x
NE 0103			x
NE 0201		x	
NE 0202		x	x
NE 0203		x	x
NE 0204		xx	x
NE 0205		xx	x
NE 0206		xx	xx
NE 0301		x	
NE 0302		x	x
SE 0101	Monoester	x	x
SE 0901		x	
SE 0902		x	x
SE 1101	Ester	x	

Experimentelle Randbedingungen

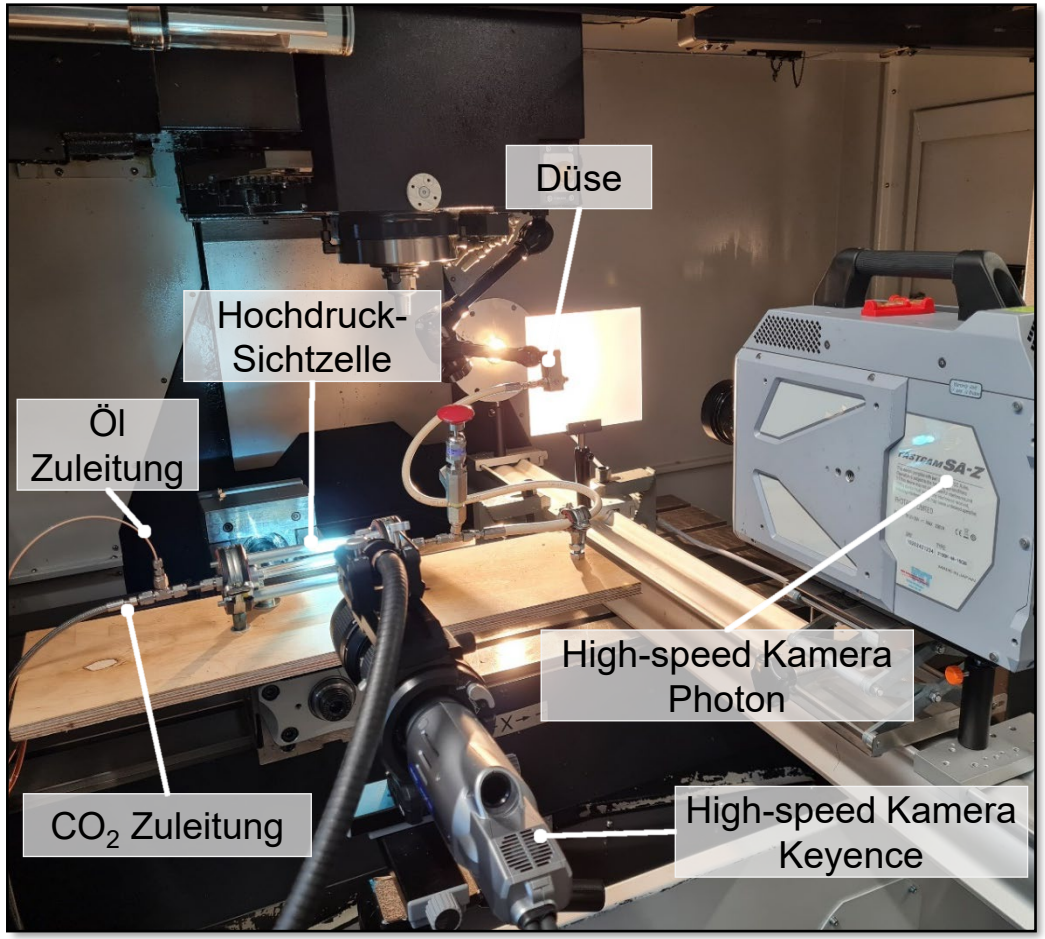
Untersuchungen zur statischen/dynamischen Löslichkeit und Sprühbild

Statische Löslichkeit



Experiment	Dynam. Löslichkeit	Sprühbild
Kamera	Keyence VW9000	Photon FASTCAM SA-Z
Belichtungszeit	1/900.000 s	1/800.000 s
frame rate	10.000 fps	40.000 fps
Auflösung	640 x 192 pixel	1024 x 512 pixel
Belichtung	front view luminaire	LED lamp from behind
Aufnahmezeit	ca. 1,5 s	0,05 s (2000 images)
Verlangsamung	x 666	x 1000

