



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Matthias Berger

**Einsatz von ultrahochfestem Beton
als Alternative zu Stahl in Primärstrukturen
von Werkzeugmaschinen**

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



Einsatz von ultrahochfestem Beton als Alternative zu Stahl in Primärstrukturen von Werkzeugmaschinen

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Johann Georg Berger

aus Westhofen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Tag der Einreichung:	04. Oktober 2018
Tag der mündlichen Prüfung:	11. Dezember 2018

Darmstadt 2018

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Matthias Berger

**Einsatz von ultrahochfestem Beton als Alternative zu
Stahl in Primärstrukturen von Werkzeugmaschinen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 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., 2018

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 978-3-8440-6562-6

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Der Einsatz von alternativen Werkstoffen zu Stahl gewinnt, aufgrund des zunehmenden Preises von Stahl auf dem Weltmarkt, immer mehr an Gewicht. Aber nicht nur der Preis ist ein Aspekt für den zunehmenden Einsatz moderner Werkstoffe in Strukturkomponenten von Werkzeugmaschinen, auch die positiven Einflüsse auf die Maschinen- und Bearbeitungseigenschaften gelten als Treiber für die Anwendung dieser Materialien. Der Stand der Technik weist ein geringes Basiswissen in Bezug auf die Anwendung des in dieser Arbeit eingesetzten zementgebundenen Werkstoffs im Bereich der Werkzeugmaschinen auf.

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich genau mit diesem innovativen Thema der Anwendung von Betonen im Werkzeugmaschinenbau. Es wird die Einsatzfähigkeit von Ultra High Performance Concrete (UHPC) ohne Bewehrungen in der Primärstruktur einer Portalmaschine für die HSC-Bearbeitung von leicht zu zerspanenden Werkstoffen nachgewiesen. Die Arbeit leistet einen Beitrag den Wissensstand zur Anwendung von Zementbeton als Konstruktionswerkstoff in Werkzeugmaschinen erheblich zu erweitern. Insbesondere für die Gestaltung von Maschinengestellen und -betten ergeben sich hierdurch über den aktuellen Stand der Technik hinausgehende Möglichkeiten in der Anwendung von alternativen Werkstoffen zu Stahl. Die durch den Einsatz des UHPC als Konstruktionswerkstoff für Strukturbauteile einer Werkzeugmaschine erzielten Verbesserungen der Bearbeitungseigenschaften werden systematisch durch simulative und experimentelle Untersuchungen analysiert und bewertet. Die fehlende Kenntnis über die Anwendung und den werkstoffgerechten Einsatz moderner Materialien wie Betone oder Faserkunststoff Verbunde stellt oftmals ein Hindernis für den verbreiteten Einsatz der Werkstoffe in Werkzeugmaschinen dar. Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Einsatz von UHPC als Alternative zu Stahl in der Traverse einer HSC-Portalmaschine und die positive Beeinflussung der Maschinencharakteristik durch den Werkstoff aufgezeigt werden. Darüber hinaus resultieren aufgrund der Urformbarkeit von Betonen neue Gestaltungs- und Integrationsmöglichkeiten, welche mit Stahl nicht realisierbar sind.

Die Arbeit ist die erste Veröffentlichung zum Einsatz von zementgebundenem Beton in Primärstrukturen von Werkzeugmaschinen in der Schriftenreihe des PTW „Innovation Fertigungstechnik“ und bildet somit den Grundstein für zukünftige Arbeiten am PTW auf diesem Gebiet.

