

Überwachungskonzept zur Analyse der Energieeffizienz von CO₂-Strahlsystemen

Multisensorische Prozessüberwachung beim CO₂-Strahlen

E. Uhlmann, Y. Li, X. Feng, V. H. Wohlfahrt

ZUSAMMENFASSUNG Das flüssige Hochdruckstrahlen mit CO₂ (HDCO₂-Strahlen) bietet als trockenes, rückstandsfreies und umweltfreundliches Fertigungsverfahren ein vielversprechendes Potenzial für den Materialabtrag und die Oberflächenbearbeitung. Um einen stabilen flüssigen CO₂-Strahl mit ausreichender Prozesskraft zu erzeugen, muss das CO₂ im Strahlsystem auf definierte Temperatur- und Druckzustände konditioniert werden. Dies erfordert eine Prozessüberwachung des CO₂-Strahlsystems. In dieser Arbeit wird die Auslegung und Integration von Durchfluss-, Druck- und Temperatursensoren in ein bestehendes Hochdruck-CO₂-Strahlsystem beschrieben. Durch experimentelle Untersuchung wird auf Basis der Datenanalyse der Zusammenhang zwischen den CO₂-Phasenumwandlungen im HDCO₂-Strahlprozess und der resultierenden Prozessstabilität analysiert.

STICHWÖRTER

Fertigungsmesstechnik, Trockenbearbeitung, Feinbearbeitung

Multisensor process monitoring of CO₂ jetting - Monitoring approach for analyzing the energy efficiency of CO₂ jet systems

ABSTRACT High-pressure jetting with liquid CO₂ (HPCO₂ jetting) is a dry, residue-free and environmentally friendly manufacturing process with significant potential for material removal and surface processing. To generate a stable liquid CO₂ jet with sufficient process forces, the CO₂ within the jet system must be conditioned to defined temperature and pressure states, which requires process monitoring of the CO₂ jet system. This study presents the design and integration of flow, pressure, and temperature sensors into a high-pressure CO₂ jetting system. Experimental investigations combined with data analysis are used to evaluate the relationship between CO₂ phase transitions during the HPCO₂ jetting process and the resulting process stability.

1 Einleitung

Das flüssige Hochdruckstrahlen mit CO₂ (kurz HDCO₂-Strahlen) ist eine neue Fertigungstechnologie, die sich durch eine trockene, rückstandsfreie und umweltfreundliche Prozessführung auszeichnet. Im Gegensatz zu konventionellen spanenden Verfahren werden beim HDCO₂-Strahlen keine Kühlschmierstoffe eingesetzt, was eine kontaminationsfreie Bearbeitung ermöglicht [1]. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an nachhaltige und ressourceneffiziente Fertigungsprozesse rückt diese Technologie zunehmend in den Fokus der Forschung.

Im Zuge verstärkter Untersuchungen zur nachhaltigen Nutzung von CO₂ als Prozessmedium wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze zur Anwendung von CO₂-Strahltechnologien entwickelt [2]. Dunsky und Hashish [3] zeigten erstmals die grundsätzliche Eignung von flüssigem HDCO₂ als Strahlmedium für Trennprozesse und wiesen dessen Potenzial für eine rückstandsfreie Bearbeitung von Aluminium, Stahl und Messing nach. Aufbauend auf diesen Ergebnissen entwickelte Bilz [4] ein prototypisches HDCO₂-Strahlsystem für den Einsatz unter atmosphärischen Bedingungen. Weitere Untersuchungen von Uhlmann *et al.* [5, 6] zur Bearbeitung von AlMg3 belegten, dass die Abtragsleistung des HDCO₂-Strahls über die Prozessdauer hinweg konstant bleibt. Engelmeier [7] untersuchte die Strahl-

bildungsmechanismen, die Phasenverhältnisse des CO₂ während des HDCO₂-Strahlprozesses sowie deren Einfluss auf den Materialabtrag.

In weiterführenden Untersuchungen von Göhlich [8] wurde der Einfluss von Strahldruck p_s , Temperatur T und Düsendurchmesser d_n auf die Materialabtragsleistung des HDCO₂-Strahls analysiert. John [9] entwickelte erstmals eine Anlagentechnologie zum HDCO₂-Strahlen mit Abrasiv. Trotz nachgewiesener Eignung des HDCO₂ als Fertigungsverfahren weisen bestehende HDCO₂-Strahlsysteme bislang einen wesentlichen Nachteil auf. Eine systematische Prozessüberwachung ist nicht vorhanden, sodass die ablaufenden thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgänge im HDCO₂-Strahlsystem nur eingeschränkt erfasst werden können [7]. Der HDCO₂-Strahlprozess stellt somit ein Black-Box-System dar, was eine gezielte Prozessführung, Stabilitätsbewertung und Energieeffizienzanalyse erheblich erschwert.

Im Gegensatz dazu existieren im Bereich des Hochdruckwasserstrahlens bereits umfangreiche Untersuchungen zur Integration von Sensorik und zur Prozessüberwachung. Veljkovic [10] untersucht den Zusammenhang zwischen Druckschwankungen und Unregelmäßigkeiten der bearbeiteten Werkstückoberfläche beim Wasserstrahlschneiden mit Abrasiv. Jerman [11] führt Temperaturmessungen mittels Thermoelemente entlang verschiedener

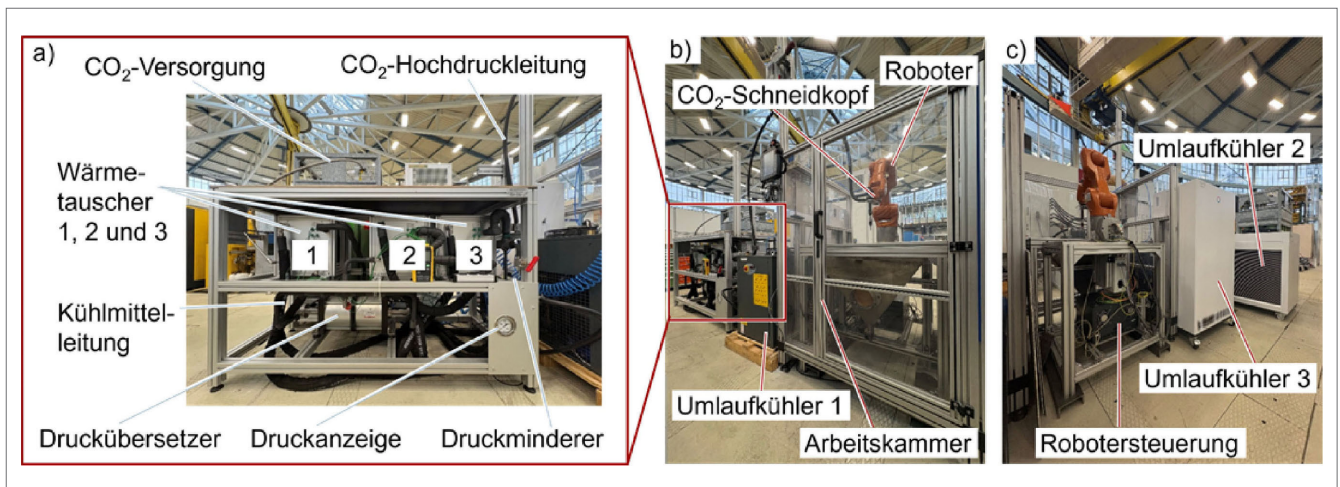


Bild 1 Prototypisches HDCO₂-Strahlsystem: a) Temperatur- und Druckeinheit. b) Frontansicht. c) Rückansicht. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