Dynamische Löslichkeit und Sprühbild



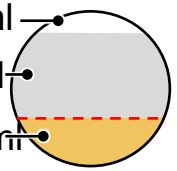
Ergebnisse

Ergebnisse

Untersuchungen zur statischen Mischbarkeit

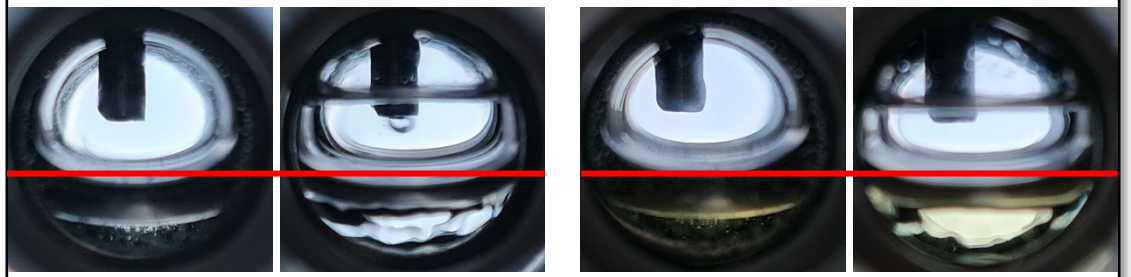
Statisches Mischverhalten
(T = 20 °C, p = 58bar)

$V_{CO2(g)}$ = 0,1 ml
$V_{CO2(l)}$ = 0,7 ml
$V_{Öl}$ = 0,2 ml



(1) Keine Löslichkeit:

NE01 Öl | NE01 Öl + LCO_2 | NE0101 Öl | NE0101 Öl + LCO_2

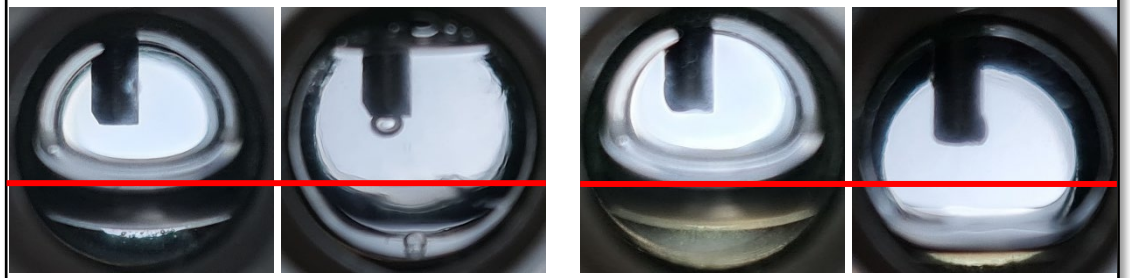


NE01(xx), SE1101

- drei verschiedene Zustände: keine Löslichkeit, Löslichkeit von Öl in CO_2 und vollständige Löslichkeit
- Vollständige Löslichkeit der synthetischen Ester SE01(xx) und SE 09(xx)
- Kein direkter Einfluss der Additivierung auf die Löslichkeit erkennbar

(2) Löslichkeit von Öl in CO_2:

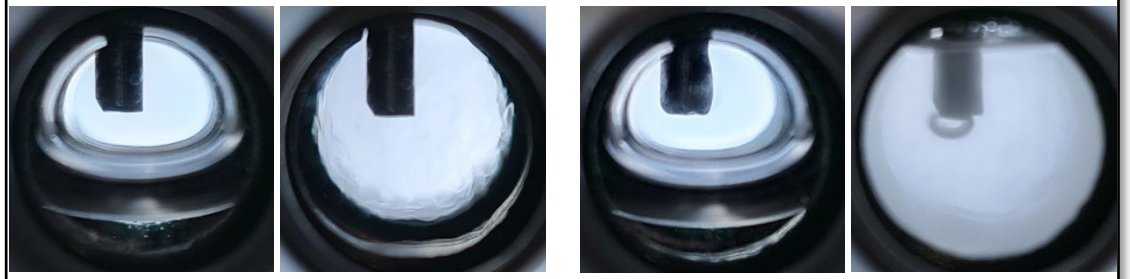
KW01 Öl | KW01 Öl + LCO_2 | KW0101 Öl | KW0101 Öl + LCO_2



