



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Timo Mathias Scherer

**Beanspruchungs- und fertigungsgerechte  
Gestaltung additiv gefertigter  
Zerspanungswerkzeuge**

**Schriftenreihe des PTW  
„Innovation Fertigungstechnik“**

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

**PTW**  
TU DARMSTADT

Beanspruchungs- und fertigungsgerechte Gestaltung additiv gefertigter  
Zerspanungswerkzeuge

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

**Timo Mathias Scherer, M.Sc.**

aus Aschaffenburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jan Christian Aurich

Tag der Einreichung: 14.01.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 29.04.2020

Darmstadt 2020

D17



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Timo Mathias Scherer**

**Beanspruchungs- und fertigungsgerechte Gestaltung  
additiv gefertigter Zerspanungswerkzeuge**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7402-4

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die Entwicklung additiver Fertigungstechnologien schreitet immer weiter voran. Verfahren wie das Selektive Laser Schmelzen (SLM) kommen nicht mehr ausschließlich zur Prototypenfertigung, sondern zur Herstellung von Endkundenbauteilen zum Einsatz. Durch die hohe Gestaltungsfreiheit und Flexibilität stellen additive Fertigungsverfahren für bestimmte Bauteile eine interessante Alternative zu konventionellen Fertigungsverfahren dar. Zugleich besitzt die additive Fertigung das Potenzial die konventionelle spanabtragende Fertigung durch die Erzeugung optimierter und leistungsfähigerer Werkzeuge zu unterstützen. Um die Potenziale der additiven Fertigung für die Werkzeugherstellung zu nutzen sind jedoch konstruktive Anpassungen der Werkzeuggeometrie, unter Berücksichtigung der Verfahrensrestriktionen, vorzunehmen.

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich daher mit der Entwicklung eines Vorgehens zur Gestaltung von Werkzeuggrundkörpern, die im SLM-Verfahren hergestellt werden. Das Vorgehen beruht auf einer beanspruchungsgerechten Gestaltung eines Fräswerkzeugs, auf Basis der Ergebnisse von Topologieoptimierungsmaßnahmen. Die fertigungsgerechte Umsetzung der Optimierungsergebnisse erfolgt unter den Gesichtspunkten der additiven Fertigung und der spanenden Nachbearbeitung. Um den Herstellungsaufwand zu reduzieren wird die Umsetzung eines hybrid additiven Fertigungsansatzes realisiert. Des Weiteren werden Strategien zur prozesssicheren Einbringung von Innengewinden sowie zur Bauteilreferenzierung zur Durchführung der Nachbearbeitungsoperationen beschrieben. Abschließend wird der Einfluss der beanspruchungs- und fertigungsgerechten Anpassung der Werkzeuggeometrie auf die Herstellkosten quantifiziert.

Die Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der Gestaltung additiv herzustellender Werkzeuge und soll zum einen kleinen und mittelständischen Werkzeugherstellern die Zugänglichkeit zum Thema erleichtern. Zum anderen legt sie den Grundstein zukünftiger Forschungsarbeiten zur additiven Werkzeugfertigung am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen.

Darmstadt, im April 2020

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Zerspanungstechnologie am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Eberhard Abele für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Die hervorragenden Rahmenbedingungen für die Forschungstätigkeiten sowie die umfassenden gewährten Freiheiten habe ich sehr geschätzt. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Jan Christian Aurich für die Übernahme des Koreferats.

Die Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts *AddiZwerk*. Allen beteiligten Partnern gilt mein Dank für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Beiträge und die Unterstützung.

Mein Dank gilt zudem meinen Kollegen und Kolleginnen am PTW, die dafür gesorgt haben, dass meine Zeit am Institut etwas ganz Besonderes war. Ich bin dankbar für die vielen neuen Freundschaften die entstanden sind und für die vielen Erinnerungen die wir teilen. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Michael Kniepkamp für dessen fachliche und freundschaftliche Unterstützung. Christopher Praetzas danke ich für seine Hilfsbereitschaft und seinen unermüdlichen Einsatz – ich hätte mir keinen besseren Bürokollegen wünschen können. Mein weiterer Dank gilt Frederik Birk, Felix Geßner, Martin Link, Holger Merschroth, Eric Schmidt und Patrick Stanula. Stellvertretend für die mechanische Werkstatt und das Support-Team möchte ich Mirko Feick, Annette Heb und Sibylle Scheibner danken.

