

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Universität Karlsruhe (TH)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem
für eine effizientere geometrische
Maschinenbeurteilung**

ISSN 0724-4967
Band 138



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

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.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6334-8

ISSN 0724-4967

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

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Siegfried Schmalzried

aus Leutenbach

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

15. März 2007

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt



Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH).

Mein Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt, der als Leiter der Gruppe FT und als Hauptreferent die Arbeit wesentlich unterstützt hat. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt für die Übernahme des Korreferates und die spontane Terminzusage, sowie Prof. Dr.-Ing. Albert Albers für den Prüfungsvorsitz. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, welcher ein stetiger Förderer meiner Arbeit war und mich mit Begeisterung im Projekt begleitete.

Letztendlich wurde die Möglichkeit zu dieser Arbeit von den Firmen „Heller“, „Index“, „Ex-Cell-O“ und „Heidelberger Druckmaschinen“ ermöglicht, wofür ich mich bei den Herren Siegler, Dr. Walker, Dr. Horn, Uhly, Wiescholleck und Rendsburg bedanke. Der Tatendrang von Herrn Dr. Werner hat die Umsetzung des Laser- μ GPS gefördert, wodurch der erste Preis beim Thüringer Businessplanwettbewerb möglich wurde.

Die Kollegen des Instituts haben durch eine hervorragende und freundschaftliche Atmosphäre zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ich freue mich über die Freundschaften die daraus entstanden sind und die meine Zeit am wbk überleben werden. Meiner Gruppe FT und meinem Bürokollegen „Sepp“ verdanke ich unendlich viele motivierende Stunden und anregende Gespräche. Einen wesentlichen Beitrag haben die Korrekturleser geleistet, bei denen ich mich hierfür bedanken möchte.

Mein allerhöchster Respekt und mein Dank gebührt den vielen Studenten mit denen ich zusammenarbeiten durfte. Nur durch deren unentwegtes Engagement und ihre Mitarbeit ist aus der Sache etwas geworden. Stellvertretend, jedoch mit den Gedanken bei allen, möchte ich hier „Nico“ erwähnen.

Außerordentlich bedanke ich mich bei meinen Eltern und meinen Geschwistern Sabine, Hermann, Annette, Christa und Esther für die immerwährende Unterstützung. Meine liebe Frau Deborah stützt mich, wenn ich falle und stützt mich, wenn ich zu hoch fliege. Ihre Liebe gibt mir den höchsten Ansporn.

Vaihingen an der Enz, den 15. Juni 2007

Siegfried Schmalzried

Abstract

The operating company and the producer of manufacturing systems have highest interest for a fast termination of the non productive and cost intensive ramp up phase. To insure that the quality is on the right level an acceptance process regarding the norm is designated. An important process within there is the geometrical evaluation of the System. However, this process needs a lot of time and multiple measurement procedures and equipment. A time saving acceptance process out of the state of art is not possible. This leads to high expenses.

From this follows the purpose of the paper: Application of a new three dimensional optical measuring system for the geometrical machine acceptance process.

Based on the definition of a specification sheet the characteristics and requirements are appointed. In the following is examined how the Laser- μ GPS with its reflectors and sending units can be integrated in the workspace. With a simulation different variants are tested about the influence of the geometrical arrangement and the herefrom following measurement uncertainty. The result leads to suggestions which are classified about feasibility and costs. For the utilisation of the Laser- μ GPS norm conform methods for the automated acceptance process of mill- and turn centres are elaborated.

Another focus is the Laser- μ GPS system itself. To qualify the system for the acceptance process an analysis under uncertainty requirements is done. The integration of an new linear reference arm induces much lower measurement uncertainties. A precise positioning sensing needs a calibrated measurement system. Therefore appropriate correction- and interpolation procedures are developed and examined. The results of the measurement uncertainty from one point in the space was achieved at about 1,8 μ m in Y-direction and 5 μ m in X, Z direction. The validation of the system is done by an acceptance measuring process of a machine tool.

The paper shows the successful envelopment of the application from the Laser- μ GPS for an effective and automated machine tool acceptance process. Although appendages to increase the accuracy of the Laser- μ GPS can be extracted and implemented.

