



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Thomas Heep

**Funktionsintegriertes Drehwerkzeug
zur Effizienzsteigerung kryogener
Kohlendioxidkühlung**

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW
TU DARMSTADT

**Funktionsintegriertes Drehwerkzeug zur Effizienzsteigerung
kryogener Kohlendioxidkühlung**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Thomas Willi Heep, M. Sc.

aus Limburg a. d. Lahn

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Tag der Einreichung: 14.01.2019

Tag der mündlichen Prüfung: 14.05.2019

Darmstadt 2019

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Thomas Heep

**Funktionsintegriertes Drehwerkzeug zur Effizienz-
steigerung kryogener Kohlendioxidkühlung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6919-8

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Das ökologische und gesundheitliche Gefährdungspotenzial durch den Einsatz von Kühlschmierstoffen ist bis heute ein allgegenwärtiges Problem in der Fertigungstechnik. Alternativ kann zur nachhaltigen und zugleich produktiven Zerspanung von verschiedenen Werkstoffen bspw. die kryogene CO₂-Schneekühlung oder auch eine Kaltluftferzeugungseinheit verwendet werden. Für die zielgerichtete und prozesssichere Applikation von CO₂-Schnee eignen sich insbesondere Zweistoffdüsenkonzepte aus dem reinigungstechnischen Bereich. Jedoch ist die kompakte Integration dieser geometrisch komplex gestalteten Zweistoffdüsen sowie die Umsetzung von kontinuierlich verlaufenden Kanalstrukturen in Zerspanungswerkzeugen als problematisch zu erachten. Gründe hierfür sind u. a. die bekannten Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren.

In der vorliegenden Arbeit wird erstmalig durch den Einsatz eines additiven Fertigungsverfahrens die Funktionsintegration von unitär ausgeführten Zweistoffdüsenkonzepten sowie von unitär gefertigten Ranque-Hilsch-Rohren in modular gestaltete Klemmhalter-systeme umgesetzt. Experimentelle Untersuchungen zum Freistrahilverhalten und zur Strahlstoßkraft der additiv gefertigten Zweistoffdüsenkonzepte zeigen, dass ein fokussiertes Freistrahilverhalten für einen effizienten Einsatz kryogener CO₂-Schneekühlung mittels einer konvergent geformten Düsengeometrie und ein vernachlässigbarer Einfluss hinsichtlich einer Verbesserung des Spanbruchverhaltens durch den kryogenen Freistrahler zu erwarten ist. Untersuchungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von unitär ausgeführten Ranque-Hilsch-Rohren zeigen das Potenzial, dass auch ohne eine spanende Nachbearbeitung der inneren Funktionsflächen von additiv gefertigten Ranque-Hilsch-Rohren die Kaltluftseparation aus einem komprimierten Luftmassenstrom möglich ist. In diesem Kontext kann insbesondere durch die Wahl einer spiralförmigen Wirbelrohrgeometrie der Kompaktheitsgrad von additiv gefertigten Sonderwerkzeuglösungen weiter gesteigert werden. Zerspanungstechnologische Untersuchungen beim Drehen von Vermicularguss GJV-450 unter CO₂-Schneekühlung zeigen abschließend, dass hartmetallbasierte Schneidstoffsysteme mit verringertem Co-Gehalt in Kombination mit einer CVD-Beschichtung zu einer signifikanten Reduzierung der Verschleißerscheinungen führen.

Darmstadt, im August 2019

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Zerspanungstechnologie am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Bei der Erstellung dieser Arbeit durfte ich Unterstützung von Personen erfahren, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Diesen möchte ich hiermit meinen Dank ausdrücken.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Fachgebiets, Herrn Professor Dr.-Ing. Eberhard Abele, für die Möglichkeit, diese Arbeit durchführen zu können und die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung. Weiterhin danke ich dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und das fachliche Interesse an meiner Arbeit.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Dr. Christoph Czettel und das Unternehmen Ceratizit Austria GmbH, ohne deren fachliche und materielle Unterstützung wesentliche Abschnitte dieser Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wären.