KW02(xx), KW01(xx), NE02(xx), NE03(xx)

(3) Vollständige Löslichkeit:

SE01 Öl | SE01 Öl + LCO_2 | SE0101 Öl | SE0101 Öl + LCO_2

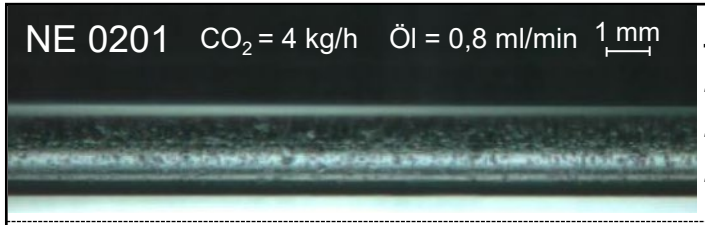


SE01(xx), SE09(xx)

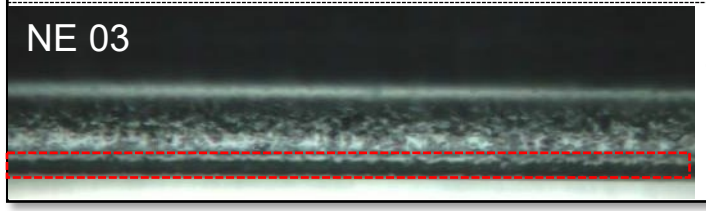
Ergebnisse

Untersuchungen zur dynamischen Löslichkeit und Sprühbild

Dynamische Löslichkeit



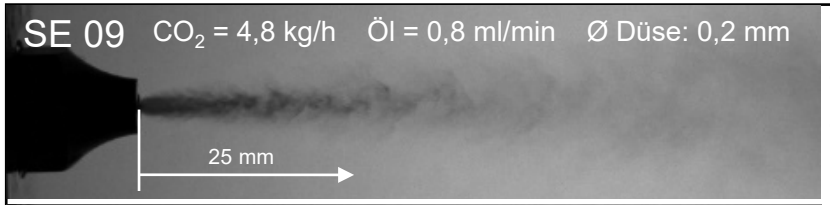
- Blasenströmung
- *KW 02(xx), KW01(xx)*
- *NE02 (xx)*
- *SE 01(xx), SE 09(xx)*

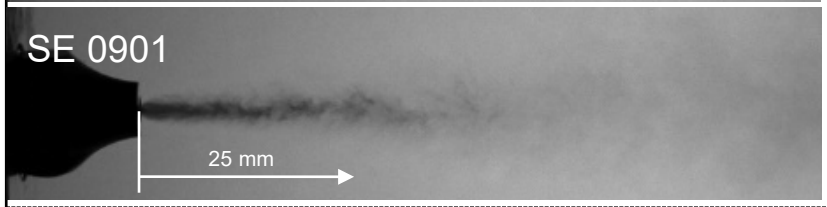


- laminare Randströmung
- *NE 01 (xx)*
- *NE 03 (xx)*

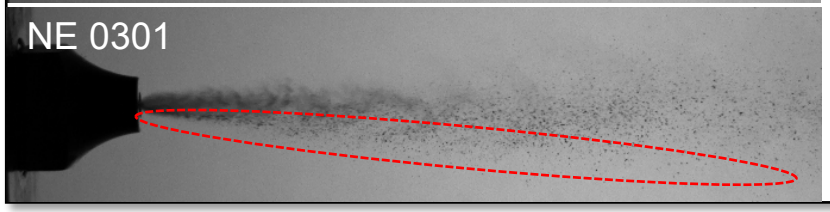
- Testöle auf der Basis von Raps-/Sonnenblumenöl (NE02/03: Testöle mit der höchsten dynamischen Viskosität)
  - langsame laminare Randströmung des Öls beim Einsatz der Düse d_i = 0,2 mm
  - keine laminare Randströmung mit der Düse d_i = 0,3 mm
- nicht nur die Viskosität bedingt eine laminare Randströmung, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeit
- die Geschwindigkeit kann durch den Wechsel zur größeren Düse von ca. v = 1 m/s auf ca. v = 2,5 m/s erhöht werden

