

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Daniel Gauder

**Adaptive in-line Qualitätsregelung
in der Mikro-Verzahnungsfertigung**

Band 274



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Daniel Sebastian Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro- Verzahnungsfertigung

Band 274



Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro- Verzahnungsfertigung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

MBA Daniel Sebastian Gauder
aus Bruchsal

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2023

Hauptreferentin:

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Benjamin Schleich

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, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9448-0

ISSN 0724-4967

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

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, indem 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) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 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

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Ich möchte mich besonders bei Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung und Begleitung dieser Arbeit in den letzten Jahren bedanken. Mein Dank gilt insbesondere auch für ihr entgegengebrachtes Vertrauen und den großen Freiraum, den ich in dieser Zeit am Institut genießen durfte. Die familiäre, inspirierende und durch persönliches Engagement geprägte Atmosphäre des wbks habe ich sehr geschätzt. Mein herzliches Dankeschön gilt Prof. Dr.-Ing. Benjamin Schleich für die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr.-Ing. Albert Albers für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Der Projektgruppe von Dentsply Sirona möchte ich für den Rahmen und die wertvollen Diskussionen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen am wbk möchte ich mich für den außergewöhnlichen Zusammenhalt und das freundschaftliche Arbeitsumfeld ganz herzlich bedanken. Insbesondere möchte ich Raphael Wagner, Constantin Hofmann, Bastian Verhaelen, Shun Yang, Carmen Krahe, Louis Schäfer, Vivian Schiller und Gwen Steier nennen. Besonderen Respekt zolle ich den Studierenden, Johannes H. Gölz, Alexander Bott und Nils Hornung, die durch ihr Engagement, ihren Erfindungsgeist und ihr Durchhaltevermögen diese Arbeit geprägt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Bruder, meinen Eltern und vor allem bei meiner Freundin für den Rückhalt und die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Karlsruhe, im August 2023

Daniel Gauder

Abstract

As the trend of miniaturization advances in the industry, micro gears are becoming increasingly crucial across various sectors. They are an integral part of micro-mechanical systems and are used, for example, in medical technology for the kinematic transmission of torque in dental instruments. Simultaneously, the need to control competition-critical acoustic emissions and vibrations during manufacturing sets new quality assurance targets. Findings from extensively studied macro gears are often not applicable to micro gears, which are currently underrepresented in existing standards. Owing to the limitations of existing manufacturing technologies, micro gears typically exhibit significant geometric deviations concerning their structural dimensions, which must be minimized for the quality-driven series production of the future.

To overcome this deficit, a strategy for adaptive in-line quality control in micro gear manufacturing is presented. The developed approach enables machine-oriented control of quality-critical features by using 100% in-line measurements based on optical focus variation technology. Established on statistical methods, an in-line capable measurement program can be developed with low measurement uncertainty within the cycle time. Additionally, the implementation of near-real-time kinematic rotary path simulation enables more accurate predictions of functional parameters, minimizing uncertainty.

By utilizing experimental single-flank rolling tests, real-time control of the analytical kinematic process is possible. The overall uncertainty of the simulation can be determined by evaluating the individual input uncertainties as well as simulations based on skin model shapes. With suitable control algorithms, the machine tool can consequently be controlled adaptively in the event of deviations in the component based on the in-line measurement data.

The developed approach is validated in an industrial application focusing on serial production for dental instrument manufacturing. The results reveal that it is feasible to adaptively adjust production based on an in-line quality assessment to achieve specifications close to the technological limits. Furthermore, function-oriented parameters are captured at 100%. This approach demonstrates that complex micro gears can be optimized for quality improvement by integrating in-line measurement technology within advanced control loop.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Herausforderung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Forschungshypothesen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 Verzahnungen	5
2.1.1 Grundbegriffe und Geometrien an Verzahnungen	6
2.1.2 Verzahnungsfertigung	9
2.1.3 Mikroverzahnungen	11
2.1.4 Geometrische Qualitätsmerkmale und Verzahnungsabweichung	12
2.1.5 Verzahnungstoleranzen	14
2.1.6 Skin-Model Shapes	16
2.1.7 Zwischenfazit	17
2.2 Messtechnik	17
2.2.1 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik	18
2.2.2 Taktile Messtechnik	19
2.2.3 Optische Messtechnik	20
2.2.4 Computertopographische Messtechnik	22
2.2.5 Funktionsorientierte Messtechnik	23
2.2.6 Zwischenfazit	28
2.3 Messunsicherheit	29
2.3.1 Definition	29
2.3.2 Einflussgrößen	30

