

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 Algorithm (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

1 Einleitung

1.1 Motivation und Herausforderung

Der progressive Trend zur Miniaturisierung von technischen Produkten bei gleichzeitiger Erhöhung des Funktionsumfangs steigert die Bedeutung der Mikroproduktionstechnik. Die steigende Nachfrage an Mikrobauteilen besteht insbesondere bei mikro-elektromechanischen Systemen, sogenannten MEMS. Für den globalen MEMS-Markt wird bis 2028 ein Umsatz von 37,24 Milliarden USD basierend auf einem jährlichen Wachstum von 12,9% erwartet. Die Mikrobauteile kommen in verschiedenen Industriezweigen, wie beispielsweise der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Unterhaltungselektronik, der Rüstungsindustrie und der Medizintechnik sowie in vielen anderen Branchen zum Einsatz (Data Bridge Market Research 2021).

Darüber hinaus besteht auch ein zunehmender Bedarf an rein mechanisch beanspruchten Mikrobauteilen. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Anwendungen werden jährlich mehrere Milliarden Mikrobauteile produziert. Insbesondere mikromechanische Antriebssysteme, die sehr geringe Toleranzen aufweisen, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Neben der Reduktion des Bauraums und des Gewichts zählen die Leistung und Laufruhe zu den hohen Anforderungen an ein Mikrogetriebe (Kraus & Merklein 2022). Besonders im Bereich der Mikrogetriebe ist die Zielsetzung der Geräusch- und Vibrationsreduktion allgegenwärtig und zunehmend wettbewerbsentscheidend (VDI 2731). Basierend auf diesem Trend steigen auch die Anforderungen an die Hersteller von Hochpräzisionskomponenten in Bezug auf die Fertigung und Qualitätssicherung (Durakbasa et al. 2018). Zusätzlich erfordert ein kompetitives, globales Wettbewerbsumfeld die notwendige Bereitschaft, Produktionsprozesse kontinuierlich weiterzuentwickeln und zu optimieren (Herrigel 2015).

Sehr hohe Funktions- und Qualitätsanforderungen in präzisen Produkten, wie es beispielsweise bei Dentalinstrumenten mit integriertem Mikrogetriebe der Fall ist, können nur durch sehr geringe Toleranzen im Bereich weniger Mikrometer realisiert werden (Mease et al. 2004).

Bereits sehr kleine Fertigungsabweichungen führen beim Einsatz von Dentalinstrumenten, wie zum Beispiel bei einem elektromechanischen Hochgeschwindigkeits-Dentalbohrer, der auch als Winkelstück bezeichnet wird, zu unerwünschten Effekten und be-

einflussen somit das Funktionsverhalten. Der Zahnarzt nutzt die Hochgeschwindigkeits-Dentalbohrer für Bohr-, Schleif- und Polieranwendungen am Zahn des Patienten. Die mit einem Mikrogetriebe betriebenen Instrumente rotieren an der Werkzeugschnittstelle mit einer Geschwindigkeit von 200.000 bis 350.000 Umdrehungen pro Minute. Die daraus resultierenden Geräuschspitzen befinden sich in einem Frequenzbereich von 2-3 kHz. Fertigungsabweichungen im Getriebe führen zu Vibrationen und akustischen Emissionen, die sowohl für den behandelnden Zahnarzt als auch für den Patienten unangenehm sind (Sampaio Fernandes et al. 2006). Darüber hinaus verursachen die akustischen Emissionen und Vibrationen Angst bei den Patienten, was ein Grund dafür sein kann, dass Patienten eine zahnärztliche Behandlung nicht in Anspruch nehmen (McGrath & Bedi 2004; Toal 2008).

Minimale geometrische Abweichungen am Zahnrad beeinflussen das Laufverhalten von Mikrogetrieben signifikant, da diese im Verhältnis zu den Bauteildimensionen deutlich prominenter als bei den Makroverzahnungen sind (Gorgels et al. 2007).

Eine Möglichkeit zur Reduktion von geometrischen Abweichungen stellt die Qualitätsregelung in der Produktion dar. Durch den Einsatz von Regelkreisen in der Fertigung lassen sich Toleranzen nahe der technologischen Grenzen innerhalb des Produktionssystems besser beherrschen (Lanza et al. 2015). Mit dem technologischen Einsatz von Sensorik und der Messdatenverarbeitung sowie der Bauteilidentifikation lassen sich Produktionssysteme für die statistisch adaptive Fertigungsanpassung und die selektive Montage von Baugruppen befähigen, um wirtschaftlich an der Grenze des technologisch möglichen zu produzieren. Durch den Einsatz von Qualitätsregelungsstrategien in der industriellen Serienproduktion kann die Produktqualität verbessert werden (Colledani et al. 2014).

Alle bisherigen Ansätze der Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung fokussieren sich auf die Fertigung und Verbesserung von geometrischen Merkmalen bei Makroverzahnungen. Die Besonderheiten von Mikrozahnradern und deren Funktionscharakterisierung werden in bestehenden wissenschaftlichen Ansätzen nur von Häfner (2017) in Bezug auf die Zahnfußspannung untersucht (Häfner 2017).

1.2 Zielsetzung

Um den zuvor genannten Herausforderungen zu begegnen, ist die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Implementierung einer adaptiven in-line Qualitätsregelung für den Einsatz in der Mikro-Verzahnungsfertigung.

Das erste Teilziel besteht in der Qualifizierung von geeigneten Messverfahren für die 100% in-line Messung von Mikroverzahnungen. Hierbei sind insbesondere die Auswirkungen des Produktionsumfelds auf das Messergebnis und die daraus resultierenden Herausforderungen zu betrachten.

Die Implementierung und Validierung einer funktionsorientierten in-line Simulation auf Basis geometrischer Messdaten stellt das zweite Teilziel dar.

Das letzte Teilziel ist die Integration des Qualitätsregelkreises in den Produktionsprozess. Dadurch soll ermöglicht werden, Potenziale gegenüber einer konventionellen Produktion ohne Qualitätsregelung aufzuzeigen und somit die Qualität zu steigern und den Ausschuss zu reduzieren.

1.3 Forschungshypothesen

Aus der dargestellten Herausforderung und Zielsetzung für diese Arbeit lassen sich folgende Forschungshypothesen formulieren:

1. Für die Qualitätssicherung von Mikrozahnradern kann mit der in-line Integration der optischen Fokusvariations-Technologie unter Berücksichtigung der aufgabenspezifischen Unsicherheit die Fertigungsqualität innerhalb des Produktionstaktes nachgewiesen werden.
2. Mittels analytischer Drehwegsimulation können auf Basis der optischen in-line Messdaten unter Berücksichtigung der Simulationsunsicherheit funktionsorientierte Bauteilverifikationen abgeleitet werden.
3. Der Einsatz von maschinennahen Qualitätsregelkreisen ermöglicht die wirtschaftliche Erfüllung hochpräziser Qualitätsanforderungen.

Die dargestellten Forschungshypothesen sollen im Rahmen der Arbeit untersucht und validiert werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel und ist wie folgt strukturiert: Zur thematischen Einleitung in die Arbeit wurden in Kapitel 1 die Motivation und Problemstellung sowie die Zielsetzung und die Hypothesen für das Forschungsthema dargestellt. Darauf aufbauend folgen in Kapitel 2 die relevanten Grundlagen um das Verständnis der inhaltlichen Zusammenhänge zu ermöglichen. Das Kapitel 3 grenzt die Arbeit vom bestehenden Stand der Forschung ab und es wird das Forschungsdefizit abgeleitet. In Kapitel 4 wird der aus dem Forschungsdefizit resultierende Lösungsansatz dargestellt. Basierend auf dem Lösungsansatz wird in Kapitel 5 das methodische Vorgehen zur systematischen Messzeitoptimierung und Messunsicherheitsermittlung für die in-line Integration der optischen Fokusvariationstechnologie erläutert. In Kapitel 6 erfolgt die Qualifizierung des Einflanken-Wälzprüfstands unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Auf Basis dieser Qualifizierung erfolgt in Kapitel 7 die Validierung der analytischen Drehwegsimulation. Kapitel 8 erläutert dann die systematische Methode zur Quantifizierung der Simulations- bzw. Gesamtunsicherheit. Die Integration des Qualitätsregelkreises in eine exemplarische Anwendung wird schließlich in Kapitel 9 demonstriert. Die Kapitel fünf bis neun schließen jeweils mit einer Diskussion der Ergebnisse. In Kapitel 10 erfolgt die zusammenfassende Diskussion. Ferner wird in diesem Kapitel ein Ausblick gegeben. Abschließend erfolgt in Kapitel 11 eine Zusammenfassung der Arbeit.

2 Grundlagen

Die im Folgenden dargestellten Grundlagen sollen das Verständnis der Zusammenhänge dieser Arbeit ermöglichen, und die hierfür wesentlichen Begriffe erklären. Zunächst wird ein Überblick über die Verzahnungstheorie gegeben, welcher nach einer Übersicht der relevanten Parameter und Abweichungen auf das Anwendungsgebiet der Mikroverzahnungen konkretisiert wird. Zur messtechnischen Erfassung von geometrischen Abweichungen an Verzahnungen eignen sich verschiedene Technologien. Dabei werden taktile, optische sowie funktionsorientierte Verfahren in ihrer Funktionsweise erläutert und bewertet. Mit einem Messergebnis geht zudem eine spezifische Messunsicherheit einher, deren Ermittlung ebenfalls beschrieben wird. Den Messungen übergeordnet ist die Theorie der Qualitätsprüfung, welche Prüfstrategien, Rückführbarkeit und die Prüfprozesseignung beinhalten. Zur Erstellung von Versuchsplänen zur Beschreibung komplexer Wirkzusammenhänge dienen die statistische Versuchsplanung und die Methodik des Latin Hypercube Samplings. Für die Auswertung der Versuche werden statistische Verfahren sowie Methoden der Künstlichen Intelligenz benötigt, welche daraufhin dargelegt werden. Zum Abschluss dieses Kapitels wird ein Einblick in die Funktionsweise der Prozess- und Qualitätsregelung gegeben. Somit lässt sich die Theorie des Qualitätsregelkreises ganzheitlich beschreiben.

2.1 Verzahnungen

Im Folgenden werden die relevanten Grundbegriffe der geometrischen Verzahnungsparameter erläutert. Darüber hinaus werden die geometrischen Qualitätsmerkmale und Abweichungsarten sowie Verzahnungstoleranzen erörtert. Abschließend werden die Verzahnungsfertigung mit dem Wälzfräsprozess und die Methode der Skin Model Shapes dargelegt.