Positionen des Wasserstrahlsystems durch und analysiert auf dieser Grundlage die Temperaturänderungen des Wassers innerhalb des Wasserstrahlsystems. Die Wassertemperatur hat einen signifikanten Einfluss auf den Zustand der Eispartikel im resultierenden Ice Jet sowie auf dessen Schneidleistung. Pietrow [12] setzt einen Luftmassendurchflusssensor zur Überwachung des Mischrohrs ein, wobei der gemessene Luftmassenstrom als Indikator für den Verschleißzustand des Mischrohrs und damit für den Betriebszustand des Abrasivwasserstrahlsystems verwendet wird. Annoni [13] gibt einen systematischen Überblick über den Einsatz unterschiedlicher Sensorik im Wasserstrahlsystem und zeigt deren Bedeutung für das Verständnis des Prozessverhaltens sowie für die Detektion von Fehl- und Stözzuständen im System auf. Diese etablierten Ansätze liefern Anknüpfungspunkte zur Übertragung vergleichbarer Überwachungskonzepte auf das HDCO₂-Strahlen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Durchfluss-, Druck- und Temperatursensoren in ein bestehendes HDCO₂-Strahlsystem zu integrieren und auf dieser Basis ein multisensorisches Prozessüberwachungskonzept umzusetzen, um den HDCO₂-Strahlprozess zu charakterisieren. Mithilfe der Analyse der während der Strahlversuche erfassten Sensordaten werden die physikalischen Vorgänge im HDCO₂-Strahlsystem erläutert und die ersten Ansätze zur Bewertung der Prozessstabilität und Energieeffizienz des HDCO₂-Strahlprozesses aufgezeigt.

2 Anlagentechnik von HDCO₂-Strahlen

Das in dieser Arbeit eingesetzte HDCO₂-Strahlsystem wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin aufgebaut. Es dient der Erzeugung eines stabilen, flüssigen CO₂-Strahls unter definierten Temperatur- und Druckbedingungen. Bild 1 zeigt den Aufbau sowie die wesentlichen Komponenten des HDCO₂-Strahlsystems.

Das Kohlenstoffdioxid wird aus einer externen CO₂-Steigrohrflasche der Firma Air Liquide Deutschland GmbH der Temperatur- und Druckeinheit zugeführt. In der Steigrohrflasche ist das CO₂ bei einer Umgebungstemperatur $T \approx 20^\circ\text{C}$ und einem Druck $p_0 = 57\text{ bar}$ gespeichert. Die Temperatur- und Druckeinheit umfasst einen Druckübersetzer und drei kaskadierte Wärmetauscher, die mit einer doppelagigen Spiralrohrstruktur ausgestattet sind. Das CO₂ durchläuft nacheinander die Wärmetauscher 1, 2 und 3.

Wärmetauscher 1 wird durch einen Umlaufkühler 1 des Typs „PCZEZ 50.06 NEB“ der National Lab GmbH betrieben, wobei Glykosol N der Pro Kühlsole GmbH als Kühlmedium eingesetzt wird. Die Wärmetauscher 2 und 3 werden jeweils durch Umlaufkühler 2 und 3 der Typen „IN 1330 TW“ und „UC 24“ der Lauda Dr. R. Wobser GmbH & Co. KG temperiert, wobei „Pekasol L“ der Pro Kühlsole GmbH als Kühlmedium verwendet wird. Zwischen dem ersten und dem zweiten Wärmetauscher wird das CO₂ mit einem Druckübersetzer des Typs „GPD 260-2-NBR“ der Maximator GmbH auf einen Druck p_s von bis zu $p_{s,\text{max}} = 2500\text{ bar}$ verdichtet. Anschließend wird das niedrigtemperierte, komprimierte HDCO₂ über eine hochdruckfeste, wärme-isolierte Rohrleitung zur Strahleinheit geführt und aus einem robotergeführten Schneidkopf des Typs „IV 2.0 PWJ 155“ der Allfi AG ausgetragen. Der Schneidkopf ist an einem sechsachsigen Industrieroboter des Typs „KR 10 R900-2“ der Kuka SE & Co. KGaA montiert. Bild 1b) und 1c) zeigen die Front- und Rückansicht des HDCO₂-Strahlsystems.

3 Ansätze zur Prozessüberwachung

3.1 Durchflusssensor

Zur Erfassung des CO₂-Massendurchflusses $\dot{m}$ wurde ein Durchflusssensor des Typs „RHE 42“ der Rheonik GmbH in die CO₂-Leitung zwischen der CO₂-Steigrohrflasche und dem Wärmetauscher 1 integriert, da sich der Druck p_s und die Temperatur T_{CO_2} des CO₂ in diesem Bereich in einem stabilen thermodynamischen Zustand befinden. Bild 2 zeigt den integrierten Durchflusssensor und den Aufbau der Durchflussmessung.

Der Durchflusssensor ist als Inline-Messaufnehmer in der CO₂-Leitung ausgeführt und übernimmt die Erfassung der strömungsabhängigen Sensorsignale. Das Messprinzip basiert auf der Erfassung der durch den Massendurchfluss induzierten Corioliskraft F_{cor} in einem schwingenden Messrohr. Die Weiterverarbeitung der Rohsignale erfolgt in einer separaten Auswerteeinheit. Diese ist zugleich die Spannungsquelle für den Sensor und dient auch zur Übertragung der Sensorsignale über einen USB-zu-RS485-Konverter an einen Rechner. In der Einheit werden die Rohsignale verstärkt, gefiltert und in Massendurchflusssensormesswerte umgerechnet. Mithilfe der Software „RHEComPro“ der Rheonik GmbH werden sie dann zeitaufgelöst ausgelesen und gespeichert.

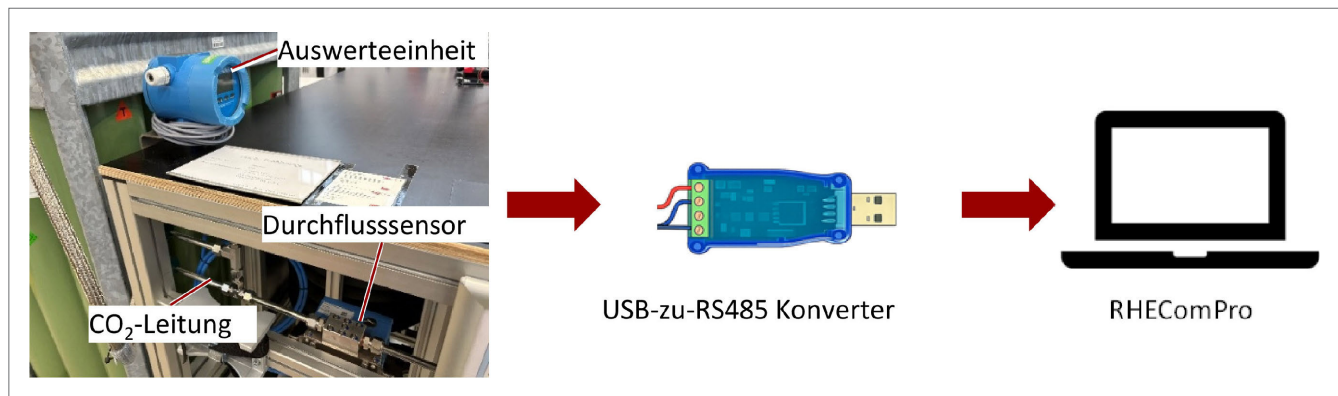


Bild 2 Aufbau zur Messung des Massendurchflusses.

Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

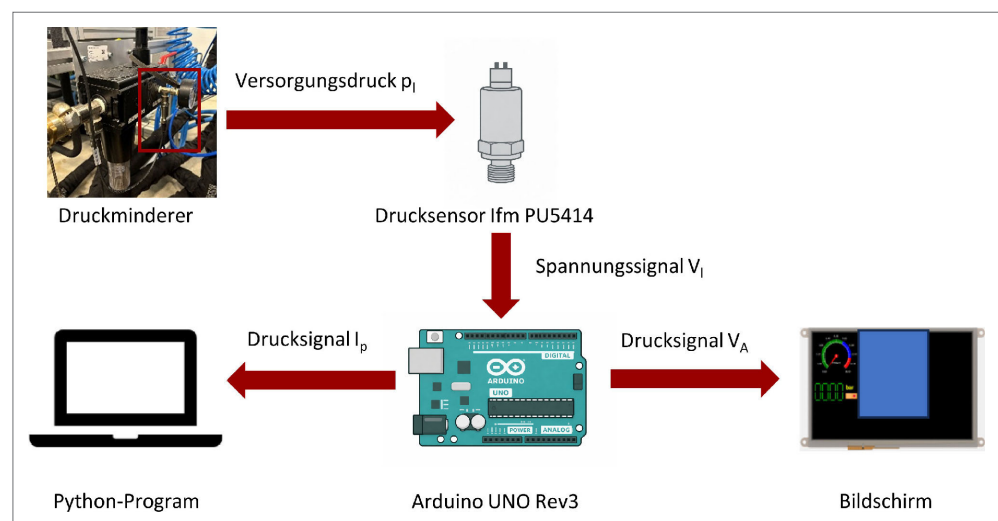


Bild 3 Aufbau zur Druckmessung.

Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

Die Abtastrate des Durchflusssensors beträgt $f_s = 5 \text{ Hz}$ mit einer Messgenauigkeit $\delta m = 0,1 \%$.

3.2 Drucksensor

Der Aufbau der Druckmessung ist in **Bild 3** dargestellt.

Der Drucksensor ist in den Druckminderer zur Regelung des Versorgungsdrucks integriert. Im HDCO₂-Strahlsystem wird auf der Niederdruckseite des Druckübersetzers Versorgungsdruckluft von $p_1 = 0$ bis 4,51 bar aus einem Kompressor zugeführt. Durch die Bewegung eines Kolbens wird auf der CO₂-Seite eine Druckerhöhung bewirkt. Das Übersetzungsverhältnis i des Druckübersetzers beträgt dabei $i = p_s : p_1 = 554 : 1$. Der Drucksensor gibt ein analoges Spannungssignal V_1 an einen Mikrocontroller des Typs „Arduino UNO Rev3“ von Arduino SA aus. Das Spannungssignal V_1 wird von „Arduino UNO R3“ weiterverarbeitet und in ein Drucksignal I_p umgewandelt, das an einen Rechner übertragen wird. Die Umrechnung in den tatsächlichen CO₂-Strahlendruck sowie die Speicherung der Messdaten erfolgen mithilfe eines auf dem Rechner implementierten Python-Programms. Die Druckmessung erfolgt mit einer Abtastrate von $f_s = 50 \text{ Hz}$ und einer Messgenauigkeit von $\delta p_1 = 5 \%$ bar. Zur Echtzeitüberwachung des CO₂-Strahlendrucks p_s während des Betriebs wird das spannungsbasierte Drucksignal V_A von dem Arduino UNO Rev3 an einen Bildschirm übertragen.

3.3 Temperatursensor

Es wurden beim HDCO₂-Strahlsystem zwölf Thermoelemente des Typs „K“ der Omega Engineering Inc zur Temperaturmessung verwendet. Die Thermoelemente sind auf den Außenoberflächen der CO₂-Leitungen sowie der Kühlmittleitungen befestigt. Die Wärmeleitpaste zwischen Thermoelementsensorkopf und Leitungsröhre verbessert den thermischen Kontakt im Messstellenbereich. Die Außenoberflächen der CO₂-Leitungen sind mit dem Isolierwerkstoff „AF EVO“ der Armaflex GmbH isoliert, um den Wärmeeinträge aus der Umgebung zu reduzieren. **Bild 4** zeigt schematisch die Rohrleitungsanordnung und die Temperaturmessstellen der Wärmetauscher.

Ein Doppelrohr nach Roetzel und Spang [14] besteht aus zwei ineinander liegenden Rohren. Beide Rohre besitzen einen Ein- und Austritt für den jeweiligen Stoffstrom. Für einen optimierten Wärmeaustausch fließt das CO₂ und das Kühlmittel gegenläufig. An den Rohrleitungen sind jeweils an jedem Ein- und Ausgang des Wärmetauschers ein separates Thermoelement installiert, um die Ein- und Austrittstemperatur vom CO₂ ($T_{\text{CO}_2,\text{ein}}$ und $T_{\text{CO}_2,\text{aus}}$) sowie vom Kühlmittel ($T_{\text{KM},\text{ein}}$ und $T_{\text{KM},\text{aus}}$) zu erfassen. Die von den Thermoelementen erzeugten Spannungssignale werden mit einem Datenlogger „PCE-T 1200“ der PCE Deutschland GmbH mit einer Abtastrate f_s von $f_s = 1 \text{ Hz}$ erfasst und in Temperaturmesswerte umgerechnet. Die Messgenauigkeit ist $\delta T = 1 \%$.

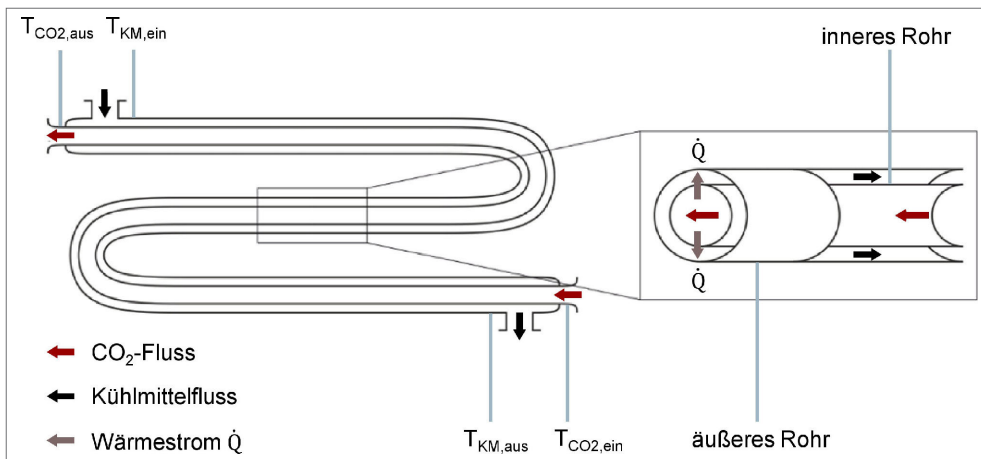


Bild 4 Aufbau zur Temperaturmessung nach Roetzel und Spang. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

Tabelle Versuchsparameter

Stellgröße		Einheit	Wert
Temperatur Umlaufkühler 1	T_{K1}	°C	-10
Temperatur Umlaufkühler 2	T_K	°C	-20
Temperatur Umlaufkühler 3	T_{K3}	°C	-20
Strahldruck	p_s	bar	500; 1.000; 2.000