Sprühbild





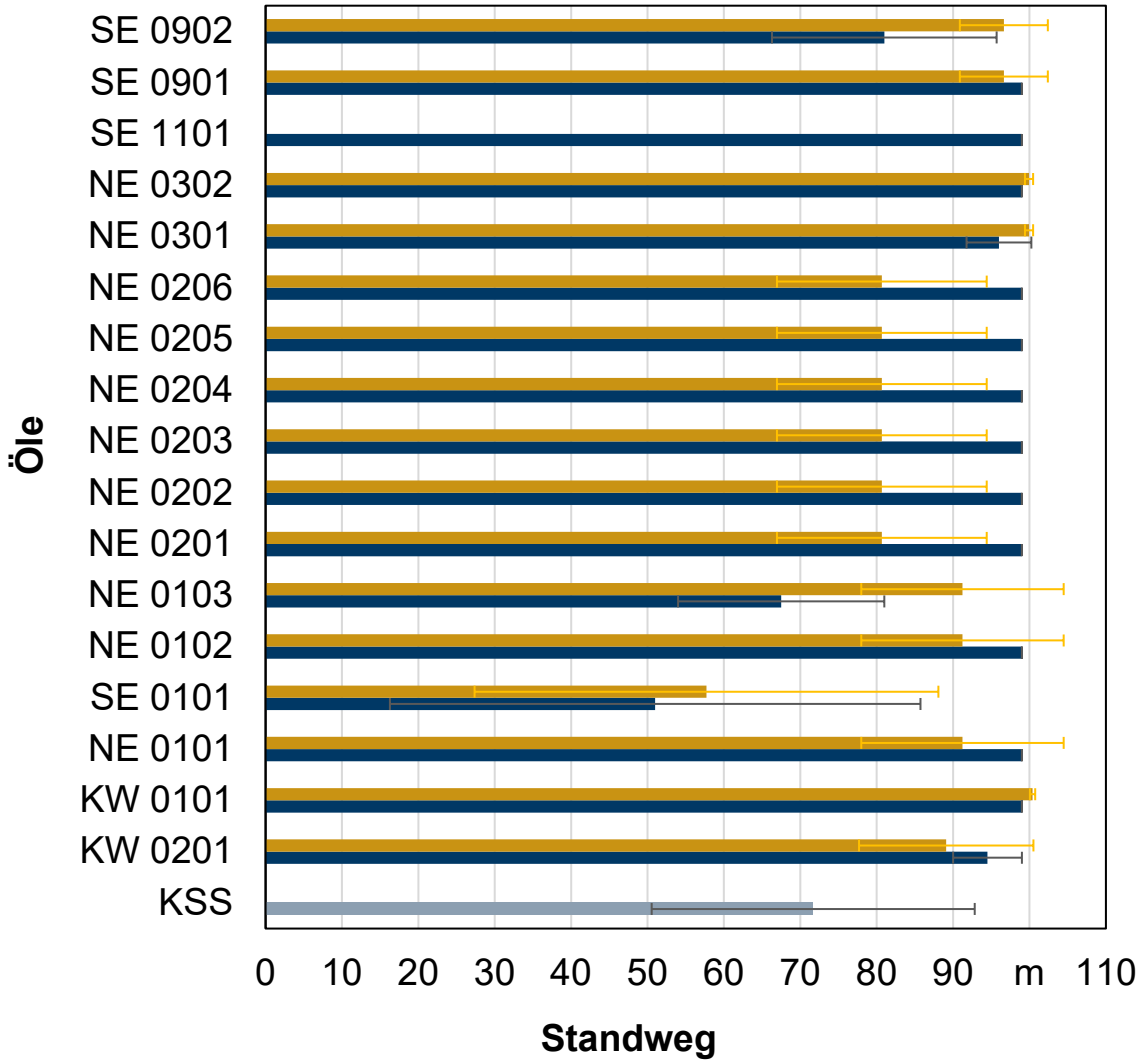
- gleichm. Sprühnebel
- Mittlere bis starke Nebelbildung
- *KW 02(xx), KW 01(xx)*
- *NE 02(xx)*
- *SE 01(xx), SE 09(xx)*