Vorwort des Verfassers

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit und das mir entgegen gebrachte Vertrauen. Insbesondere die fachlichen Diskussionen und umfangreiche Unterstützung während meiner gesamten Institutszeit habe ich sehr geschätzt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider danke ich für die Übernahme des Koreferats und für die konstruktiven Diskussionen während der Erstellung meiner Dissertationsschrift.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am PTW, die mich in meiner Zeit am PTW begleitet haben, möchte ich mich ebenfalls bedanken. Es war eine Zeit voller positiver Erinnerungen für mich, auf die ich gerne zurückblicke. Allen voran möchte ich mich bei meinem ehemaligen Bürokollegen und guten Freund Sebastian Schmidt für die gemeinsame Zeit am PTW und die zahlreichen schönen Momente bedanken. Ich danke auch meiner Fahrgemeinschaft und guten Freunden Dr.-Ing. Stefan Seifermann und Stefan Mischliwski für die wertvolle gemeinsame Zeit. Dr.-Ing. Dennis Korff und Dr.-Ing. Arno Wörn danke ich für die freundschaftliche Unterstützung und die kritische Diskussion meiner Arbeit. Mein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Robert Rost, Herrn Götz Görisch und dem Team der DATRON AG für die Zusammenarbeit im Rahmen des Dynasource II Projekts.

Mein Dank gilt ebenso dem engagierten Team der Werkstatt und dem gesamten Support am PTW, die mich während meiner Zeit am Institut und darüber hinaus unterstützt haben. Ebenso danke ich meinen Studenten Fares Ali, Tim Bergmann und Raphael Wissel für die tatkräftige Unterstützung und die langjährige Zusammenarbeit.

Von tiefstem Herzen danke ich meiner Familie. Ohne die Unterstützung und das Vertrauen meiner Eltern wäre diese Arbeit nicht entstanden, hierfür vielen Dank.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Michèle, die mich auf meinem Weg durch Ihre Liebe jederzeit unterstützt und motiviert hat.

Westhofen, im Februar 2019

Matthias Berger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis-----	I
Abbildungsverzeichnis-----	V
Tabellenverzeichnis-----	IX
Abkürzungen und Formelzeichen-----	XI
1 Einleitung-----	1
2 Problemstellung und Anforderungen-----	3
2.1 Problemstellung-----	3
2.2 Anforderungen-----	5
2.3 Aufbau der Arbeit-----	7
3 Grundlagen und Stand der Forschung-----	9
3.1 Werkzeugmaschinen-----	9
3.2 Werkstoffe und Materialien für Maschinengestelle und Komponenten----	12
3.2.1 Stahl und Grauguss als Konstruktionswerkstoff-----	15
3.2.2 Metallschaum und Sandwichplatten in technischen Anwendungen----	18
3.2.3 Faserkunststoffverbunde als Konstruktionswerkstoff-----	21
3.2.4 Hartgestein in technischen Anwendungen-----	26
3.2.5 Polymerharzgebundener Mineralguss als Konstruktionswerkstoff-----	29
3.2.6 Ultrahochfester Beton in technischen Anwendungen-----	32
3.3 Fertigung von Betonbauteilen-----	38
3.3.1 Formenbau-----	39
3.3.2 Besonderheiten der Herstellung von UHPC-----	40
3.3.3 Recyclingeigenschaften von Beton-----	42
3.4 Funktionsintegration und Bewehrung-----	43
3.4.1 Bewehrungen-----	43
3.4.2 Funktionsintegration-----	45
3.5 Fazit zu den Grundlagen und dem Stand der Forschung-----	47
4 Systematische Entwicklung einer Primärstruktur aus UHPC-----	51

4.1 Ableitung des Vorgehens für die Entwicklung einer Primärstruktur aus UHPC-----	52
4.2 Referenzsystem für die Entwicklung einer Primärstruktur aus UHPC-----	56
4.3 Zielsetzung dieser Arbeit anhand der Referenzmaschine-----	58
4.4 Anwendung der Entwicklungsmethode auf die Traverse aus UHPC -----	60
4.4.1 Innovations- und Informationsphase-----	61
4.4.2 Definition und experimentelle Ermittlung der Kennwerte-----	65
4.4.3 Konzeptionierung-----	73
5 Vorversuche und Definition der Kenngrößen -----	83
5.1 Analytische Ermittlung der Prozesskraft-----	83
5.2 Zerspankraftmessung -----	85
5.3 Ermittlung der Strukturnachgiebigkeit -----	90
5.4 Modalanalyse an der Versuchsmaschine-----	96
5.5 Fazit der Voruntersuchungen und Ableitung der Randbedingungen-----	100
6 Konzeptionierung der Traverse aus UHPC -----	101
6.1 Einfluss der Geometrie auf die Struktureigenschaften -----	101
6.2 Konstruktion der UHPC-Traverse -----	104
6.3 FE-Analyse und Vergleich der Traversen aus UHPC und Stahl-----	107
6.4 Aufbau des Prototyps aus UHPC-----	112
6.4.1 Erstellen der Gussform und Abguss der UHPC-Traverse -----	112
6.4.2 Implementierung der Traverse in die Referenzmaschine-----	115
7 Validierung am Prototyp -----	117
7.1 Vergleich der Strukturnachgiebigkeit der Varianten aus UHPC und Stahl -----	117
7.2 Vergleich der Zerspankraft und des Schwingungsverhaltens -----	120
7.3 Vergleich der dynamischen Steifigkeit des Stahl und UHPC-Portals-----	123
7.4 Fazit - Eignung von UHPC in dynamisch angeregten Maschinenkomponenten -----	126
8 Zusammenfassung und Ausblick-----	129
Literaturverzeichnis-----	133