Meiner Familie, vor allem meinem Vater Horst, meinem Bruder Markus und meinem Onkel Mathias möchte ich ebenfalls danken. Ihr Vertrauen und ihre Unterstützung haben mir erst ermöglicht diese Arbeit anfertigen zu können.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Julia – ihre Liebe und Fürsorge gaben mir während der Erstellung dieser Dissertation stets Halt und waren zugleich meine größte Motivation.





## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Additive Fertigungsverfahren und Selektives Laserschmelzen .....	5
2.1.1 Grundlagen des SLM-Verfahrens .....	7
2.1.2 Bauteilkonstruktion für das SLM-Verfahren .....	13
2.1.3 Nachbearbeitung von SLM-Bauteilen .....	19
2.2 Beanspruchungsgerechte Auslegung von Bauteilen.....	23
2.2.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode .....	23
2.2.2 Topologieoptimierung von Bauteilen .....	30
2.2.3 Additive Fertigung topologieoptimierter Bauteile.....	35
2.3 Zerspanung und Zerspanungswerkzeuge .....	38
2.3.1 Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide .....	38
2.3.2 Bauweisen und Gestaltung von Zerspanungswerkzeugen .....	42
2.3.3 Analyse der Beanspruchung von Zerspanungswerkzeugen.....	46
2.3.4 Additive Fertigung von Werkzeugen .....	52
<b>3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>55</b>
<b>4 Vorgehen zur Entwicklung beanspruchungs- und fertigungsgerecht gestalteter Werkzeuggrundkörper .....</b>	<b>59</b>
4.1 Beschreibung des systematischen Vorgehens .....	59
4.2 Darstellung des zugrundeliegenden Anwendungsfalls .....	62
4.3 Verwendete Software und Versuchstechnik .....	64
<b>5 Beanspruchungsgerechte Auslegung des Werkzeuggrundkörpers.....</b>	<b>69</b>
5.1 Aufbau des Finite-Elemente Modells .....	69
5.1.1 Modellierung des Materialverhaltens .....	69

---

5.1.2	Annahmen und Abstraktionen der Modellbildung.....	70
5.2	Bestimmung und Modellierung der Lastfälle.....	73
5.2.1	Ermittlung der wirkenden Prozesskräfte .....	74
5.2.2	Modellierung der Lastfälle.....	79
5.3	Durchführung der Finite-Elemente-Analyse .....	83
5.3.1	Betrachtung unterschiedlicher Diskretisierungsstrategien .....	85
5.3.2	Definition des statischen Vergleich-Lastfalls.....	88
5.4	Topologieoptimierung des Werkzeuggrundkörpers.....	92
5.4.1	Aufbau der Topologieoptimierung.....	92
5.4.2	Ergebnis der Topologieoptimierung .....	93
5.5	Zwischenfazit .....	96
<b>6</b>	<b>Fertigungsgerechte Konstruktion des Werkzeuggrundkörpers.....</b>	<b>97</b>
6.1	Umsetzung des Optimierungsergebnisses für den SLM-Prozess .....	97
6.1.1	Softwaregestützte Erfassung der Hohlraumkonturen .....	98
6.1.2	Fertigungsgerechte Konstruktion des Werkzeuggrundkörpers .	101
6.1.3	Evaluation der konstruktiven Ergebnisumsetzung.....	103
6.2	Hybrid additiver Fertigungsansatz .....	105
6.2.1	Verbindungsqualität der Bauteilschnittstelle .....	106
6.2.2	Prozessseitige Umsetzung des Fertigungsansatzes.....	109
6.3	Durchführung der spanenden Nachbearbeitung.....	112
6.3.1	Untersuchung zur Einbringung von Innengewinden .....	113
6.3.2	Spannbarkeit und Referenzierbarkeit des Grundkörpers.....	118
6.3.3	Referenzierung im Bauraum der Werkzeugmaschine.....	119
6.4	Zwischenfazit .....	125
<b>7</b>	<b>Charakterisierung und Anwendungserprobung der Werkzeuggrundkörper .....</b>	<b>127</b>
7.1	Geometrische Beschaffenheit der Werkzeuggrundkörper.....	128
7.2	Fliehkraftbelastungsprüfung und Bestimmung der Betriebsdrehzahl.	131
7.3	Einsatzverhalten der Werkzeuggrundkörper .....	132
<b>8</b>	<b>Herstellkosten der Werkzeuggrundkörper .....</b>	<b>135</b>

