

Signaltechnische Voraussetzungen und Analyseverfahren zur Überwachung von Präzisions- und Ultrapräzisionsbearbeitungsverfahren

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Christoph Schäfer

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Manfred Weck

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 2013

Berichte aus der Produktionstechnik

Christoph Schäfer

**Signaltechnische Voraussetzungen und
Analyseverfahren zur Überwachung von Präzisions-
und Ultrapräzisionsbearbeitungsverfahren**

Herausgeber:

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. F. Klocke

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. T. Pfeifer

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. E. h. M. Weck

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt

Band 2/2013
Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2013)

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2286-5

ISSN 0943-1756

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

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie – Fraunhofer IPT in Aachen.

Sie wurde von Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Brecher, Direktor des Fraunhofer IPT und Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, und von Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Manfred Weck angeregt und gefördert. Durch die eingehende und aufmerksame Durchsicht dieser Arbeit entstanden sehr wertvolle Anregungen. Beiden Herren möchte ich daher an erster Stelle für Ihre Unterstützung und die Förderung meiner Arbeit danken.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. (UA) Dieter Weichert für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Besonderer Dank gilt auch den Herren Prof. Dr.-Ing. Sven Carsten Lange und Dr.-Ing. Christian Wenzel, die mir in ihren Zeiten als Oberingenieure am Fraunhofer IPT die Durchführung meiner Projekte ermöglichten und mir bei organisatorischen Fragen mit Rat zur Seite standen.

Zahlreiche Kollegen, studentische Mitarbeiter sowie Studien- und Diplomarbeiter von Fraunhofer IPT und WZL haben mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt. Ihnen allen danke ich herzlich für ihr Interesse am Thema und die angenehme Zusammenarbeit. Speziell erwähnen möchte ich an dieser Stelle Herrn Andreas Merz für seinen Arbeitseinsatz, seine Kreativität und seine Zuverlässigkeit.

Für ihre wertvollen Anregungen, kreativen Diskussionen und schnellen Hilfen in technischen Dingen besonders verbunden bin ich den Herren Theo Hamacher, Lutz Beegen, Norbert Schatzschneider und Ralf Weber. Meine Wertschätzung gilt weiterhin den Herren Jürgen Gensicke und Reinhard Charlier mit ihren Teams, die gleichfalls zügig und geduldig neue elektrotechnische bzw. mechanische Ideen prototypische Realität werden ließen.

Für das Lektorat meiner Arbeit danke ich meinen Schwiegereltern Herrn Dr. rer. nat. Frank Rother und Frau Almut Rother.

Ein großer Dank gebührt meinen Eltern und meiner Großmutter, die mir auf meinem Lebensweg stets fördernd zur Seite standen und somit meinen akademischen Werdegang überhaupt erst ermöglichten.

Schließlich und ganz besonders gilt mein Dank meiner Frau Kerstin und meinen Kindern Ricarda und Alexander, die mich in allen Phasen der Arbeit unterstützt und mit viel Geduld auf viele gemeinsame Stunden verzichtet haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
	Introduction and motivation	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Spanende Präzisions- (P) und Ultrapräzisions- (UP) Fertigungs- verfahren	8
2.1.1	Ultrapräzisionszerspanung: Definition und Abgrenzung	9
2.1.2	Technologische Anforderungen der Ultrapräzisionszerspanung ...	10
2.1.3	Fertigungstechnologien und Maschinenkonzepte	11
2.1.4	Mechanische Grundlagen der P-/UP-Zerspanung	12
2.2	Technologien konventioneller Prozessüberwachungsstrategien	13
2.2.1	Grundbegriffe, Aufgaben und Ziele der Prozessüberwachung	15
2.2.2	Funktionsweise klassischer Prozessüberwachungsmethoden	20
2.2.3	Anwendung klassischer Prozessüberwachungsmethoden	31
2.2.4	Erkennungs- und Überwachungsmethoden	33
2.2.5	Steuerungsintegrierte Zustandsüberwachung	36
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit	40
4	Sensorauslegung und Signalerfassung	44
4.1	Körperschallaufnahme	44
4.1.1	Betrachtung des Schallverhaltens in Festkörpern	44
4.1.2	Modellbildung zur Entstehung von Körperschall	53
4.1.3	Sensorauswahl und Charakterisierung des Wandlungsverhaltens	56
4.1.4	Leitfaden zur Applikation von Körperschallaufnehmern	61
4.2	Prozesskraftaufnahme	63
4.2.1	Konzept der Messeinrichtung	63
4.2.2	Theoretische Betrachtung des Wirkprinzips	64
4.2.3	Detailkonstruktion des mechatronischen Werkzeug- spannsystems	67
4.2.4	Messtechnische Charakterisierung des Prototyps	71
4.2.5	Zusammenfassung	76
5	Signalverarbeitung und Signalanalyse	78
5.1	Signaltheoretische Anforderungen und technische Randbedingungen	78
5.2	Signalanalyse und Algorithmik	78
5.2.1	Hüllkurventransformation	79
5.2.2	Spektraltransformation und Signalreduktion	82
5.2.3	Merkmalsreduktion und Signifikanzisolation	84
5.2.4	Signifikanzinterpretation und Korrelation zur Bearbeitungsqualität	87
5.3	Systemprototyp (UP-Control)	89
5.3.1	FPGA Architektur	90