Studentische Arbeiten -----	149
Lebenslauf des Autors -----	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Anforderungen an das Werkstoffverhalten im Bauingenieurwesen und dem Maschinenbau [SAGM12]	6
Abbildung 2 - Vorgehensweise für die Erstellung einer Primärstruktur aus UHPC.....	7
Abbildung 3 - Auszug aus der DIN8580 zur Einteilung der Hauptgruppen in den Fertigungsverfahren	9
Abbildung 4 - Einordnung der Fräsmaschine anhand der DIN 8580 nach Hirsch.....	10
Abbildung 5 - Bauformen von Fräsmaschinen und Substitutionspotentiale nach Ahlers	12
Abbildung 6 - Einteilung technischer Werkstoffe [ARNO13]	13
Abbildung 7 - Werkstoffvergleich anhand der spezifischen Dichte nach Arnold [ARNO13].....	15
Abbildung 8 - Maschinenbetten aus Grauguss [BETZ18, GILD18]	16
Abbildung 9 - Schweißkonstruktionen aus Stahl	17
Abbildung 10 - Beispiel für einen Stahl-Mineralguss-Verbund	18
Abbildung 11 - Beispiele für Metallschäume für technische Anwendungen	18
Abbildung 12 - Aluminiumschaum Sandwich.....	19
Abbildung 13 - Beispiel für das APM Verfahren	20
Abbildung 14 - Technische Anwendung von Aluminiumschaum.....	21
Abbildung 15 - x-Achse in Sandwichbauweise mit Stahl-Waben Struktur [DENK04].....	21
Abbildung 16 - REM-Darstellung der gebräuchlichsten Faserarten nach Schürmann [SCHU07].....	22
Abbildung 17 - Fasergewebe Glas (a), Aramid (b) und Carbon (c) zur Herstellung von Halbzeugen.....	23
Abbildung 18 - Gewebekonstruktionen nach [SCHU07]	23
Abbildung 19 - Leiterseil mit CFK-Seele	25
Abbildung 20 - Beispiele für Maschinenachsen aus CFK	25
Abbildung 21 - Federn und Gehäuse aus CFK in der Prothetik	26
Abbildung 22 - Anwendung von CFK und GFK	26
Abbildung 23 - Hartgesteinsarten für technische Anwendungen nach Jackisch	27
Abbildung 24 - Fügetechnik für Hartgestein	28