Besondere Freude bereitete mir die Zusammenarbeit mit zahlreichen Studenten, die mich an verschiedenen Stellen bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Christian Bickert, M. Sc., Herrn Philipp Feßler, M. Sc. und Herrn Kiril Kirilov, M. Eng. Durch Eure Kreativität und unermüdliche Einsatzbereitschaft habt Ihr wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin möchte ich ebenso dem Werkstatt-Team sowie dem Support des PTW für die tolle Zusammenarbeit und die Unterstützung in den letzten Jahren danken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am PTW, die mich im Laufe meiner Institutszeit begleitet haben, möchte ich ebenfalls danken. Ihr habt mir mit Eurer unkomplizierten Art sowohl bei dienstlichen als auch bei unzähligen privaten Aktivitäten eine unvergessliche Zeit bereitet, die ich immer in positiver Erinnerung behalten werde. Allen voran danke ich Herrn Dr.-Ing. Sebastian Güth und Herrn Dr.-Ing. Christian Bölling für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die entstandene Freundschaft sowie Herrn Michael Kniepkamp, M. Sc. und Herrn Timo Scherer, M. Sc. für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung additiv gefertigter Werkzeuggrundkörper.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Ulrike und Jakob Heep, die mich auf meinem Ausbildungsweg immer bestärkt und mir stets den Rücken freigehalten haben. Vielen Dank, dass ich von Euch einen so großen Rückhalt erfahren durfte.

Arfurt, im August 2019

Thomas Heep

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungen und Formelzeichen.....	XI
1 Einleitung	1
2 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	4
3 Grundlagen und Stand der Technik	6
3.1 Drehbearbeitung von Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV)	6
3.1.1 Grundlagen zum Drehen	6
3.1.2 GJV im Kontext der grauen Gusseisenwerkstoffe	8
3.1.3 Eigenschaften beschichteter Hartmetall-Schneidstoffe.....	14
3.2 Schneidteilkühlung mittels kryogener CO ₂ -Schneekühlung.....	19
3.2.1 CO ₂ -Schneestrahlen – Grundlagen und Zufuhrsysteme.....	19
3.2.2 Methoden zur Bewertung kryogener Freistrahlen.....	25
3.2.3 Erkenntnisse zur CO ₂ -Schneekühlung beim Drehen von GJV	27
3.3 Additive Fertigung funktionsintegrierter Werkzeugkonzepte	29
3.3.1 Selektives Laserschmelzen von metallischen Werkzeuggrundkörpern ---	31
3.3.2 Funktionsintegration mittels selektiven Laserschmelzen	36
3.3.3 Ökonomische Aspekte der Additiven Fertigung	38
3.4 Zusammenfassung zum Stand der Technik	42
4 Experimentelle Versuchstechnik	45
4.1 Werkzeugmaschinen.....	45
4.1.1 Selektive Laserschmelzanlage EOS M 290	45
4.1.2 Drehzentrum DMG CTX beta 800	46
4.2 Gusseisen mit Vermiculargraphit GJV-450	46
4.3 Eingesetzte Hartmetall-Schneidstoffe.....	48
5 Klemmhalterentwicklung im Kontext additiver Fertigung.....	51
5.1 Neuartiges Klemmhalterkonzept mit erhöhter Funktionsintegration.....	51
5.2 Spannungszustand im Klemmhalterschaft beim Drehen von GJV	56
5.3 Werkstoffeigenschaften von 316L unter statischer Beanspruchung.....	58

5.4 Werkstoffeigenschaften von 316L unter dynamischer Beanspruchung -----	60
6 Charakterisierung funktionsintegrierter Merkmale -----	65
6.1 Zweistoffdüsenkonzept – Funktionsweise und Betriebsverhalten -----	66
6.2 Freistrahlundersuchung mit der Methode der Schattenfotografie -----	70
6.2.1 Versuchsanordnung und Vorgehensweise -----	71
6.2.2 Ergebnisdarstellung -----	74
6.3 Quantifizierung der Strahlstoßkraft kryogener CO ₂ -Kühlung -----	77
6.3.1 Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung -----	77
6.3.2 Ergebnisdarstellung -----	78
6.4 Kaltluftherzeugung mittels additiv gefertigtem Ranque-Hilsch-Rohr -----	81
6.4.1 Versuchsanordnung und Durchführung -----	83
6.4.2 Ergebnisdarstellung -----	84
7 Untersuchung der Abkühlrate kryogener CO ₂ -Kühlung -----	89
7.1 Versuchsanordnung mit thermodynamischer Charakterisierung -----	89
7.2 Einfluss von Düsenabstand und -beladung auf die Kühlwirkung -----	93
7.3 Zwischenfazit -----	95
8 Rapid Tooling – Funktionsintegrierter Klemmhalter -----	97
8.1 Additive Fertigung funktionsintegrierter Klemmhaltervarianten -----	97
8.2 Nachbearbeitungsaufwendungen am DCLNL-Klemmhalterkonzept -----	99
9 Einsatzverhalten beschichteter Hartmetalle unter CO ₂ -Schneekühlung -----	103
9.1 Einfluss von Schneidteilgeometrie und Beschichtungsart -----	108
9.2 Variation von Schneidstoffsubstrat und -beschichtung -----	110
9.3 Einfluss der Technologieparameter auf die Schneidteilbelastung -----	115
10 Zusammenfassung und Ausblick -----	123
Literaturverzeichnis -----	127
Anhang -----	157
Studentische Arbeiten -----	159
Lebenslauf -----	161

