

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-57
Datum der Einreichung: 27.02.2026
Datum der Annahme: 21.05.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

CFD- und experimentelle Analyse der Kühlschmierstoffströmung beim Einlippentiefbohren

Experimentelle Validierung der Kühlschmierstoffströmung im Einlippentiefbohren durch CFD-gestützte Strömungsanalyse

A. Bekston, D. Biermann

ZUSAMMENFASSUNG Insbesondere bei Tiefbohrprozessen ist die effiziente Kühlschmierstoffversorgung entscheidend für Prozessstabilität und Werkzeugstandzeit. Ziel der Arbeit ist die experimentelle Validierung numerischer Strömungssimulationen beim Einlippentiefbohren. Hierzu werden CFD-Simulationen mit einer experimentellen Strömungsvisualisierung kombiniert. Die Ergebnisse zeigen eine inhomogene Strömungsverteilung sowie eine unzureichende Versorgung der Schneidenecke, die sowohl numerisch als auch experimentell konsistent nachgewiesen wird. Die gute Übereinstimmung belegt die Aussagekraft des Modells und bildet eine belastbare Grundlage für gezielte Optimierungen der Kühlschmierstoffführung.

Experimental validation of cutting fluid flow in single-lip deep hole drilling using CFD-based flow analysis

ABSTRACT Efficient cutting fluid supply is crucial for process stability and tool life in deep hole drilling. This study focuses on the experimental validation of numerical flow simulations in single-lip deep hole drilling. CFD simulations are combined with experimental flow visualization. The results show an inhomogeneous flow distribution and insufficient supply of the cutting edge corner, consistently identified in both simulation and experiment. The good agreement confirms the validity of the model and provides a basis for targeted optimization of the cutting fluid supply.

STICHWÖRTER

Einlippentiefbohren, Kühlschmierstoffströmung, experimentelle Validierung

1 Einleitung und Motivation

Das Tiefbohren ist ein zentrales Verfahren der spanenden Fertigung zur Herstellung von Bohrungen mit hohen Längen-zu-Durchmesser-Verhältnissen und hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität. Innerhalb der Tiefbohrverfahren stellt das Einlippentiefbohren eine besonders wirtschaftliche und weit verbreitete Technologie dar, die vor allem in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- sowie der Medizintechnik eingesetzt wird [1]. Die zunehmende Verwendung hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe führt dabei zu steigenden Anforderungen an Prozesssicherheit, Werkzeugstandzeit und Bauteilqualität. Eine wesentliche Herausforderung des Einlippentiefbohrens ergibt sich aus den prozessbedingten Randbedingungen. Die große Eingriffstiefe, die eingeschränkten Möglichkeiten der Spanabfuhr sowie die asymmetrische Anordnung der Schneiden führen zu hohen mechanischen und thermischen Belastungen in der Schneidzone [1, 2]. Eine effiziente Kühlschmierstoffversorgung ist daher essenziell, um diese Belastungen zu reduzieren und einen stabilen Prozess sicherzustellen. Der Kühlschmierstoff übernimmt dabei mehrere Funktionen, wie die Kühlung der Schneidzone, die Reduktion der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück sowie den Spanabtransport aus der Bohrung [3]. Eine unzureichende Kühlschmierstoffzufuhr kann zu instabilen Prozesszuständen, erhöhtem Werkzeugverschleiß und Qualitätsein-

bußen an der Bohrungsoberfläche führen [4]. Insbesondere bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe, wie austenitischer Stähle oder nickelbasierter Superlegierungen, zeigt sich, dass die konventionelle Kühlschmierstoffzufuhr häufig nicht ausreicht, um die entstehende Wärme effektiv abzuführen [4]. Trotz hoher Versorgungsdrücke und Volumenströme ist die lokale Versorgung der hochbelasteten Werkzeugschneide mit Kühlschmierstoff häufig unzureichend. Die lokale Verteilung des Kühlschmierstoffs wird dabei wesentlich durch die Werkzeuggeometrie, die Spanbildung sowie die internen Strömungsverhältnisse bestimmt [5, 6].

Die Schneidenecke des Einlippentiefbohrwerkzeugs stellt einen besonders kritischen Prozessbereich dar. In diesem Bereich kumulieren hohe mechanische und tribologische Beanspruchungen bei gleichzeitig eingeschränkter Kühlschmierstoffversorgung, wodurch lokal sehr hohe Temperaturen entstehen können [2, 7]. Bild 1 zeigt die hochbelastete Zone im Bereich der Schneidenecke bei der Bearbeitung von Inconel 718. Erkennbar sind ausgeprägte Verschleißerscheinungen im Eckbereich, die sich insbesondere in Form von Schneidkantenversatz, Schneidkantenverrundung sowie lokal ausgeprägtem Freiflächen- und Kolkverschleiß manifestieren. Die Aufnahme erfolgte unter prozessnahen Schnittbedingungen ($v_c = 60$ m/min, $f = 0,03$ mm/U) sowie einem Kühlschmierstoffdruck von $p = 40$ bar. Zudem lassen sich thermisch beeinflusste Bereiche