5.3.2	Lastenheft und Hardwaredesign	91
5.3.3	Funktionskonzept der Systemplattform	94
5.3.4	Implementierung der Signalverarbeitung	95
5.3.5	User Interface und Anwendung	97
6	Anwendungsbeispiele zur Charakterisierung von P-/UP-Musterprozessen	99
6.1	Identifikation von Werkzeugverschleiß bei Präzisionsbearbeitungen mit kontinuierlichem Schnitt durch Körperschall	100
6.1.1	Werkzeugverschleißverhalten beim Einsatz an Inconel	101
6.1.2	Frequenzverhalten bei zunehmendem Werkzeugverschleiß im Bearbeitungseinsatz an Stahl 100Cr6	102
6.2	Identifikation von Werkzeugverschleiß und Prozessfortschritt bei UP-Drehbearbeitungen durch Prozesskraftanalyse	108
6.3	Überwachung dynamischer Schnittvorgänge bei UP-Bearbeitungen	114
6.3.1	Schnittverhalten und Prozessverlauf	115
6.3.2	Anschnitterkennung	116
6.3.3	Geometrie- & Schnitttiefenidentifikation	117
6.4	Identifikation von Verschleiß und abnormer Prozesszustände beim Präzisionsschleifen	119
6.4.1	Verschleißidentifikation bei der Schleifbearbeitung von Stirnflächen	119
6.4.2	Signifikanzisolation von Prozess- und Zustandsparametern beim Spitzenlos-Einsteichschleifen	123
6.5	Bewertung der Anwendungsergebnisse	127
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Conclusions and Outlook	132
8	Verzeichnisse und Quellenangaben	135
9	Lebenslauf	149

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula signs and abbreviations

Lateinische Großbuchstaben

A	-	Amplitude allg.
B	Nm	Biegesteife
B_s	-	Signifikanzband im Signalspektrum
D_{bin}	-	Binärer Schwellwert
\check{D}	-	Dilatation
\check{D}	m^3	Volumendilatation
E	kN/mm^2	Elastizitätsmodul
E_i	dB/S_i	Spektralbandbezogene akustische Energie
E_m	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$	Mechanische Energie
E_{th}	J	Thermische Energie
$F(\omega)$	V/Hz	Diskretes Amplitudendichtespektrum
F_c	N	Schnittkraft
F_p	N	Passivkraft
F_x, F_y, F_z	N	Kraftvektorkomponenten
F_v	N	Vorschubkraft
\overline{FFT}	-	Komplexes Kurzzeitspektrum
G	N/m^2	Schubmodul
H_{Fl}	s^{-1}	Flankenfrequenz
I	m^2	Flächenträgheitsmoment
K	N/m^2	Kompressionsmodul
P_c	W	Schnittleistung mechanisch
$R(\tau)$	-	Autokorrelationsfunktion
R_a	μm	Mittenrauhwert
$S(\omega)$	W/Hz	Leistungsdichtespektrum
S_0	-	Bezugsgröße
$S_{HO}(k)$	V	Zeitdiskrete obere Hüllkurve
$S_{HU}(k)$	V	Zeitdiskrete untere Hüllkurve
$S_H(k)$	V	Zeitdiskretes Hüllkurven-Differenzsignal
$S(k)$	V	Zeitdiskretes Quellensignal
T	$^{\circ}\text{C}$ oder K	Temperatur
T	s	Periodendauer
T	N/m^2	Spannungstensor

T_{Fl}	s	Flankenabstand
$U_{AM}(\omega)$	V/Hz	Spektraldichte des amplitudenmodulierten Signals
Z_T, Z_L	N s/m ³	Akustische Feldimpedanz im Festkörper (transversal, longitudinal)