- Sichtbare Tröpfchenbildung
- Pulsierende Ölaustöße
- *NE 01(xx)*
- *NE 03(xx)*

Ergebnisse

Korrelation mit Fräsprozess



Fräsen

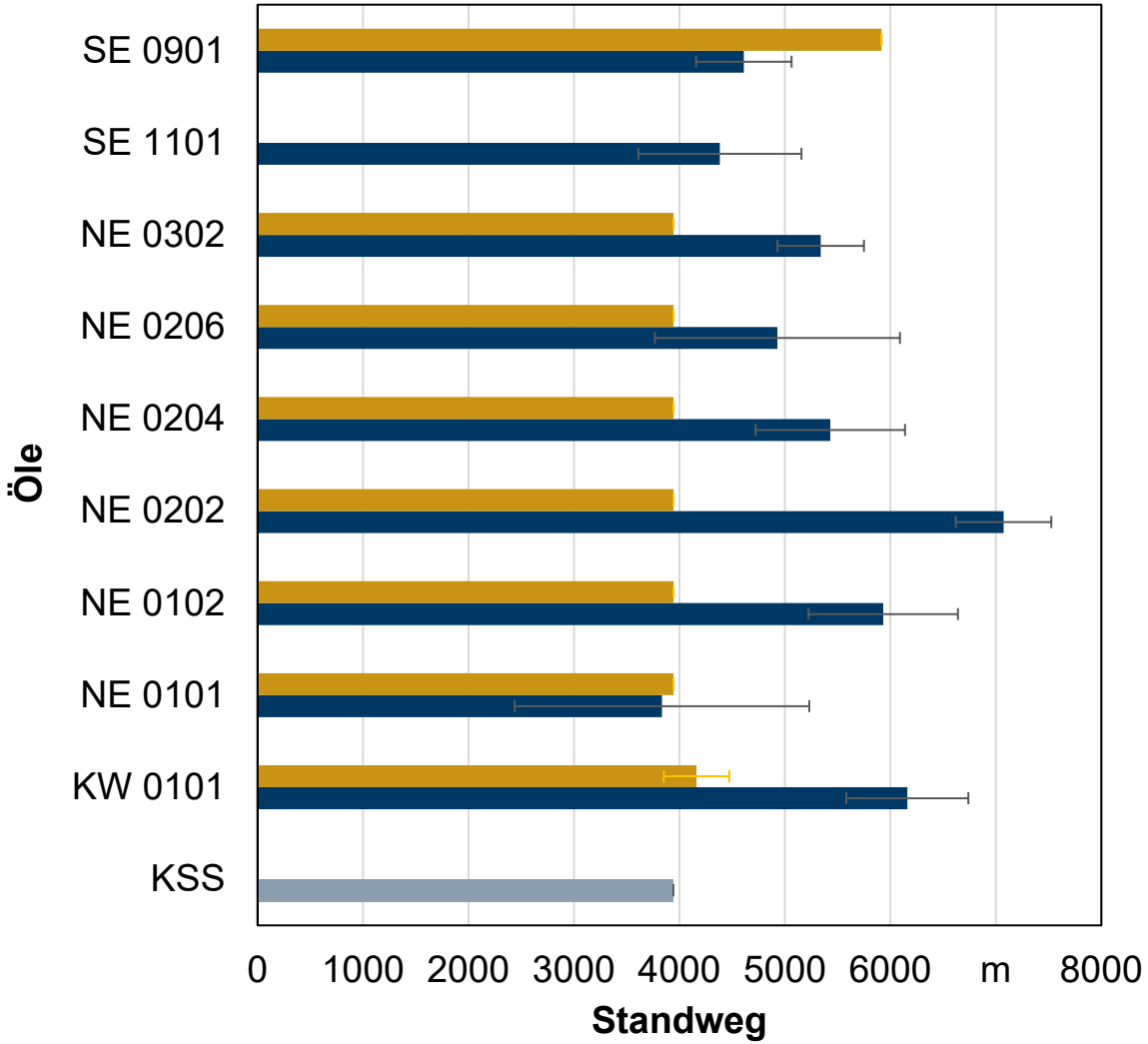
Parameter	Wert	
Material	1.4404	
v_c	264	*m/min*
n	10500	*U/min*
f	0,06	*mm/U*
a_e	0,8	*mm*
a_p	8	*mm*
Öl Durchfluss	0,8	*ml/min*
CO_2 Durchfluss	4,5	*kg/h*