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Prozentualer Anteil der Kühlschmierstoffkosten an den gesamten Fertigungskosten im Automotive Sektor, eigene Darstellung-----	1
Abbildung 1.2:	Einfluss der Kühlstrategie auf das Verschleißverhalten von beschichtetem Hartmetall sowie die Zuführung von CO ₂ -Schnee mittels Zweistoffdüsenteknik am Beispiel eines Vierzylinder-Reihenmotors aus GJV, eigene Darstellung -----	2
Abbildung 1.3:	Potenziale und Anwendungsbeispiele additiver Werkzeugfertigung, eigene Darstellung -----	3
Abbildung 2.1:	Zielsetzung und Vorgehensweise-----	5
Abbildung 3.1:	Zerspankraftkomponenten und Eingriffsgrößen beim Außenlängsrunddrehen, eigene Darstellung -----	6
Abbildung 3.2:	Spanbildungsprozess bei Graugusswerkstoffen – Wirkzonen und typische Spanformung, eigene Darstellung -----	7
Abbildung 3.3:	Grafitformen von grauen Gusseisen mit deren typischen thermomechanischen Werkstoffeigenschaften, eigene Darstellung ---	9
Abbildung 3.4:	Einflussfaktoren auf die Zerspanbarkeit von Graugusswerkstoffen, eigene Darstellung-----	11
Abbildung 3.5:	Werkzeugeinsatzzeiten und Verschleißformen beim Drehen im kontinuierlichen Schnitt, eigene Darstellung -----	12
Abbildung 3.6:	Verschleißmechanismen und -formen beim Drehen von GJV, eigene Darstellung -----	13
Abbildung 3.7:	Einfluss der durchschnittlichen Hartmetall-Korngröße auf die mechanischen Eigenschaften von WC-6Co Hartmetall, eigene Darstellung-----	15
Abbildung 3.8:	Thermomechanische Eigenschaften von WC-Co-Hartmetall in Abhängigkeit des Co-Anteils, eigene Darstellung -----	16
Abbildung 3.9:	Aufbau von Schneidstoffbeschichtungen, eigene Darstellung -----	16
Abbildung 3.10:	Druck-Enthalpie-Diagramm von CO ₂ , eigene Darstellung -----	21
Abbildung 3.11:	Auswahl möglicher CO ₂ -Schneestrahlskonzepte aus der flüssigen Phase, eigene Darstellung-----	22
Abbildung 3.12:	Prüfstandkonzepte zur experimentellen Untersuchung kryogener Freistrahlen hinsichtlich Abkühlrate und Strahlstoßkraft, eigene Darstellung-----	25
Abbildung 3.13:	Prozesskategorien für additive Fertigungsverfahren und deren Eignung zur Herstellung metallischer Werkzeugkörper (grau hinterlegt), eigene Darstellung -----	30
Abbildung 3.14:	SLM-Prozesskette, eigene Darstellung -----	32