Lateinische Kleinbuchstaben

a	m/s ²	Beschleunigung allg.
a	mm	Zustellung
a_R	-	Reflexionskoeffizient
a_T	-	Transmissionskoeffizient
b	m	Breite
c_R	m/s	Phasengeschwindigkeit
c_T, c_L, c_R, c_{Pl}	m/s	Wellengeschwindigkeit im Festkörper (transversal, longitudinal, Rayleigh-, Platten-)
d	mm	Durchmesser
d	mm	Plattendicke
e_c	J	Schnittenergie, spezifische
f_A	Hz	Abtastfrequenz
f	Hz	Frequenz, allgemeine
f_{gu}, f_{go}	Hz	Grenzfrequenzen, untere, obere
f_{nyq}	Hz	Nyquist-Frequenz
f_S	Hz	Schwebungsfrequenz
g	-	Zeitkontinuierliche, normierte Rechteckfunktion, allg.
h	m	Höhe
h	µm/N	Nachgiebigkeit
h_{Sp}	µm	Spandicke
h_c	µm	Spanungsdicke, Schnitttiefe
j	-	Imaginäre Zahl
k_{AM}	-	Modulationskonstante
$\underline{k}_T, \underline{k}_L$	-	Komplexe Wellenzahlen (transversal, longitudinal)
l	m	Länge allg.
m	kg	Masse
n	min ⁻¹	Drehzahl
n	-	Ganze Zahlen
p_S	N/m ²	Schalldruck
q	-	Datenblockgröße

r_Q	mm	Quellenabstand
r_W	mm	Bearbeitungsradius
r_S	mm	Schneidenspitzenradius
\bar{s}	m	Teilchenverschiebung
t	s	Zeit
t_P	s	Prozesszeit
\hat{u}	V	Max. Spannungsamplitude
$u_N(t)$	V	Zeitkontinuierliches Nutzsignal
$u(t)$	V	Zeitkontinuierliches Quellensignal
$u_C(t)$	V	Zeitkontinuierliches Trägersignal
$u_{AM}(t)$	V	Zeitkontinuierliches, amplitudenmoduliertes Signal
$u_C(t)$	V	Hochfrequenzträger
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_s	mm/min	Vorschub
v_{SS}	m/s	Schallschnelle
\bar{w}_F	mm	Verlagerung
z_F	mm	Kraglänge
z_{mess}	mm	Messposition

Griechische Buchstaben

α	°	Freiwinkel
α_{gT}, α_{gL}	°	Grenzwinkel für akustische Totalreflexion (transversal, longitudinal)
f_A	1/s	Abtastrate
ε_i	-	Dehnung
ρ	g/cm ³	Dichte
$\bar{\theta}$	°	Drehwinkel der Werkstückachse
σ_i	N/m ²	Druckspannung
$\omega_{(n)}$	-	Fensterfunktion
δ	-	Dirac-Funktion (Impulsfunktion)
σ	N/m ²	Mechanische Spannung
μ_Q	-	Poisson'sche Querkontraktionszahl
$\vec{\varphi}$	°	Rotationsvektor
ϕ	°	Scherwinkel
ρ_S	µm	Schneidkantenradius
γ	°	Spanwinkel

g_{Ho}, g_{Hu}	-	Spreizungsfaktoren
χ	°	Verformungswinkel
η		Verlustfaktor
$\lambda_T, \lambda_L, \lambda_R,$ λ_{Pl}	m	Wellenlänge im Festkörper (transversal, longitudinal, Rayleigh-)
$\Delta\tau_{Bl}$	s	Äquidistanter Blockabstand
τ	s	Zeitkonstante

Abkürzungen

Abbreviations

ADC	A nalog D igital C onverter
KA	K epstral- A nalyse
ASIC	A pplikation S pecific I ntegrated C ircuit
VHDL	V ery H igh S peed I ntegrated C ircuit H ardware D escription L anguage
IPC	I ntellectual P roperty C ore
IOB	I nput- O utput- B ox
DFT	D iskrete F ourier- T ransformation
DGZfP	D eutschen G esellschaft für Z erstörungsfreie P rüfung e.V.
DSP	D igitaler S ignal P rozessor
EF	E igen f requenz
EM	E igen m ode
EMV	E lektromagnetische V erträglichkeit
FEM	F inite E lemente M ethode
FFT	F ast- F ourier- T ransformation
FIR	F inite- I mpulse- R esponse Filter (Transversalfilter)
FPGA	F ield P rogrammable G ate A rrays
GUI	G rafical U ser I nterface
IIR	I nfinite- I mpulse- R esponse Filter (Rekursives Filter)
KB	K olk b reite
KM	K olk m ittenabstand
KT	K olk t iefe
MATLAB	M atrix L aboratory
NK	A nzahl K ammrisse
P-	P räzisions-
PCI	P eripheral C omponent I nterconnect (PCI-Bus)
Profibus	P rocess F ield B us, Standard für die Feldbus-Kommunikation in der Automatisierungstechnik
RMS	R oot M ean S quare, quadratische Mittelung bzw. Effektivwert
S/N	S ignal-to- N oise (Signal-zu-Rausch Verhalten)
SERCOS	S erial R ealtime C ommunication S ystem, weltweit genormte digitale Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Steuerungen und Antrieben (IEC 61491 und EN 61491)
SKV	S chneid k anten v ersatz