Abbildung 25 - Beispiele für den technischen Einsatz von Hartgestein	28
Abbildung 26 - Bestandteile Mineralguss	29
Abbildung 27 - Duschwanne und Waschtisch aus Mineralguss.....	31
Abbildung 28 - Fassadensysteme aus Mineralguss	32
Abbildung 29 - Maschinenbetten aus Mineralguss.....	32
Abbildung 30 - Bestandteile UHPC.....	34
Abbildung 31 - Vergleich der Packungsdicht Normalbeton und UHPC [KASS06]	34
Abbildung 32 - Werkstoffverhalten von UHPC [FEHL07]	35
Abbildung 33 - Parapolspiegel und filigrane Strukturen aus UHPC	37
Abbildung 34 - Anwendungen von UHPC aus dem Bauwesen	37
Abbildung 35 - Beispiele für den Einsatz von UHPC in Werkzeugmaschinen ..	38
Abbildung 36 - Gussformen für Mineralguss und UHPC	39
Abbildung 37 - UHPC Frischbeton	40
Abbildung 38 - Recycling von Beton	43
Abbildung 39 - Beispiel für Stahlfaserbeton	44
Abbildung 40 - Abstandshalter für die Bewehrung im Beton	45
Abbildung 41 - Funktionsintegration nach [DIZD15].....	46
Abbildung 42 - Gewindeanker E001 von Rampf	46
Abbildung 43 - Bewertungsmatrix zu den Konstruktionswerkstoffen.....	48
Abbildung 44 - Vergleich des Bruchverhaltens von Normalbeton und UHPC [ZILC06].....	50
Abbildung 45 - Ansatz des Design Thinking nach Kelly, Winograd, Leifer	52
Abbildung 46 - 5 Phasen des Design Thinking nach [MEIN11].....	53
Abbildung 47 - Entwicklungsprozess nach VDI - Richtlinie und Korff [VDI2221; VDI2222; KORF16]	54
Abbildung 48 - Die Referenzmaschine / Versuchsmaschine	57
Abbildung 49 - Querschnitt der Stahltraverse mit Schottblechen	59
Abbildung 50 - Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung	61
Abbildung 51 - Beurteilungsschema nach Bohn und Birkhofer.....	64
Abbildung 52–Beispiel für eine Stabilitätskarte.....	67
Abbildung 53 - Einflüsse auf die Prozessstabilität [ABEL16a]	67
Abbildung 54 - Beschädigtes Werkstück in Folge eines instabilen Bearbeitungsprozesses.....	68
Abbildung 55: Dynamisches Ersatzmodell der Referenzmaschine M10 Pro.....	69
Abbildung 56 - Übertragungsfrequenzgang für einen Einmassenschwinger	70
Abbildung 57 - Übertragungsfrequenzgang eines komplexeren Systems	71

Abbildung 58 - Aufbau der Steifigkeitsmessung	72
Abbildung 59 - Systemtechnische Betrachtung nach Haberhauer [HABE11]	73
Abbildung 60 - Reduktion der Traverse auf einen Biegebalken.....	74
Abbildung 61 - Betrachteter Querschnitt zur Ermittlung des Flächenträgheitsmoments	75
Abbildung 62 - Vergleich des Flächenträgheitsmoments bezogen auf die Querschnittsgeometrie des Stahlportals [WECK06]	77
Abbildung 63 - Freikörperbild zur Bestimmung der Krümmung und Verdrehung	77
Abbildung 64 - Vergleich der Torsions- und Biegesteifigkeit für unterschiedliche Querschnitte [WECK06].....	78
Abbildung 65 - Vergleich des Flächenträgheitsmoments von Rohrprofilen	79
Abbildung 66 - Morphologischer Kasten für die Teilfunktion der Traversengeometrie.....	80
Abbildung 67 - Punktbewertungsskala nach VDI-Richtlinie	81
Abbildung 68 - Versuchsmatrix und Musterstabilitätskarte	86
Abbildung 69 - Versuchsaufbau zur Zerspankraftmessung	86
Abbildung 70 - Dreiachsiges Kraftsignal einer Fräsbahn aus den Vorversuchen	87
Abbildung 71 - FFT zu Kraftsignalen zur Bewertung der Prozessstabilität.....	88
Abbildung 72 - Vergleich der Stabilitätskarten des Stahlportals.....	89
Abbildung 73–Versuchsaufbau zur Ermittlung der statischen Steifigkeit.....	91
Abbildung 74 - Aufbau der Steifigkeitsmessung am Stahlportal	92
Abbildung 75 - Weg-Kraft-Diagramm der Steifigkeitsuntersuchung	92
Abbildung 76 - Gesamtergebnis der Steifigkeitsuntersuchung in y-Richtung	93
Abbildung 77 - Messaufbau zur Erfassung der Parallelverschiebung	94
Abbildung 78 - Gesamtergebnis der Parallelverschiebung.....	95
Abbildung 79 - Aufbau zur Modalanalyse.....	96
Abbildung 80 - Modell zur Modalanalyse	97
Abbildung 81 - Frequenzgang am TCP	98
Abbildung 82 - Eigenmode bei 222,7 Hz	99
Abbildung 83 - CAD-Modell der Stahl-Traverse ohne Verkleidungen.....	105
Abbildung 84 - CAD-Modell der UHPC-Traverse.....	105
Abbildung 85 - CAD-Modell der UHPC-Traverse ohne Verkleidungen	106
Abbildung 86 - Modell der Traverse aus UHPC für die FE-Analyse.....	107
Abbildung 87 - Ergebnis der Gesamtverformung der UHPC-Traverse.....	108
Abbildung 88 - Ergebnis der Gesamtverformung der Stahl-Traverse	109