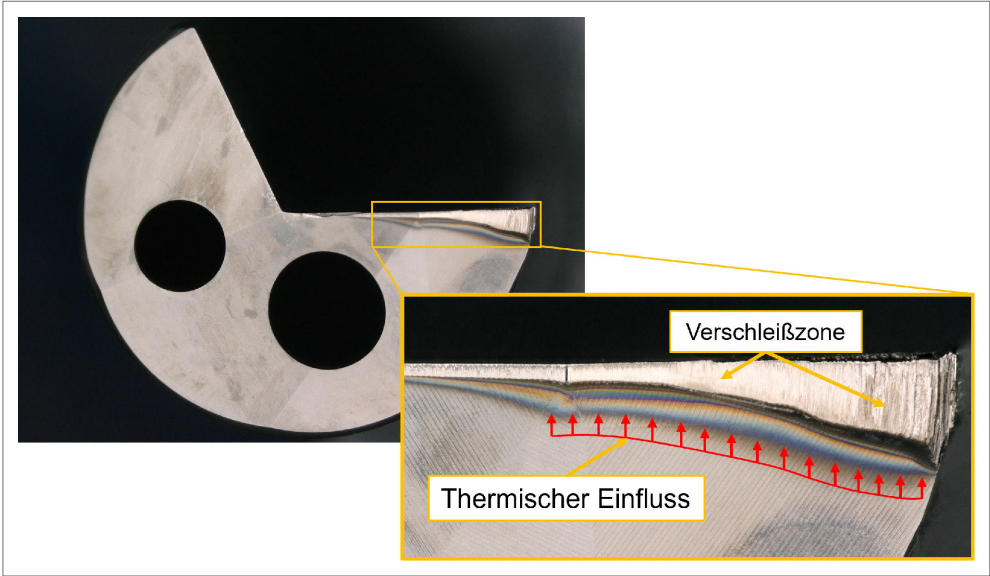


Bild 1 Verschleißzone - thermischer und mechanischer Einfluss.
Grafik: ISF

Tabelle 1 Randbedingungen der CFD-Simulation.

Randbedingungen Simulation		Größe	Einheit
Blasomill 10DM	Temperatur T	298,15	K
	Viskosität η	0,0085	Pa*s
	Dichte ρ	850	kg*m ⁻³
Kühlkanäle d_K Einlass	Durchmesser d_K Druck p	2,5; 1,96 40	mm bar
$d_{K1} = 2.5 \text{ mm}$	Massenstrom $\dot{m}_{dk1}$ Geschwindigkeit v_{dk1}	0,2936 72,41	kg*s ⁻¹ m/s
$d_{K2} = 1.96 \text{ mm}$	Massenstrom $\dot{m}_{dk2}$ Geschwindigkeit v_{dk2}	0,1731 70,28	kg*s ⁻¹ m/s
Auslass Interface 1: Öl - Werkzeug Interface 2: Werkzeug - Werkstück Interface 1 und 2 Turbulenzmodell	Umgebungsdruck p_u reibungsfrei Reibung Rotation w Typ	1 - 0,01 83,3 k-w-SST	bar - - rad*s ⁻¹ -

identifizieren, die auf lokal erhöhte Temperaturbelastungen während des Zerspanprozesses hindeuten. Diese thermischen Belastungsspitzen begünstigen Verschleißerscheinungen wie Kolk- und Freiflächenverschleiß und können darüber hinaus die Randzoneneigenschaften beeinflussen, beispielsweise durch Gefügeänderungen oder veränderte Eigenspannungszustände [2, 3, 8]. Trotz umfangreicher Untersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern, Werkzeugbeschichtungen und Kühlschmierstoffstrategien besteht weiterhin ein begrenztes Verständnis der lokalen Strömungs- und Temperaturverhältnisse im unmittelbaren Bereich der Schneidenecke [5, 6, 9]. Insbesondere hinsichtlich der experimentellen Validierung numerischer Strömungssimulationen bestehen weiterhin Forschungslücken. Hier besteht ein erhebliches Potenzial zur Reduktion thermischer Be-

lastungen sowie zur Steigerung der Prozessstabilität und Werkzeugstandzeit.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Validierung der Kühlschmierstoffströmung im Einlippentiefbohrprozess im Bereich des Bohrkopfes sowie die Identifikation unterversorgter Zonen. Durch die Kombination aus numerischer Strömungssimulation und experimenteller Strömungsvisualisierung wird untersucht, inwieweit die realen Strömungsverhältnisse im Bohrkopfbereich eines Referenzwerkzeugs quantitativ und qualitativ durch CFD-Modelle reproduzierbar abgebildet werden können. Auf dieser Basis wird die Aussagekraft des numerischen Modells bewertet und eine Grundlage für weiterführende geometrische Anpassungen des Bohrkopfes zur Verbesserung der lokalen Kühlschmierstoffversorgung geschaffen.

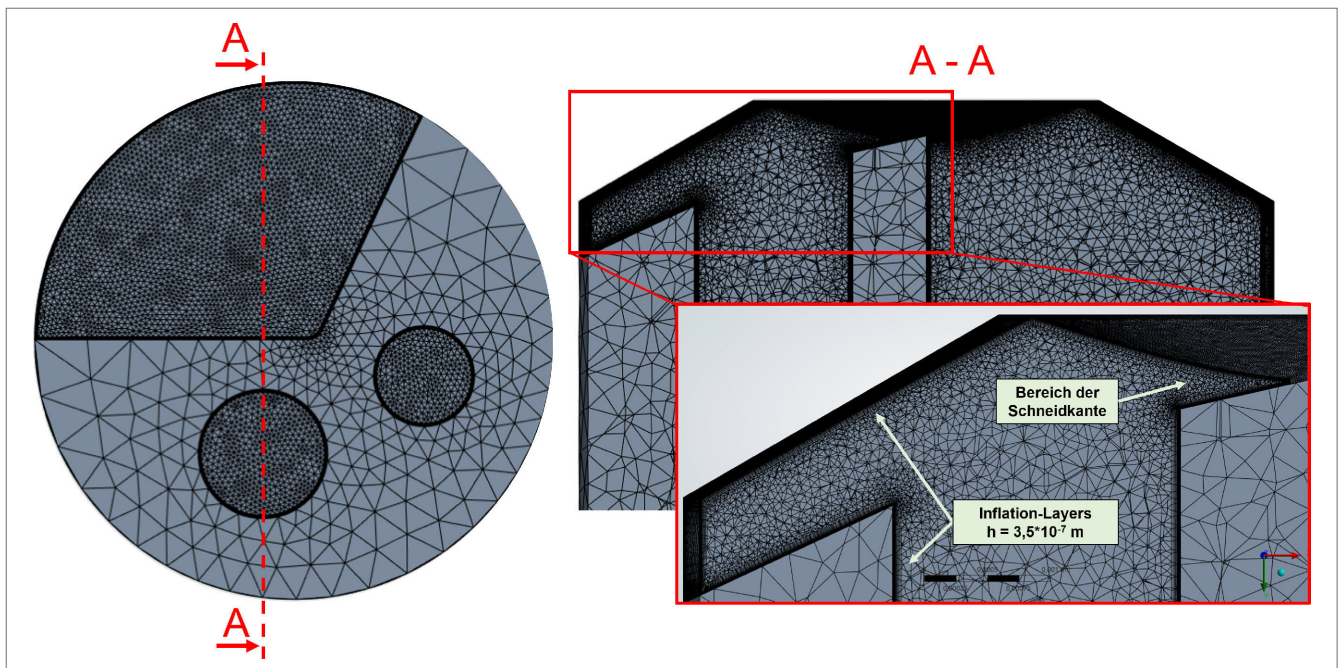


Bild 2 Rechengitter mit lokaler Verfeinerung im Bereich der Schneidenecke. Grafik: ISF