Grundöl | Additiviertes Öl

- kMMS mit biobasierten Ölen liefert bessere Ergebnisse als der Referenzversuch mit KSS
- **Sonnenblumenöl:** mit dem Basisöl (NE 03) konnte eine höhere Standzeit erreicht werden, als mit den additivierten Varianten (NE 03(xx))
- **Rapsöl:** additivierte Öle (NE 02(xx)) höhere Standzeit als Grundöle
- **synthetische Ester:** die vollständige statische Löslichkeit scheint im Vergleich zu anderen Ölen keinen direkten Einfluss auf die Wirksamkeit bei der Bearbeitung zu haben

Ergebnisse

Korrelation mit Schruppdrehprozess



Schruppdrehen

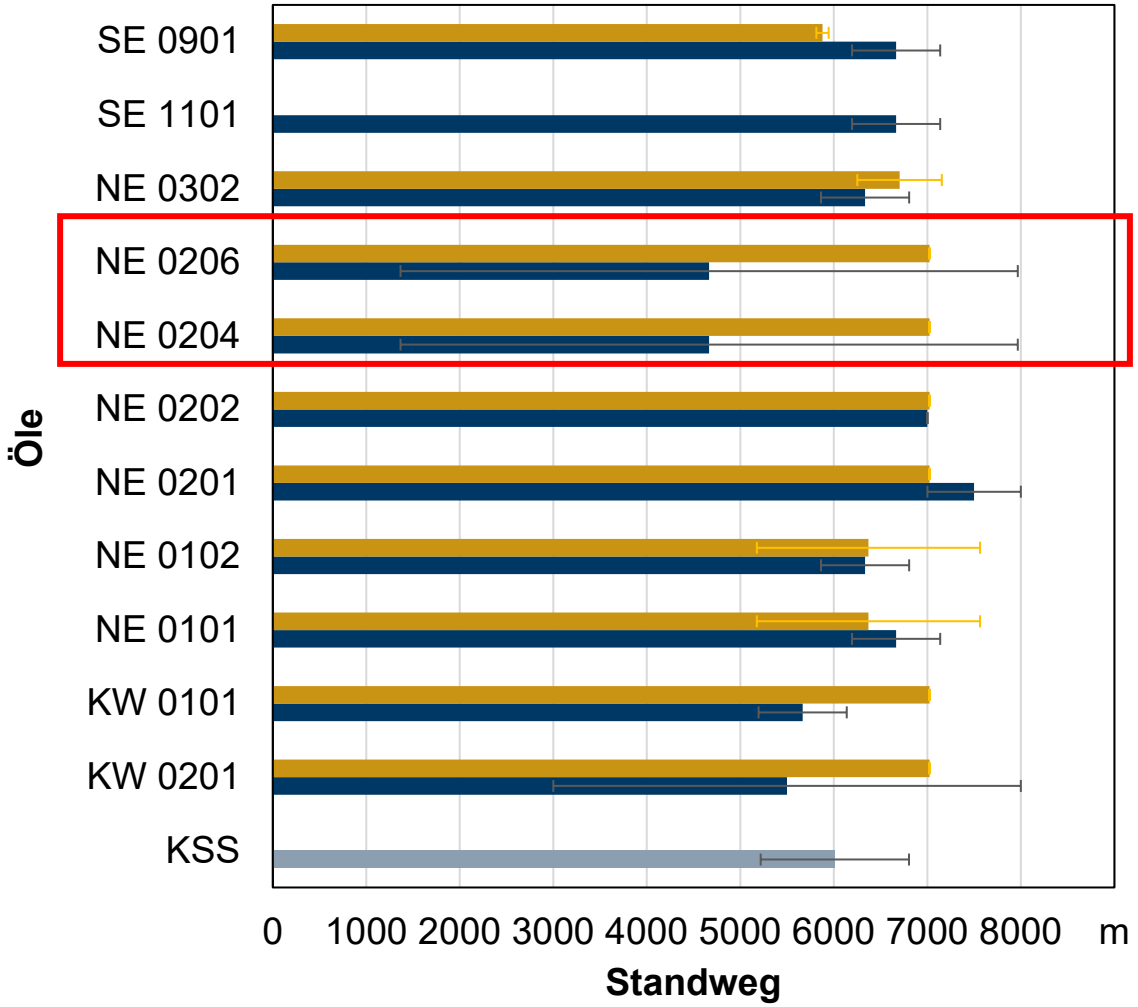
Parameter	Wert	
Material	1.4404	
v_c	160	*m/min*
f	0,06	*mm/U*
a_p	3	*mm*
Öl Durchfluss	0,8	*ml/min*
CO_2 Durchfluss	7	*kg/h*