Abbildung 3.15:	Beispiel für den Treppenstufeneffekt sowie die Auswirkungen thermisch induzierter Eigenspannungen beim SLM-Verfahren, eigene Darstellung -----	34
Abbildung 3.16:	Designfreiheiten bei der Herstellung von innenliegenden Kanalstrukturen durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren, eigene Darstellung -----	37
Abbildung 3.17:	Kostenbeeinflussung bei der Produktentwicklung sowie Anwendungsmöglichkeiten additiver Fertigungstechnologie im Produktlebenszyklus, eigene Darstellung -----	39
Abbildung 3.18:	Ökonomisch sinnvoller Einsatzbereich bei additiven und konventionellen Fertigungsverfahren, eigene Darstellung-----	41
Abbildung 4.1:	Metallografische Schlifffbilder zur Veranschaulichung von Grundgefüge und Grafitmorphologie bei GJV-450, eigene Darstellung -----	47
Abbildung 4.2:	Bruchstrukturen und Aufbau der eingesetzten Schichtsysteme, eigene Darstellung -----	48
Abbildung 5.1:	Zweistoffdüsenkonzept zur Applikation kryogener Kühlmedien, eigene Darstellung -----	52
Abbildung 5.2:	Schneidwerkzeug mit integriertem Ranque-Hilsch-Rohr, eigene Darstellung -----	53
Abbildung 5.3:	Iterativ gestalteter Produktentwicklungsprozess beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren, eigene Darstellung-----	55
Abbildung 5.4:	Schematische Darstellung eines Klemmhalters mit wirkenden Zerspankraftkomponenten sowie zugehörige Freikörperbilder, eigene Darstellung -----	56
Abbildung 5.5:	Analytisch berechneter Normalspannungsverlauf im Klemmhalterquerschnitt, eigene Darstellung mit berechneten Normalspannungen -----	57
Abbildung 5.6:	Werkstoffgefüge und mechanische Eigenschaften von 316L in Abhängigkeit von Herstellungsprozess und Wärmebehandlung, eigene Darstellung -----	59
Abbildung 5.7:	Schematische Darstellung der zyklischen Biegeschwellbelastung und geometrische Beschreibung der verwendeten Biegeproben, eigene Darstellung-----	61
Abbildung 5.8:	Schwingfestigkeitsverhalten von konventionell und additiv hergestellten Werkstoffproben aus 316L, eigene Darstellung-----	62
Abbildung 6.1:	Fotografische Aufnahmen zum Freistrahilverhalten von Ein- und Zweistoffdüsen, eigene Darstellung -----	65
Abbildung 6.2:	Schnittansichten zu den eingesetzten Düsenformen zur Applikation von CO ₂ -Schnee (Bemaßung in mm), eigene Darstellung -----	66

Abbildung 6.3:	Funktionsweise der additiv gefertigten Zweistoffdüsenkonzepte, eigene Darstellung -----	67
Abbildung 6.4:	Nichtlineare Kennlinie und zeitliche Betriebscharakteristik der eingesetzten CO ₂ -Dosiersystemeinrichtung bei Verwendung der Einstoffdüse ESD-52, eigene Darstellung-----	69
Abbildung 6.5:	Einfluss auf den gemessenen CO ₂ -Massenstrom: a) Variation von Dosiersystemeinstellung und Düsenart sowie b) Variation des zugeführten Luftmassenstroms, eigene Darstellung -----	70
Abbildung 6.6:	Prüfstand zur Erfassung von strömungstechnischen Freistrahleigenschaften mit der Methode der Schattenfotografie, eigene Darstellung -----	71
Abbildung 6.7:	Vorgehensweise und Berechnungsvorschriften zur Ermittlung von Partikelintensität und Freistrahlfuktuation, eigene Darstellung-----	73
Abbildung 6.8:	Einfluss der Düsenauslassgeometrie auf das Freistrahilverhalten bei maximaler Düsenbeladung, eigene Darstellung -----	74
Abbildung 6.9:	Einfluss des Luftmassenstroms auf die Freistrahleigenschaften für die Düsenauslassgeometrie MSD-63, eigene Darstellung -----	75
Abbildung 6.10:	Einfluss des CO ₂ -Massenstroms auf die Freistrahleigenschaften für die Düsenauslassgeometrie MSD-63, eigene Darstellung-----	76
Abbildung 6.11:	Aufbau der Messkette zur Quantifizierung der Strahlstoßkraft, eigene Darstellung -----	78
Abbildung 6.12:	Einfluss der Düsengeometrie auf die Strahlstoßkraft in Abhängigkeit des zugeführten Luftmassenstroms, eigene Darstellung-----	79
Abbildung 6.13:	Einfluss von Luftmassenstrom und Düsenabstand auf die Strahlstoßkraft sowie Einfluss der Düsenbeladung auf die Strahlstoßkraft, eigene Darstellung-----	80
Abbildung 6.14:	Modell des Klemmhalterschafts mit integriertem Ranque-Hilsch-Rohr und einer schematischen Darstellung der Wirbelrohrströmung, eigene Darstellung-----	81
Abbildung 6.15:	Konstruktive Umsetzung der Ranque-Hilsch-Rohr-Versorgung mit komprimierter Luft, eigene Darstellung -----	82
Abbildung 6.16:	Prüfstand zur experimentellen Untersuchung der Leistungsfähigkeit von additiv hergestellten Ranque-Hilsch-Rohren, eigene Darstellung-----	83
Abbildung 6.17:	Einfluss des zugeführten Luftmassenstroms auf die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit des Kaltluftanteils, eigene Darstellung-----	84
Abbildung 6.18:	Einfluss der Ranque-Hilsch-Rohrlänge auf die erreichte Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltluftstrom, eigene Darstellung-----	85