Ein Zahnrad wird gemäß DIN ISO 21771 als rotationssymmetrischer Körper definiert, auf dessen Umfang eine Verzahnung eingearbeitet wurde. Die Verzahnung wird als Gesamtheit aller Zähne und Zahnücken über deren Umfang definiert (DIN ISO 21771). Im Allgemeinen erfüllen Zahnräder als wesentliche Komponenten von Antrieben durch wechselseitigen, formschlüssigen Eingriff der einzelnen Zähne die Funktion der Drehmomentübertragung (Linke & Börner 2013; Roth 2001).

2.1.1 Grundbegriffe und Geometrien an Verzahnungen

Durch das Ineinandergreifen der Zähne in die Lücken des Partnerzahnrad wird eine Kraftübertragung im Eingriffspunkt (derzeitiger Berührungspunkt ineinandergreifender Zähne) realisiert. Dieser wandert innerhalb des Kopf- und Fußbereiches mit der Drehbewegung des Zahnrad. Der Flankenbereich jedes Zahns wird in eine Rechts- und eine Linksflanke unterteilt. Bei der Beschreibung der Zahnflanke wird zwischen der Profil- und Flankenrichtung differenziert. Diese Art der Differenzierung ist für die Qualitätsprüfung von entscheidender Bedeutung (DIN 868; Wittel et al. 2017). Abbildung 2-1 zeigt die charakteristischen Bezeichnungen für einen einzelnen Zahn.

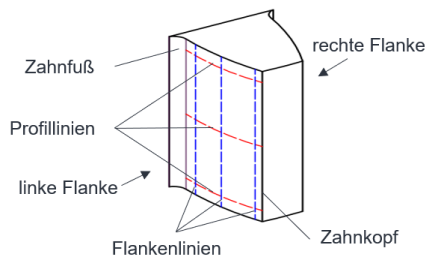


Abbildung 2-1: Bezeichnung am Zahn nach (Wittel et al. 2017)

In der industriellen Anwendung werden weitestgehend zwei verschiedene Verzahnungsarten genutzt, welche sich durch ihre Profilform als Zykloide oder Evolvente unterscheiden. Die Evolventenverzahnung ist jedoch aufgrund ihres Einsatzverhaltens und der einfachen Herstellung die am weitesten verbreitete Verzahnungsart (Klocke & Brecher 2016; Wittel et al. 2017). Sie besteht im Gegenteil zur Zykloidverzahnung aus einer Kurve, welche durch eine auf einem Grundkreis abrollende Gerade beschrieben wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Durch den Abwälzvorgang ist die Eingriffslinie der Evolventenverzahnung eine Gerade. Eine gerade Eingriffslinie hat den entscheidenden Vorteil, unempfindlich gegenüber Achsabstandsänderungen zu sein (Wittel et al. 2017). Da im Wesentlichen die Mikrozahlräder als geradverzahnte Stirnräder ausgelegt sind (Dunovska et al. 2015; Härtig et al. 2009), fokussieren sich die weiteren Betrachtungen auf diesen Verzahnungstyp.

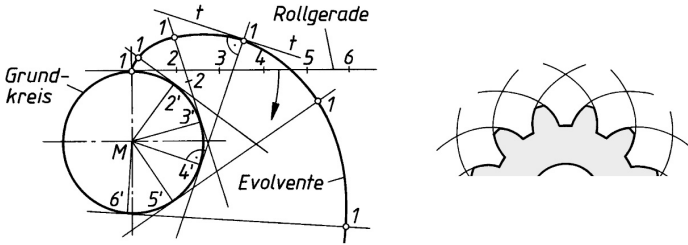


Abbildung 2-2: Konstruktion einer Evolvente (Wittel et al. 2017)

Die im Folgenden eingeführten Parameter werden für Evolventenverzahnungen konkretisiert. Die Kenngrößen zur Charakterisierung sind nach DIN 867, DIN 868 und DIN ISO 21771 genormt (DIN 867; DIN 868; DIN ISO 21771). Abbildung 2-3 zeigt für die Evolventenverzahnung grundlegende Begriffe, welche als Konvention für eine Zahncharakterisierung dienen (Wittel et al. 2017). Im Anschluss an die Abbildung werden Parameter beschrieben, um ein Verständnis über kritische Kenngrößen zu erhalten.

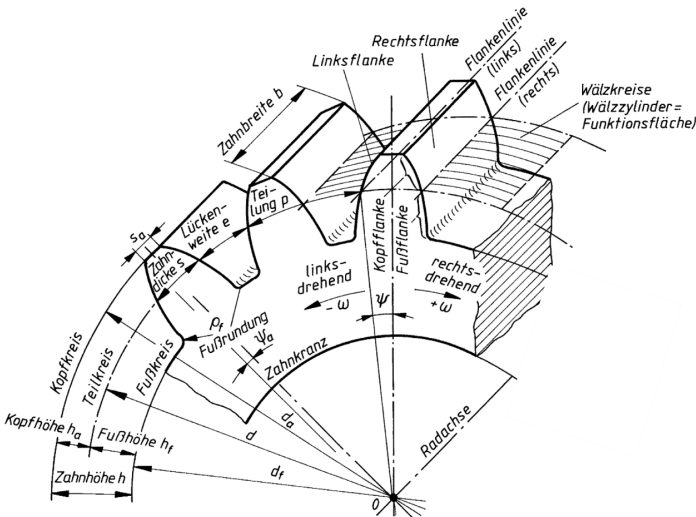


Abbildung 2-3: Bezeichnungen einer Evolventenverzahnung (Wittel et al. 2017)

Das Bezugsprofil der Evolventenverzahnung eines Stirnrades weist laut DIN 867 gerade Flanken auf, welche an der Kopflinie enden und am Zahnfuß mit einer Fußrundung in den Zahnlückengrund übergehen. Das Profil des korrespondierenden Gegenrades greift in die Zahnlücken des Bezugsprofils ein. Die Zähnezahl z ist ein ganzzahliger Parameter, welcher die Anzahl der Zähne über dem Radumfang beschreibt (DIN 867; Wittel et al. 2017). Die Teilung p ist definiert als der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Links- oder Rechtsflanken. Um das Abwälzen einer Zahnradpaarung zu ermöglichen, muss deren Teilung identisch sein. Bei Teilungsfehlern können Zahnräder beim Abwälzen unruhig laufen oder verklemmen. (DIN 868; Klocke & Brecher 2016; Wittel et al. 2017). Durch das Modul m lassen sich Aussagen über die Größendimensionierung der Zähne treffen. Der Modul ist eine Größe, die teilungsabhängig ist. Somit müssen Zahnradpaare nicht nur dieselbe Teilung aufweisen, sondern auch denselben Modul besitzen, um ein Abwälzen zu gewährleisten. Der Modul ist über den Quotienten der Teilung p sowie die Kreiszahl π definiert (Wittel et al. 2017).

$$m = \frac{p}{\pi} \quad \text{Formel 2-1}$$

Um die Anzahl der verwendeten Werkzeuge für die Zahnradfertigung zu begrenzen ist der Modul für Stirnradverzahnungen nach DIN 780-1 in Reihen genormt (DIN 780). Als Zahnbreite b wird der Abstand zwischen den begrenzenden Stirnflächen eines Zahns definiert. Für die formschlüssig übertragbare Kraft einer Verzahnung ist die Zahnbreite ein relevanter Parameter. Der Teilkreisdurchmesser d ist durch das Produkt von Zähnezahl z und Modul m definiert. Setzt man die Formel 2-1 des Moduls m ein, so resultiert daraus Formel 2-2 (Bender & Göhlich 2020).

$$d = z \cdot m = z \cdot \frac{p}{\pi} \quad \text{Formel 2-2}$$

Der Teilkreis einer Verzahnung entsteht durch stirnseitiges Schneiden eines theoretisch abwälzenden Zylinderpaars ohne Zähne (Wälzkreis, siehe Abbildung 2-3) (Wittel et al. 2017). Die Zahnkopfhöhe h_a und die Zahnfußhöhe h_f beschreiben die Höhe der Zähne in Bezug auf deren Teilkreis. Man erhält durch deren zweifache Addition vom Teilkreisdurchmesser ihren Kopfkreisdurchmesser d_a oder Fußkreisdurchmesser d_f . Wird bei der Verzahnung eine Profilverschiebung V angewandt, so ist diese bei der Ermittlung des Kopf- und Fußkreisdurchmessers zu berücksichtigen. Die Zahnhöhe h ergibt sich aus der Summe von Kopf- und Fußhöhe. Mit der Profilverschiebung V wird

das Produkt aus Profilverchiebungsfaktor x und Modul m als Abstand zwischen dem Teilkreis und der Profilbezugslinie in Formel 2-3 beschrieben (Wittel et al. 2017).

$$V = x \cdot m$$

Formel 2-3

Der Teilkreis weist ohne angewandte Profilverchiebung den Wert $V = 0$ aus. Um den definierten Achsabstand zwischen einem Zahnradpaar einzuhalten oder eine geringe Zahnfußdicke bei kleinen Zähnezahlen zu vermeiden, werden häufig Profilverchiebungen bei der Auslegung angewandt. Der Abwälzvorgang erfolgt dabei nicht mehr auf dem Teilkreis, sondern auf einem vergrößerten ($V > 0$) oder verkleinerten ($V < 0$) Durchmesser. Die Verschiebung verändert dabei ausschließlich das Flankenprofil und nicht die Evolvente. Dadurch verschmälert sich bei positiver Profilverchiebung der Zahnkopf, wobei der Zahnfuß breiter wird. Für negative Profilverchiebungen wirkt dieser Effekt genau umgekehrt (siehe Abbildung 2-4). (Klocke & Brecher 2016; Wittel et al. 2017)

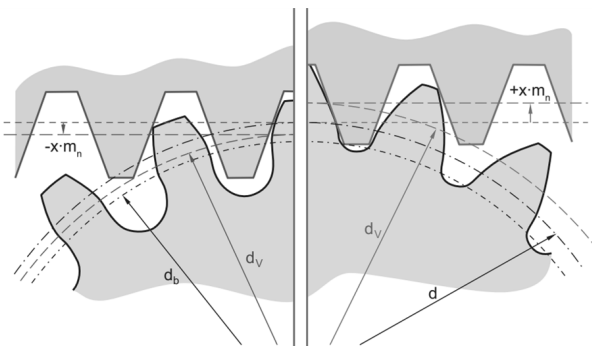


Abbildung 2-4: Darstellung der negativen (links) und positiven (rechts) Profilverchiebung (Klocke & Brecher 2016)