2 Konzept zur Analyse der Kühlschmierstoffführung

Zur Untersuchung der Kühlschmierstoffführung im Einlippentiefbohrprozess wird ein kombinierter Untersuchungsansatz eingesetzt, der numerische Strömungsberechnungen mit experimenteller Strömungsvisualisierung verknüpft. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der experimentellen Erfassung der Strömungsverhältnisse im Bohrkopf, während die numerische Simulation zur ergänzenden Beschreibung und Interpretation der Strömungsstrukturen dient. Hierzu werden dem Kühlschmierstoff strömungsfolgende Tracerpartikel zugesetzt, deren Bewegung mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera erfasst und anschließend bildbasiert ausgewertet wird. Zur Realisierung der optischen Zugänglichkeit wird ein speziell konzipierter Versuchsaufbau eingesetzt, bei dem die Bohrungswand durch blickdurchlässiges Acrylglas substituiert wird. Dadurch wird eine direkte optische Erfassung des Strömungsfeldes im Bereich des Bohrungsgrundes ermöglicht. Der Vergleich der experimentell bestimmten Partikeltrajektorien mit den numerisch berechneten Strömungsfeldern erlaubt eine qualitative und quantitative Bewertung der Modellgüte sowie die Identifikation möglicher Abweichungen zwischen Simulation und realem Strömungsverhalten. Auf dieser Grundlage wird die Aussagekraft der numerischen Strömungssimulation hinsichtlich der Abbildung der realen Strömungsverhältnisse bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur gezielten Optimierung der Kühlschmierstoffführung im Einlippentiefbohrprozess.

3 Numerische Analyse der Kühlschmierstoffströmung

Die numerische Analyse der Kühlschmierstoffströmung basiert auf einem dreidimensionalen CFD-Modell des Bohrkopfbereichs eines Einlippentiefbohrwerkzeugs. Der betrachtete Strömungsraum umfasst den inneren Kühlschmierstoffkanal, den Austritts-

bereich am Bohrkopf sowie den unmittelbaren Bereich der Schneide. Die Simulation wird als einphasige, stationäre Strömung berechnet, wobei der Kühlschmierstoff als inkompressible, newtonsche Flüssigkeit modelliert wird. Thermische Effekte werden vernachlässigt, da der Fokus auf der Analyse der Fluidversorgung und der Anströmung der Schneidzone liegt. Diese Modellannahme stellt eine bewusste Vereinfachung dar und ist für die Untersuchung der Strömungsverteilung im Bohrkopfbereich ausreichend, da die maßgeblichen Strömungsmechanismen primär durch die Geometrie und die Randbedingungen bestimmt werden. Die Randbedingungen werden prozessnah definiert, um eine möglichst realitätsgetreue Abbildung industrieller Einsatzbedingungen zu gewährleisten. Der Kühlschmierstoffeintritt wird als Massenstromrandbedingung definiert, wobei der vorgegebene Massenstrom den experimentell eingestellten Förderbedingungen entspricht. Am Austritt des Strömungsraums wird eine druckbasierte Auslassrandbedingung angesetzt. Die Werkzeugoberflächen werden als starre Wände mit Haftbedingung (No-Slip) modelliert. Die Rotation des Werkzeugs wird über eine rotierende Wandrandbedingung berücksichtigt. Eine Übersicht der verwendeten Randbedingungen ist in der **Tabelle** dargestellt.

Zur präzisen Erfassung der Strömungsvorgänge im Bereich der Schneide, insbesondere der Schneidenecke wird eine hybride Vernetzungsstrategie angewendet. Der globale Strömungsraum wird mit einem überwiegend tetraedrischen Volumennetz diskretisiert, während in wandnahen Bereichen prismatische Grenzschichten eingesetzt werden. Das verwendete Rechengitter umfasst circa 18 Millionen Zellen und wurde gezielt im Bereich der Schneidkante und der Schneidenecke lokal verfeinert, um die dort auftretenden hohen Geschwindigkeitsgradienten sowie die Umlenkung der Strömung zuverlässig abzubilden.

Die globale Elementgröße beträgt $1 \cdot 10^{-4}$ m, wobei in geometrisch komplexen Bereichen eine Verfeinerung unter Berücksichtigung von Krümmungseffekten erfolgt. Die minimale Elementgröße liegt im Bereich von $1 \cdot 10^{-6}$ m. In wandnahen Bereichen werden prismatische Grenzschichtzellen eingesetzt, wobei die