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Ableitung der Problemstellung	3
2	Stand der Forschung und Technik	5
2.1	Notwendigkeit der Maschinenabnahme und -beurteilung	5
2.2	Gestaltung eines Abnahmeprozesses	7
2.3	Normen und Richtlinien zur Maschinenabnahme	9
2.3.1	DIN ISO 230: Prüfregeln für Werkzeugmaschinen	11
2.3.2	DIN ISO 10791: Prüfbedingungen für Bearbeitungszentren	11
2.3.3	DIN V 8602: Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Beanspruchung	12
2.3.4	VDI/DGQ 3441: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen	12
2.3.5	DIN ISO 3070: Prüfbedingungen für Werkzeugmaschinen	12
2.3.6	Einheitsblatt VDMA 8669: Richtlinien zu Fähigkeitsuntersuchungen	13
2.4	Messsysteme und Verfahren zur Maschinenbeurteilung	15
2.4.1	Direkte Maschinenbeurteilung	15
2.4.2	Indirekte Maschinenbeurteilung	22
2.4.3	Aktuelle Messsysteme für die teilautomatisierte Maschinenbeurteilung	27
2.5	Beschreibung und Funktionsweise des Laser- μ GPS Messsystems	32
2.5.1	Funktionsprinzip der klassischen Interferometrie	33
2.5.2	Funktionsprinzip der Absolutinterferometrie des Laser- μ GPS	35
2.5.3	Aufbau des Laser- μ GPS	36
2.5.4	Positionsbestimmungsalgorithmus des Laser- μ GPS	42
2.6	Diskussion und Bewertung der Messsysteme zur direkten Maschinenbeurteilung	44
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	48
3.1	Zielsetzung	48
3.2	Vorgehensweise	49
4	Definition der Anforderungen des Laser-μGPS zur Maschinenabnahme	51
4.1	Entwicklung eines Lastenhefts	51
4.2	Komponentenkosten des Systems	54

5 Untersuchung von Konfigurationen zur Arbeitsraumabdeckung	55
5.1 Geometrische Untersuchung zur Konfiguration der	
Messstrategie Kubus	55
5.1.1 Voraussetzungen zur Vermessung des geforderten	
Arbeitsraums	55
5.1.2 Vorgehensweise zur Definition von Konfigurationen	
für die Vermessung des Arbeitsraums	56
5.1.3 Ergebnis der Untersuchung der geometrischen	
Konfigurationen	60
5.2 Simulation der räumlichen Messunsicherheit der Varianten...61	
5.2.1 Vorgehensweise	61
5.2.2 Simulationsergebnisse der verschiedenen Varianten	64
5.2.3 Zusammenhang Kugelabstand - Genauigkeit.....	68
5.2.4 Vergleich der verschiedenen Varianten	70
5.3 Bewertung der Ergebnisse zur Untersuchung	
der Konfigurationen.....	72
6 Entwicklung einer Methode zur dreidimensionalen geometrischen Maschinenbeurteilung.....	73
6.1 Abnahme eines Bearbeitungszentrums mit dem Laser- μ GPS..76	
6.1.1 Aufbauvarianten im Bearbeitungszentrum	76
6.1.2 Methode zur geometrischen Maschinenbeurteilung von	
Bearbeitungszentren mit dem Laser- μ GPS	77
6.1.3 Diskussion der Methode zur geometrischen Maschinen-.....	
beurteilung für Bearbeitungszentren mit dem Laser- μ GPS	81
6.2 Abnahme eines Drehzentrums mit dem Laser- μ GPS	84
6.2.1 Aufbauvarianten im Drehzentrum	84
6.2.2 Methode zur geometrischen Maschinenbeurteilung von	
Drehzentren mit dem Laser- μ GPS	86
6.2.3 Diskussion der Methode zur geometrischen Maschinen-.....	
beurteilung für Bearbeitungszentren mit dem Laser- μ GPS	92
7 Systemanalyse zur Genauigkeitssteigerung.....	93
7.1 Allgemeine Messunsicherheit der Längenmessung.....	93
7.2 Fehlereinflussanalyse des Laser- μ GPS Messsystems	94
7.3 Theoretisches physikalisches Steigerungspotential	99
7.4 Praktische technologische Maßnahme zur Steigerung	
der Genauigkeit des Laser- μ GPS	99