2.1.2 Verzahnungsfertigung

Die Fertigung von Mikrozahlrädern erfolgt wie bei Makrozahlrädern überwiegend mittels spanabhebender Verfahren. Eine hierfür verbreitete Prozesskette besteht aus der Verzahnungsschweibearbeitung mittels Wälzfräsen und der darauffolgenden Wärmebehandlung durch das Härten (Winkel et al. 2003). Der Fokus dieser Arbeit beschränkt sich auf das Wälzfräsen von Zahnradern, da dieses Fertigungsverfahren in der prototypischen Anwendung des Ansatzes betrachtet wird. Beim Wälzfräsen wird

ein Werkzeug genutzt, dessen Form dem Bezugsprofil der Verzahnung entspricht. Bei der industriellen Herstellung von Stirnrädern ist der Wälzfräsprozess aufgrund seiner hohen Produktivität weit verbreitet. Bei der Zerspanung bilden der Wälzfräser (Schnecke) und das Zahnrad (Schneckenrad) eine Paarung ähnlich einer Schnecke und einem Schneckenrad. Um das geforderte Zahnprofil zu erzeugen, schneidet der Wälzfräser mit geometrisch bestimmter Scheide und unterbrochenem Schnitt entsprechende Hüllschnitte. Für die Realisierung des Abwälzvorgangs wird zur Herstellung von Zahnrädern ein synchronisierter Achsantrieb benötigt. Aus der Drehzahl des Fräasers n_0 resultiert mit dessen Außendurchmesser die Schnittgeschwindigkeit v_c . Über das Verhältnis der Zähnezahl lässt sich ebenfalls die Drehzahl des Werkstücks n_2 ermitteln. Zwei weitere relevante Parameter sind der axiale Vorschub f_a , welcher die Strecke beschreibt, die während einer Werkstückumdrehung zurückgelegt wird, sowie die radiale Zustellung a_e , welche den Abstand des Werkzeugs senkrecht zur Werkstückachse darstellt. Der Wälzfräsprozess ist in Abbildung 2-5 abgebildet, wobei der Fräser in blauer Farbe und das Zahnrad in grauer Farbe dargestellt ist. (Klocke & Brecher 2016; Paucksch et al. 2008)

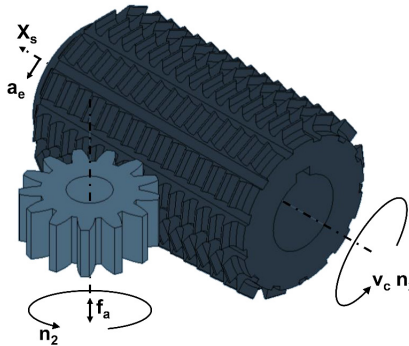


Abbildung 2-5: Parameter des Wälzfräsprozesses nach (Klocke & Brecher 2016)

Um einen gleichmäßigen Verschleiß des Fräasers zu ermöglichen, kann das Werkzeug entlang seiner Mittelachse durch Shiften X_s nach jedem gefertigten Bauteil n verschoben werden, wie es in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Dabei wird zwischen dem konventionellen und dem Multizyklus-Shiften unterschieden, wobei Letzteres wärmeoptimiert

ist. Am Ende eines kompletten Shiftdurchgangs hat das Werkzeug seine Standzeit erreicht. (Klocke & Brecher 2016)

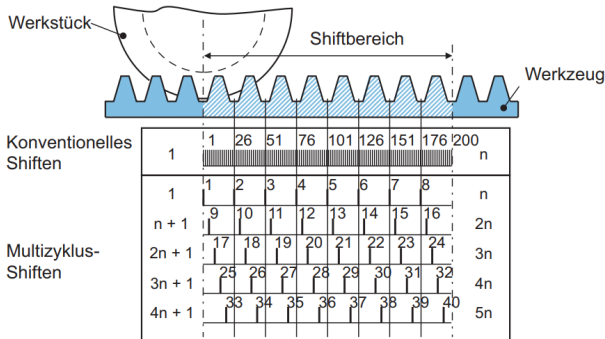


Abbildung 2-6: Shiftbereich eines Wälzfräasers (Klocke & Brecher 2016)

2.1.3 Mikroverzahnungen

Zur Abgrenzung der Mikroverzahnungen von Makroverzahnungen ist in der Fachliteratur keine einheitliche Beschreibung vorhanden. Mikroverzahnungen werden in der VDI 2731 - Blatt 1 und in Härtig et al. definiert (Härtig et al. 2002; VDI 2731). Ebenfalls existiert die DIN 58405 für Stirnradgetriebe der Feinwerktechnik, welche jedoch zurückgezogen wurde. Mikrogetriebe sind gemäß VDI 2731 in der Tabelle 2-1 charakterisiert und müssen mindestens zwei der drei genannten Merkmale aufweisen (VDI 2731).

Tabelle 2-1: Merkmale von Mikrogetrieben (VDI 2731)

Merkmale	Wert
Charakteristische Ausmaße (z.B.: Durchmesser, Kantenlänge)	< 20 mm
Modul	< 0,2 mm
Strukturdetails (z.B.: Zahndicke, Kopfhöhe)	< 0,1 mm

Als Beispiel für Mikrogetriebe wird in der Richtlinie auf die Uhrenindustrie verwiesen, welche langjährige Erfahrungen in der stückzahlintensiven Fertigung von Verzahnungen mit Modulbereichen $m < 0,3$ mm besitzt. Eine Einteilung, welche ausschließlich auf dem Modul m beruht, ist nach VDI 2731 jedoch nicht möglich (VDI 2731). Dem gegenüber steht die Definition nach Härtig et al. für Mikroverzahnungen. Die Autoren charakterisieren Mikroverzahnungen allgemein durch einen Modulbereich von 1 μ m bis 1 mm (Härtig et al. 2002).

Die Beschreibung und Festlegung entsprechender Toleranzen für Mikrozahnäder gestaltet sich ebenfalls kompliziert. Die geltende Norm zur Berechnung von zulässigen Toleranzen DIN ISO 1328-1 ist nur bis zu einem minimalen Modul von 0,5 mm definiert (ISO 1328). Bisherige Untersuchungen nutzten daher die Extrapolation der Toleranzwerte für kleinere Modulbereiche (Hauser 2007). Es zeigt sich, dass im Bereich der Mikroverzahnungen bisher nur wenige Richtlinien erarbeitet worden sind. Dies führt dazu, dass allgemeine Zusammenhänge aus dem Bereich der Makroverzahnungen abgeleitet oder anwendungsspezifisch festgelegt werden.

2.1.4 Geometrische Qualitätsmerkmale und Verzahnungsabweichung

Grundsätzlich findet eine Qualitätscharakterisierung zwischen Profil-, Flankenlinien- sowie Teilungsabweichungen statt (Klocke & Brecher 2016). Eine Abweichung des Zahnprofils wird durch die geometrische Beschaffenheit und Einbausituation des Fräswerkzeuges verursacht. Abweichungen der Flankenlinie werden durch veränderte Zustellbedingungen des Fräsers ermöglicht. Beispielhafte Kenngrößen sind die Profilabweichung F_α , Winkelabweichung f_H und die Balligkeit C , wie sie in Abbildung 2-7 und Abbildung 2-8 zu sehen sind. (DIN ISO 21771; ISO 1328)

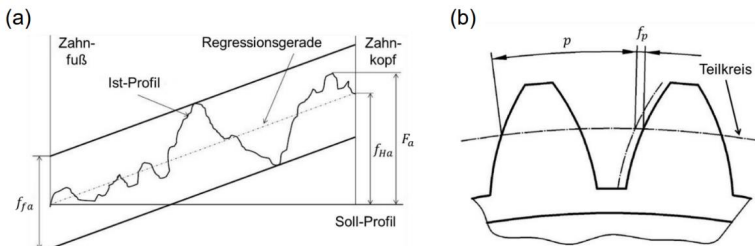


Abbildung 2-7: Geometrische Verzahnungskenngrößen: (a) Profilabweichungen F_α , (b) Einzelteilungsabweichung f_p , Darstellung nach (DIN 21772)

Die gegenwärtig geltende Norm zur Definition und Tolerierung von Verzahnungsabweichungen ist die DIN ISO 1328-1 (ISO 1328). Diese bündelt die Normen DIN 3961, DIN 3962-1, DIN 3962-2, DIN 3962-3, DIN 3963 sowie DIN 21772 und erweitert sie hinsichtlich vergrößerter Anwendungsbereiche, neuer Toleranzgleichungen und in Bezug auf Aspekte wie die funktionsorientierte Wälzprüfung. Der Definitionsbereich umfasst eine Zähnezah z zwischen 5 und 1000, ein Modul m von 0,5 mm bis 70 mm, einen Teilkreisdurchmesser d von 5 mm bis 15.000 mm sowie einer Zahnbreite b von 4 mm bis

1200 mm. Die definierte Einheit der Abweichungen wird in Mikrometer (μm) ausgedrückt.

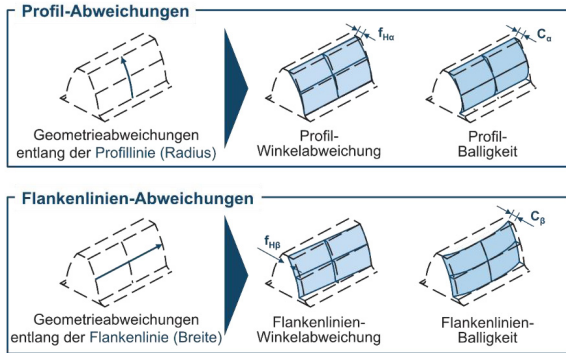


Abbildung 2-8: Profil- und Flankenlinienabweichungen nach (Klocke & Brecher 2016)

Weitere Abweichungen sind die funktionsorientierten Kenngrößen der Einflanken- und Zweiflanken-Wälzprüfung. Diese werden im Kapitel der Messtechnik erläutert, da sie an das Messverfahren gebunden sind. Eine Zusammenfassung relevanter Verzahnungsabweichungen nach DIN ISO 1328-1 ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Verzahnungsabweichungen (ISO 1328)

Abweichung	Definition
Profil-Gesamtabweichung F_α	Maximaler Abstand innerhalb des Auswertebereich.
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$	Abstand der einschließenden, mittleren Profillinien.
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$	Schnittabstand einer extrapolierten, mittleren Profillinie mit dem Profilkontroll- und Kopfdurchmesser.
Profil-Balligkeit C_α	Abstand zwischen der Line der Profil-Winkelabweichung und einer parallelen Linie, die tangential zur mittleren Profillinienkurve verläuft.
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β	Maximaler Abstand innerhalb des Auswertebereich.
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$	Abstand der einschließenden, mittleren Flankenlinien.
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$	Abstand der Schnittpunkte einer extrapolierten, mittleren Flankenlinie mit den Endpunkten der Zahnbreite.