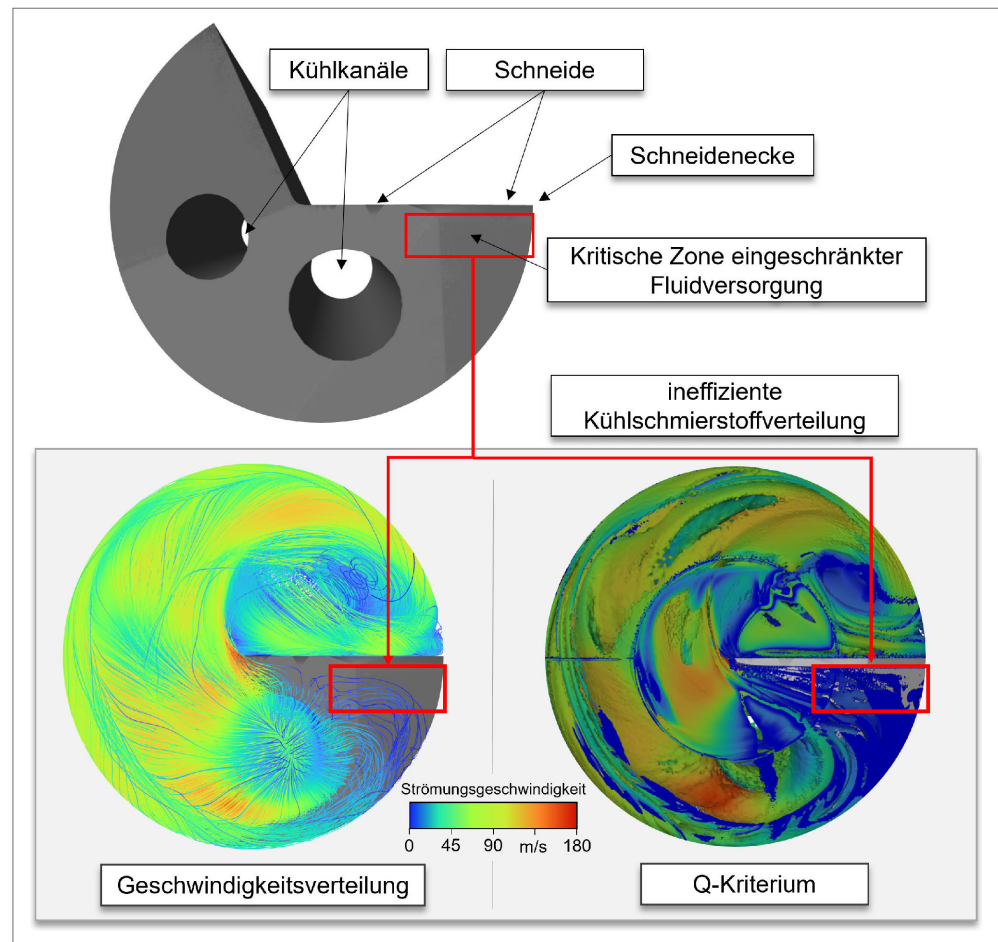


Bild 3 Numerisch ermittelte Geschwindigkeitskonturen und Q-Isoflächen mit identifizierter kritischer Versorgungszone. Grafik: ISF

erste Schichthöhe $h = 3,5 \cdot 10^{-7}$ m beträgt. Es werden bis zu 20 Prismenschichten mit einer Wachstumsrate von 1,2 verwendet, um die wandnahen Strömungsgradienten adäquat aufzulösen. Die Netzqualität wurde anhand der orthogonalen Qualität bewertet. Der durchschnittliche Wert beträgt 0,81 und liegt damit im für CFD-Berechnungen üblichen guten Bereich. Lokal auftretende Zellen mit geringerer Qualität beschränken sich auf geometrisch komplexe Randbereiche und haben keinen signifikanten Einfluss auf die Stabilität und die Ergebnisse der Simulation. Die Auslegung der Grenzschichtauflösung erfolgt unter Berücksichtigung geeigneter y^+ -Werte, sodass die Anforderungen des verwendeten Turbulenzmodells erfüllt werden. Die Netzaufklärung wurde iterativ erhöht, bis eine numerisch stabile Lösung sowie eine konsistente Abbildung der relevanten Strömungsstrukturen erreicht werden konnte. Eine klassische Netzunabhängigkeitsstudie wurde nicht durchgeführt, jedoch zeigte sich bei weiterer Netzverfeinerung keine signifikante Änderung der maßgeblichen Strömungsgrößen. Aufgrund der gezielten lokalen Verfeinerung in den strömungsrelevanten Bereichen sowie der guten Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Strömungsstrukturen wird von einer hinreichenden Auflösung der maßgeblichen Strömungsphänomene ausgegangen.

Die numerischen Strömungsberechnungen wurden mit Ansys Fluent unter Verwendung des Shear-Stress-Transport-(SST)-Turbulenzmodells durchgeführt. Die Druck-Geschwindigkeits-Kopplung erfolgt mittels eines gekoppelten Lösungsverfahrens (Coupled Scheme). Für die räumliche Diskretisierung wird ein Least-Squares Cell-Based Verfahren zur Gradientenberechnung verwen-

det. Der Druck wird mit dem PRESTO!-Verfahren diskretisiert, während für die Impuls- sowie Turbulenzgleichungen (turbulente kinetische Energie k und spezifische Dissipationsrate ω) ein zweiter Ordnung genaues Upwind-Schema verwendet wird. Die Konvergenz der Lösung wird anhand der Residuen überwacht. Für Kontinuität, die Geschwindigkeitskomponenten sowie die spezifische Dissipationsrate ω wird ein Konvergenzkriterium von 10^{-5} angesetzt, während für die turbulente kinetische Energie ein Kriterium von 10^{-4} verwendet wird.

Die Berechnung wurde über 1000 Iterationen durchgeführt. Die Konvergenz der Lösung wurde anhand der definierten Residuenkriterien sowie der Stabilisierung relevanter Strömungsgrößen im Bohrkopfbereich bewertet. Die experimentelle Validierung der Strömungsstrukturen ermöglicht eine ergänzende Bewertung der Aussagekraft des numerischen Modells.

3.1 Strömungsstruktur und Geschwindigkeitsverteilung im Bohrkopfbereich

Die Simulationsergebnisse zeigen eine ausgeprägt inhomogene Verteilung der Kühlschmierstoffströmung im Bohrkopfbereich. Im unmittelbaren Austrittsbereich der Kühlkanäle treten hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf, die entlang der dominanten Strömungspfade in Richtung der Schneidzone kontinuierlich abnehmen. Die Strömungslinien verdeutlichen, dass der Kühlschmierstoffstrom bevorzugt entlang geometrisch begünstigter Bereiche geführt wird, während andere Zonen lediglich indirekt oder abgeschwächt angeströmt werden. Im Bereich der Schneide