Abbildung 6.19:	Einfluss der Ranque-Hilsch-Rohrgeometrie auf die resultierende Temperaturdifferenz, eigene Darstellung-----	86
Abbildung 7.1:	Versuchsaufbau und schematische Darstellung der eingesetzten Messkette zur Untersuchung der Abkühlrate kryogener Mehrstoffkühlung, eigene Darstellung-----	90
Abbildung 7.2:	Stationäre und instationäre Wärmestrombilanz an der Prallplatte, eigene Darstellung -----	91
Abbildung 7.3:	Einfluss von Prallplattentemperatur und Düsenabstand auf die Abkühlrate, eigene Darstellung -----	93
Abbildung 7.4:	Einfluss der Düsenbeladung auf den zeitlichen Temperaturverlauf, eigene Darstellung -----	94
Abbildung 7.5:	Einfluss von Prallplattentemperatur, CO ₂ - und Luftmassenstrom auf die Abkühlrate, eigene Darstellung -----	95
Abbildung 8.1:	Funktionsintegriertes Klemmhalterkonzept ohne und mit integriertem Ranque-Hilsch-Rohr, eigene Darstellung-----	98
Abbildung 8.2:	Funktionsintegriertes Klemmhaltermodell – Darstellung von Zweistoffdüse und Ranque-Hilsch-Rohr, eigene Darstellung -----	99
Abbildung 8.3:	Ausrichtung von Klemmhaltermodul und -schaft zur Bauplattform sowie die erforderliche Nachbearbeitung am Beispiel eines Klemmhaltermoduls, eigene Darstellung -----	100
Abbildung 9.1:	Versuchsaufbau zur Erfassung thermomechanischer Schneidstofflasten beim Außenlängsrunddrehen, eigene Darstellung -----	104
Abbildung 9.2:	Eingesetzte Messkette zur Erfassung der mechanischen Schneidstofflast beim Außenlängsdrehen, eigene Darstellung-----	106
Abbildung 9.3:	Typisches Zerspankraftverhalten der stationären und der progressiven Verschleißphase, eigene Darstellung -----	107
Abbildung 9.4:	Einfluss der Schneidteilgeometrie auf Zerspankraftentwicklung und das erreichbare Zerspanvolumen, eigene Darstellung-----	109
Abbildung 9.5:	Einfluss von Schneidteilgeometrie und Beschichtung auf das erreichbare Zerspanvolumen, eigene Darstellung-----	110
Abbildung 9.6:	Einfluss von Hartmetallsubstrat und Beschichtungsart auf das erzielte Zerspanvolumen, eigene Darstellung-----	111
Abbildung 9.7:	Entwicklung von Verschleißverhalten und thermomechanischer Schneidstoffbelastung in Abhängigkeit des Zerspanvolumens, eigene Darstellung -----	113
Abbildung 9.8:	Einfluss von Applikationsstrategie und zugeführtem Kühlmassenstrom auf das Werkzeugverschleißverhalten bei konstantem Zerspanvolumen, eigene Darstellung-----	115
Abbildung 9.9:	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die thermomechanische Schneidstofflast bei maximaler Abkühlrate, eigene Darstellung ---	116

Abbildung 9.10: Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Abkühlrate auf Temperaturverlauf und spanflächenseitiges Initialverschleißverhalten, eigene Darstellung-----	117
Abbildung 9.11: Einfluss der Abkühlrate auf die thermomechanische Schneidstofflast bei Verwendung arbeitsscharfer Schneidkörper, eigene Darstellung -----	118
Abbildung 9.12: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf das erreichte Zerspanvolumen und die daraus resultierenden Verschleißerscheinungen, eigene Darstellung-----	119
Abbildung 9.13: Einfluss der kryogenen Kühlung auf die thermomechanische Schneidstoffbelastung unter Variation der Beschichtungsart, eigene Darstellung -----	120