Flankenlinien-Balligkeit C_p	Abstand zwischen der Linie der Flankenlinien-Winkelabweichung und einer parallelen Linie, welche tangential zur mittleren Flankenlinienkurve verläuft.
Teilungs-Gesamtabweichung F_p	Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Einzelwert der Teilungs-Einzelabweichungen.
Teilungs-Einzelabweichung f_p	Maximale Differenz zwischen der Ist- und Soll-Teilung innerhalb eines Zahns auf dem Messkreis.

2.1.5 Verzahnungstoleranzen

Zur Beurteilung der Qualität einer Verzahnung sind die entsprechenden Toleranzen von Bedeutung. Die DIN ISO 1328-1 ist die aktuell geltende Norm für Toleranzen an Zylinderrädern. Sie ersetzt die DIN 3961, DIN 3962-1, DIN 3962-2, DIN 3962-3 und DIN 21772 vollständig und die DIN 3963 teilweise (ISO 1328). Der Geltungsbereich und die Anwendung wurden bereits in 2.1.3 erläutert. In diesem Abschnitt soll nun die Berechnungsgrundlage der Toleranzen beschrieben werden. Aufgrund des Nichtvorhandenseins von Toleranzen im Modulbereich kleiner als 0,5 mm werden die Werte in einem Ansatz nach Hauser extrapoliert, um sich an der geltenden Norm zu orientieren (Hauser 2007). Auch wenn die Extrapolation gemäß Norm nicht verwendet werden soll, liefert diese im Austausch mit den Verzahnungsherstellern und unter Berücksichtigung einer funktionsorientierten Qualitätsbetrachtung wichtige Anhaltspunkte für eine allgemeine Prozessfähigkeitsanalyse. Relevante Parameter zur Bestimmung der Toleranzen sind der Modul m , der Teilkreisdurchmesser d , die Verzahnungsqualität A sowie die Zahnbreite b . Die Verzahnungsqualität A ist nach DIN 3961 in 12 Stufen unterteilt, wobei die zahlenmäßig niedrigeren Stufen für Lehrzahnräder und besondere Bedürfnisse vorgesehen sind. Unterteilt sind die Stufen so, dass die darauffolgende Stufe der φ -fachen Toleranz der vorhergehenden entspricht. Die Stufensprünge φ sind der Norm zu entnehmen (DIN 3961). Im Folgenden werden die Berechnungsformeln für Funktions- und Abweichungstoleranzen nach DIN ISO 1328-1 beschrieben (ISO 1328). Berechnet wird die Toleranz der Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ mit Hilfe der Formel 2-4. Die Toleranzen der Winkel sind zweiseitige Toleranzen und daher als Plus- und als Minus-Werte zu verwenden. Mit der Formel 2-5 wird die Toleranz der Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ berechnet. Aus den Ergebnissen der beiden vorherigen Toleranzen wird

die Toleranz der Profil-Gesamtabweichung F_{α} mit Hilfe der Formel 2-6 berechnet. (ISO 1328)

$$f_{H\alpha, Tol} = (0,4 \cdot m + 0,001 \cdot d + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad \text{Formel 2-4}$$

$$f_{f\alpha, Tol} = (0,55 \cdot m + 5) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad \text{Formel 2-5}$$

$$F_{\alpha, Tol} = \sqrt{f_{H\alpha, Tol}^2 + f_{f\alpha, Tol}^2} \quad \text{Formel 2-6}$$

Dieses Prinzip gilt ebenfalls für die Abweichungen in Richtung der Flankenlinien. Die beidseitige Toleranz der Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ lässt sich mit der Formel 2-7 berechnen. Für die Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ ist die Formel 2-8 anzuwenden. Die Toleranz der Flankenlinien-Gesamtabweichung errechnet sich äquivalent zur Profil-Gesamtabweichung unter Anwendung der Formel 2-9. (ISO 1328)

$$f_{H\beta, Tol} = (0,05 \cdot \sqrt{d} + 0,35 \cdot \sqrt{b} + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad \text{Formel 2-7}$$

$$f_{f\beta, Tol} = (0,07 \cdot \sqrt{d} + 0,45 \cdot \sqrt{b} + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad \text{Formel 2-8}$$

$$F_{\beta, Tol} = \sqrt{f_{H\beta, Tol}^2 + f_{f\beta, Tol}^2} \quad \text{Formel 2-9}$$

Ferner werden neben den Abweichungstoleranzen in der DIN ISO 1328-1 Formeln zur Berechnung funktionsorientierter Toleranzen angegeben. Die Toleranz für den Einflanken-Wälzsprung f'_i und der Einflanken-Wälzabweichung F'_i sind für nicht-modifizierte Zahnformen in Formel 2-10 und Formel 2-11 angegeben (ISO 1328).

$$f'_{i, Tol} = \left((0,375 \cdot m + 5) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \right) \quad \text{Formel 2-10}$$

$$F'_{i, Tol} = \left((0,002 \cdot d + 0,55 \cdot \sqrt{d} + 0,7 \cdot m + 12) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \right) + f'_{i, Tol} \quad \text{Formel 2-11}$$

Auf Basis dessen können die benötigten Toleranzen durch Einsetzen der Verzahnungsparameter ermittelt werden. Nach DIN 3961 sind die Gleichungen zur Berechnung der Toleranzwerte in Abhängigkeit des Qualitätsgrades, des Durchmessers und des Moduls definiert. Sie sind gültig in einem Bereich zwischen $m \geq 1 \text{ mm}$ und $m \leq 70 \text{ mm}$ bei einem Durchmesser $d \leq 10000 \text{ mm}$ und gelten für die Verzahnungsqualität 5. Die Toleranzen für die weiteren Qualitätsstufen ergeben sich durch die Multiplikation

der vorhergehenden Stufen mit dem entsprechenden Stufensprung φ der Verzahnungsqualität. Nachfolgende Abbildung 2-9 zeigt beispielhaft, wie sich die zulässige Abweichung der Einflanken-Wälzabweichung und des Einflanken-Wälzsprungs verhalten, sobald diese unter ein Modul $m = 1 \text{ mm}$ gehen. (DIN 3961)

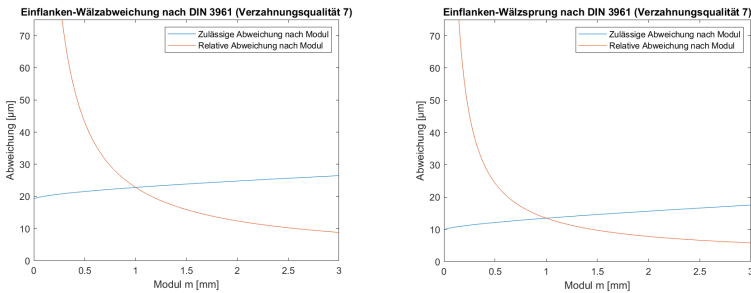


Abbildung 2-9: links extrapolierte Toleranzen für F_i' (Verzahnungsqualität 7) und rechts extrapolierte Toleranzen für f_i' (Verzahnungsqualität 7)

Betrachtet man die Kurve der relativen Abweichung (normiert durch das Modul), dann lässt sich ein exponentieller Anstieg der Abweichung im Verhältnis zum kleiner werden des Modul feststellen. Dies liegt daran, dass die Toleranzen einen konstanten Anteil haben, zu welchen noch ein modul- und/oder durchmesserabhängiger Anteil hinzukommt. Der von der Norm vorgesehene Zusammenhang zwischen Qualitätsstufe, Funktion und Fertigungsaufwand ist beim Extrapolieren nur bedingt gegeben. Die nachfolgende Tabelle 2-3 zeigt die theoretisch zulässigen Abweichungen für ein Modul $m = 0,28 \text{ mm}$ – entspricht dem Modul des zu untersuchenden Prüfzahnrad (siehe Kapitel 4.2) – nach der DIN 3961 für die Verzahnungsqualität 7 (DIN 3961:1978-08).

Tabelle 2-3: Extrapolierte Toleranzen nach DIN 3961 für $m = 0,28 \text{ mm}$

Kenngroße	Zulässige Abweichung
Einflanken-Wälzabweichung F_i'	21,55 μm
Einflanken-Wälzsprung f_i'	12,15 μm

2.1.6 Skin-Model Shapes

Das Skin-Model ist ein Konzept zur virtuellen Darstellung geometrischer Abweichungen von realen Bauteilen. Ziel dieser Darstellung ist die Simulation und Visualisierung von potentiell auftretenden Wechselwirkungen mit anderen von abweichungsbehaftenden

Bauteilen (Anwer et al. 2013). Das Konzept basiert auf der Definition aus DIN EN ISO 17450-1, die zwischen einem Nominalmodell und einem Skin Model unterscheidet (DIN EN ISO 17450). Ein Sollmodell ist die vom Konstrukteur beabsichtigte perfekte Werkstückform. Das Skin Model hingegen ist die physikalische Schnittstelle eines Werkstücks mit seiner Umgebung, auch als nicht-ideales Oberflächenmodell bezeichnet (DIN EN ISO 17450). Damit ist das Skin Model ein geeignetes Werkzeug, um die zulässigen Abweichungen einer Form von ihren geometrischen Vorgaben zu verstehen. Das Skin Model ist jedoch unendlich und kann durch eine unendliche Anzahl von Punkten beschrieben werden, da es kontinuierlich ist. Im Gegensatz dazu stellen Skin Model Shapes eine spezifische und endliche Ausprägung des unendlichen Skin Models dar. Eine Abweichungsmodellierung \bar{P}_i kann daher durch das Verschieben von Punkten gemäß der folgenden Gleichung beschrieben werden (Schleich et al. 2014).

$$\bar{P}_i = P_i + h_{P_i} n_i + \chi_i n_i \quad \text{Formel 2-12}$$

Dabei beschreibt P_i einen anfänglichen Oberflächenpunkt, n_i den Normalenvektor zur Oberfläche, h_{P_i} ist eine modellierte Fertigungsabweichung dieses Punktes und χ_i beschreibt seine zufällige Abweichung. Darüber hinaus beschreiben Shao et al. einen neuartigen Ansatz zur Toleranzanalyse von Stirnrädern, der auf Skin Model Shapes und der Boundary Element Method basiert. Sie untersuchten die funktionsorientierten Auswirkungen von Bearbeitungs- und Montagefehlern auf verschiedene Aspekte der Übertragungsleistung, einschließlich des Zahnkontaktmusters, der Kontaktdruckverteilung und des Übertragungsfehlers (Shao et al. 2020).