2.3.3	Richtlinien	30
2.3.4	Zwischenfazit	36
2.4	Qualitätsprüfung	36
2.4.1	Prüfstrategien	36
2.4.2	Rückführbarkeit	37
2.4.3	Prüfprozesseignung	38
2.4.4	Zwischenfazit	39
2.5	Statistische Versuchsplanung	39
2.5.1	Definition	39
2.5.2	Latin Hypercube Sampling	40
2.5.3	Zwischenfazit	41
2.6	Messdatenanalyse	41
2.6.1	Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen	41
2.6.2	Statistische Kenngrößen	43
2.6.3	Analyse von Signaldaten	45
2.6.4	Zwischenfazit	47
2.7	Prozess- und Qualitätsregelung	47
2.7.1	Definition	47
2.7.2	Elemente eines Regelkreises	47
2.7.3	Qualitätsregelkreis	48
2.7.4	Zwischenfazit	48
3	Stand der Forschung	49
3.1	Anforderungen	49
3.2	Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze	50
3.2.1	Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen	50
3.2.2	Ansätze zu simulativen Zahnkontaktanalysen von Makroverzahnungen	52
3.2.3	Ansätze zur Mikroverzahnungsmessung mit der optischen Fokusvariationstechnologie	54
3.2.4	Ansätze zur Quantifizierung der Messunsicherheit bei funktionsorientierten Wälzprüfungen	55

3.2.5 Ansätze zu Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung	56
3.3 Forschungsdefizit	57
4 Lösungsansatz	61
4.1 Aufbau des Lösungsansatzes	62
4.2 Ausgangssituation der prototypischen Realisierung	63
5 Messzeitorientierung und Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation	67
5.1 Versuchsaufbau für taktile und optische Messungen	67
5.1.1 Einrichtung zur Ermittlung eines optimalen Reinigungsverfahrens	67
5.1.2 Taktile Referenzmessungen	68
5.1.3 In-line Einrichtung der Fokusvariationstechnologie	70
5.2 Methode zur Ermittlung optimaler in-line Messparameter unter Berücksichtigung von Messzeit und Messunsicherheit	72
5.2.1 Identifikation optimaler Messparameter	72
5.2.2 Ausgewählte Methoden zur Bewertung der Messunsicherheit	74
5.2.3 Konzept der Prozesseignungsanalyse für die Validierung	75
5.3 Ergebnisse der Messzeitorientierung sowie der Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation	76
5.3.1 Identifizierung eines optimierten Reinigungsverfahrens	76
5.3.2 Identifizierung optimierter Messparameter	77
5.3.3 Optimiertes Messprogramm	82
5.3.4 Messunsicherheiten des optimierten Messprogramms	83
5.3.5 Unsicherheit der virtuellen Zahnweitenprognose	84
5.3.6 Ergebnisse der Prüfprozesseignung	84
5.4 Diskussion der Ergebnisse	85
6 Qualifizierung des Einflanken-Wälzprüfstands	86
6.1 Experimenteller Aufbau	86
6.1.1 Einflanken-Wälzprüfstand für Mikrozahnräder	86
6.1.2 Meisterzahnräder	88
6.1.3 Spanndorn für das Prüfzahnrad	91

6.2	Lasinterferometrie zur Messung von Achsabweichungen	93
6.3	Evaluierung der Messunsicherheit	94
6.3.1	Parameter des Messprogramms	95
6.3.2	Unsicherheitsbewertung der Achspositioniergenauigkeit	99
6.3.3	Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten	100
6.4	Messunsicherheitsmodell der Einflanken-Wälzprüfung	101
6.4.1	Unsicherheit der Anfangskalibrierung	102
6.4.2	Unsicherheit der Einspannsituation	104
6.4.3	Unsicherheit des Messprozesses	104
6.5	Ergebnisse und Messunsicherheitsbudget	106
6.6	Untersuchung der Prüfprozesseignung	108
6.7	Diskussion der Ergebnisse	108
7	Validierung der analytischen Drehwegsimulation	110
7.1	Analytische Drehweg-Simulation	110
7.2	Experimentelles Vorgehen	112
7.3	Vergleichende Signalanalyse	113
7.3.1	Methodisches Vorgehen	113
7.3.2	Filtermethoden zur Beseitigung unerwünschter Exzentrizitäten	114
7.3.3	Identifizierung der optimalen Filtermethode	116
7.3.4	Vergleich der Simulationsdaten mit den Daten des Prüfstands	117
7.4	Diskussion der Ergebnisse	121
8	Quantifizierung der Simulations- bzw. Gesamtunsicherheit	124
8.1	Ansatz für die Bewertung der Simulationsunsicherheit	124
8.1.1	Methode	124
8.1.2	Vorgehensweise	126
8.2	Analyse der optischen Messdaten	126
8.2.1	Vorverarbeitung	127
8.2.2	Clustering	128
8.2.3	Statistische Formanalyse	129