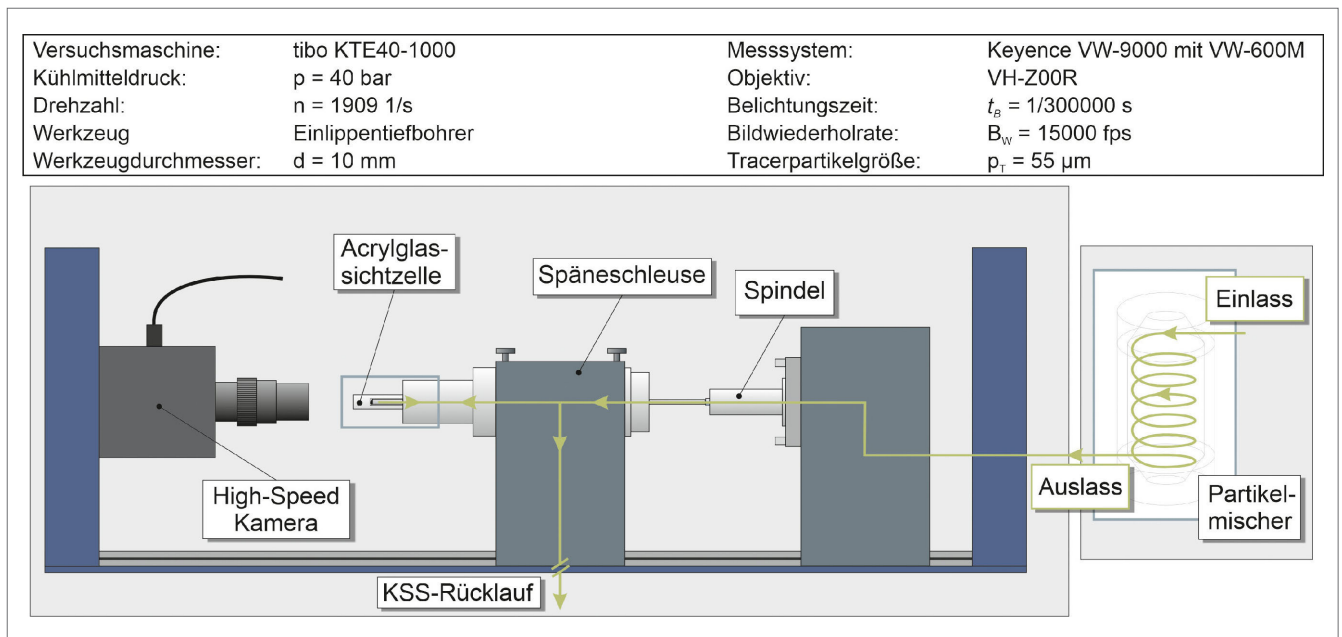


Bild 4 Experimenteller Versuchsaufbau zur Validierung der numerisch ermittelten Strömungsstrukturen. Grafik: ISF

kommt es infolge der Werkzeuggeometrie zu einer deutlichen Umlenkung der Strömung, wodurch einzelne Schneidenabschnitte teilweise abgeschattet werden. Insbesondere im Bereich der Schneidenecke ist eine lokal stark reduzierte Anströmgeschwindigkeit erkennbar. Die dort auftretenden Geschwindigkeitsniveaus liegen signifikant unterhalb der Hauptströmungsbereiche, was auf eine eingeschränkte direkte Fluidzufuhr hindeutet. Zur weiterführenden Charakterisierung der Strömungsstruktur wird das Q -Kriterium herangezogen, das rotationsdominierte Bereiche ($Q > 0$) identifiziert und wie folgt definiert ist:

$$Q = \frac{1}{2} (|\Omega|^2 - |S|^2)$$

Dabei beschreibt Ω die Rotationsrate (antisymmetrischer Anteil des Geschwindigkeitsgradienten) und S die Deformationsrate (symmetrischer Anteil). Positive Q -Werte kennzeichnen rotationsdominierte Bereiche und damit kohärente Wirbelstrukturen. In der vorliegenden Auswertung wurden in ANSYS Isoflächen positiver Q -Werte erzeugt und mit dem Betrag der lokalen Strömungsgeschwindigkeit eingefärbt. Diese Darstellung ermöglicht eine simultane Bewertung von Wirbelstruktur und Geschwindigkeitsniveau. Die Q -Isoflächen zeigen im Bohrkopfbereich ausgeprägte, geometrie- und rotationsinduzierte Wirbelstrukturen. Im Umfeld der Schneidenecke sind diese Strukturen überwiegend blau eingefärbt, was auf ein geringes lokales translatorisches Geschwindigkeitsniveau hinweist. Es handelt sich somit nicht um einen strömungsfreien Bereich, sondern um rotationsdominierte, impulsschwache Strömungsanteile. Der Hauptströmungsimpuls wird in diesem Bereich nicht direkt eingetragen, sondern teilweise in lokale Wirbelbewegungen überführt, wodurch die gerichtete Anströmung zusätzlich abgeschwächt wird. Die detaillierte Analyse der lokalen Strömungsgrößen bestätigt, dass die Schneidenecke einen besonders kritisch versorgten Bereich darstellt. Im Vergleich zur übrigen Schneide werden dort signifikant geringere Strömungsgeschwindigkeiten sowie eine reduzierte direkte Anströmung festgestellt. Die Fluidversorgung erfolgt überwiegend über sekundäre, wirbelgeprägte Strömungsanteile

mit begrenztem Impulsniveau. Dieses Verhalten lässt sich auf die Kombination aus geometrischer Abschattung, dominanter Hauptströmungsrichtung und rotationsbedingten Strömungseffekten zurückführen. Eine Erhöhung des Versorgungsdrucks führt grundsätzlich zu einer Zunahme des globalen Geschwindigkeitsniveaus im Strömungsfeld. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch, dass die lokal reduzierte Versorgung der Schneidenecke nicht ausschließlich auf ein unzureichendes Druckniveau zurückzuführen ist. Vielmehr wird die Strömungsverteilung im Bohrkopfbereich maßgeblich durch die Werkzeuggeometrie und die daraus resultierende Umlenkung des Kühlschmierstoffs bestimmt. Eine Erhöhung des Kühlschmierstoffdrucks kann die Fluidzufuhr zwar insgesamt verbessern, führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer ausreichenden und gezielten Anströmung der Schneidenecke. Die Schneidenecke wird damit eindeutig als strömungstechnisch kritische Versorgungszone identifiziert. Vor dem Hintergrund der dort auftretenden hohen mechanischen und thermischen Belastungen ergibt sich ein deutliches Optimierungspotenzial hinsichtlich einer gezielten Anpassung der Kühlschmierstoffführung im Bohrkopfbereich.