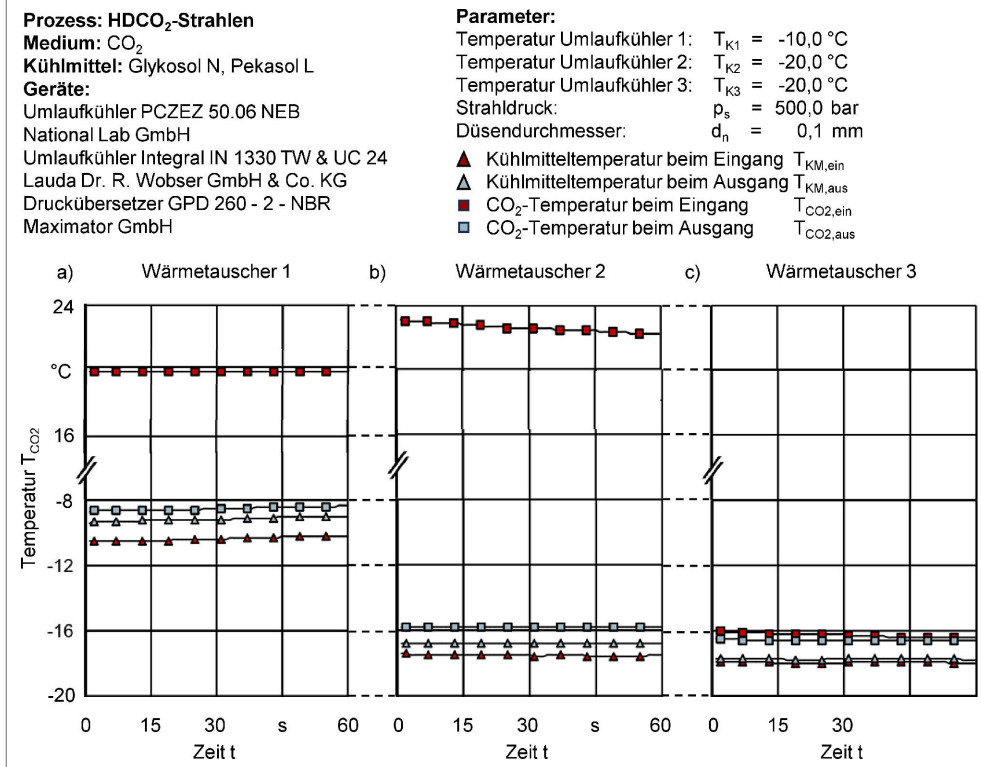


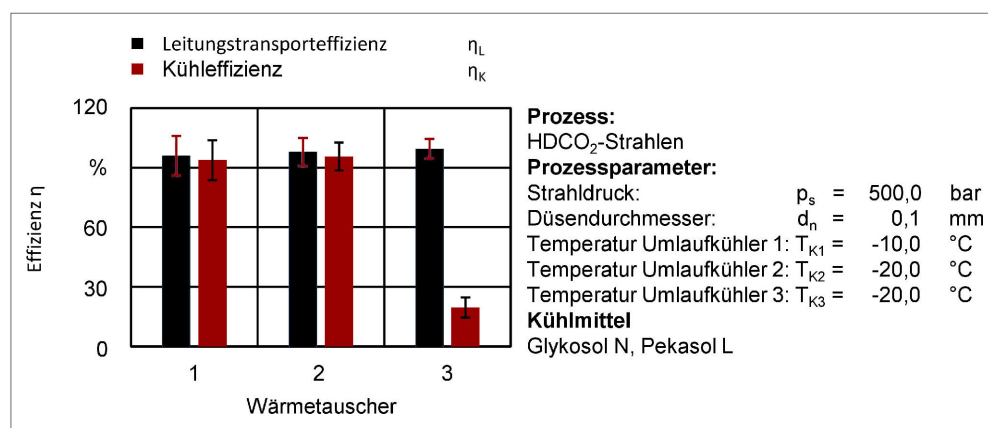
Bild 5 Temperaturverlauf in der Temperier- und Druckeinheit bei $p_s = 500\text{ bar}$; a) Wärmetauscher 1; b) Wärmetauscher 2; c) Wärmetauscher 3. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

4 Ergebnisse und Diskussion

Um die Funktionalität der eingesetzten Sensorik zu überprüfen und den HDCO₂-Strahlprozess anhand der multisensorischen Messdaten zu charakterisieren, wurden

HDCO₂-Strahlversuche durchgeführt. Die in den Strahlversuchen eingestellten Parameter sind in der **Tabelle** zusammengefasst. In den Strahlversuchen wurde eine Saphirdüse mit dem Düsendurchmesser $d_n = 0,1\text{ mm}$ des Typs „94“ der Allfi AG eingesetzt.

Bild 6 Effizienz der Wärmetauscher. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin



4.1 Charakterisierung des Strahlprozesses durch multisensorische Datenauswertung

Bild 5 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe an den verschiedenen Messstellen bei einer Umgebungstemperatur $T_1 = 20$ °C. Der Strahldruck p_s wurde, basierend auf den Messwerten des Drucksensors, auf $p_s = 500$ bar eingestellt, während die Solltemperaturen des Umlaufkühlers 1 auf $T_{K1} = -10$ °C sowie die des Umlaufkühler 2 und 3 auf $T_{K2} = T_{K3} = -20$ °C festgelegt werden. Nach **Bild 5 a)** beträgt die CO₂-Eintrittstemperatur beim Wärmetauscher 1 $T_{CO_2, \text{ein}1} = 19,7$ °C und entspricht der Temperatur der CO₂-Steigrohrflasche. Nach dem Durchströmen des Wärmetauschers 1 wird das CO₂ auf eine Austrittstemperatur von etwa $T_{CO_2, \text{aus}1} = -8,7$ °C abgekühlt.

Bild 5 b) und **5 c)** stellt die zeitlichen Temperaturverläufe der Wärmetauscher 2 und 3 dar. Die CO₂-Eintrittstemperatur des Wärmetauschers 2 $T_{CO_2, \text{ein}2}$ beträgt $T_{CO_2, \text{ein}2} = 22$ °C ist somit um $\Delta T_{CO_2} = 30,7$ K höher. Ursache ist der zwischen den Wärmetauschern 1 und 2 angeordnete Druckübersetzer, in dem das CO₂ von $p_s = 57$ bar auf $p_s = 500$ bar verdichtet wird. Durch die dabei verrichtete Arbeit erhöht sich dessen innere Energie E_{int} , was zu einem entsprechenden Temperaturanstieg führt. Im Wärmetauscher 2 wird das CO₂ anschließend auf etwa $T_{CO_2, \text{aus}2} = -15,8$ °C abgekühlt und in Wärmetauscher 3 weiter auf $T_{CO_2, \text{aus}3} = -16,4$ °C temperiert. Zudem ist zu beobachten, dass die an die Wärmetauscher 2 und 3 angeschlossenen Umlaufkühler eine Solltemperatur $T_{K2,3} = -20$ °C aufweisen, während die jeweiligen Kühlmittelntrittstemperaturen bei etwa $T_{KM, \text{ein}2} = -17,0$ °C beziehungsweise $T_{KM, \text{ein}3} = -18,0$ °C liegen. Die Temperaturdifferenz $\Delta T_{3-3} = T_{K3} - T_{KM, \text{ein}3} = 2,0$ K zwischen der Solltemperatur T_{K3} des Umlaufkühlers 3 und der Kühlmittelntrittstemperatur $T_{KM, \text{ein}3}$ ist auf Verluste der Kühlleistung entlang der Kühlmittelleitung zwischen Umlaufkühler und Wärmetauscher zurückzuführen.