8.3	Generierung von künstlichen Zahnrädern	133
8.3.1	Validierung	136
8.4	Monte-Carlo-Simulation von Skin Model Shapes	138
8.5	Simulation der künstlich generierten Zahnräder	140
8.6	Diskussion der Ergebnisse	144
8.6.1	Bewertung der Simulationsunsicherheit	144
8.6.2	Qualifizierung	145
9	Integration des Qualitätsregelkreises	147
9.1	Entwicklung eines adaptiven Qualitätsregelkreises	147
9.2	Analyse des Wälzfräsprozesses	148
9.2.1	Versuchsreihe mit eindimensionalen Variationen	149
9.2.2	Identifikation kritischer Einflussgrößen	150
9.2.3	Versuchsreihe mit mehrdimensionalen Variationen	151
9.3	Verarbeitung von Messdaten	156
9.3.1	Messung und Datenexport	156
9.3.2	Messdatenvorverarbeitung	156
9.3.3	Ermittlung von Verzahnungsabweichungen	158
9.4	Analyse der Daten des Korrekturalgorithmus	159
9.5	Training des Korrekturalgorithmus	164
9.6	Entscheidungslogik für die Korrektur	171
9.7	Rückführung der Korrekturwerte an die Werkzeugmaschine	172
9.8	Grafische Benutzeroberfläche für die Mensch-Maschine-Kommunikation	173
9.9	Validierung	174
9.10	Diskussion der Ergebnisse	176
10	Diskussion und Ausblick	178
10.1	Diskussion	178
10.2	Ausblick	180
11	Zusammenfassung	182

Liste eigener Veröffentlichungen	184
Literaturverzeichnis	188
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IX
Anhang	XIII
A1 Angaben zur Alicona μ CMM	XIII
A2 Ermittlung der Messunsicherheit der Fokusvariation auf der Alicona μ CMM	XVI
A3 Prüfzertifikate der Lehrzahnräder	XX
A4 Messaufbau des Interferometers zur Achsvermessung des Einflanken-Wälzprüfstands	XXII
A5 Sensitivitätskoeffizienten des Messunsicherheitsbudget von dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand	XXIII
A6 Auflistung der ermittelten Messunsicherheiten aller funktionalen Parameter der Einflanken-Wälzprüfung auf dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstands	XXV
A7 Code des Generierungsprozesses	XXVI
A8 Vergleich der funktionsorientierten Parameter der Einflanken-Wälzprüfung	XXVII
A9 Kompletter Versuchsplan der DOE	XXIX
A10 Analyse der optischen Messdaten	XXXVIII
A11 Messunsicherheitsbudget der virtuellen Zahnweitenprognose	XLII
A12 Ergebnisse der Analyse des Wälzfräsprozesses	XLIII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer A ided D esign (Computergestütztes Konstruieren)
CRISP-DM	C ross I ndustry S tandard P rocess for D ata M ining (Branchenübergreifender Standardprozess für Data Mining)
DAkKS	D eutsche A kkreditierungs s telle
DOE	D esign O f E xperiments (Statistische Versuchsplanung)
DOF	D epth O f F ield (Tiefenschärfe)
FFT	F ast F ourier T ransformation
GUM	G uide to the expression of U ncertainty in M easurement (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen)
ICP	I terative C losest P oint A lgorithm (Iterativer Algorithmus zur Ermittlung der nächstgelegenen Punkte)
JCGM	J oint C ommittee for G uides in M etrology (Gemeinsamer Ausschuss für Leitlinien in der Messtechnik)
KDD	K nowledge D iscovery in D atabases (Wissensentdeckung in Datenbanken)
KI	K ünstliche I ntelligenz
KMG	K oordinaten m ess g erät
KNN	K - N earest- N eighbor- C lassification (K-Nächste-Nachbarn-Klassifikation)
LHD	L atin H ypercube D esign
LHS	L atin H ypercube S ampling
LI	L inks
LW	L ücken w eite
MAX	M aximum
MED	M edian
MIN	M inimum
MPE	M aximum P ermissible E rror (Maximal zulässiger Fehler)
MW	M ittel w ert
ProIQ	Adaptive, prozessübergreifende Qualitätsregelkreise mittels photo- nischer Sensoren zur Identifikation und Qualitätsmessung von Hochpräzisionsbauteilen
PTB	P hysikalisch- T echnische B undesanstalt
QM	Q ualitäts m anagement
RE	R echts
RMSE	R oot M ean S quare E rror (Mittlerer quadratischer Fehler)
STD	S tandard a bweichung
SVM	S upport v ektormaschine
TG	T eilungs g eometrie