2.1.7 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den bestehenden Normen keine validierten Toleranzwerte für Mikroverzahnungen existieren. Die Methode des Skin Model Shapes bietet sich zur virtuellen Darstellung von geometrischen Abweichungen bei Verzahnungen an.

2.2 Messtechnik

Zur quantitativen Erfassung der Fertigungsabweichungen von Verzahnungen werden nachfolgend die verfügbaren messtechnischen Verfahren zur Verzahnungsprüfung und die metrologischen Integrationsgrade erläutert.

Für die Ermittlung der Qualitätsmerkmale einer Verzahnung ist die Messtechnik von eminenter Bedeutung. Es existieren unterschiedliche Verfahren der Messtechnik, die für verschiedene Prüfaufgaben ausgelegt sind. Ein weiteres Differenzierungsmerkmal ist die Messunsicherheit, die die unterschiedlichen Verfahren aufweisen. Dabei ist es von Bedeutung, das entsprechende Prüfmittel sorgfältig anhand des spezifischen Anwendungsfalls auszuwählen (VDI/VDE 2612). Nur wenn ein Prüfmittel die Anforderung an die Prüfaufgabe vollständig erfüllt, kann ein aussagekräftiges Messergebnis, unter Berücksichtigung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit, ermittelt werden (Pfeifer & Schmitt 2011b).

2.2.1 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik

Durch den gezielten Einsatz produktionsintegrierter Fertigungsmesstechnik in oder nahe der Fertigungslinie kann aufgrund einer frühzeitigen Detektion von auftretenden Fertigungsabweichungen die Produktqualität entlang des Wertschöpfungsprozesses optimiert werden (Colledani & Tolio 2006; Lanza et al. 2019).

Der Einsatz von produktionsintegrierter Fertigungsmesstechnik on-shopfloor lässt sich in den jeweiligen Grad der Integrationstiefe klassifizieren (Schmitt & Damm 2008). Die on-shopfloor Fertigungsmesstechnik unterteilt sich im nächsten Grad der Integration in in-line und off-line. Bei der in-line Integration erfolgen die Messungen an den Bauteilen taktzeitparallel zum Produktionsprozess. Der Informationsfluss zwischen Fertigungsmesstechnik und dem Fertigungsablauf erfolgt synchronisiert. Bei der off-line Integration erfolgt die produktionsbegleitende Stichprobenmessung neben der Produktionslinie und ist somit nicht direkt in den Prozess integriert (Heizmann & Imkamp 2011). Die in-line Integration lässt sich wiederum in zwei Unterkategorien unterteilen, und zwar in on-machine und off-machine. Hier wird im Wesentlichen differenziert, ob die Messtechnik direkt in der Fertigungsmaschine on-machine integriert ist oder sich außerhalb dessen an einer separaten Messstation off-machine befindet. Bei der on-machine Integration wird zudem zwischen in-process und off-process unterschieden (siehe Abbildung 2-10). Im Falle von in-process erfolgt die Messung analog zum eigentlichen Fertigungsschritt. Wenn die Messung nach dem Fertigungsschritt erfolgt, handelt es sich um off-process (Lanza et al. 2019; Pfeifer & Schmitt 2011a). Durch den Einsatz einer produktionsintegrierten in-line Messtechnik und die 100% Erfassung von qualitätsrelevanten

Merkmale wird ein kontinuierlicher Informationsfluss ermöglicht. Durch eine ganzheitliche Rückkopplung der Messwerte in Form einer echtzeitnahen Qualitätsregelung kann die Produktion verbessert werden. (Brunner & Wagner 2011)

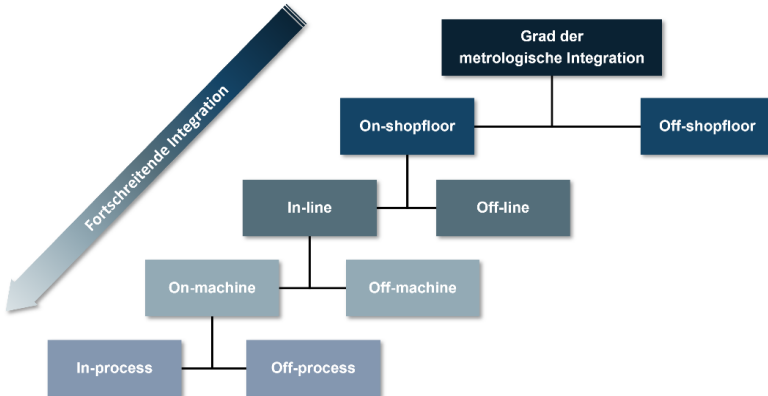


Abbildung 2-10: Integrationsgrad der Messtechnik nach (Lanza et al. 2019)

2.2.2 Taktile Messtechnik

Durch das mechanische Antasten wird bei der taktilen Messtechnik die Geometrie eines Bauteils erfasst. Der Bezug zwischen Objekt und Messgerät wird durch das Tastsystem realisiert. Durch das taktile Berühren und das gleichzeitige Auslesen der Messgeräteposition wird ein Prüfling geometrisch erfasst. Durch hohe Genauigkeiten eignet sich das taktile Messverfahren als Referenzverfahren für die Unsicherheitsermittlung der optischen Messtechnik (Dunovska et al. 2015; Viering 2011)

Das Prinzip der Koordinatenmesstechnik basiert auf der Erfassung von Raumpunkten eines Bauteils innerhalb eines Koordinatensystems. Die einzelnen Messpunkte werden dabei mathematisch verarbeitet. Die Vorgehensweise lässt sich in drei Schritte unterteilen. Ziel ist es, die Ist-Gestalt einer Probe zu erfassen und diese auf Abweichungen zu ihrer Soll-Gestalt zu überprüfen. Im initialen Schritt wird ein Raumpunkt $P = (x, y, z)$ definiert. Dieser wird im nächsten Schritt durch das Tastsystem angetastet. Die Auswertungssoftware verknüpft daraufhin im letzten Schritt die Einzelpunkte um diese auszuwerten. (Pfeifer & Schmitt 2011b)

Um aus Messpunkten ein Bauteil beschreiben zu können nutzt man geometrische Basiselemente. Somit können durch Punkte (eindimensional), Geraden und Kreise (jeweils zweidimensional) sowie Ebenen, Kugeln, Zylinder und Kegel (jeweils dreidimensional) Geometrieabweichungen zur Ist-Gestalt durch den Einsatz von Ersatzelementen berechnet werden. (Pfeifer & Schmitt 2011b; Weckenmann 2012)

Abschließend werden die Grenzen der taktilen Tastverfahren in Bezug auf Mikroverzahnungen aufgezeigt. Eine taktile Messung mittels Koordinatenmesstechnik ist laut VDI 2731 - Blatt 1 nur bis zu einem Modul von $m \geq 0,2$ mm und mit Hilfe von speziellen Tastern bis zu einem Modul von $m \geq 0,1$ mm möglich (VDI 2731).

2.2.3 Optische Messtechnik

Optische Sensoren können je nach Ausführung ein-, zwei- oder dreidimensionale Koordinaten erfassen. Durch den Einsatz von Flächensensoren sind zweidimensionale Erfassungen möglich, welche die Oberfläche eines Bauteils aufnehmen. Eine dreidimensionale Erfassung wird durch zusammengefügte 2D-Aufnahmen ermöglicht. Für komplexe Geometrien ist eine Ausrichtung notwendig, welche die jeweilige Gestalt für den Sensor erfassbar macht. Die optische Messtechnik lässt sich in zwei verschiedene Messprinzipien unterteilen: die Weglängenmessung und die Triangulation. (Weckenmann 2012)

Beide Messprinzipien liefern relative Koordinaten in einem definierten Raum. Weglängenmessungen wie die Weißlichtinterferometrie nutzen die Welleneigenschaften des Lichts. Mit Hilfe der Interferenzerscheinung bei der Überlagerung zweier Strahlen lassen sich daraus Weginformationen extrahieren. Die Triangulation hingegen beschreibt ein Verfahren, dessen Sensor und Beleuchtung in einem definierten Winkel zur Probe bzw. Bauteil stehen. Im Anwendungsfall der Streifenprojektion spannen Bauteil, Sensor und Beleuchtung ein Dreieck auf. Auch wenn dieses Dreieck nicht in jedem Aufbau ersichtlich ist, wie beispielsweise in einer Blende des Messobjektives, kann es sich trotzdem um eine Triangulation handeln. Dies ist insbesondere bei der Fokusvariation der Fall (Weckenmann 2012). Für die prototypische Anwendung des Ansatzes im Qualitätsregelkreis wird das Prinzip der Fokusvariation näher betrachtet.

Fokusvariation

Das Prinzip der Fokusvariation basiert auf einem einfachen optischen Zusammenhang. Fokussiert man mit einem Mikroskop einen bestimmten Punkt auf einer Probe, so lässt

sich durch die Position des Objektivs die Höhe des Punkts abschätzen. Desto geringer dabei die Tiefenschärfe (Depth of Field) ist, je genauer ist dieser Bereich eingrenzbar. Durch die gezielte Variation des Fokus lassen sich über die Höhe des gesamten Bauteils Geometrieinformationen erfassen. Eine wesentliche Voraussetzung der Fokusvariation ist die Bedingung, dass die betrachtete Oberfläche eine kontrastreiche Struktur aufweisen muss. Zur Ermittlung der Höheninformation wird durch mechanisches Verfahren der Fokus variiert. Auf den Bildsensor der Fokusvariation fällt viel Licht und die Aufnahme besitzt eine geringe Schärfentiefe. Daher wird über den Kontrast die lokale Schärfe und nicht die Helligkeit untersucht. (König & Schmitt 2018; Weckenmann 2012)

Der Aufbau der Fokusvariation ähnelt dem Aufbau eines digitalen Auflichtmikroskops. Bei beiden Verfahren wird Weißlicht durch einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) eingeschleust. Nachdem das Licht durch das Objektiv (beweglicher Kollimator) auf das Bauteil trifft, wird es reflektiert und trifft durch das Objektiv auf den Sensor (Detektor). Hierbei verzichtet die Fokusvariation auf eine Blende, um eine geringe Tiefenschärfe zu realisieren. Die erläuterte Funktionsweise der Fokusvariation ist in Abbildung 2-11 links dargestellt. (Schuth & Buerakov 2017; Weckenmann 2012)

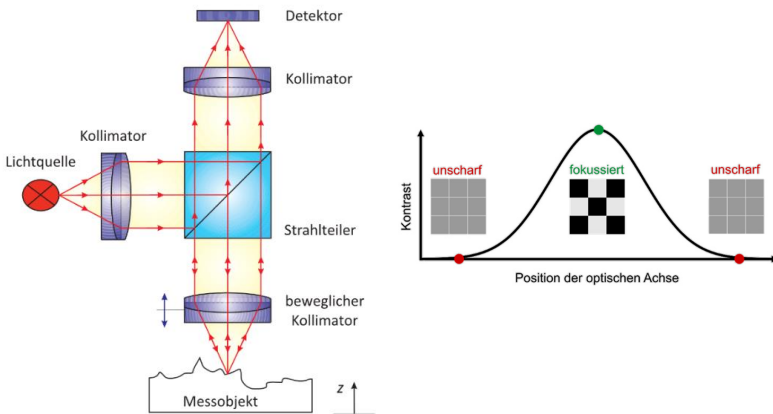


Abbildung 2-11: links: Aufbau der Fokusvariation (Schuth & Buerakov 2017), rechts: Kontrastauswertung der Fokusvariation nach (Weckenmann 2012)

Die einzelnen Oberflächenpunkte können nach dem Passieren des Objektivs und des halbdurchlässigen Spiegels, Pixeln des optischen Flächensensors zugeordnet werden.