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Thermophysikalische Schichteigenschaften -----	17
Tabelle 3.2:	Auszug wichtiger physikalischer Eigenschaften von CO ₂ -----	20
Tabelle 3.3:	Bisherige Arbeiten zum Drehen von Graugusslegierungen unter Einsatz von CO ₂ -Schnee, eigene Darstellung-----	28
Tabelle 4.1:	Technische Leistungsdaten der SLM-Anlage EOS M 290 -----	45
Tabelle 4.2:	Technische Leistungsdaten DMG CTX beta 800 -----	46
Tabelle 4.3:	Elementgehalt und mechanische Eigenschaften von GJV-450 -----	47
Tabelle 4.4:	Eigenschaften der eingesetzten Hartmetall-Substrate -----	48
Tabelle 4.5:	Ergebnisse der optischen Schneidkantenvermessung, gemessene Werte-----	49
Tabelle 5.1:	Gemessene Zerspankraftanteile beim Drehen von GJV-450 unter Einsatz von KSS-----	56
Tabelle 5.2:	Mechanische Werkstoffeigenschaften von 316L im Bauzustand bei Raumtemperatur-----	58
Tabelle 6.1:	Applizierte Luftmassenströme, berechnete Werte -----	68
Tabelle 9.1:	Resultierende Schneidteilwinkel am Klemmhaltersystem in Abhängigkeit der Schneidteilgeometrie, berechnete Werte -----	104
Tabelle 9.2:	Technische Daten und geometrische Ausrichtung zur Infrarot- Temperatursensorik optris [®] CT LT22, eigene Darstellung -----	105
Tabelle 9.3:	Versuchsaufbau und ermittelte Emissionsgrade der eingesetzten Schneidstoffsysteme, eigene Darstellung-----	106
Tabelle 9.4:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale eingesetzter Wendeschnidplatten bei der Analyse der Schneidteilgeometrie auf die mechanische Zerspankraftentwicklung-----	108

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Abkürzungen	
Kurzzeichen	Begriff
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
A/D	Analog/Digital
AG	Aktiengesellschaft
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATS®	Aerosol-Trockenschmierung
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
BAZ	Bearbeitungszentrum
BNC	Steckverbinder (Bayonet Nut Connector)
ca.	circa
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CM	Mischkeramik
CN	Siliziumnitrid-Schneidkeramik
CNMA	Teil der Normbezeichnung für Wendschneidplatten
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapor Deposition
DAQ	Data Acquisition
dB(A)	Dezibel (Schalldruckpegelgewichtung der Kurve A)
DCLNL	Teil der Normbezeichnung für Klemmhaltersysteme
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
et al.	lat. und andere
EN	Europäische Norm
ESD-52	Einstoffdüse (Nummer 52)
Fa.	Firma

Fe	Eisen
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
GJL	Gusseisen mit lamellarem Grafit
GJS	Gusseisen mit Kugelgrafit
GJV	Gusseisen mit vermicularem Grafit
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPL	VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
HBW	Härte Brinell Wolframkarbid
HC	beschichtetes Hartmetall
HM	Hartmetall
HV30	Härteprüfung nach Vickers
HW	unbeschichtetes Hartmetall
i	Laufvariable
Inc.	Incorporated
ISO	International Organization for Standardization
IT7 IT10	Grundtoleranzgrade für Passungssysteme
K	Kaltluftstrom
KHS	Klemmhaltersystem
KSS	Kühlschmierstoff
LN ₂	Flüssigstickstoff
Ma	Machzahl
Mass%	Massenanteil x 100
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MgS	Magnesiumsulfid
Mn	Mangan
MnS	Mangansulfid
Mo	Molybdän
MSD-63	Mehrstoffdüse (Nummer 63)
MSD-66	Mehrstoffdüse (Nummer 66)
MSD-69	Mehrstoffdüse (Nummer 69)
N ₂	Stickstoff
Nb	Niob
Ni	Nickel
P	Phosphor
PC	Personal Computer
PcBN	Polykristallines kubisches Bornitrid
PCLNL	Teil der Normbezeichnung für Klemmhaltersysteme
PEEK	Polyetheretherketon