4 Experimenteller Versuchsaufbau

4.1 Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen zur Strömungsvisualisierung wurden auf einer industriellen Tiefbohrmaschine des Typs „tibo KTE40-1000“ durchgeführt (vgl. **Bild 4**). Ziel der Versuche ist es, mithilfe geeigneter Tracerpartikel die Kühlschmierstoffströmung im Bereich des Bohrkopfes sichtbar zu machen und die lokalen Strömungsstrukturen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erfassen sowie eine experimentelle Validierung der numerisch bestimmten Strömungsverhältnisse zu ermöglichen.

Hierzu wurden dem Kühlschmierstoff strömungsfolgende Tracerpartikel zugesetzt. Die verwendeten Partikel bestehen aus Polyamid und weisen eine mittlere Partikelgröße von $p_T = 55 \text{ }\mu\text{m}$ und einer Dichte von etwa $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ auf. Aufgrund ihrer geringen Größe und Dichte folgen die Partikel dem Strömungsfeld

mit hinreichender Genauigkeit und ermöglichen somit eine realitätsnahe Abbildung der lokalen Strömungsverhältnisse.

Zur Realisierung der optischen Zugänglichkeit wurde eine speziell angepasste Vorrichtung für die Spänschleuse entwickelt und gefertigt. Diese Adaptierung ermöglicht es, den realen Bohrungsgrund durch eine transparente Substitution aus Acrylglas realitätsnah abzubilden. Auf diese Weise bleibt die geometrische Eingriffssituation im Bereich des Bohrkopfes erhalten, während gleichzeitig eine direkte visuelle Erfassung der Strömungsvorgänge ermöglicht wird. Die gewählte Ausführung stellt sicher, dass die strömungsmechanischen Randbedingungen möglichst nahe an den realen Prozessbedingungen liegen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Zur Aufnahme der Strömungsvorgänge wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera des Typs „VW-9000“ von Keyence frontal auf den Bohrungsgrund ausgerichtet. Diese Positionierung erlaubt eine direkte Sicht auf den rotierenden Bohrer sowie den unmittelbaren Bereich der Schneidzone. Die im Kühlschmierstoff suspendierten Tracerpartikel werden dadurch in der Beobachtungsebene erfasst und können über aufeinanderfolgende Einzelbilder (Frames) hinweg verfolgt werden. Die gewählte Konfiguration ermöglicht insbesondere im Bereich der Schneidenecke eine detaillierte Analyse der Strömungsstruktur und Partikeltrajektorien, wodurch eine experimentelle Bewertung der lokal identifizierten, kritisch versorgten Zone erfolgen kann.

4.2 Geschwindigkeitsermittlung

Zur quantitativen Bestimmung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Kühlschmierstoffströmung ausgewertet. Hierzu wurden die Videoaufnahmen in einzelne Frames zerlegt, die mit einer konstanten Bildwiederholrate von $BW = 15000$ fps aufgenommen wurden. Innerhalb der Bildsequenzen wurde jeweils ein repräsentativer Tracerpartikel identifiziert und über aufeinanderfolgende Frames hinweg verfolgt. Die Auswahl der Tracerpartikel erfolgte gezielt in Bereichen mit klar identifizierbaren und reproduzierbaren Strömungspfaden, um eine vergleichbare und konsistente Auswertung der Partikelbewegungen zu gewährleisten. Die Verschiebung des Partikels zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Frames wurde in Pixeln bestimmt. Mithilfe einer zuvor durchgeführten geometrischen Kalibrierung des Bildes konnte die Pixelverschiebung in eine reale Wegstrecke umgerechnet werden. Aus der bekannten Zeitdifferenz zwischen zwei Frames, die sich aus der Bildwiederholrate der Hochgeschwindigkeitskamera ergibt, wurde anschließend die lokale Partikelgeschwindigkeit berechnet. Die Geschwindigkeit v_{Partikel} ergibt sich dabei aus dem Verhältnis der zurückgelegten Strecke Δs zur Zeitdifferenz Δt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Frames:

$$v_{\text{Partikel}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Durch die Auswertung mehrerer aufeinanderfolgender Bildpaare sowie unterschiedlicher Partikeltrajektorien konnte eine annäherungsweise Abschätzung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit vorgenommen werden. Die ermittelten Geschwindigkeiten weisen dabei eine gewisse Streuung auf, die sich aus der begrenzten räumlichen Auflösung, der Projektion der dreidimensionalen Strömung auf die Beobachtungsebene sowie aus der Auswahl der Tracerpartikel ergibt. Die ermittelten Geschwindigkeiten sind als

näherungsweise Bestimmung des lokalen Geschwindigkeitsbetrags zu interpretieren, da lediglich die in der Beobachtungsebene projizierten Partikelbewegungen ausgewertet werden. Die reale Strömung im Bohrkopfbereich ist jedoch dreidimensional, sodass Geschwindigkeitsanteile senkrecht zur Beobachtungsebene nicht erfasst werden. Dadurch ergibt sich eine systematische Unterschätzung der tatsächlichen Partikelgeschwindigkeit. Insbesondere in Bereichen mit ausgeprägten Umlenkungen und rotationsdominierten Strömungsstrukturen, wie im Umfeld der Schneidenecke, ist davon auszugehen, dass zusätzliche Geschwindigkeitskomponenten in Tiefenrichtung auftreten, die in der Auswertung nicht berücksichtigt werden können. Die experimentell bestimmten Geschwindigkeiten stellen somit eine Projektion der realen dreidimensionalen Strömung dar und sind entsprechend als untere Abschätzung des tatsächlichen Geschwindigkeitsniveaus zu interpretieren. Dennoch ermöglicht die Methode eine robuste Bewertung der relativen Geschwindigkeitsverteilung sowie der räumlichen Lage strömungstechnisch kritischer Bereiche.