7.5 Experimentelle Einflussanalyse des geometrischen Fehlers	der Referenzachse	101
8 Kalibrierung des Messsystems.....		104
8.1 Aufbau des Laser-µGPS am Referenzmesssystem	Koordinatenmessmaschine	104
8.2 Vorüberlegungen zur Auswahl von Kalibrierstrategien		106
8.3 Entwicklung der Kalibrierstrategien		110
8.4 Bewertung der Kalibrierstrategien		117
9 Charakterisierung des optimierten Laser-µGPS		
hinsichtlich der Genauigkeit.....		119
9.1 Wiederholgenauigkeitsmessungen.....		119
9.2 Absolutgenauigkeitsmessungen		121
10 Realversuche an Werkzeugmaschinen zur Validierung		
des Laser-µGPS.....		124
10.1 Geometrische Vermessung einer Fünf-Achs-Fräsmaschine		124
10.1.1 Ergebnis der Geradheitsmessung		126
10.1.2 Auswertung des Winkels		129
10.1.3 Zusammenfassung der geometrischen Vermessung		134
10.2 Wiederholgenauigkeitsmessungen in		
Werkzeugmaschinen.....		135
10.2.1 Vermessung der Wiederholgenauigkeit des Palettenwechsels...		136
10.2.2 Vermessung der Wiederholgenauigkeit des		
Werkstückwechsels.....		137
10.2.3 Vermessung der Spindelverlagerung aufgrund der		
Spindelerwärmung.....		139
10.2.4 Zusammenfassung der Wiederholgenauigkeitsmessungen		140
11 Zusammenfassung und Ausblick		142
12 Literaturverzeichnis		145

Abkürzungen

ΔI_p	Längenänderung optischer Weg
ΔI_{RF}	Längenänderung optischer Weg
ΔI_T	Längenänderung optischer Weg
Δp	Druckänderung
ΔRF	Relative Feuchteänderung
ΔT	Temperaturänderung der durchstrahlten Luft
Δ_x	Positionsabweichung in X
Δ_y	Positionsabweichung in Y
Δ_z	Positionsabweichung in Z
A	Rotatorische Fehler
C	Fähigkeitsindex
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-coupled Device
C_{Luft}	Cotton-Mouse-Konstante
d	Geometrische Distanz
DBB	Double Ball Bar
DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität
E	Elektrische Feldstärke
$\vec{E}$	Fehlervektor
EDF	Erbium Doped Fibre
F	Fehler
GPS	Global Positioning System
GS	Gegenspindel
H	Magnetische Feldstärke
HS	Hauptspindel
K	Korrektur
K_{Kerr}	Kerr-Konstante
KMG	Koordinatenmessgerät
I	Ursprüngliche optische Weglänge
L	Länge
L_0	Optischer Weg im Vakuum
L_c	Kohärenzlänge
L_i	Reflektorkoordinaten
L_n	optischer Weg in der Luft mit dem Brechungsindex n
m	Gemessener Weg
n	Brechungsindex
NC	Numerical Control
$n_{R/M}$	Brechungsindex der Luft im Referenzarm bzw. im Messarm
OGW	Oberer Grenzwert
P	Translatorische Fehler
PSD	Position Sensitive Device
q_i	Position der Reflektoren im Referenzkoordinatensystem
R	Spannweite
R_1, R_2	Kleiner und großer Radius des Retroreflektors

RV	Spannweitenkennwert
RV _K	Kritischer Spannweitenkennwert
s	Strecke
SPC	Statistic Process Control
T	Toleranz
T	Temperatur
UGW	Unterer Grenzwert
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken
WDM	Wavelength Division Multiplexer
WT	Werkzeugträger
WZM	Werkzeugmaschinen
$\bar{x}$	Mittelwert
X ₁	1. Schnittpunkt mit Reflektoroberfläche (R1, Luft - Medium)
X ₂	Reflexionspunkt mit Reflektor (R2)
X ₃	3. Schnittpunkt mit Reflektoroberfläche (R1, Medium - Luft)
X _{start}	Startpunkt eines Lichtstrahls
Y _{µs}	Ausgleichsgerade durch Laser-µGPS Punkte senkrecht
Y _{µw}	Ausgleichsgerade durch Laser-µGPS Punkte waagrecht
Y _{Grs}	Ausgleichsgerade durch Punktelinie Granitwinkel senkrecht
Y _{Grw}	Ausgleichsgerade durch Punktelinie Granitwinkel waagrecht
α _{Therm}	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
Δf _{krit}	Kritischer Abstand zur Spannweite
δx (x)	Lineare Positionsabweichung
Δx _{krit}	Kritischer Abstand
δy (x)	Geradheitsabweichung
δz (x)	Geradheitsabweichung
δφx	Rollabweichung
δφy	Stampfabweichung
δφz	Gierabweichung
λ	Wellenlänge
σ	Standardabweichung
σ _i	Korrekturfunktion
σ _i	Standardabweichung Einzeldistanzen
σ _x	Standardabweichung in X
σ _y	Standardabweichung in Y
σ _z	Standardabweichung in Z