PKD	Polykristalliner Diamant
ppm	parts per million
PVD	Physical Vapor Deposition
$P_{x,y,0}$ $P_{x,y,i}$	Referenzbild Bildaufnahme i
REM	Rasterelektronenmikroskop
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RR	Rapid Repair
RT	Rapid Tooling
S	Schwefel
Si	Silizium
Si_3N_4	Siliziumnitrid
SCLCL	Teil der Normbezeichnung für Klemmhaltersysteme
SLI	Slice Layer Interface
SLM	Selective Laser Melting
Sn	Zinn
STL	Standard Tessellation Language
TaC	Tantalkarbid
TC-1, TC-2, TC-3	Thermoelement 1 ... 3
Ti	Titan
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiAlTaN	Titanaluminiumtantalnitridd
TiB_2	Titanborid
TiC	Titankarbid
TiCN	Titankarbonitrid
TiN	Titannitrid
TRL	Technology Readiness Level
u. a.	unter anderem
V	Vanadium
vgl.	vergleiche
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
W	Warmluftstrom
WC	Wolframkarbid
x	Koordinatenachse in x-Richtung
y	Koordinatenachse in y-Richtung
z	Koordinatenachse in z-Richtung

Formelzeichen		
Kurzzeichen	Einheit	Größe
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a_p	mm	Zustellung, Schnitttiefe
A	$\% \mid \text{m}^2 \mid \text{mm}^2$	Bruchdehnung / Oberfläche
A_v	J	Kerbschlagarbeit
b	mm	Kantenlänge
B	$\text{J}/(\text{kgK})$	Wärmeeindringkoeffizient
c_p	$\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität
d	mm	Durchmesser
d_{KL}	mm	Durchmesser am Kaltluftauslass
d_{RHVT}	mm	Wirbelrohr-Durchmesser
E	GPa	E-Modul
f	Hz, fps mm	Frequenz Vorschub
f_{min}	Hz	minimale Aufnahme Frequenz
F	N	Resultierende Zerspankraft
F_c	N	Schnittkraft
F_D	N	Drangkraft
$F_{\text{Düse}}$	N	Strahlstoßkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_N	N	Normalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_R	N	Reibkraft
G	Pixel/mm	Abbildungsmaßstab
h	kJ/kg	Enthalpie
h_2	kJ/kg	Enthalpie an Punkt 2
h_{Sub}'	kJ/kg	CO_2 Sublimationsenthalpie (fest)
h_{Sub}''	kJ/kg	CO_2 Sublimationsenthalpie (gasförmig)
h_s	mm	Hatch-Abstand
H	GPa	Härte
$I_{p,x,y}$	-	gemittelte Partikelintensität
I_y, I_z	mm^4	Flächenträgheitsmoment um y bzw. z
\dot{I}	N	Impulsfluss
k	- / $1/\text{s}$	Neigungsexponent / Wärmetransferkoeffizient
$K_{t,b}$	-	Kerbformzahl
L	mm, m	Länge
L_c	km	Schnittstandweg
L_{DA}	mm	Düsenabstand

L_{RHVT}	mm	Wirbelrohlänge
\dot{m}	g/min	Massenstrom
\dot{m}_{CO_2}	g/min	CO ₂ -Massenstrom (flüssiger Zustand)
$\dot{m}_{Kaltluft}$	g/min	Kaltluftmassenstrom
\dot{m}_L	g/min	Luftmassenstrom
\dot{m}_{TE}	g/min	Trockeneismassenstrom
$\dot{m}_{Warmluft}$	g/min	Warmluftmassenstrom
M	kg	Prallplattenmasse
M_y	Nmm	Biegemoment um die y-Achse
M_z	Nmm	Biegemoment um die z-Achse
n	-	Anzahl
N	-	Schwingspielzahl
N_G	-	Grenzschwingspielzahl
p	bar	Druck
p_U	bar	Umgebungsdruck
P	W	Leistung
P_c	W	Schnittleistung
P_e	W	Wirkleistung
$P_e, \text{Schneidstoff}$	W	Anteil thermischer Energie im Schneidstoff
P_e, Span	W	Anteil thermischer Energie im Span
$P_e, \text{Werkstück}$	W	Anteil thermischer Energie im Werkstück
P_f	W	Vorschubleistung
P_A	%	Ausfallwahrscheinlichkeit
P_L	W	Laserleistung
$\dot{q}_A(t)$	W/mm ²	spezifischer Wärmestrom durch Oberfläche A
\dot{Q}_α	W	Wärmestrom durch Konvektion
\dot{Q}_ε	W	Wärmestrom durch Strahlung
\dot{Q}_λ	W	Wärmestrom durch Wärmeleitung
\dot{Q}_{HP}	W	Wärmestrom durch die Heizpatrone
Q	cm ³ /min	Zeitspanvolumen
r	mm	Radius
r_β	µm	Schneidkantenverrundung
r_e	µm	Eckenradius der Wendeschneidplatte
R	-	Spannungsverhältnis
R_a	µm	Mittenrauwert
R_m	N/mm ² MPa	Zugfestigkeit
$R_{p,0,2}$	N/mm ² MPa	0,2 % Dehngrenze
R_z	µm	gemittelte Rautiefe