5 Ergebnisse und Auswertung der Strömungsfelder

Bild 4 zeigt den direkten Vergleich zwischen den numerisch berechneten Strömungsstrukturen und den experimentell erfassten Partikeltrajektorien im Bereich der Schneidzone. Während die CFD-Ergebnisse die Geschwindigkeitsverteilung sowie rotationsdominierte Strukturen darstellen, visualisieren die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die reale Bewegung der Tracerpartikel im experimentellen Versuchsaufbau. Zur direkten visuellen Gegenüberstellung wurden die numerischen Strömungsfelder mit den experimentellen Aufnahmen überlagert. Die Overlay-Darstellung zeigt eine hohe räumliche Übereinstimmung der dominanten Strömungspfade sowie der lokal strömungsschwachen Bereiche. Insbesondere die Lage der reduzierten Anströmung im Bereich der Schneidenecke stimmt zwischen Simulation und Experiment sehr gut überein. In beiden Darstellungen wird deutlich, dass der Kühlschmierstoff nach dem Austritt aus dem Kühlkanal bevorzugt entlang geometrisch begünstigter Bereiche geführt wird und keine homogene Verteilung über die gesamte Schneidzone erfolgt. Die experimentell beobachteten Partikeltrajektorien bestätigen die Umlenkung der Strömung im Bereich der Schneide sowie die Ausbildung sekundärer Strömungsanteile. Im Bereich der Schneidenecke zeigen sowohl Simulation als auch Experiment eine reduzierte gerichtete Anströmung. Die numerische Auswertung weist dort signifikant geringere Geschwindigkeitsniveaus aus, während die experimentell bestimmten Partikelbewegungen geringere translatorische Geschwindigkeiten und eine erhöhte lokale Verweilzeit erkennen lassen. Damit wird die Schneidenecke sowohl numerisch als auch experimentell als strömungstechnisch kritisch versorgter Bereich identifiziert. Die in **Bild 5** dargestellten Geschwindigkeitswerte bestätigen diese qualitative Beobachtung quantitativ. Sowohl Simulation als auch Experiment zeigen eine signifikante Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Schneidenecke im Vergleich zum Hauptströmungsbereich. Die experimentell ermittelten Geschwindigkeiten liegen dabei tendenziell geringfügig unterhalb der numerischen Werte. Zur quantitativen Absicherung der Messergebnisse wurden insgesamt zehn Tracerpartikel entlang vergleichbarer Strömungspfade ausgewertet. Die ermittelten Geschwindigkeiten wurden gemittelt, wobei die Streuung der Messwerte durch die Standardabweichung

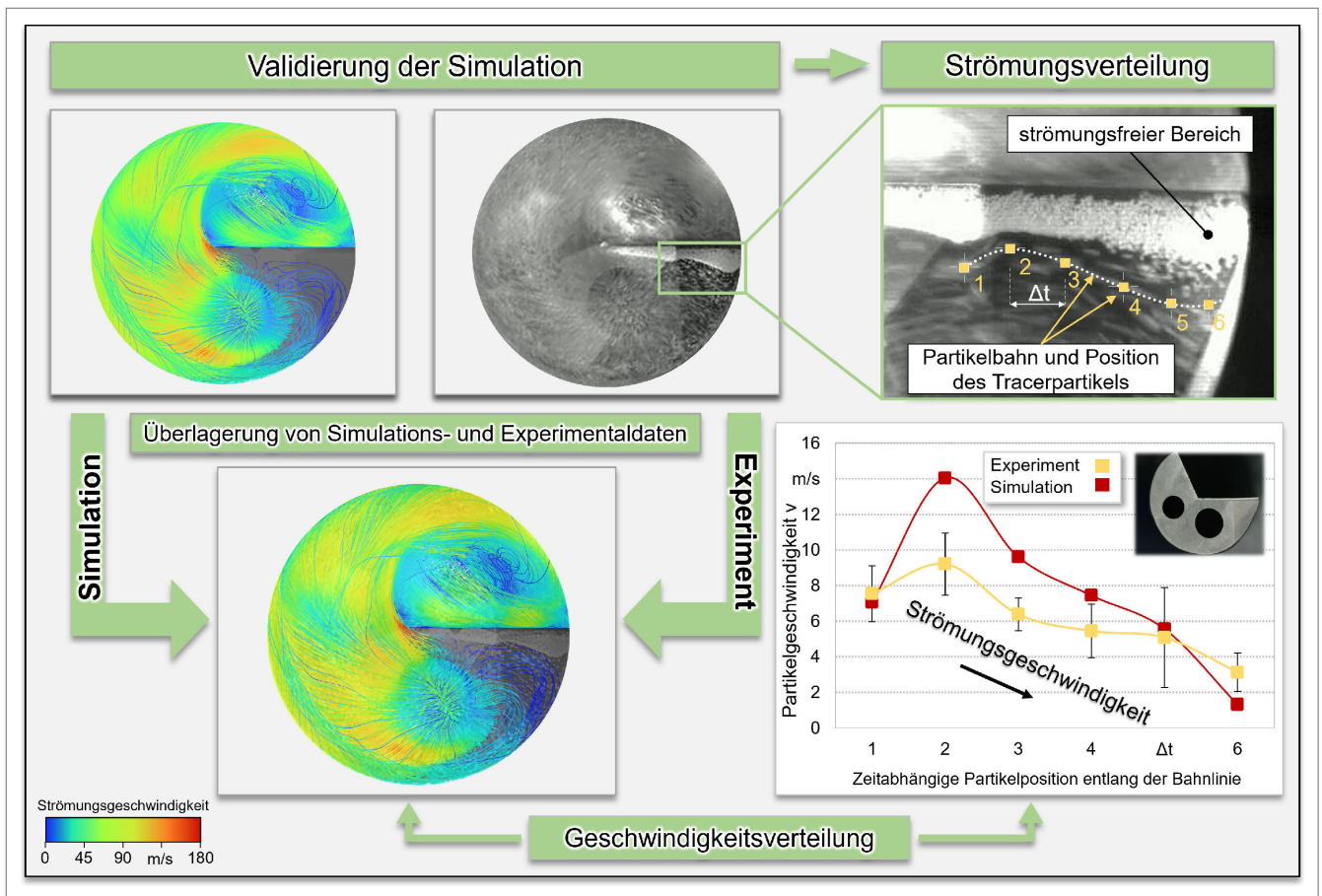


Bild 5 Qualitativer und quantitativer Vergleich der Strömungsstruktur im Bereich der Schneidenecke (CFD und Partikeltracking). Grafik: ISF

