



**Berichte aus dem
Institut für Fertigungstechnik
und Qualitätssicherung
Magdeburg**

**Inverses Spanungsverhältnis –
eine neue Strategie für das Planfräsen**

Dmytro Borysenko



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

Inverses Spanungsverhältnis – eine neue Strategie für das Planfräsen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. M.Eng. Dmytro Borysenko
geb. am 04.11.1992 in Mykolajiw, Ukraine

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski
Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Prof. h.c. János Kundrák

Promotionskolloquium am 30.04.2020

Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung Magdeburg

Band 47

Dmytro Borysenko

**Inverses Spanungsverhältnis –
eine neue Strategie für das Planfräsen**

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.: Magdeburg, 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 978-3-8440-7431-4

ISSN 1863-0936

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

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Ohne die Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt, ohne die Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und des Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) hätte diese Arbeit nicht geschrieben werden können. Für die geleistete Unterstützung meiner Anstrengungen und Ideen möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski, der die bestmöglichen Bedingungen für die Entstehung dieser Arbeit geschaffen hat und für mich als Vorbild eines modernen hochgradigen Wissenschaftlers gilt.

Für die Übernahme des Korreferats, seine behutsame Durchsicht und fachlichen Hinweise möchte ich Herrn Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Prof. h.c. János Kundrák aus dem Institute of Manufacturing Science der Universität Miskolc in Ungarn danken.

Für seine fachlichen und persönlichen Ratschläge während meiner Zeit am IFQ gilt mein herzlichster Dank Herrn Dr.-Ing. Dr. h.c. Thomas Emmer. Ohne seine Unterstützung wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Ebenso danke ich der ehemaligen Gesamtkoordinatorin der gemeinsamen deutsch-ukrainischen Fakultät für Maschinenbau, Frau Prof. Dr.-Ing. Limara Dübner, die mein Studium in Magdeburg arrangiert hat.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am IFQ möchte ich mich für eine produktive und konstruktive Zusammenarbeit sowie schöpferische Atmosphäre bedanken. Weiterhin sei den Kolleginnen und Kollegen aus dem Institute of Manufacturing Science der Universität Miskolc für die Kooperation in zahlreichen Projekten gedankt.

Schließlich danke ich meiner Familie, meinen Freunden und meiner Lebenspartnerin für ihre Unterstützung und insbesondere meinem Opa, Herrn Perto Doroschovych Geraimovych, der mich für die Promotion inspiriert hat.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit fokussiert auf aktuelle Fragenstellungen der Metallzerspanung mittels Planfräsens (Stirnfräsen). Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht das Spanungsverhältnis b/h (Spanungsbreite b , Spanungsdicke h) mit der Zielsetzung einer Erhöhung der Prozessstabilität und Oberflächenqualität, verbunden mit der Erhaltung oder Steigerung der Produktivität beim Planfräsen. Wird eine Strategie zur Verringerung des Spanungsverhältnisses bis zu $b/h < 1$ verfolgt, kehren sich viele Spanungskenngrößen und Wirkmechanismen um, sodass die Dynamik des Zerspanprozesses positiv beeinflusst wird.

Dementsprechend behandelt die Arbeit als Schwerpunkte grundlegende Untersuchungen zum Einfluss des geringeren Spanungsverhältnisses auf die resultierenden Prozesskräfte, die Werkzeugauslenkung und das Temperaturverhalten beim Fräsen sowie eine praxisrelevante Werkzeug- und Prozessgestaltung. Die wichtigsten Bestandteile der theoretischen Ausführungen umfassen die Entwicklung der Prozesskraft-, Werkzeugauslenkungs- und Eigenspannungsmodelle sowie die Gestaltung von 3D FEM-basierten Modellen zur Simulation des Stirnfräsens. Die Basis hierfür liefern die Ergebnisse detaillierter Untersuchungen zur Schnittaufteilung und Spiralanordnung der Schneiden, zur Erweiterung des Kraftmodells nach Kienzle, zur Gestaltung der Makrogeometrie der Schneide sowie Untersuchungen zum Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Oberflächenbeschaffenheit unter den Bedingungen eines geringeren Spanungsverhältnisses $b/h < 1$. Über die Kombination von geringeren Spanungsverhältnissen mit dem High Speed Cutting sollen deutliche Effekte für die Fräsbearbeitung von Planflächen in Bezug auf die erzeugbare Oberflächenqualität und Produktivität erreicht werden.