Abbildung 89 - Vergleich der Gesamtverformung zwischen UHPC und Stahl	110
Abbildung 90 - Ergebnis der Normalspannungsanalyse	111
Abbildung 91 - Auswertung der Normalspannungen an der oberen Portalkante	112
Abbildung 92 - Gussform aus Holz für die UHPC Traverse.....	113
Abbildung 93 - Ausgeformte Traverse aus UHPC	114
Abbildung 94 - Traverse aus UHPC nach der Nachbearbeitung	114
Abbildung 95 - Zurückgebaute Stahltraverse	115
Abbildung 96 - Aufbau des Maschinenportals aus UHPC	116
Abbildung 97 - Umgerüstete Maschine mit Traverse aus UHPC.....	116
Abbildung 98 - Vergleich der Steifigkeitsuntersuchung in y-Richtung mit der Simulation	117
Abbildung 99 - Vergleich der Traversenverformung zwischen Simulation und Messung	118
Abbildung 100 - Stabilitätskarten für das UHPC-Portal	120
Abbildung 101 - Ausprägung der Bearbeitungsinstabilität	121
Abbildung 102 - Vergleich der Stabilitätskarten UHPC und Stahl	122
Abbildung 103 - Verschiebung der Eigenfrequenz durch die neue Struktur aus UHPC	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Werkstoffeigenschaften und Kennwerte.....	14
Tabelle 2 - Werkstoffkennzahlen für Grauguss	16
Tabelle 3 - Werkstoffkennzahlen für Baustahl	17
Tabelle 4 - Werkstoffkennzahlen für Aluminiumschau.....	20
Tabelle 5 - Werkstoffkennzahlen für CFK Halbzeuge	24
Tabelle 6 - Werkstoffkennzahlen für Hartgestein.....	28
Tabelle 7 - Werkstoffkennzahlen für Mineralguss	31
Tabelle 8 - Werkstoffkennzahlen für UHPC.....	36
Tabelle 9 - Auswahlmatrix für Entwicklungsmethoden	52
Tabelle 10 - Anforderungsliste für die Realisierung der UHPC Traverse.....	62
Tabelle 11 - Kennwerte für den Vergleich der Strukturen.....	66
Tabelle 12 - Gewichtungsfaktoren.....	81
Tabelle 13 - Parameter zur Zerspankraftberechnung	84
Tabelle 14 - Resultat der Steifigkeitsuntersuchung am Stahlportal.....	95
Tabelle 15 - Ergebnistabelle zu den Eigenfrequenzen.....	99
Tabelle 16 - Vergleich der Flächenträgheitsmomente und der Querschnittsfläche.....	102
Tabelle 17 - Vergleich der Masse zwischen der Traverse aus Stahl und UHPC	103
Tabelle 18 - Vergleich der Dehn- und Federsteifigkeiten.....	103
Tabelle 19 - Vergleich der Simulation und der experimentellen Messungen am Stahlportal	110
Tabelle 20 - Resultat der Steifigkeitsuntersuchung in y-Richtung am UHPC-Portal	119
Tabelle 21 - Ergebnis der Modalanalyse an der Traverse aus UHPC.....	123
Tabelle 22 - Vergleich der ermittelten Eigenfrequenzen und Moden.....	124