chung beschrieben wird. Die beobachteten Abweichungen liegen im erwartbaren Bereich und bestätigen die Reproduzierbarkeit der experimentellen Ergebnisse. Unabhängig davon ist zu berücksichtigen, dass die Geschwindigkeitsbestimmung auf der zweidimensionalen Projektion der dreidimensionalen Strömung basiert, wodurch Geschwindigkeitsanteile in Tiefenrichtung systematisch nicht erfasst werden. Entscheidend ist, dass sowohl die relativen Geschwindigkeitsverhältnisse als auch die räumliche Lokalisierung der kritisch versorgten Zone konsistent wiedergegeben werden. Die gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zeigt, dass das numerische Modell die maßgeblichen Strömungsmechanismen im Bohrkopfbereich realitätsnah abbildet. Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment belegt die Aussagekraft des numerischen Modells unter prozessnahen Bedingungen und stellt eine belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen sowie zukünftige geometrische Anpassungen des Bohrkopfes zur gezielten Optimierung der Kühlschmierstoffführung dar.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die experimentelle Validierung der numerisch berechneten Kühlschmierstoffströmung im Einlippentiefbohrprozess mit besonderem Fokus auf den Bereich der Schneidenecke. Hierzu wurde eine dreidimensionale CFD-Simulation mit einer experimentellen Strömungsvisualisierung auf Basis von Tracerpartikeln kombiniert, um die Aussagekraft

des numerischen Modells unter prozessnahen Bedingungen zu bewerten. Die Gegenüberstellung von Simulation und Experiment zeigt eine sehr gute qualitative Übereinstimmung der dominanten Strömungspfade sowie der lokal strömungsschwachen Bereiche im Bohrkopf. Insbesondere die Lage der reduzierten Anströmung im Bereich der Schneidenecke wird durch beide Methoden konsistent abgebildet. Auch die quantitative Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten bestätigt die lokal reduzierte Fluidversorgung in diesem Bereich. Geringfügige Abweichungen zwischen Simulation und Experiment lassen sich auf die zweidimensionale Projektion der dreidimensionalen Strömung bei der experimentellen Geschwindigkeitsbestimmung sowie auf prozessbedingte Einflüsse wie Druckverluste innerhalb des Werkzeugs zurückführen. Diese beeinflussen das absolute Geschwindigkeitsniveau, ändern jedoch nicht die grundlegende Strömungscharakteristik. Die experimentellen Untersuchungen belegen die Validität der CFD-Simulation und zeigen, dass diese als belastbare Grundlage für die Analyse und gezielte Optimierung der Kühlschmierstoffführung im Einlippentiefbohrprozess herangezogen werden kann. Auf Basis der identifizierten kritisch versorgten Zone im Bereich der Schneidenecke ergeben sich konkrete Ansatzpunkte für zukünftige geometrische Anpassungen des Bohrkopfes. Insbesondere eine gezielte Umpositionierung des Kühlschmierstoffaustritts sowie die Integration strömungsführender Strukturen erscheinen geeignet, die lokale Anströmung der hochbelasteten Zone zu verbessern. Diese Arbeit leistet damit einen Beitrag zur experimentellen Validierung numerischer Strömungssimulationen im Ein-

lippentiefbohren und schafft eine belastbare Grundlage für deren Bewertung und Weiterentwicklung unter prozessnahen Bedingungen.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 405605200.

Literatur

- [1] D. Biermann, F. Bleicher, U. Heisel, F. Klocke, H.-C. Möhring, A. Shih: Deep Hole Drilling; CIRP Annals - Manufacturing Technology, 67 (2018)
- [2] J. Nickel, N. Baak, F. Walther, D. Biermann: Investigation of the thermo-mechanical loads on the bore surface during single-lip deep hole drilling of steel components
- [3] E. Brinksmeier, D. Meyer, A.G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann: Metalworking fluids - Mechanisms and performance, CIRP Annals Volume 64, Issue 2, 2015, Seite 605-628
- [4] E.O. Ezugwu: Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) Seite 1353-1367
- [5] K.S. Woon, G.L. Tnay, M. Rahman, S. Wan, S.H. Yeo: A computational fluid dynamics (CFD) model for effective coolant application in deep hole gundrilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 113, Februar 2017, Seite 10-18
- [6] A. Tismer, C. Menze, P. Straub, J. Stegmann, S. Riedelbauch, H.-C. Möhring, S. Kabelac: Simulation-based evaluation of the 3D fluid dynamics of a coolant lubricant in the narrow-closed cutting gap during circular sawing, 19th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations
- [7] A. Kumar, R. Bhardwaj, S. S. Joshi: Thermal analysis of drilling in titanium under flood and cryogenic cooling using coupled CFD and FEM, Journal of Manufacturing Processes Volume 81, September 2022, Seite 605-623
- [8] W. Wei, J. A. Robles-Linares, Z. Liao, Z. Wang, G. G. Luna, J. Billingham, D. Axinte: On modelling coolant penetration into the microchannels at the tool-workpiece interface, Journal of Manufacturing Processes Volume 84, Dezember 2022, S. 43-54
- [9] N. Gerhards, T. Göttlich, T. Helmig, H. Liua, M. Meurera, R. Kneerb, T. Bergsa: Numerical investigation of cutting fluid cooling on machining-induced thermal stresses, 19th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Procedia CIRP 117 (2023) Seite 116-121
- [10] A. Baumann, E. Oezkaya, D. Biermann, P. Eberhard: Geometry Modifications of Single-Lip Drills to Improve Cutting Fluid Flow, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2022) 121:1689-1695

André Bekston, M.Sc. 
andre.bekston@tu-dortmund.de

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann 
Institut für Spanende Fertigung (ISF)
Baroper Str. 303, 44227 Dortmund
www.isf.mb.tu-dortmund.de

LIZENZ



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