Grundöl Additiviertes Öl

- **Sonnenblumenöl:** additivierten Varianten (NE 03(xx)) konnten eine höhere Standzeit erreichen, als Grundöl (NE 03)
- **Rapsöl:** additivierte Öle (NE 02(xx)) zeigen höhere Standzeit als Grundöle

Ergebnisse

Korrelation mit Schlichtdrehprozess



Schlichtdrehen

Parameter	Wert	
Material	1.3505	
v_c	200	*m/min*
f	0,12	*mm/U*
a_p	0,1	*mm*
Öl Durchfluss	0,8	*ml/min*
CO_2 Durchfluss	2,5	*kg/h*

Grundöl Additiviertes Öl

- **Sonnenblumenöl:** mit den additivierten Varianten (NE 03(xx)) konnte eine höhere Standzeit erreicht werden, als mit dem Grundöl (NE 03)
- **Rapsöl:** teilweise Grundöle (NE 02) höhere Standzeit als additivierte Öle

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Kryogene Minimalmengenschmierung mit bioasierten Ölen

- Kein direkter Einfluss der Additivierung von biobasierten Ölen auf die Löslichkeit und das Sprühbild
- additivierte native Öle können die Werkzeugstandzeit erhöhen
- **Kohlenwasserstoffe (KW 01(xx), KW 02(xx)):**
  - teilweise gelöst in CO_2
- **Native Ester (Rapsöl NE 01(xx), Kokosöl NE 02(xx), Sonnenblumenöl NE 03(xx)) :**
  - Raps- und Sonnenblumenöl: intensiver Ölauftrag und Randströmung bei niedrigen Durchflussraten
  - Kokosnussöl: niedrige Viskosität führt zu starker Zerstäubung
- **Synthetische Ester (SE 01(xx) and SE 09(xx)):**
  - zerstäuben ähnlich wie Kokosöl
  - vollständige Löslichkeit in der statischen Zelle

➢ **Kein direkter Einfluss der Zerstäubung und Löslichkeit auf die Zerspanungsergebnisse feststellbar**

➢ **Vollständige Löslichkeit des Öls im CO_2 für gleichmäßigen Ölauftrag und ein gleichmäßiges Sprühbild nicht erforderlich**

- Viskosität und Strömungsgeschwindigkeit bedingen laminare Randströmung
  - ausgewählte Prozess- und Kühlschmierparameter haben Einfluss auf die Werkzeugstandzeit und bedingen weitere Untersuchungen
- Untersuchungen zu Werkzeugen und Beschichtungen unter dem Einfluss von:
  - Medium CO_2
  - Thermoschock
  - Einfluss der Schmierstoffadditive
- Untersuchungen zu alternativen Additiven für biobasierte Öle (MMS/kMMS)

Zusammenfassung

Kryogene Minimalmengenschmierung mit bioasierten Ölen

Die Löslichkeit von Triglyceriden in CO_2 hängt stark von der Anzahl an C-Atomen ab

Valle Del, J. M. et al.: A refined equation for predicting the solubility of vegetable oils in high-pressure CO2 (2012).