Abstract

The thesis focuses on current questions of metal cutting in face milling. A reduction of the cutting ratio b/h (chip width b to chip thickness h) contributes to an increase in process stability and surface quality, combined with the maintenance or increase in productivity in face milling. If the strategy of a low cutting ratio is realized down to $b/h < 1$, many cutting parameters and mechanisms are inverted. As a result, the cutting process is stabilized.

The thesis contains topics from basic investigations of the effect of a low cutting ratio on process forces, tool deflection and process temperature in milling, which are leading to practical issues of process and tool design. The main milestones are the development of prediction models for process forces, tool deflection and residual stress, 3D FEM simulation models for face milling, investigations on stepped cutting and helical positioning of the cutting edges, extension of the Kienzle force model, design of macro tool geometry, as well as investigation of cutting speed influence on surface integrity at low cutting ratios. Finally, the combination of low cutting ratios and high speed cutting is intended to significantly optimize the face milling process in terms of surface integrity and productivity.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	VI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Konventionelles Planfräsen	3
2.2 High Feed Milling (HFM)	6
2.3 High Speed Cutting beim Planfräsen	7
2.4 Axiale und Radiale Schnittaufteilung	9
2.5 Begriff „inverse Spannungstechnologie“ und Grundprinzip	12
2.6 Zerspankraftmodelle und FEM Simulation	15
3 Zielstellung	22
4 Instrumentarium und Methoden.....	24
4.1 Versuchsmaschinen	24
4.2 Untersuchte Werkstoffe	25
4.3 Methode der Werkzeugentwicklung und Versuchswerkzeuge	26
4.3.1 Methode der Werkzeugentwicklung	26
4.3.2 Versuchswerkzeuge und -wendeschneidplatten	28
4.4 Versuchsstände.....	32
4.4.1 Versuchsaufbau für die Erfassung der Kraftkomponenten und Auslenkungen beim Fräsen.....	32
4.4.2 Versuchsaufbau für die Erfassung der Kraftkomponenten beim Drehen	33
4.4.3 Versuchsaufbau für die Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Fräsen	34
4.4.4 Versuchsaufbau für die Temperaturmessung beim Fräsen	35

4.5	Messtechnik	36
4.6	Methoden der Versuchsplanung.....	38
4.7	Eigener Beitrag zur Ermittlung und Berechnung von Kraftwirkungen beim Fräsen.....	39
4.8	Aufschlagbedingungen der Schneide und Stoßfaktors p	42
4.9	FEM-Simulationsmodell	43
5	Kräfte.....	48
5.1	Einfluss eines inversen Spanungsverhältnisses auf die Kraftkomponenten beim Planfräsen	48
5.2	Axialbelastung der Spindel.....	53
5.3	Physikalische Ursachen des Zerspankraftabfalls	54
5.4	Erweiterung des Kraftmodells nach Victor und Kienzle	58
5.5	Kraftmodell für das Planfräsen	63
5.6	Aufschlagbedingungen bei inverser Spanbildung.....	69
6	Spanbildung, Werkzeuggeometrie und Verschleiß.....	71
6.1	Spanbildung und Spanfluss bei inversem Spanungsverhältnis: Simulation und Realität.....	71
6.2	Einfluss der Schneidengeometrie auf die Prozesskenn- und Wirkgrößen bei einer inversen Spanbildung.....	75
6.2.1	Einfluss des Seitenspanwinkels γ_f auf die Prozesskenn- und Wirkgrößen.....	76
6.2.2	Einfluss des Rückspanwinkels γ_p auf die Prozess- und Wirkgrößen... ..	81
6.3	Verschleißverhalten und Verschleißmodell für die inverse Zerspanung.....	85
7	Werkstückoberfläche	89
7.1	Oberflächenqualität bei inverser Spanbildung.....	89
7.1.1	Modelle zur Vorhersage der Oberflächenqualität	90
7.1.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Oberflächenqualität.....	95
7.2	Ausbildung der Randzoneneigenschaften bei inverser Spanbildung.....	96
7.2.1	Einfluss des Vorschubes auf die Randzoneneigenschaften.....	96