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AFS	Aluminum Foam Sandwich
Ag	Silber
Al	Aluminium
APM	Advanced Pore Morphology
BVMed	Bundesverband Medizintechnologie
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
C-Fasern	Kohlenstofffasern in FKV
CFK	Carbon Faser verstärkter Kunststoff
Cu	Kupfer
CuZn	Messing
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
Dgl.	Differentialgleichung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOF	Degree of Freedom
EN	Europäische Normen
FE ₃ C	Zementit – eine Form von Kohlenstoffvorkommen
FKV	Faserkunststoffverbunde
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HPC	High Performance Concrete / Hochfeste Betone
HWWI	Hamburgischen Weltwirtschaftsinstituts
KGt	Kugelgewindetrieb
KMP	Kraftmessplattform
MMS	Minimalmengenschmierung
MSV	Mehrschichten-Verband
NWA	Nutzwertanalyse
OLED	Organic Light Emitting Diode
PE	Polyethylen (C ₂ H ₄) _n , Thermoplast
PKW	Personenkraftwagen

PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
PVC	Polyvinylchlorid (C_2H_3Cl) _n , Thermoplast
REM	Rasterelektronenmikroskop
SPP	Schwerpunktprogramm
TCP	Tool Center Point
TiH ₂	Titandihydrid
TIPS	Theory of Inventive Problem Solving
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens (russisches Akronym)
UHPC	Ultra High Performance Concrete / Ultrahochfeste Betone
VDI	Verein Deutscher Ingenieure / Richtlinien
w/b-Wert	Wasser / Bindemittel-Wert
WifOR	Wirtschaftsforschungsinstituts
Zn	Zink

Formelzeichen

A	Flächeninhalt in m ² oder mm ²
a _p	axiale Zustellung oder Schnitttiefe in mm
a _c	radiale Zustellung oder Schnittbreite in mm
b	Angabe der Bauteilbreite in mm
c	spezifische Wärmekapazität in J/kgK
d	Durchmesser [mm]
D	Dämpfungskonstante in kg/s, dimensionslos erfolgt die Angabe in %
E	Elastizitätsmodul oder Young's Modulus in N/mm ²
F	Frequenz in Hz
F _(t)	Anregung mit einer Kraft über eine bestimmte Dauer t
f _i	Last die auf ein System wirkt (Kraft, Druck, Moment, ...)
f _z	Vorschub pro Zahn in mm/Zahn
H _i	Nachgiebigkeitsmatrix
h	Angabe der Bauteilhöhe in mm
I _y	Flächenträgheitsmoment in mm ⁴
k	Federkonstante in N/m

K	Steifigkeitsmatrix
l	Länge
Δl	Längenänderung
M	Drehmoment in Newtonmeter in Nm
m	Masse in kg
N	Newton in N
n	Drehzahl in 1/min
p	Einheit für Druck abgeleitet von der SI-Einheit 1 Pa = 1 N/m ²
q _i	Antwort eines Systems auf eine Anregung durch eine Last f _i
R _m	Zugfestigkeit in N/mm ²
t	Wandstärke des Profils in mm
u _(t)	Erregerfunktion über die Zeit T
\hat{u}	Amplitude der Erregerfunktion
V _c	Schnittgeschwindigkeit in m/min
V _f	Vorschubgeschwindigkeit in m/min
W	Widerstandsmoment in mm ³
z	Anzahl der Schneiden/Zähne eines Werkzeugs, einheitenlos
π	Kreiszahl, einheitenlos
α	Wärmeausdehnungskoeffizient in K ⁻¹
β	Nullphasenwinkel
δ	Nachgiebigkeit in mm/N
ε_e	Dehnung, dimensionslos die Angabe erfolgt in %
κ	Wärmeleitfähigkeit in W/mK oder Einstellwinkel des Schneidkeils
Ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenfrequenz
σ_i	Normalspannung in Koordinatenrichtung in [N/m ²]
τ_i	Schubspannung in Koordinatenrichtung in [N/m ²]
ρ	Dichte in g/cm ³