SPS	S peicher p rogrammierbare S teuerung
SSD	S ub S urface D amages
STFT	S hort- T ime- F ourier- T ransformation
TCP	T ool- C enter- P oint
UP-	U ltrapräzision-
VB	V erschleißmarken b reite
WFE	W ait- F or- E vent
WST	W erkstück
WT	W avelet- T ransformation
WZG	W erkzeug

Glossar

Glossary

Spektrale Leistungsdichte	(auch Autoleistungsspektrum) Sie gibt die Energie eines Signals in einem infinitesimal kleinen Frequenzband mit der Dimension [Watt/Hertz] an. Über die Frequenz aufgetragen spricht man vom Leistungsdichtespektrum. Das Integral über alle Frequenzanteile ergibt die komplette Leistung des Signals.
Burst	Kurzzeitiger Signalimpuls mit hoher Amplitude
CBN	Kubisch kristallines Bornitrid, Schneidstoff für Wendschneidplatten zur Bearbeitung von Metallen
Chemisch Nickel	Chemisch abgeschiedenes Nickel zur Erhöhung des Verschleiß- oder Korrosionsschutzes von metallischen Werkstoffen
Chuck	Aufnahmevorrichtung in Bearbeitungsmaschinen, meist für das Werkstück
Chunk	Bezeichnung für einen Datenblock
Dispersion	Abhängigkeit der Brechzahl n , bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_{(\omega)}$ von der Wellenlänge λ in Medien
Distorsion	Stauchung einer Strukturwelle
Elman-Netzwerk	Lernfähiges, regressives, neuronales Netzwerke, welches eine Kopie der verdeckten Schicht für den jeweils nächsten Trainingsschritt zwischenspeichert.
Flankenfrequenz	Anzahl aufsteigender Leistungsdichteflanken eines spezifischen Spektralbandes pro Sekunde

Host-PC	Computer, der als Primärplattform Hard- oder Software-Ressourcen bereitstellt.
Inconel	Rechtlich geschützter Markenname der Firma Special Metals Corporation für eine Reihe von korrosionsbeständigen Nickelbasislegierungen
Isomorphismus	Abbildungsgültigkeit zwischen zwei mathematischen Strukturen, durch die Teile einer Struktur auf „bedeutungsgleiche“ Teile einer anderen Struktur umkehrbar eindeutig (bijektiv) abgebildet werden.
Merkmalskarte	Kombination aus Befehlsreihenfolge und Vergleichsgröße zur Auswertung von Prozesssignalen
Modalanalyse	Verfahren zur Bestimmung des Eigenschwingverhaltens von elastischen Strukturen
Neusilber	Bezeichnung für eine Kupfer-Nickel-Zink-Legierung mit hoher Korrosionsbeständigkeit
Rayleighwelle	Schwingungsmoden an der Oberfläche eines Festkörpers
Reziprozität	Bezeichnung für Umkehrbarkeit; gegeben, wenn in einer Anordnung die Position von Ursache und Wirkung miteinander vertauscht werden können, ohne dass die Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung sich ändert.
Seismische Masse	Ausnutzung der Massenträgheit durch einen Hilfsmassenkörper zur Umsetzung von Beschleunigungsgrößen in Kraftgrößen
Shunt-Widerstand	Niederohmiger Nebenschlusswiderstand, der zur Messung von Strömen verwendet wird.
si-Funktion	Sinus cardinalis, auch als sinc-Funktion oder Spaltfunktion bezeichnet, Spektralfunktion eines Rechtecksignals
Standzeit	Zeitintervall einer Bearbeitungsmaschine zwischen der Durchführung notwendiger Wartungs- oder Reinigungsarbeiten
Streaming	Kontinuierliches Übertragen eines Datenstroms
Thread	Bezeichnet in der Informatik einen Ausführungsstrang oder eine Ausführungsreihenfolge in der Abarbeitung eines Programms
Zerodur	Glaskeramischer Werkstoff, der durch kontrollierte Volumenkristallisation hergestellt wird. Markenname der Schott AG