---

<b>9 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>141</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
<b>Studentische Arbeiten.....</b>	<b>177</b>
<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>179</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>181</b>
A.1 Ergebnisse der Topologieoptimierung .....	181
A.2 Details der Herstellkostenberechnung .....	184
<b>Lebenslauf des Autors.....</b>	<b>189</b>



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Herausforderungen der Zerspanungswerkzeug-Branche .....	1
Abbildung 2-1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 .....	5
Abbildung 2-2: STL-Dateierzeugung aus Volumenkörper .....	8
Abbildung 2-3: Arbeitsprinzip/Systemkomponenten des SLM-Verfahrens .....	10
Abbildung 2-4: Wesentliche Prozessparameter des SLM-Verfahrens .....	11
Abbildung 2-5: Kontur-Hatch-Belichtungsstrategie mit Auswahl möglicher Variationen der Scanvektoren .....	13
Abbildung 2-6: Aspekte der fertigungsgerechten Gestaltung von SLM-Bauteilen .....	16
Abbildung 2-7: Konstruktionsrichtlinien für die Gestaltung von SLM-Bauteilen .....	19
Abbildung 2-8: Gängige Klassen von Volumenelementen .....	25
Abbildung 2-9: Klassifizierung von Strukturoptimierungsproblemen .....	30
Abbildung 2-10: SIMP-Ansatz für verschiedene Bestrafungsexponenten .....	33
Abbildung 2-11: Ablauf der Topologieoptimierung von Bauteilen .....	34
Abbildung 2-12: Iterative Anpassung innenliegender Konturen zur Vermeidung nichtherstellbarer Überhänge .....	37
Abbildung 2-13: Schneide mit Schneidkantenradius .....	39
Abbildung 2-14: Die Komponenten der Zerspankraft beim Stirnplanfräsen .....	40
Abbildung 2-15: Geometrische Zusammenhänge der Kinematik beim Fräsen .....	41
Abbildung 2-16: Bauformen von Wendeplattenfräs Werkzeugen und Bezeichnungen am Fräskopf .....	44

---

Abbildung 2-17: Ergebnis der Strukturoptimierung eines BTA-Bohrkopfes.....	51
Abbildung 2-18: Auswahl im SLM-Verfahren hergestellter Werkzeuggrundkörper.....	54
Abbildung 3-1: Ableitung der Zielsetzung dieser Dissertation.....	57
Abbildung 3-2: Inhaltlicher Aufbau dieser Dissertation.....	58
Abbildung 4-1: Systematisches Vorgehen zur Erreichung des Zielvorhabens .....	60
Abbildung 4-2: Der Entwicklung zugrundeliegendes Originalwerkzeug .....	63
Abbildung 4-3: SLM-System EOSINT M270 – Anlage und Systemgrößen.....	65
Abbildung 4-4: Aufbau zur Bestimmung der Prozesskräfte des betrachteten Anwendungsfalls.....	66
Abbildung 5-1: Ableitung einer ringförmigen Scheibe aus der Grundkörpergeometrie .....	72
Abbildung 5-2: Freischneiden des Werkzeuggrundkörpers zur Definition der Lagerbedingungen .....	73
Abbildung 5-3: Geometrischer Zusammenhang zwischen den Kraftkomponenten.....	75
Abbildung 5-4: Phasen der Werkzeugeingriffssituation und Bestimmung des Positionswinkels .....	77
Abbildung 5-5: Verlauf der Prozesskräfte der Versuchsreihe 15.....	78
Abbildung 5-6: Modellierung der Prozesskraftverläufe des dynamischen Lastfalls.....	80
Abbildung 5-7: Bestimmung des Verteilungsschlüssels der Kraftkomponenten.....	82
Abbildung 5-8: Iteratives Vorgehen der Finite-Elemente-Analyse .....	84
Abbildung 5-9: Erste Iteration und Vergleich der Diskretisierung des Grundkörpermodells.....	86