7.2.2	Einfluss eines Kühlschmierstoffs auf die Randzoneneigenschaften....	99
7.2.3	Erklärungsmodell zur Eigenspannungsbildung beim Planfräsen.....	100
8	Praxisrelevante Anwendungen	105
8.1	Inverse Spanungstechnologie und High Speed Cutting	105
8.2	Schnittaufteilung bei inverser Spanbildung	108
8.2.1	Axiale Schnittaufteilung bei inverser Spanbildung.....	108
8.2.2	Kombinierte Schnittaufteilung – Spiralanordnung der Schneiden bei inverser Spanbildung.....	109
8.3	Empfehlungen für die Werkzeug- und Prozessgestaltung für die Umsetzung einer inversen Spanungstechnologie	112
9	Zusammenfassung	114
10	Ausblick	118
11	Literaturverzeichnis.....	119
Anhang A.....		132
Anhang B.....		133

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Spanungsquerschnitt	mm ²
a	Windungsabstand einer Spirale	mm
a _e	Arbeitseingriff	mm
a _p	Schnitttiefe	mm
b	Spanungsbreite	mm
b'	Spanbreite	mm
b _n	Fasenbreite einer Schneidkante	mm
b/h	Spanungsverhältnis	-
c	Schnitthöhe	μm
c _a	axiale Steifigkeit	μm/N
c _r	radiale Steifigkeit	μm/N
D	Werkzeugdurchmesser	mm
e _c	spezifische Schnittenergie	J/mm ³
F _a	Aktivkraft	N
F _c	Schnittkraft	N
F _{cN}	Schnittnormalkraft	N
F _D	Drangkraft	N
F _f	Vorschubkraft	N
F _{fN}	Vorschubnormalkraft	N
F _N	Normalkraft	N
F _p	Passivkraft	N
F _R	Reibungskraft	N
F _x	Kraft in X Richtung	N
F _y	Kraft in Y Richtung	N
F _z	Kraft in Z Richtung	N
F _Z	Zerspankraft	N
F _{Σc}	Gesamtschnittkraft beim Mehrzahneingriff	N
F _{ΣcN}	Gesamtschnittnormalkraft beim Mehrzahneingriff	N
F _{Σp}	Gesamtpassivkraft beim Mehrzahneingriff	N
f _s	Abtastfrequenz pro Sekunde	Hz
f _u	Abtastfrequenz pro Werkzeugumdrehung	Hz