Die Variation des Fokus erfolgt bei einer Aufnahme kontinuierlich. Dadurch kann eine Kontrastauswertung vollzogen werden. Der maximal messbare Kontrast ist im schärfsten Fokusbereich realisierbar. Durch das Defokussieren kann der Kontrast reduziert werden. Mittels vertikalen Scannens resultiert aus vielen Einzelaufnahmen eine dreidimensionale Aufnahme. Die Auflösung der Aufnahme hängt maßgeblich von der verwendeten Sensorik, der optischen Auflösung des Objektivs und den Schrittkrementen zwischen den Einzelaufnahmen in vertikaler Richtung ab. Jedoch muss der Prüfling eine erfassbare Oberfläche aufweisen. Diese sollte nicht zu stark reflektieren und mit einer gewissen Rauheit beschaffen sein. (Hartmann et al. 2012; Weckenmann 2012)

Die Auswertung der Einzelbildaufnahmen erfolgt über einen an das Messgerät angeschlossenen, leistungsstarken Desktop-Rechner. Ist ein Punkt auf der Bauteiloberfläche scharf fokussiert, so wird dieser mit größtmöglichem Pixelkontrast angezeigt, da durch die scharfe Aufnahme Merkmale exakt unterscheidbar sind. Mittels Auswertung der Schärfentiefe entlang der gesamten optischen Achse ergibt sich ein Kontrastverlauf. Dabei wird die Standardabweichung des Kontrastes von angrenzenden Pixeln verglichen (Bruker Alicona 2023). Abbildung 2-11 rechts zeigt die Funktionsweise der Kontrastauswertung über den Weg der optischen Achse.

Die Funktionsweise der Fokusvariation verdeutlicht gleichzeitig eine technologische Einschränkung. Bei Oberflächen mit geringem Kontrast weisen die Messwerte höhere Messunsicherheiten auf. Ferner ist festzuhalten, dass nicht die einzelnen Pixel das Messergebnis repräsentieren. Diese Informationen dienen primär der Überführung von Kontrastverläufen in die Koordinaten eines 3D-Raums. Das endgültige Messergebnis besteht dann aus einer X-, Y-, und Z-Koordinate. (Hartmann et al. 2012; Weckenmann 2012)

Die geringen Abstände im Vergleich zu taktil gemessenen Messpunkten von unter 2,5 μm unterstreichen die Vorteile der optischen Fokusvariationstechnologie bei der Vermessung von Mikroverzahnungen. (Neuschaefer-Ruben et al. 2011)

2.2.4 Computertopographische Messtechnik

Die industrielle Computertopographie durchleuchtet mit Hilfe von Röntgenstrahlung Bauteile aus verschiedenen Winkelstellungen. Anschließend wird durch Algorithmen eine 3D-Ansicht aus den 2D-Aufnahmen rekonstruiert. Die Darstellung ermöglicht eine

Betrachtung der Bauteiloberflächen und des Bauteilinneren. Daher gewinnt man zusätzlich noch Informationen über die Materialbeschaffenheit. Die hohe Messunsicherheit bei der Vermessung filigraner und metallischer Bauteile aufgrund des Auftretens verfahrensbedingter Fehler, den Artefakten, muss jedoch berücksichtigt werden (Dunovska et al. 2015).

2.2.5 Funktionsorientierte Messtechnik

Die Funktionsfähigkeit sowie das Laufverhalten einer Verzahnung kann mittels Wälzprüfungen ermittelt werden. Dabei werden die geometrischen Abweichungen, wie zum Beispiel Rundlauf- oder Flankenlinienabweichungen eines Zahnradpaares aufgezeigt (Linke & Börner 2013). Bei der funktionsorientierten Prüfung lassen sich in Abhängigkeit vom Prüfverfahren unterschiedliche Abweichungen ermitteln. Die Normen VDI/VDE 2608 und DIN ISO 1328-1 definieren hierzu die Einflanken- und Zweiflanken-Wälzprüfung. Deren Messergebnisse sind nicht vergleichbar, da beide Verfahren auf verschiedenen Prinzipien beruhen. Wird für die Prüfung ein Lehrzahnrad (Meisterrad) verwendet, welches im Allgemeinen durch sehr geringe Fertigungsabweichungen charakterisiert ist, so lassen sich die ermittelten Abweichungen dem Prüfzahnrad zuordnen. (ISO 1328; VDI 2608)

Bei der Einflanken-Wälzprüfung werden die Zahnräder mit einem festen Achsabstand montiert. Dadurch wird ein Verzahnungsspiel ermöglicht, wodurch eine Bewegungsfreiheit zwischen beiden Zahnrädern realisiert wird. Hieraus werden Abweichungen in tangentialer Richtung ermittelt, wodurch sich auf die Übertragung der Drehbewegung und somit die Funktionsfähigkeit der Verzahnung schließen lässt. Dahingegen werden bei der Zweiflanken-Wälzprüfung beide Zahnräder spielfrei aneinander abgerollt. Der Achsabstand variiert hierbei. Dies ermöglicht die Abweichungsermittlung in radialer Richtung. Dabei lassen sich Fertigungsabweichungen einfach ermitteln. Diese Unterscheidung wird in Abbildung 2-12 schematisch dargestellt. (VDI 2608)

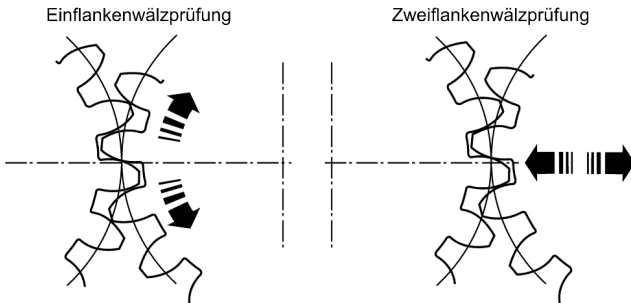


Abbildung 2-12: Funktionale Prüfverfahren für Verzahnungen (VDI 2608)

Die Ergebnisse der Einflanken-Wälzprüfung sind umfangreicher und lassen sich sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich untersuchen. Weiterhin spiegelt dieses Verfahren in der Regel die spätere Einbausituation wider.

Einflanken-Wälzprüfung

Um den Flankenkontakt sicherzustellen wird das Abtriebsrad leicht gebremst und das Antriebsrad langsam gedreht. Dadurch ist eine Flankenseite immer im Zahneingriff. Auf Basis der VDI/VDE 2608 erfolgt die Wälzprüfung mit geringen Drehzahlen ($5\text{-}30\text{ min}^{-1}$) und niedrigen Dreh- ($1\text{-}5\text{ Nm}$) und Bremsmomenten. Daraus kann man einen näherungsweise statischen und lastfreien Zustand annehmen. Bei der Prüfung wird die Drehwinkelabweichung des angetriebenen Zahnrads ermittelt, welche sich aus dem berechneten Drehwinkel des Antriebrads und dem Übersetzungsverhältnis berechnen lässt (Klocke & Brecher 2016; VDI 2608). Abbildung 2-13 zeigt oben den prinzipiellen Aufbau der Einflanken-Wälzprüfung durch ein treibendes Prüfzahnrad und getriebenes Lehrzahnrad (Meisterrad) und Abbildung 2-14 ein beispielhaftes Diagramm der Einflanken-Wälzprüfung.

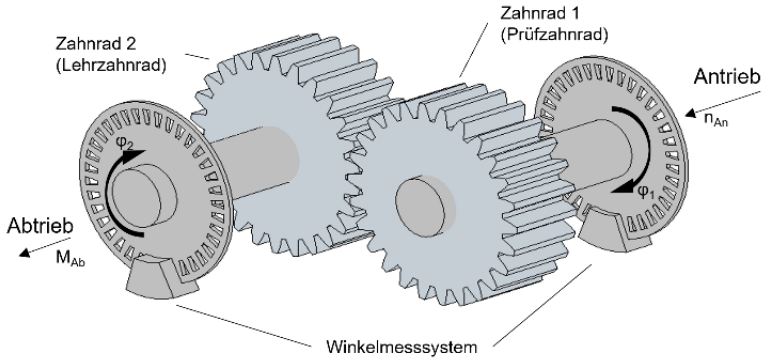


Abbildung 2-13: Einflanken-Wälzprüfung nach (Klocke & Brecher 2016)

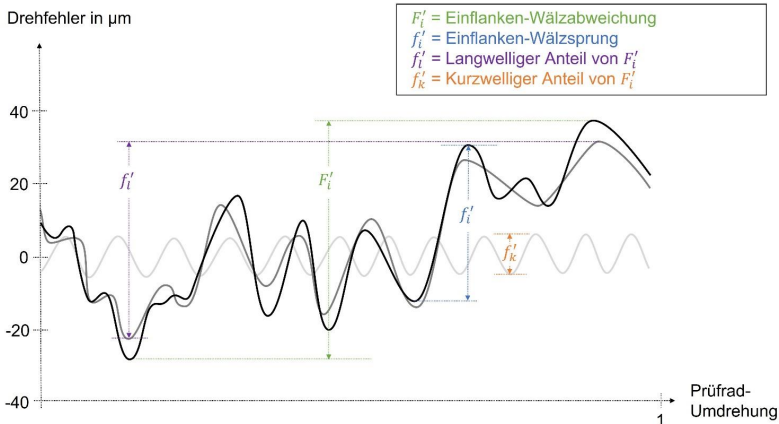


Abbildung 2-14: Oben und unten: Beispielhaftes Ergebnis einer Einflanken-Wälzprüfung nach (DIN 3960) (schwarz = Drehwinkelabweichung; grau = langwelliger Anteil der Drehwinkelabweichung; hellgrau = kurzwelliger Anteil der Drehwinkelabweichung)