s	μm	Schichtdicke
t	s	Zeit
t_b	μs	Belichtungszeit
T	$^{\circ}\text{C}$, K	Temperatur
T_c	min	Bearbeitungszeit
T_A	$^{\circ}\text{C}$, K	Oberflächentemperatur
T_{CO_2}	$^{\circ}\text{C}$, K	CO_2 -Schneestrahlttemperatur
T_{CVD}	$^{\circ}\text{C}$	CVD-Beschichtungstemperatur
T_{Kaltluft}	$^{\circ}\text{C}$, K	Temperatur Kaltluftstrom
T_N	-	Streuspanne in Richtung der Schwingspielzahl
T_{PVD}	$^{\circ}\text{C}$	PVD-Beschichtungstemperatur
T_{Sync}	$^{\circ}\text{C}$	Synchronisationstemperatur
$T_{\text{TC-2}}$	$^{\circ}\text{C}$, K	Temperatur am Thermoelement TC-2
T_{Warmluft}	$^{\circ}\text{C}$, K	Temperatur Warmluftstrom
T_{σ}	-	Streuspanne in Richtung der Spannungsamplitude
u	m/s	Geschwindigkeit
$u_{\text{max, Freistrah}}$	m/s	maximale Freistrahlggeschwindigkeit
v	m/min	Geschwindigkeit
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit
VB_{max}	μm	Verschleißmarkenbreite
V_Z	cm^3	Zerspanvolumen
\dot{V}_N	Nl/min	Normvolumenstrom
x	-	Laufvariable
$x_{\text{Schneeanteil}}$	-	CO_2 -Schneeanteil nach isenthalper Expansion
α	$^{\circ}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Freiwinkel Wärmeübergangskoeffizient
α_{KHS}	$^{\circ}$	Freiwinkel am Klemmhaltersystem
α_{WSP}	$^{\circ}$	Freiwinkel der Wendeschneidplatte
β	$^{\circ}$	Keilwinkel
γ	$^{\circ}$	Spanwinkel
γ_{KHS}	$^{\circ}$	Spanwinkel am Klemmhaltersystem
γ_{WSP}	$^{\circ}$	Spanwinkel der Wendeschneidplatte
ΔL_{RHVT}	mm	Längendifferenz Wirbelrohr
ΔT_{RHVT}	$^{\circ}\text{C}$, K	Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltluftstrom
ϵ	$^{\circ}$	Eckenwinkel der Wendeschneidplatte
κ	$^{\circ}$	Einstellwinkel

λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
λ_{WSP}	°	Neigungswinkel der Wendeschneidplatte
μ_{Kaltluft}	-	Kaltluftanteil
π	-	Kreiszahl Pi (3,1418)
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_{Luft}	kg/m ³	Dichte von Luft
$\rho_{\text{N Luft}}$	kg/m ³	Dichte von Luft bei Normalbedingungen
ρ_{Sub}'	kg/m ³	Dichte CO ₂ am Sublimationspunkt (fest)
ρ_{Sub}''	kg/m ³	Dichte CO ₂ am Sublimationspunkt (gasförmig)
$\sigma(L, y, z)$		Normalspannungsverlauf an der Stelle L in Abhängigkeit von y und z
$\sigma_{\text{a,D}}$	N/mm ²	Nennspannungsamplitude (dauerfest)
σ_{f}	-	Freistrahlfuktuation
σ_{m}	N/mm ²	Mittelspannung
$\sigma_{\text{max,Druck}}$	N/mm ² MPa	Maximale Druckspannung
$\sigma_{\text{max,Zug}}$	N/mm ² MPa	Maximale Zugspannung
$\sigma_{\text{n,a}}$	N/mm ²	Nennspannungsamplitude
σ_{o}	N/mm ²	Oberspannung
σ_{u}	N/mm ²	Unterspannung