---

Abbildung 5-10: Mises-Vergleichsspannung zu den Zeitpunkten der maximal wirkenden Beanspruchungen.....	87
Abbildung 5-11: Zweite Iteration und tetraedrische Diskretisierung des Grundkörpermodells.....	88
Abbildung 5-12: Vergleich der Ergebnisse der dynamischen und statischen Finite-Elemente-Analysen .....	89
Abbildung 5-13: Dritte Iteration und tetraedrische Diskretisierung des Grundkörpermodells.....	91
Abbildung 5-14: Ergebnis der statischen Finite-Elemente-Analyse des originalen Werkzeuggrundkörpers .....	92
Abbildung 5-15: Vergleichsspannungen und Verschiebungen bei Variation der funktionellen Randbedingung.....	94
Abbildung 5-16: Ergebnisgeometrie der Topologieoptimierung und Ergebnisse der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	95
Abbildung 6-1: Markante Aussparungsmerkmale der Ergebnisgeometrie .....	99
Abbildung 6-2: Ablauf der softwaregestützten Umsetzung der Optimierungsergebnisse .....	100
Abbildung 6-3: Fertigungsgerechte Anpassung des Optimierungsergebnisses.....	102
Abbildung 6-4: Vergleich des originalen Werkzeuggrundkörpers und der konstruktiven Ergebnisumsetzung.....	103
Abbildung 6-5: Validierung der Analyseergebnisse durch Vergleich von Abaqus CAE und Siemens NX Nastran .....	105
Abbildung 6-6: Aufbau der Versuchsreihe zur Bestimmung der Zugfestigkeit.....	107
Abbildung 6-7: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der konventionell, additiv und hybrid additiv gefertigten Zugproben.....	108
Abbildung 6-8: Vergleich der Bruchformen der konventionell, additiv und hybrid gefertigten Zugproben.....	109



---

Abbildung 6-9: Schematischer Aufbau des Bauplattformsystems zur Umsetzung des hybrid additiven Fertigungsansatzes .....	110
Abbildung 6-10: Bestimmung der Korrekturwerte zur Durchführung des hybrid additiven Fertigungsansatzes .....	111
Abbildung 6-11: Aufbau der Versuchsreihe zur Einbringung von Innengewinden.....	114
Abbildung 6-12: Einfluss des Fertigungsansatzes auf die Oberflächenqualität der Gewindegänge .....	116
Abbildung 6-13: Ausprägung der Gewindegänge bei Verwendung unterschiedlicher Fertigungsansätze.....	117
Abbildung 6-14: Spannsystem und Spannsituation zur Durchführung der spanenden Nachbearbeitungsoperationen.....	119
Abbildung 6-15: Prüfkörper und Vorgehen zur Bestimmung der Genauigkeit der Bauteilreferenzierungsstrategie .....	122
Abbildung 6-16: Ergebnisse der Erprobung variierender Referenzierungsstrategien .....	124
Abbildung 7-1: Vergleich der Werkzeuggrundkörpervarianten WZGK <sub>A</sub> und WZGK <sub>B</sub> .....	128
Abbildung 7-2: Ergebnis der Falschfarbenanalyse zur Bestimmung der Fertigungsgenauigkeit des Werkzeuggrundkörpers .....	129
Abbildung 7-3: Ergebnisse der Rund- und Planlauffehlermessungen der Werkzeuggrundkörper.....	130
Abbildung 7-4: Ergebnisse der Fliehkraftbelastungsprüfung des Werkzeuggrundkörpers WZGK <sub>A</sub> .....	131
Abbildung 7-5: Vergleich der Prozesskräfte des Originalwerkzeugs und der additiv gefertigten Werkzeuggrundkörper .....	133
Abbildung 7-6: Vergleich der Rauheit der mit den Werkzeuggrundkörpern erzeugten Oberflächen .....	134
Abbildung 8-1: Zusammensetzung der Herstell-, Fertigungs- und Fertigungsgemeinkosten.....	139