In dem Diagramm wird die Drehwinkelabweichung (dicke schwarze Linie) als Bogenlänge auf einem Referenzdurchmesser, häufig der Teilkreisdurchmesser über die Umdrehungen (oder Zahneingriffe) des Antriebrads abgebildet. Die Parameter (diskrete Werte) der Einflanken-Wälzprüfung sind die Einflanken-Wälzabweichung F'_i , der Einflanken-Wälzsprung f'_i , der langwellige Anteil der Einflanken-Wälzabweichung f'_l

und der kurzwellige Anteil der Einflanken-Wälzabweichung f'_k . In der Tabelle 2-4 werden die Parameter gemäß der Definition nach VDI/VDE 2608 erläutert. (Klocke & Brecher 2016; VDI 2608)

Tabelle 2-4: Parameter der Einflanken-Wälzprüfung (VDI 2608)

Parameter	Erklärung
Einflanken-Wälzabweichung f'_i	Schwankung der Ist-Drehstellung gegenüber der Soll-Drehstellung. Diese resultiert aus dem Unterschied der größten voreilenden und nacheilenden Drehstellungsabweichung einer Prüflingsumdrehung.
Einflanken-Wälzsprung f'_i	Größter Unterschied, der bei den Drehstellungsabweichungen innerhalb der Dauer eines Zahneingriffes auftritt.
langwelliger Anteil der Einflanken-Wälzabweichung f'_l	Berechnung einer ausmittelnden Linie aus der Drehwegabweichung, bei der die kurzwelligen Anteile unterdrückt sind. Zur Vergleichbarkeit wird in der Praxis eine Fensterbreite von drei Zahnteilungen verwendet.
kurzwelliger Anteil der Einflanken-Wälzabweichung f'_k	Unterschied zwischen der Drehwegabweichung und der ausmittelnden Linie. Diese können auch Einflüsse von Welligkeiten durch Formabweichungen enthalten.

Weiterhin lassen sich Abweichungen des Rundlaufs und der Teilung einer Verzahnung ermitteln sowie Geräuschemissionen bewerten. Diese Untersuchungen werden jedoch mit Hilfe von Spektralanalysen im Frequenzbereich durchgeführt (Klocke & Brecher 2016). Um eine Frequenzanalyse in kurzer Zeit ausführen zu können, wird das Verfahren der Fast Fourier Transformation (FFT) angewandt.

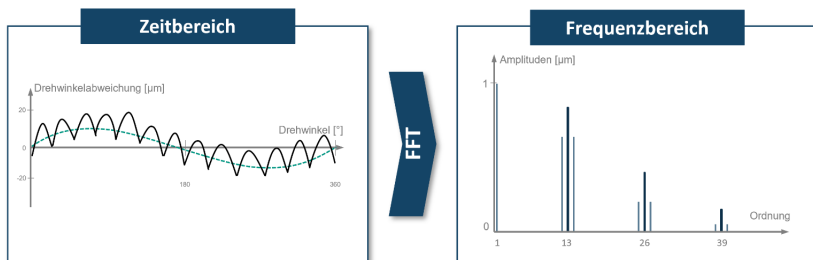


Abbildung 2-15: Fast Fourier Transformation nach (Klocke & Brecher 2016; Müller 2016)

Dabei wird das Zeitsignal in den Frequenzbereich überführt, indem die Zeitfunktion in eine unendliche Anzahl von harmonischen Einzelfunktionen mit unendlich geteilten Frequenzen zerlegt wird, wie es in Abbildung 2-15 visualisiert ist (Klocke & Brecher 2016; Müller 2016; VDI 2608). Diese Beziehung kann durch die folgenden Formeln für kontinuierliche und diskrete Signale beschrieben werden (Hoffmann & Wolff 2014).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{Formel 2-13}$$

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad \text{Formel 2-14}$$

Für den kontinuierlichen Fall wird das Frequenzspektrum durch $X(f)$ dargestellt und das Zeitsignal wird durch $x(t)$ repräsentiert. Für den diskreten Fall, der für die spätere Auswertung in der prototypischen Anwendung des Ansatzes von Bedeutung ist, wird das endliche Frequenzspektrum durch X_k dargestellt und die diskreten Gitterpunkte durch k für ($k = 0, 1, \dots, N - 1$) sowie eine diskrete Signalfunktion durch x_n . Vielfache der Zahneingriffsfrequenz des Frequenzspektrums X_k , die bei der Betrachtung von Zahnrädern von Interesse sind, können mit der Formel 2-15 beschrieben werden. (Hoffmann & Wolff 2014)

$$X_{k'} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-j\frac{2\pi nk'}{N}} \quad \begin{array}{l} \text{Formel} \\ \text{2-15} \end{array}$$

Indem nur die Gitterpunkte berücksichtigt werden, die ein Vielfaches der Anzahl der Zähne z durch die Definition $k' = z \cdot v$ für ($v = 0, 1, \dots, \frac{N-1}{z}$) sind, ist es möglich, Untersuchungen an Zahnrädern durchzuführen. Die resultierenden Ordnungen vermitteln einen Einblick über das Abwälzverhalten und die daraus resultierende Akustik des untersuchten Zahnrads. Ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, Amplituden und Phasenlagen können folglich analysiert werden. Dementsprechend unterteilt die FFT das Signal der Einzelflanken-Wälzprüfung pro Prüflingsumdrehung und sortiert diese Frequenzanteile aufsteigend nach Ordnungen (Müller 2016). Dieses Verfahren ist in Abbildung 2-15 dargestellt. Ein Zeitsignal wird dabei in den Frequenzbereich transformiert. Abschließend werden zu den funktionsorientierten Prüfverfahren die genormten Profilabweichungen und die daraus resultierenden Einflanken-Wälzverläufe nach VDI-Richtlinie 2608 in der Abbildung 2-16 aufgezeigt (VDI 2608).

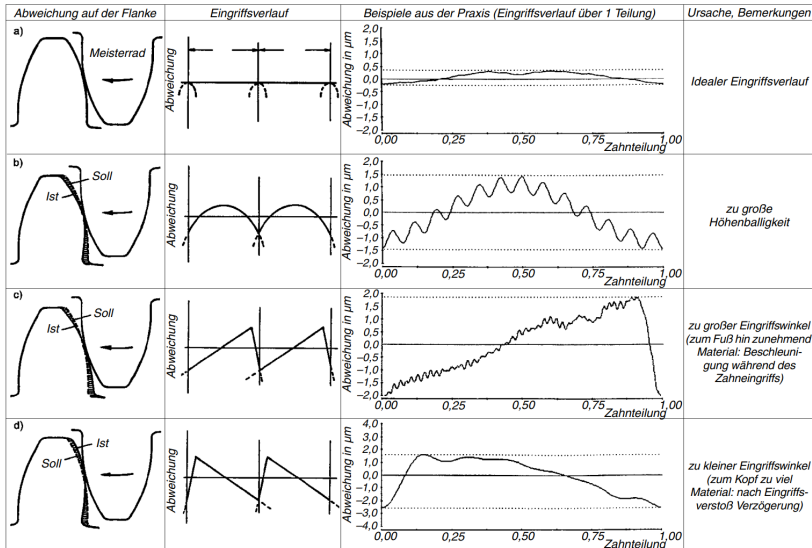


Abbildung 2-16: Typische Profilabweichungen und ihre Auswirkungen (VDI 2608)

Zweiflanken-Wälzabweichung

Hierbei wird eines der beiden Zahnräder, wie in Abbildung 2-12 angedeutet, entlang der Mittellinie radial verschiebbar aufgespannt und durch eine anhaltende Anpresskraft dauerhaft im Zweiflanken-Kontakt mit dem Lehrzahnrad gehalten. Bei der Prüfung schwankt nun der tatsächliche Wälz-Achsabstand a'' kontinuierlich aufgrund der unterschiedlichen Zahndicken und Lückenweiten. Das Ergebnis einer Zweiflanken-Wälzprüfung wird als Kreisdiagramm dargestellt, welches eine Umdrehung des Prüfzahnrad darstellt. Hierbei stellt die Zweiflanken-Wälzabweichung F_i'' den maximalen Unterschied des Wälz-Achsabstands einer Umdrehung dar und der Zweiflanken-Wälzsprung f_i'' den größten Unterschied innerhalb einer Zahnteilung. (VDI 2608)

2.2.6 Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Messung von geometrischen und funktionsorientierten Qualitätsmerkmalen von Mikroverzahnungen sehr wichtig für die Qualitätssicherung ist. Eine 100% Messung von qualitätsrelevanten Merkmalen von

Mikroverzahnungen kann theoretisch innerhalb des Produktionstaktes durch die in-line Integration der optischen Fokusvariationstechnologie realisiert werden.

2.3 Messunsicherheit

Um ein ganzheitliches Verständnis für die Begrifflichkeiten zu erhalten, wird im Folgenden der Begriff der Messunsicherheit definiert. Nach der Definition des „Joint Committee for Guides in Metrology“ (JCGM) hängt das Ergebnis einer Messung von dem Messsystem, dem Messverfahren, dem Anwender, der Umgebung und zusätzlichen Einflüssen ab. Um folglich eine verlässliche Aussage treffen zu können, ob ein Messwert für eine bestimmte Messaufgabe fähig ist, wird das Heranziehen der Messunsicherheit benötigt (Brinkmann 2012; JCGM 104:2009).

2.3.1 Definition

Basierend auf dem „International vocabulary of basic and general terms in metrology“ (VIM) in Kapitel 2.1 ist eine *Messung* der Prozess des experimentellen Aufnehmens eines oder mehrerer Werte, welche einer Messgröße zugeordnet werden (Brinkmann 2012; JCGM 200:2012). Diese Messaufgaben erfolgen manuell oder automatisch (Pesch 2021). Die Messgröße ist als Eigenschaft eines Gegenstandes zu verstehen, welche durch eine Zahl und eine Referenzeinheit dargestellt wird (JCGM 200:2012). Dabei ist es von Relevanz, nicht nur die Zahl, sondern auch deren Referenzeinheit anzugeben. Die Messgröße muss eine physikalische Größe repräsentieren. Somit sind die Masse einer Kugel, das Volumen eines Bechers oder die Spannung zwischen zwei Polen exemplarische Messgrößen. Auf Basis des VIM 2.26 ist die *Messunsicherheit* ein nichtnegativer Parameter, welcher die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der resultierenden Information beigeordnet ist (Brinkmann 2012; JCGM 200:2012). Die Messunsicherheit wird damit einer Messgröße zugeordnet. Um eine Aussage treffen zu können, wie wahrscheinlich ein Messergebnis in dem Intervall der Unsicherheit liegt, wird ein Vertrauensniveau ausgewählt, welches Auskunft über die Annäherung des Messergebnisses an den richtigen Wert der Messung gibt (Dietrich & Schulze 2017; Pesch 2021). Das Ergebnis einer Messung ist im Allgemeinen nur eine Annäherung oder Schätzung des Wertes der Messgröße. Ein Messergebnis ist nur dann vollständig, wenn es von einer Aussage über die Messunsicherheit dieser Schätzung begleitet wird (JCGM 100:2008).