- Vollständige Löslichkeit zeigten ausschließlich synthetische Ester.
- Anzahl der C-Atome dieser Öle zwischen 10 und 11
- Alle weiteren Versuchsöle besitzen eine größere Anzahl an C-Atomen.

Geringere kinematische Viskosität des Schmierstoffes sorgt für bessere Löslichkeit

Bergs, T. et al.: Investigation of the Solubility of Liquid CO2 and Liquid Oil to Realize an Internal Single Channel Supply in Milling of Ti6Al4V (2019).

- Sowohl vollständig lösbare synthetischen Ester als auch nichtlösbare Kohlenwasserstoffe weisen für Viskosität 100 m^2/s uneingeschränkt einen Wert von < 2 auf

Unpolare Öle lösen sich besser in LCO_2 als polare Öle

Grguraš, D. et al.: Media Flow Analysis of Single-Channel Pre-Mixed Liquid CO2 and MQL in Sustainable Machining (2019).

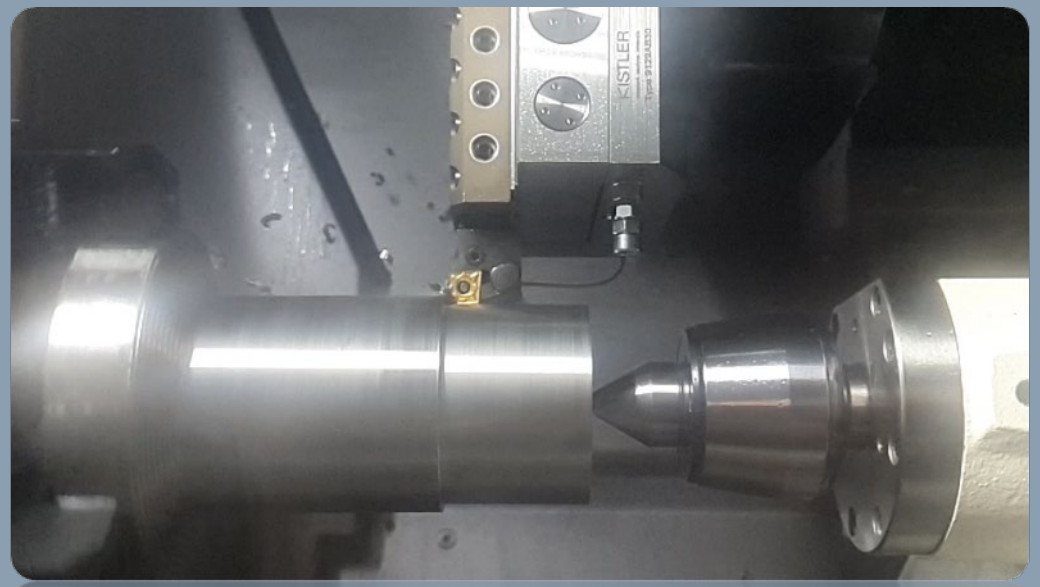
- vollständig gelöste Versuchsöle weisen im Fall von SE 0101 einen schwach polaren und SE0901 und SE0902 einen polaren Zustand auf
- Unploare Öle wie KW0201 lösen sich nicht

Empfehlungen

Kryogene Minimalmengenschmierung mit bioasierten Ölen

- Für intensiven Ölauftrag Grundöl auf Basis von Raps- oder Sonnenblumenöl
- Für homogenes Gemisch von Öl und CO_2 Verwendung von synthetischen Monoester
- Schwefel und Phosphor beeinflussen das Misch-, Sprüh- und Strömungsverhalten eines biologischen Grundöls nicht nachweisleich
- Bei Unterschreitung der CO_2-Dichte von $\rho = 500\ kg/m^3$ steigt der Gasanteil und führt zu Pulsationseffekten
- Zur Stabilisierung (vollständiger flüssiger Aggregatzustand) des CO_2 bei einkanaliger Zuführung sollte Kühlung des Mediums nach Austritt aus den Steigrohrflaschen erfolgen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !



Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg
Institute of Resource and Energy Efficient Production Systems (REP)

Dr.-Mack-Str. 81 | Technikum 1
90762 Fürth

www.rep.tf.fau.de | www.ncatec.de