Die Effizienz der Wärmetauscher wird anhand der gemessenen Temperaturdaten bestimmt. In dieser Arbeit werden zwei Effizienzkennwerte definiert. Zwischen Umlaufkühler und Wärmetauscher unterliegen die Kühlmittelleitungen einem thermischen Umgebungseintrag. Gemäß Formel 1 wird die Leitungstransporteffizienz η_L als Verhältnis der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur T_{amb} und der Kühlmittelntrittstemperatur $T_{KM, \text{ein}}$ zur Differenz zwischen Umgebungstemperatur T_{amb} und Solltemperatur des Umlaufkühlers T_K definiert. Nähert sich die Leitungstransporteffizienz η_L dem Wert $\eta_L = 1$ an, entspricht die Kühlmittelntrittstemperatur $T_{KM, \text{ein}}$ der eingestellten Soll-

temperatur T_K . Folglich approximieren die infolge des Umgebungseintrags verursachten Kühlleistungsverluste gegen Null.

$$\eta_L = \frac{T_{\text{amb}} - T_{KM, \text{ein}}}{T_{\text{amb}} - T_K} \quad (1)$$

Die Kühleffizienz η_K wird gemäß Formel 2 als Verhältnis der tatsächlich erreichten CO₂-Temperaturabsenkung zur maximal möglichen Temperaturabsenkung definiert. Im Idealfall kann das CO₂ bis auf die Kühlmittelntrittstemperatur $T_{KM, \text{ein}}$ abgekühlt werden. Ein Wert der Kühleffizienz $\eta_K = 1$ zeigt, dass der Wärmetauscher seine maximale Kühlkapazität erreicht.

$$\eta_K = \frac{T_{CO_2, \text{ein}} - T_{CO_2, \text{aus}}}{T_{CO_2, \text{ein}} - T_{KM, \text{ein}}} \quad (2)$$

Bild 6 zeigt die Leitungstransporteffizienz η_L sowie die Kühleffizienz η_K der Wärmetauscher 1, 2 und 3. Die Leitungstransporteffizienz η_L beträgt dabei $\eta_{L,1} = 96$ %, $\eta_{L,2} = 98$ % und $\eta_{L,3} = 99,5$ %. Die hohen Leitungstransporteffizienzen η_L sind auf die eingesetzte Wärmedämmung zurückzuführen.

Die Kühleffizienz η_K der Wärmetauscher 1 und 2 liegt bei $\eta_{K,1} = 93,8$ % beziehungsweise $\eta_{K,2} = 95,7$ %, was darauf hinweist, dass beide Wärmetauscher nahezu ihre theoretisch maximal erreichbare Kühlwirkung erzielen. Die Kühleffizienz des Wärmetauschers 3 beträgt hingegen $\eta_{K,3} = 19,6$ %. Dies ist auf die geringe Temperaturdifferenz zwischen CO₂-Eintrittstemperatur $T_{CO_2, \text{ein}3}$ und Kühlmittelntrittstemperatur $T_{KM, \text{ein}3}$ zurückzuführen. Der zwischen CO₂ und Kühlmedium übertragene Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{st}}$ stark vom CO₂-Zustand und von der Temperaturdifferenz ΔT_{3-3} zwischen CO₂ und Kühlmittel [15]. Im Wärmetauscher 2 ist das CO₂ aufgrund der Verdichtung durch den Druckübersetzer in Mehrphasenzustand, während das CO₂ im Wärmetauscher 3 rein flüssig ist. Im Wärmetauscher 3 beträgt die Temperaturdifferenz $\Delta T_{3-3} = 2,0$ K, wodurch das CO₂ nur um ungefähr $\Delta T_{CO_2} = 0,2$ K abgekühlt wird.

Neben der Temperaturmessung kann der HDCO₂-Strahlprozess auch anhand von Druck- und Durchflussmessungen charakterisiert werden. **Bild 7** zeigt synchron erfasste Messsignale von Druck- und Durchflusssensor beim Strahldruck von $p_s = 500$ bar.

Bild 7 a) zeigt einen periodischen Einbruch von Strahldruck p_s mit einer Periodendauer $t_p = 8,8$ s um circa $\Delta p_s = 327,3$ bar. Dieses Verhalten resultiert aus der Funktionsweise des eingesetzten pneumatischen Druckübersetzers GPD 260-2-NBR, der das CO₂ durch oszillierende Kolbenbewegungen verdichtet. Während der Rückzugsbewegung des Kolbens bildet sich im Kolbenraum ein

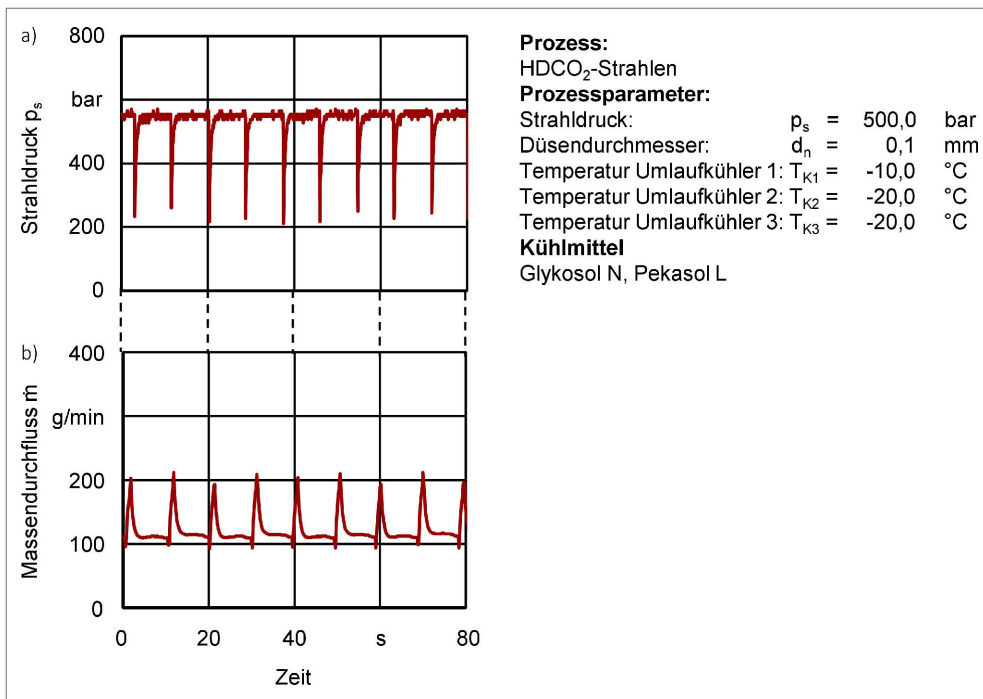


Bild 7 Zeitverlauf a) Strahldrucks p_s ; b) Massendurchfluss $\dot{m}$.
Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