---

*Anhang*

Abbildung A.1: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 10 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	181
Abbildung A.2: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 15 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	182
Abbildung A.3: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 20 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	182
Abbildung A.4: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 25 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	183
Abbildung A.5: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 40 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	183
Abbildung A.6: Ergebnis der Topologieoptimierung (FRB 50 %) und der statischen Finite-Elemente-Analyse .....	184

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4.1: Prozessparameter des zugrundeliegenden Bearbeitungsfalls .....	64
Tabelle 5.1: Mechanische Eigenschaften EOS MS1 .....	70
Tabelle 5.2: Versuchsplan zur Bestimmung der Lastfälle .....	74
Tabelle 5.3: Ergebnisse der Schnitt-, Schnittnormal- und Passivkraftbestimmung.....	79
Tabelle 5.4: Verteilungsschlüssel der Kraftkomponenten auf den Plattensitzflächen .....	83
Tabelle 6.1: Prozessparameter der Kernloch- und Gewindebohroperationen.....	115
Tabelle 8.1: Vergleich der Herstellkosten der drei Fertigungsfälle.....	137

*Anhang*

Tabelle A.1: Schema der Maschinenstundensatzkalkulation .....	184
Tabelle A.2: Berechnung der Maschinenstundensätze.....	186

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

*Große lateinische Buchstaben*

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$A$	$\text{mm}^2$	Spanungsquerschnitt
$A_\alpha$		Freifläche
$A_\gamma$		Spanfläche
${}^E\mathbf{B}_n$		Verzerrungs-Verschiebungsmatrix
${}^E\mathbf{C}_n$		Elastizitätsmatrix
$\mathbf{D}$		Dämpfungsmatrix
$E$	GPa	Elastizitätsmodul (E-Modul)
$E_{\min}$	GPa	Minimaler E-Modul
$E_n$	GPa	E-Modul des Elements $n$
$E_n^0$	GPa	E-Modul eines massiven Elements
$F$	N	Zerspankraft
$F_a$	N	Aktivkraft
$F_{a_i}$	N	Aktivkraft zum Zeitpunkt $i$
$F_{a,\max}$	N	Maximum der Aktivkraft
$F_c$	N	Schnitt-/Tangentialkraft
$F_{c_i}$	N	Schnitt-/Tangentialkraft zum Zeitpunkt $i$
$F_{c,\text{Last}}$	N	Schnitt-/Tangentialkraft des Lastfalls
$F_{cN}$	N	Schnittnormal-/Radialkraft
$F_{cN_i}$	N	Schnittnormal-/Radialkraft zum Zeitpunkt $i$
$F_{cN,\text{Last}}$	N	Schnittnormal-/Radialkraft des Lastfalls
$F_{\max}$	N	Maximale Zerspankraft
$F_p$	N	Passiv-/Axialkraft

---

$F_{p,Last}$	N	Passiv-/Axialkraft des Lastfalls
$F_{p,max}$	N	Maximum der Passivkraft
$F_x$	N	Kraft in x-Richtung
$F_{x_i}$	N	Kraft in x-Richtung zum Zeitpunkt $i$
$F_{x,max}$	N	Maximale Kraft in x-Richtung
$F_y$	N	Kraft in y-Richtung
$F_{y_i}$	N	Kraft in y-Richtung zum Zeitpunkt $i$
$F_{y,max}$	N	Maximale Kraft in y-Richtung
$F_z$	N	Kraft in z-Richtung
$G_0$	$m^3$	Volumenbeschränkung d. Topologieoptimierung
$G_L$		Optimierungsbeschränkung d. Topologieoptimierung
${}^E\mathbf{H}_n$		Matrix der Verschiebungsinterpolationsfunktion
$J$		Jacobi-Verhältnis
$\mathbf{K}$		Gesamtsteifigkeitsmatrix
$K_f$		Korrekturfaktor Formfaktor
$K_{sch}$		Korrekturfaktor Schneidstoff
$K_{st}$		Korrekturfaktor Spanstauchung
$K_v$		Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit
$K_{ver}$		Korrekturfaktor Verschleiß
$K_\gamma$		Korrekturfaktor Spanwinkel
$\mathbf{M}$		Massenmatrix
$P_L$	W	Laserleistung
$Q$	$mm^3/min$	Zeitspanvolumen
$R_a$	$\mu m$	Mittenrauwert
$\bar{R}_{m,add}$	MPa	Gemittelte Zugfestigkeit der additiven Proben
$\bar{R}_{m,hybr}$	MPa	Gemittelte Zugfestigkeit der hybriden Proben