f_{um}	Umdrehungsvorschub	mm/U
f_z	Zahnvorschub	mm/Zahn
h	Spanungsdicke	mm
h_m	mittlere Spanungsdicke	mm
h'	Spandicke	mm
$K_{b/h (c)}$	Spanungsverhältnis-Korrekturfaktor für spezifische Schnittkraft	-
$K_{b/h (f)}$	Spanungsverhältnis-Korrekturfaktor für spezifische Vorschubkraft	-
$K_{b/h (p)}$	Spanungsverhältnis-Korrekturfaktor für spezifische Passivkraft	-
K_f	Werkstückform-Korrekturfaktor	-
K_{ks}	Kühlschmierung-Korrekturfaktor	-
K_v	Schnittgeschwindigkeit-Korrekturfaktor	-
K_{ws}	Schneidstoff-Korrekturfaktor	-
K_{wv}	Werkzeugverschleiß-Korrekturfaktor	-
K_γ	Spanwinkel-Korrekturfaktor	-
k_c	spezifische Schnittkraft	N/mm ²
k_{cN}	spezifische Schnittnormalkraft	N/mm ²
k_f	spezifische Vorschubkraft	N/mm ²
k_p	spezifische Passivkraft	N/mm ²
L_f	Standweg	m
l_a	Werkzeugauskraglänge	mm
l_w	Länge der Nebenschneide	mm
m_c	Spanungsdickenexponent der spezifischen Schnittkraft	-
m_{cN}	Spanungsdickenexponent der spezifischen Schnittnormalkraft	-
m_p	Spanungsdickenexponent der spezifischen Passivkraft	-
n	Drehzahl pro Minute	min ⁻¹
n_s	Drehzahl pro Sekunde	s ⁻¹
P_A	Flächenleistung	mm ² /min
P_c	Schnittleistung	W

p	Stoßfaktor	N/ms
Q	Zeitspanvolumen	cm ³ /min
Ra	arithmetischer Mittenrauwert	µm
Rmr	Materialanteil in einer bestimmten Tiefe	µm
Rt	maximale Rautiefe	µm
Rz	gemittelte Rautiefe	µm
r _β	Schneidkantenradius	µm
r _ε	Schneidenradius	mm
r _{ε'}	Radius der Nebenschneide	mm
S	Gesamtwerkzeugauslenkung	µm
s	Standardabweichung der Stichprobe	-
T	Standzeit	min
T _{co}	Temperatur der Spanaußenseite	°C
v _c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v _f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
v _{sp}	Spangeschwindigkeit	m/min
VB	Verschleißmarkenbreite	µm
W _c	Schnittarbeit	W·s
\bar{x}	Arithmetisches Mittelwert	-
Z	Zähnezahl	-
Z _E	Zähne im Eingriff	-
α	Freiwinkel	°
β _s	Drehwinkel der Werkzeugmaschinen spindle	°
γ	Spanwinkel	°
γ _b	Fasenwinkel einer Schneidkantenfase	°
γ _f	Werkzeug-Seitenspanwinkel	°
γ _o	Spanwinkel in der Orthogonalebene	°
γ _p	Werkzeug-Rückspanwinkel	°
κ _r	Werkzeug-Einstellwinkel	°
κ _{r'}	Werkzeug-Einstellwinkel der Nebenschneide	°
λ _h	Spandickenstauchung	-
μ _{sp}	Spanflächenreibwert	-
π	Kreiszahl	-
σ _{II}	Normaleigenspannung in Vorschubrichtung	MPa

σ_{45}	Normaleigenspannung unter 45° zur Vorschubrichtung	MPa
σ_{\perp}	Normaleigenspannung in Quervorschubrichtung	MPa
$\sigma_{v,M}$	Mises-Vergleichsspannung	MPa
τ	Teilung der Schneiden	°
Φ	Scherwinkel	°
φ	Eingriffswinkel der Schneide	°
φ_A	Austrittswinkel der Schneide	°
φ_E	Eintrittswinkel der Schneide	°
φ_s	Schnittbogenwinkel	°

Abkürzung**Bedeutung**

CAD	computer-aided design
CAM	computer-aided manufacturing
FEM	Finite-Elemente-Methode
HEC	High End Cutting
HM	Hartmetall
HFM	High Feed Milling
HFC	High Feed Cutting
HPC	High Performance Cutting
HSC	High Speed Cutting
KSS	Kühlschmierstoff
PVD	Physical Vapor Deposition (Beschichtung)
SM	Spannmittel
WZ	Werkzeug
WZM	Werkzeugmaschine
WST	Werkstück
WSP	Wendeschnidplatte