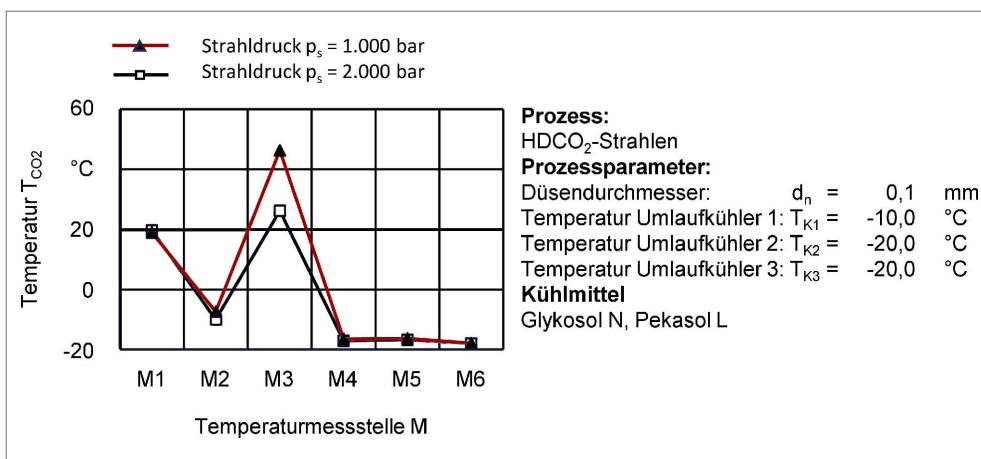


Bild 8 Mehrpunkt-Temperaturmessung mit $p_s = 1000$ bar und $p_s = 2000$ bar. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

Unterdruck p_u , wodurch der Strahldruck p_s vorübergehend absinkt. Dieser Vorgang spiegelt sich ebenfalls in den Durchflussmessdaten wider. Aufgrund des entstehenden Unterdrucks p_u wird vermehrt CO₂ aus der Steigrohrflasche in den Druckübersetzer angesaugt. Während des Druckeinbruchs tritt daher gleichzeitig ein sprunghafter Anstieg des CO₂-Massendurchflusses $\dot{m}$ auf. Die Periodendauer t_m entspricht dabei näherungsweise derjenigen des Strahldrucks p_s und beträgt $t_m = 9,5$ s.

4.2 Phasenumwandlungsanalyse

In **Bild 8** sind die CO₂-Temperaturen T_{CO_2} an den jeweiligen Messstellen M der drei Wärmetauscher bei einem eingestellten Strahldruck von $p_s = 1000$ bar und $p_s = 2000$ bar aufgeführt.

Die Temperaturmessstellen M1 bis M6 bezeichnen nacheinander die CO₂-Eingänge und -Ausgänge der drei kaskadierten Wärmetauscher. Die Temperaturverteilung T_{CO_2} entlang der CO₂-Leitung in der HDCO₂-Strahlanlage zeigt bei Strahldrücken von $p_s = 1000$ bar und $p_s = 2000$ bar einen insgesamt ähnlichen Verlauf wie bei $p_s = 500$ bar. In allen Fällen tritt die höchste

CO₂-Temperatur $T_{CO_2, \text{ein}2}$ am Eingang des Wärmetauschers 2 an der Messstelle M3 auf, da das CO₂ hier zuvor im Druckübersetzer verdichtet wird.

Bild 9 zeigt die zeitlichen Temperatur- und Druckverläufe am CO₂-Eingang des Wärmetauschers 2 bei Strahldrücken p_s von $p_s = 1000$ bar und $p_s = 2000$ bar.

Im Fall von $p_s = 1000$ bar liegt die Temperatur $T_{CO_2, \text{ein}2, 1000 \text{ bar}} = 26,2$ °C unterhalb der kritischen Temperatur von CO₂ $T_{c, CO_2} = 30,98$ °C, sodass das CO₂ im HDCO₂-Strahlsystem in flüssigem Zustand vorliegt. Die kritische Temperatur T_{c, CO_2} von CO₂ ist die Übergangstemperatur zwischen flüssigem und überkritischem Aggregatzustand. Im Vergleich zu flüssigem CO₂, das als inkompressible oder nur geringfügig kompressible Flüssigkeit betrachtet werden kann, weist überkritisches CO₂ eine deutlich höhere Kompressibilität auf [16].

Bei einem Strahldruck von $p_s = 2000$ bar überschreitet die CO₂-Eintrittstemperatur $T_{CO_2, \text{ein}2, 2000 \text{ bar}} = 43,2$ °C die kritische Temperatur T_{c, CO_2} von CO₂, sodass das CO₂ nach der Verdichtung in den überkritischen Bereich übergeht. Aufgrund der höheren Kompressibilität des überkritischen CO₂ im Vergleich mit

Prozess: HDCO₂-Strahlen
Medium: CO₂
Kühlmittel: Glykosol N, Pekasol L
Geräte:
 Umlaufkühler PCZEZ 50.06 NEB
 National Lab GmbH
 Umlaufkühler Integral IN 1330 TW & UC 24
 Lauda Dr. R. Wobser GmbH & Co. KG
 Druckübersetzer GPD 260 - 2 - NBR
 Maximator GmbH

Parameter:
 Temperatur Umlaufkühlers 1: $T_{K1} = -10,0\text{ °C}$
 Temperatur Umlaufkühlers 2: $T_{K2} = -20,0\text{ °C}$
 Temperatur Umlaufkühlers 3: $T_{K3} = -20,0\text{ °C}$
 Düsendurchmesser: $d_n = 0,1\text{ mm}$
 Strahldruck $p_s = 1.000,0\text{ bar}$
 Strahldruck $p_s = 2.000,0\text{ bar}$
 Kritische Temperatur T_{c,CO_2}
 Druckschwankung aufgrund transienter Hohlräume

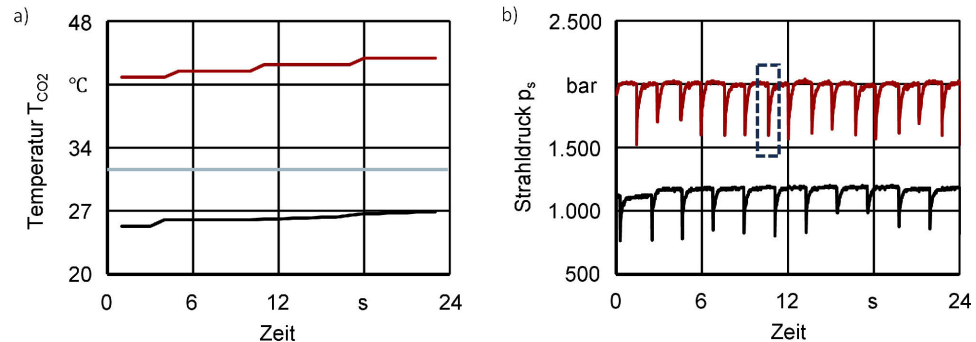


Bild 9 Zeitverlauf a) Eintrittstemperatur $T_{CO_2, \text{ein}}$ am Wärmetauscher 2; b) Strahldruck p_s . Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Berlin

flüssigem CO₂ nimmt das überkritische CO₂ nach der Verdichtung im Druckübersetzer ein geringeres spezifisches Volumen V' ein. Dies kann zur Ausbildung transienter Hohlräume im Druckübersetzer führen, die wiederum häufigere Druckschwankungen verursachen. Bild 9b) verdeutlicht diesen Effekt. Bei einem eingestellten Strahldruck von $p_s = 2000\text{ bar}$ wird eine erhöhte Frequenz kurzfristiger Druckabfälle beobachtet. Die Aufrechterhaltung der Temperatur des CO₂, T_{CO_2} , im unterkritischen Bereich trägt maßgeblich zur Stabilität des HDCO₂-Strahls bei. Auch bei einem Strahldruck von $p_s = 1000\text{ bar}$ treten Druckschwankungen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die CO₂-Temperatur unter $p_s = 1000\text{ bar}$ in die Nähe der kritischen Temperatur T_{c,CO_2} gelangt. In diesem Übergangsbereich zum überkritischen Zustand zeigt CO₂ auch eine stark erhöhte Kompressibilität [9]. Für einen stabilen HDCO₂-Strahl ist es auch erforderlich, die CO₂-Temperatur T_{CO_2} im HDCO₂-Strahlsystem so einzustellen, dass eine Annäherung an die kritische Temperatur T_{c,CO_2} vermieden wird.