$\bar{R}_{m, \text{konv}}$	MPa	Gemittelte Zugfestigkeit der konventionellen Proben
$R_{m, \text{max}}$	MPa	Maximale Zugfestigkeit
$R_{m, \text{min}}$	MPa	Minimale Zugfestigkeit
$R_{p0,2, \text{min}}$	MPa	Minimale Streckgrenze
$V$	m <sup>3</sup>	Bauraumvolumen
$V_0$	m <sup>3</sup>	Zielvolumen d. Topologieoptimierung
$Z$		Zielfunktion d. Topologieoptimierung

*Kleine lateinische Buchstaben*

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$a_e$	mm	Schnittbreite/radiale Zustellung
$a_p$	mm	Schnitttiefe
$b$	mm	Spanungsbreite
$c_1$		1. Konstante der Radialverschiebungsberechnung
$c_2$		2. Konstante der Radialverschiebungsberechnung
$d_{\text{min}}$	mm	Minimal herstellbarer Bohrungsdurchmesser
$d_{\text{WZ}}$	mm	Werkzeugdurchmesser
$d_f$	mm	Fokusbereich
$d_1$	mm	Schichtdicke
$f$	mm	Vorschub
$\mathbf{f}$		Lastvektor
$f_z$	mm	Zahnvorschub
$h$	mm	Spanungsdicke
$h_{\text{Eintritt}}$	mm	Spanungsdicke bei Eintritt in das Werkstück
$h_s$	mm	Scanlinienabstand
$h_{\text{norm}}$		Normierte Spanungsdicke

---

$k_c$	N/mm <sup>2</sup>	Spezifische Schnittkraft
$k_{c1.1}$	N/mm <sup>2</sup>	Spezifische Schnittkraft bezogen auf $A = 1 \text{ mm}^2$
$m_c$		Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$
$n$	min <sup>-1</sup>	Werkzeugdrehzahl
$n_{\text{Antrieb}}$	min <sup>-1</sup>	Antriebsdrehzahl
$n_{\text{max}}$	min <sup>-1</sup>	Maximale Betriebsdrehzahl
$p$		Bestrafungsexponent
$p_{\text{KSS}}$	bar	Kühlschmiermitteldruck
$r$	mm	Radius
$r_a$	mm	Außenradius
$r_i$	mm	Innenradius
$r_\beta$	mm	Schneidkantenradius
$s_v$	mm	Scanvektorlänge
$t$	s	Zeitpunkt
$t_{F_a, \text{max}}$	s	Zeitpunkt der maximalen Aktivkraft
$t_{F_p, \text{max}}$	s	Zeitpunkt der maximalen Passivkraft
$t_{F_x, \text{max}}$	s	Zeitpunkt der maximalen Kraft in x-Richtung
$t_{F_y, \text{max}}$	s	Zeitpunkt der maximalen Kraft in y-Richtung
$t_{\text{Abfahren}}$	s	Austrittszeitpunkt des Werkzeugs
$t_{\text{Austritt}}$	s	Austrittszeitpunkt der Schneide
$t_{\text{Eingriff}}$	s	Eintrittszeitpunkt des Werkzeugs
$t_{\text{Eintritt}}$	s	Eintrittszeitpunkt der Schneide
$t_{\text{min}}$	mm	Minimale Wandstärke
$t_{\text{Poststationär}}$	s	Startzeitpunkt des poststationären Prozesses
$t_{\text{Stationär}}$	s	Startzeitpunkt des stationären Prozesses
$\mathbf{u}$		Zustandsvektor

$u_a$	mm	Radiale Dehnung am Außenradius
$u_i$	mm	Radiale Dehnung am Innenradius
$u_{\max}$	mm	Maximale Verschiebung eines Elementknotens
$\hat{\mathbf{v}}$		Vektor der Verschiebungskomponenten
$v_c$	m/min	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
$\mathbf{v}_n$		Vektor des Verschiebungsfeld des Elements $n$
$v_n$	m <sup>3</sup>	Volumen des Elements $n$
$v_s$	mm/s	Scangeschwindigkeit
$v_{s,\max}$	mm/s	Maximale Scangeschwindigkeit
$\mathbf{x}$		Vektor der Punkte im Entwurfsraum
$x_n$		Entwurfvariable des Elements $n$
$z$		Anzahl der Werkzeugschneiden