USD	United State Dollar
VIM	Vocabulaire International de Métrologie (Internationales Wörterbuch der Metrologie)
ZD	Zahndicke

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Verzahnungsqualität	[-]
a_e	Radiale Zustellung	mm
b	Zahnbreite	mm
b_{sys}	Systematische Abweichung	beliebig
C_α	Profil-Balligkeit	μm
C_β	Flankenlinien-Balligkeit	μm
c_i	Sensitivitätskoeffizient	[-]
$cross - corr\{k\}$	Kreuzkorrelation	[-]
d	Teilkreisdurchmesser	mm
d_a	Kopfkreisdurchmesser	mm
d_f	Fußkreisdurchmesser	mm
E_0	Maximal zulässiger Fehler	μm
E_W	Taumel des Fräsdorns	μm
F_α	Profil-Gesamtabweichung	μm
F_β	Flankenlinien-Gesamtabweichung	μm
F'_i	Einflanken-Wälzabweichung	μm
F''_i	Zweiflanken-Wälzabweichung	μm
F_p	Teilungs-Gesamtabweichung	μm
f_a	Axialer Vorschub	mm
\hat{f}_{error}	Verlustfunktion	[-]
$f_{f\alpha}$	Profil-Formabweichung	μm
$f_{f\beta}$	Flankenlinien-Formabweichung	μm
$\hat{f}_{H\alpha}$	Profil-Winkelabweichung	μm
$f_{H\beta}$	Flankenlinien-Winkelabweichung	μm
f'_i	Einflanken-Wälz sprung	μm
f''_i	Zweiflanken-Wälz sprung	μm
f'_k	Kurzwelliger Anteil der Einflanken-Wälzabweichung	μm
f''_l	Langwelliger Anteil der Einflanken-Wälzabweichung	μm
f_p	Teilungs-Einzelabweichung	μm
G_i	Gewichtungsfaktor eines Unsicherheitsbeitrags	[-]
G_{pp}	Grenzwert des Prüfprozesseignungsverhältnisses	[-]
g_{pp}	Prüfprozesseignungsverhältnis	[-]
\vec{I}	Merkmalsvektor der Einflussgrößen	beliebig
k	Erweiterungsfaktor	[-]
L	Nennlänge einer Messung	beliebig
M_{costs}	Kostenmatrix	[-]
m	Modul	mm
n	Anzahl der Messwerte	[-]

n_0	Drehzahl Werkzeug	1/min
n_2	Drehzahl Werkstück	1/min
$n_{mis,class}$	Anzahl der klassifizierten Validierungsbeispiele	[-]
$n_{sum,class}$	Gesamtanzahl der Validierungsbeispiele	[-]
p	Teilung	mm
R^2	Dimensionsloses Bestimmtheitsmaß	[-]
$RMSE$	Root Mean Square Error (Mittlerer quadratischer Fehler)	beliebig
r	Korrelationskoeffizient	[-]
T	Toleranz	beliebig
U	Erweiterte Messunsicherheit	beliebig
$u(x_i)$	Standardmessunsicherheit	beliebig
u_i	Standardunsicherheit	beliebig
u_b	Standardunsicherheit der systematischen Abweichung	beliebig
u_{cal}	Standardunsicherheit der Kalibrierung des Werkstücks	beliebig
u_p	Standardunsicherheit der Streuung des Messverfahrens	beliebig
u_w	Standardunsicherheit aus Werkstoff- und Produktionsstreuungen	beliebig
V	Profilverschiebung	mm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	mm/min
W_t	Zahnweite über t Zähne	mm
w	Werkzeugverschleiß	beliebig
\vec{X}	Merkmalsvektor der Verzahnungsabweichungen	beliebig
X_i	Eingangsgröße eines Unsicherheitsmodells	beliebig
X_s	Shiftposition	mm
x	Profilverschiebungsfaktor	[-]
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe	beliebig
\tilde{x}	Median einer Stichprobe	beliebig
x_i	Schätzwert einer Eingangsgröße	beliebig
Y	Ausgangsgröße eines Unsicherheitsmodells	beliebig
z	Zähnezahl	[-]
μ	Arithmetischer Mittelwert einer Messreihe	beliebig