Auf Basis der Mehrpunkt-Temperaturmessungen in der Temperier- und Druckeinheit sowie der erfassten Druckverläufe lassen sich die thermodynamischen Vorgänge des CO₂ im HDCO₂-Strahlsystem detailliert analysieren und beschreiben. Der Gesamtprozess lässt sich in mehrere charakteristische Phasen unterteilen, die im p-T-Phasendiagramm von CO₂ in **Bild 10** dargestellt sind.

- Phase A-B: Im Wärmetauscher 1 erfährt das CO₂ eine nahezu isobare Abkühlung. Während dieses Prozessschritts bleibt der Druck p_s des CO₂ nahezu auf dem Ausgangsdruck der Steigrohrflasche $p_0 = 57\text{ bar}$ konstant, während die Temperatur T_{CO_2} von etwa $T_{CO_2} = 20\text{ °C}$ auf circa $T_{CO_2} = -9\text{ °C}$ abgesenkt wird. Unter diesen Bedingungen liegt das CO₂ eindeutig im flüssigen Zustand vor.
- Phase B-C: In der anschließenden Phase vom Austritt des Wärmetauschers 1 bis zum Eintritt in den Wärmetauscher 2 wird das CO₂ im Druckübersetzer innerhalb kurzer Zeit auf den eingestellten Strahldruck p_s verdichtet. Dieser Vorgang kann als adiabatische Kompression beschrieben werden, bei der durch die verrichtete Verdichtungsarbeit die innere Energie E_{int} sowie die CO₂-Temperatur T_{CO_2} stark ansteigen. Bei hohen

eingestellten Druckniveaus von $p_s = 2000\text{ bar}$ besteht die Gefahr, dass das ursprünglich flüssige CO₂ in den überkritischen Bereich übergeht. Auf dieser Grundlage kann in dieser Arbeit lokalisiert werden, dass die beobachteten Druckschwankungen des HDCO₂-Strahls auf den Verdichtungsprozess im Druckübersetzer zwischen Kühlern 1 und 2 zurückzuführen sind. Durch den Vergleich der gemessenen CO₂-Drücke p_s bei Sollwerten von $p_{s, \text{soll}} = 1000\text{ bar}$ und 2000 bar kann zudem eine erste Richtung für die Optimierung der Strahlstabilität des HDCO₂-Systems abgeleitet werden, nämlich die Absenkung der CO₂-Temperatur im Druckübersetzer.

- Phase C-D: Im weiteren Verlauf vom Eintritt in den Wärmetauscher 2 bis zum Schneidkopf erfolgt eine erneute, annähernd isobare Abkühlung. Durch die nachgeschalteten Wärmetauscher 2 und 3 wird das CO₂ auf Temperaturen von etwa $T_{CO_2} = -20\text{ °C}$ temperiert, sodass sich vor der Strahlbildung wieder ein stabiler flüssiger Zustand einstellt. Diese gezielte thermische Konditionierung ist eine wesentliche Voraussetzung für einen reproduzierbaren und stabilen HDCO₂-Strahlprozess.
- Phase D-E: Nach dem Austritt des CO₂-Strahls aus der Düse fällt der Strahldruck p_s schlagartig vom eingestellten Niveau von $p_s = 1000\text{ bar}$ beziehungsweise $p_s = 2000\text{ bar}$ auf Atmosphärendruck p_{amb} ab. Dabei durchläuft das CO₂ einen adiabatischen Expansionsprozess, der von Flash-Verdampfung begleitet wird [9]. Ein Teil des flüssigen CO₂ verdampft unmittelbar zu gesättigtem Dampf unter Atmosphärendruck, wodurch sich die CO₂-Temperatur T_{CO_2} stark reduziert. Daraus ergibt sich, dass der austretende CO₂-Strahl zu einer deutlichen Abkühlung der strahl nahen Umgebung sowie der Werkstückoberfläche führt.

5 Fazit

In dieser Arbeit wird ein multisensorisches Mess- und Überwachungskonzept für ein HDCO₂-Strahlsystem präsentiert und untersucht. Dabei werden Durchfluss-, Druck- und Temperatursensoren in das Strahlsystem integriert. Mithilfe der experimen-

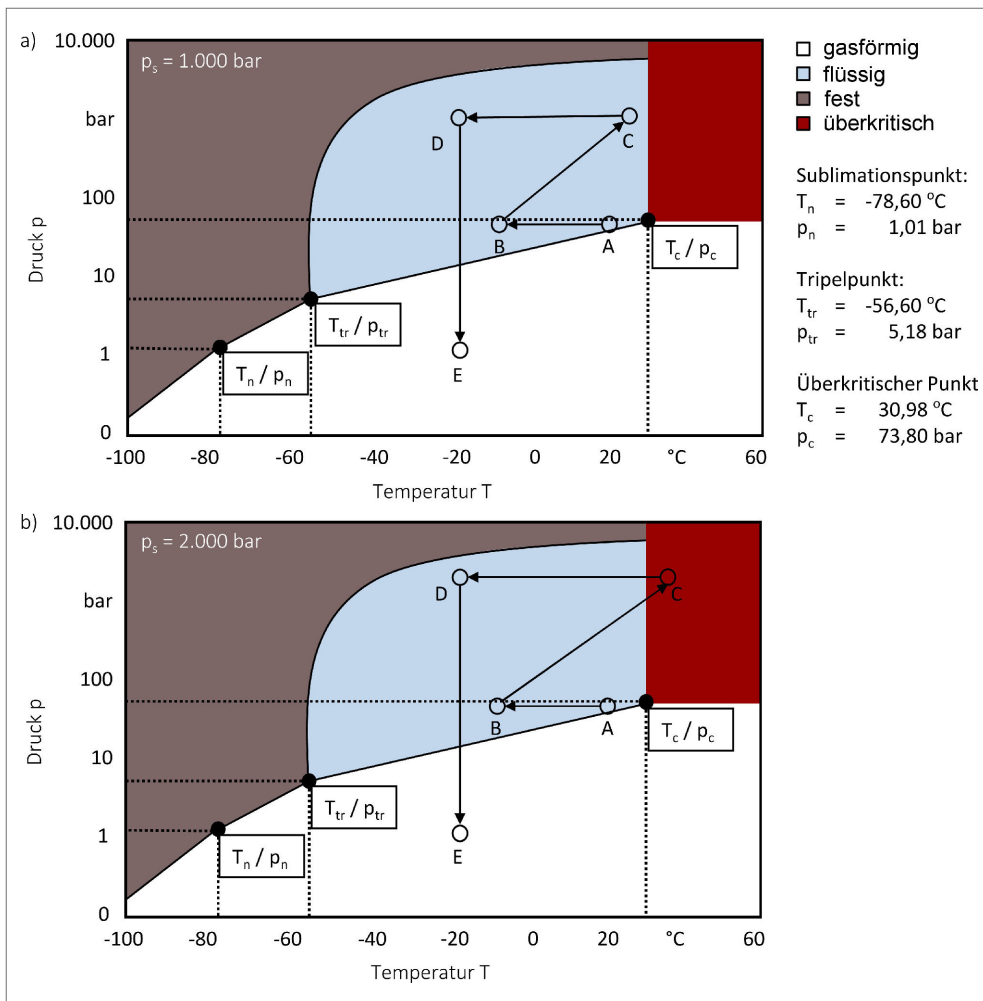


Bild 10 Phasenumwandlung im HDCO₂-Strahlprozess; a) Strahl-
druck $p_s = 1000 \text{ bar}$. b) Strahl-
druck $p_s = 2000 \text{ bar}$.
Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschi-
nen und Fertigungstechnik, TU Berlin