### Griechische Buchstaben

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\beta$	°	Keilwinkel
$\beta_i$	°	Wirkwinkel des Werkzeugs zum Zeitpunkt $i$
$\gamma_{\text{Austritt}}$	°	Positionswinkel des Werkzeugs bei Schneidenaustritt
$\gamma_{\text{Eintritt}}$	°	Positionswinkel des Werkzeugs bei Schneideneintritt
$\gamma_i$	°	Positionswinkel des Werkzeugs zum Zeitpunkt $i$
$\gamma_n$		Dehnung des Elements $n$
$\gamma_{\text{Schnitt}}$	°	Winkelmaß des Schnitts
$\dot{\gamma}$	°/s	Winkelgeschwindigkeit



---

$\Delta_{t,dyn}$	s	Zeitschritt der dynamischen Modellierung
$\Delta_{t,Schnitt}$	s	Dauer eines Schnitts
$\delta$	°	Downskin-Winkel
$\delta_{krit}$	°	Kritischer Downskin-Winkel
$\kappa$	°	Einstellwinkel
$\nu$		Querkontraktionszahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\boldsymbol{\rho}$		Vektor der Gestaltungsvariablen
$\rho_{min}$	kg/m <sup>3</sup>	Minimum der Dichte
$\rho_n$	kg/m <sup>3</sup>	Kontinuierliche DichtevARIABLE des Elements $n$
$\rho_n^0$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des massiven Elements $n$
$\sigma_{It1,max,hex,dyn}$	MPa	Maximale Spannung des hexaedrisch diskretisierten dynamischen Modells (1. Iteration)
$\sigma_{It1,max,tet,dyn}$	MPa	Maximale Spannung des tetraedrisch diskretisierten dynamischen Modells (1. Iteration)
$\sigma_n$	MPa	Spannung des Elements $n$
$\sigma_{It1,Vgl,hex,dyn}$	MPa	Vergleichsspannung des hexaedrisch diskretisierten dynamischen Modells (1. Iteration)
$\sigma_{It1,Vgl,tet,dyn}$	MPa	Vergleichsspannung des tetraedrisch diskretisierten dynamischen Modells (1. Iteration)
$\sigma_{It2,max,tet,dyn}$	MPa	Maximale Spannung des tetraedrisch diskretisierten dynamischen Modells (2. Iteration)
$\sigma_{It2,max,tet,stat}$	MPa	Maximale Spannung des tetraedrisch diskretisierten statischen Modells (2. Iteration)
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit
$\Omega$		Entwurfsraum
$\Omega_n$	m <sup>3</sup>	Volumen des Elements $n$

*Abkürzungen*

3D	Dreidimensional
ALE	Arbitrary-Lagrangian-Eulerian
AlSi11	Aluminium Legierung mit 11 % Siliziumgehalt
AMF	Additive Manufacturing File
BTA	Boring and Trepanning Association
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FE	Finite-Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEK	Fertigungseinzelkosten
FEM	Finite-Elemente-Methode
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FK	Fertigungskosten
FRB	Funktionelle Randbedingung
GGL	Gegenlaufrässtrategie
GL	Gleichlaufrässtrategie
GUI	Graphic User Interface
HK	Herstellkosten

HSC	High Speed Cutting
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
MK	Materialkosten
MGK	Materialgemeinkosten
MS	Maraging Stahl
MMS	Minimalmengenschmierung
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NURBS	Non-uniform rational B-Splines
PBF	Powder Bed Fusion
PKD	Polykristalliner Diamant
PKW	Personenkraftwagen
SEKF	Sondereinzelkosten der Fertigung
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLM	Selective Laser Melting
STL	Surface Tessellation Language
T3DP	Thermoplastic 3D Printing
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WC	Wolframcarbid
WSP	Wendeschneidplatten
Yb	Ytterbium