tell erfassten Sensordaten können die im HDCO₂-Strahlprozess ablaufenden physikalischen und thermodynamischen Prozesse analysiert und der Zusammenhang zwischen Temperatur, Druck und Prozessstabilität untersucht werden.

Die Temperaturmessungen zeigen, dass die Leitungstransporteffizienz η_L aller drei Wärmetauscher $\eta_L \geq 95 \%$ beträgt. Die Kühleffizienz η_K der Wärmetauscher 1 und 2 beträgt $\eta_K > 90 \%$, während die des dritten Wärmetauschers unter 20% liegt. Dies ist auf eine zu hoch eingestellte Kühlttemperaturen T_K zurückzuführen. Die Analyse der Druck- und Durchflussmessdaten zeigt, dass der im Druckübersetzer entstehende Unterdruck p_u zu periodischen Druckeinbrüchen des Strahlendrucks p_s führt, die von einem sprunghaften Anstieg des Durchflusses $\dot{m}$ begleitet sind. Mit steigendem Strahlendruck p_s von $p_s = 500 \text{ bar}$ über $p_s = 1000 \text{ bar}$ bis $p_s = 2000 \text{ bar}$ verstärkt sich die Druckinstabilität. Bei $p_s = 2000 \text{ bar}$ steigt die CO₂-Temperatur im Druckübersetzer infolge der adiabatischen Kompression über die kritische Temperatur $T_{c,CO_2} = 30,98 \text{ °C}$ an. Das dabei entstehende überkritische CO₂ ist komprimierbarer und verstärkt somit die durch den Unterdruck verursachten Druckschwankungen Δp_s .

Für zukünftige Untersuchungen zur Realisierung höherer Strahlrücke p_s erscheint der Einsatz von mehrstufigen Druckübersetzern beziehungsweise Pumpenkonzepten sinnvoll, um die Temperaturerhöhung pro Verdichtungsstufe zu reduzieren und somit kritische thermodynamische Zustände zu vermeiden. Ein weiterer Ansatz für zukünftige Arbeiten ist die thermische und

optische Untersuchung des HDCO₂-Strahls nach dem Austritt aus der Düse mithilfe einer Thermografiekamera, um den Zustand des CO₂ im freien Strahl zu analysieren. Auf dieser Basis können die Prozessparameter des HDCO₂-Strahlens weiter optimiert werden, um einen stabilen und reproduzierbaren flüssigen CO₂-Strahl zu realisieren. Basierend auf den Messdaten kann zudem ein zentrales Steuerungssystem aufgebaut werden, das die Einstellung der Prozessparameter ermöglicht, beispielsweise um die verbleibende Regeldifferenz zu minimieren.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Inhalten des Forschungsprojekts „Konditionieren hochharter Schleifscheiben durch Hochdruckstrahlen mit flüssigem CO₂“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 510588719.

Literatur

- [1] Uhlmann, E.; John, P.; Mankiewicz, J.: Strahlschneiden mit flüssigem CO₂ als Strahlmedium. wt Werkstattstechnik online, 106 (2016) 10,

- S. 775-780. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [2] Hunt, A.; Sin, E.; Marriott, R.: Generation, Capture, and Utilization of Industrial Carbon Dioxide. *ChemSusChem* 3 (2010) 3, pp. 306–322
- [3] Dunskey, C.; Hashish, M.: Cutting with high pressure CO₂ jets. In: Allen, A. G. (ed.): 12th International Conference on Jet Cutting Technology. London: Mechanical Engineering Publications 1994, pp. 683–690
- [4] Bilz, M.: Möglichkeiten und Grenzen des Strahlspanens mittels CO₂-Hochdruckstrahlen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2014
- [5] Uhlmann, E.; John, P.: Dry Cutting with High-Pressure Liquid CO₂ Jets. *Advanced Materials Letters* 10 (2019) 1, doi.org/10.5185/amlett.2019.2231
- [6] Uhlmann, E.; John, P.: Advancements of the Manufacturing Technology with High-Pressure Liquid CO₂ Jets. WJTA-IMCA Conference and Expo, 2017, www.wjta.org/images/wjta/Proceedings/Papers/2017/C2.pdf
- [7] Engelmeier, L.: Flüssige, kohärente Kohlendioxidstrahlen zum Schneiden von Materialien in atmosphärischer Umgebung. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2016
- [8] Göhlich, L.; Pollak, S.; Petermann, M.: Generation of liquid CO₂ jets under atmospheric conditions for cutting applications. *The Journal of Supercritical Fluids* 225 (2025), doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106688
- [9] John, P.: Trennstrahlen mit flüssigem Kohlendioxid. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, 2023
- [10] Veljkovic, D.; Baralic, J.; Jankovic, P. et al.: The Influence of Operating Pressure Oscillations on the Machined Surface Topography in Abrasive Water Jet Machining. *MDPI Materials* 18 (2025) 15, #3570, doi.org/10.3390/ma18153570
- [11] Jerman, M.; Orbanic, H.; Etxeberria, I. et al.: Measuring the Water Temperature Changes Throughout the Abrasive Water Jet Cutting System. 2011 WJTA-IMCA Conference and Expo, 2011
- [12] Pietrow, D.; John, P.; Fairclough, A. et al.: A Framework for Tool Condition Monitoring of Abrasive Waterjet Systems. *Procedia CIRP* 126 (2024), pp. 475–480, doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.404
- [13] Annoni, M.: A Review of Waterjet Cutting Research Towards MicroAWJ and the Definition of the Waterjet Digital Twin. *Materials*, 17(2024) 6, #1328, doi.org/10.3390/ma17061328
- [14] Roetzel, W.; Spang, B.: Berechnung von Wärmeübertragern. Heidelberg: Springer 1997
- [15] Karatzaferis, J.; Papanikolaou, N.; Tatakis E. et al.: Comparison and Evaluation of Power Factor Correction Topologies for Industrial Applications. *Energy and Power Engineering* 5 (2013) 6, pp. 401–410, dx.doi.org/10.4236/epe.2013.56042
- [16] Huber, M. L.; Lemmon, E. W.; Bell, I. H. et al.: The NIST REFPROP Database for Highly Accurate Properties of Industrially Important Fluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 61 (2022) 42, pp. 15449–15472, doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01427

Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann 

Yupeng Li, M.Sc. 
yupeng.li@tu-berlin.de

Xingqian Feng, M.Sc.

Viktor Wohlfahrt, M.Sc.

Technische Universität Berlin, Institut für
Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)
Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.iwf.tu-berlin.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)