2.3.2 Einflussgrößen

Der Einfluss der Messunsicherheit ist eine nicht gewollte Einflussgröße. Die Messunsicherheit steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Messung. Sie beschränkt sich aber nicht nur auf die Messung selbst, sondern bezieht sich beispielsweise auch auf das Runden von Werten sowie Übertragungsfehlern (Pesch 2010). Der Einfluss der Messunsicherheit kann zu einer Messabweichung führen. Daraus resultiert der jeweilige Messunsicherheitsbeitrag auf das Messergebnis. Ein vollständiges Messergebnis entsteht aus der Verrechnung der Einflüsse, bewertet mit den jeweiligen Gewichtungs- und Sensitivitätskoeffizienten. Zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Einflüsse wird ein Budget, welches die jeweiligen Einflussgrößen beinhaltet, aufgestellt. Die ganzheitliche Erfassung der Einflussgrößen für die jeweilige Messung ist von besonderer Bedeutung, denn sie finden sich in dem späteren aufgestellten Budget für die Unsicherheitsermittlung wieder (Pesch 2021)

2.3.3 Richtlinien

Für die Ermittlung der Messunsicherheit existieren mehrere Richtlinien, welche für den weiteren Verlauf dieser Arbeit von Bedeutung sind. Grundsätzliche Definitionen und Zusammenhänge werden in dem Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) erläutert. Dieser bildet die Basis für die methodische Vorgehensweise der Unsicherheitsermittlung, die Bewertung der Einflüsse sowie die Ermittlung des Unsicherheitsbudgets. Der GUM ist als allgemeines Handbuch zur Ermittlung der Messunsicherheit zu verstehen (JCGM 100:2008). Ferner beinhaltet der GUM mit dem Supplement 1 auch ein methodisches Vorgehen, welches die simulative Ermittlung mittels Monte-Carlo-Verfahren ermöglicht (JCGM 101:2008). Für die Spezifizierung der Messunsicherheit durch Referenzmessungen existieren Normen, die das Vorgehen detaillierter als der GUM beschreiben. Die DIN EN ISO 15530-3 befasst sich mit der Unsicherheitsermittlung von Koordinatenmessgeräten (KMG) durch kalibrierte Werkstücke oder Normale. Dabei wird der GUM auf experimentelle Messungen des zu untersuchenden Verfahrens angewandt (DIN EN ISO 15530). Eine weitere Richtlinie ist die VDI/VDE 2617 - Blatt 8. Darin werden relevante Anmerkungen zur Messunsicherheitsermittlung nach DIN EN ISO 15530-3 und GUM hinzugefügt, welche das Verständnis erhöhen sollen (VDI/VDE 2617).

Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

Die Abkürzung „GUM“ steht übersetzt für „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“. Mit der Veröffentlichung durch den „Joint Committee for Guides in Metrology“ (JCGM) im Jahr 1993 wurde eine einheitliche Methode zur Unsicherheitsermittlung festgelegt. Im Jahr 2008 wurde die ursprüngliche Fassung novelliert. Die Messunsicherheitsanalyse nach GUM basiert auf einem Vorgehen, welches im Allgemeinen in vier aufeinanderfolgende Schritte gegliedert ist. Dieses grundlegende Vorgehen wird in der Originalfassung des GUM im Abschnitt 4 (JCGM 100:2008) und der DIN 1319 - Teil 3 im Abschnitt 4.2 beschrieben (DIN 1319). Die Kritik am Vorgehen nach GUM besteht darin, dass die beschriebene Methodik äußerst allgemein formuliert ist (Pesch 2021).

Ein Modell wird gemäß VIM 2.48 als eine formalisierte Darstellung eines Systems, Prozesses oder Sachverhalts verstanden, welches dazu dient, dessen Eigenschaften zu analysieren, zu verstehen oder Vorhersagen zu treffen. Für eine Messung können verschiedene Modelle existieren, die das Problem beschreiben. Ein Modell kann sich aus einer oder mehreren Eingangsgrößen X_i zusammensetzen, die gemessen werden müssen, um die Ausgangsgröße Y zu ermitteln (JCGM 200:2012). Die Ausgangsgröße wird nach GUM 4.1.1 mit einem Messmodell beschrieben, welche durch die Formel 2-16 repräsentiert wird (JCGM 100:2008).

$$Y = f(X_1, \dots, X_n) \quad \text{Formel 2-16}$$

Im Abschnitt 3.3.5 des GUM werden die Eingangsgrößen X_i als Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben, da ihr wahrer Wert unbekannt ist. Es existieren zwei verschiedene Möglichkeiten um für die Eingangsgrößen die bestmöglichen Schätzwerte x_i zu erhalten. Eine Möglichkeit wird im Abschnitt 4.2 des GUM beschrieben, diese wird als Typ A bezeichnet. Basierend auf Wiederholmessungen werden beim Typ A die Eingangsgrößen ermittelt. Die Messergebnisse einer Messreihe werden mit Hilfe von statistischen Methoden ausgewertet. Als bester Schätzwert wird der arithmetische Mittelwert μ einer Messreihe in Formel 2-17 definiert, wobei x_i für die Messwerte und n für die Anzahl der Messwerte steht (JCGM 100:2008).

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Formel 2-17}$$

Die Standardunsicherheit $u(x_i)$ wird nach GUM 4.2.3 durch die Standardabweichung des Mittelwertes in der Formel 2-18 repräsentiert.

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{Formel 2-18}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Eingangsgrößen stellt die nach dem GUM 4.3, als Typ B bezeichnete Methode, dar. Hier werden die Angaben für die Eingangsgrößen aus anderen Informationsquellen, die bereits erhoben wurden, übernommen. Mit anderen Informationsquellen sind Kalibrier- und Eichscheine, Gerätespezifikationen, Literatur oder bereits erhobene Messdaten gemeint (Mieke 2014). Es wird dabei ersichtlich, dass beide Möglichkeiten (Typ A oder Typ B) eine unterschiedliche Qualität besitzen können. Um die korrekte Berechnung der Messunsicherheit durchzuführen, wird eine weitere Größe benötigt, und zwar der Gewichtungsfaktor G_i der Verteilung (Pesch 2021).

Um bewerten zu können, wie stark das Messergebnis von einem bestimmten Einfluss abhängig ist, beschreibt man die partielle Ableitung der Modellgleichung nach den einzelnen Einflussgrößen X_i als Sensitivitätskoeffizient c_i . In der Formel 2-19 des Koeffizienten wird ersichtlich, dass die Wahl der Modellgleichung $f(X_1, \dots, X_n)$ einen wesentlichen Einfluss auf die Sensitivität hat (Pesch 2010).

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_i} \quad \text{Formel 2-19}$$

Sofern keine weiteren Einflüsse eruiert wurden, ist das Messunsicherheitsbudget aufzustellen. Durch die Anwendung einer numerischen Budgetgleichung erhält man die erweiterte Messunsicherheit U mit dem Erweiterungsfaktor k , den Gewichtungsfaktoren G_i , den Sensitivitätskoeffizienten c_i sowie den jeweiligen Unsicherheitsbeiträgen u_i durch die Formel 2-20.

$$U = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n G_i \cdot (c_i \cdot u_i)^2} \quad \text{Formel 2-20}$$

Für $k = 1$ liegt die Wahrscheinlichkeit bei 68,27 %, dass ein Messergebnis der Normalverteilung im Vertrauensbereich liegt. Bei $k = 2$ beträgt die Wahrscheinlichkeit bereits 95,45 % und entspricht in der allgemeinen Messtechnik dem Standard. (Mieke 2014; Pesch 2021)

Ein vollständiges Messergebnis sollte nach GUM 7.2.3 die Messgröße Y definieren und das Messergebnis in der Form $Y = y \pm U$ angeben, den Grad des Vertrauens benennen sowie über die Methode seiner Ermittlung Auskunft geben (JCGM 100:2008; Mieke 2014). Das Messergebnis kann beispielsweise in folgender Weise präsentiert werden: $Y = 100 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$, $k = 2$, Grad des Vertrauens: 95 %.

Simulative Messunsicherheitsermittlung nach GUM Supplement 1

Analog zu einer Messunsicherheit, die einem Messergebnis zugeordnet ist, sind auch algorithmischen Modellvorhersagen Messunsicherheiten zugeordnet. Diese können jedoch nicht mit dem analytischen Ansatz des GUM bestimmt werden, da die Modellgleichung durch einen Algorithmus dargestellt wird (Wagner 2020). In diesem Fall wird ein numerischer Ansatz mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation (MCM) gemäß GUM Supplement 1 empfohlen. Die Methode kann auch bei sehr komplexen Modellgleichungen hilfreich sein. Wenn die Ergebnisse des analytischen Ansatzes und der MCM divergieren, wird empfohlen, das Ergebnis der MCM vorzuziehen (JCGM 101:2008). Dieser Ansatz basiert auf einem Modell, Eingangsvariablen und Verteilungen. Die Unsicherheit wird jedoch durch wiederholte Zufallsexperimente und nicht durch eine direkte Auswertung bestimmt. Aus den Experimenten ergibt sich eine Häufigkeitsdichte, aus der der Schätzwert y der Ergebnisgröße als Mittelwert, die Standardunsicherheit $u(y)$ als empirische Standardabweichung sowie bei Angabe einer geforderten Überdeckungswahrscheinlichkeit ein Überdeckungsintervall berechnet werden können. Für die Eingangsvariablen X_i wird ein Zufallswert entsprechend ihrer zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgewählt. Für diese Kombination von Eingabeparametern wird der Ausgabewert y_i durch den Algorithmus bestimmt. Entsprechend der gewählten Anzahl von Versuchen M wird das Zufallsexperiment wiederholt und der entsprechende Funktionswert y_M bestimmt. Die Verteilungsfunktion $G(\eta)$ von Y kann durch M Werte von Y angenähert werden. Für die diskrete Häufigkeitsverteilung $\hat{G}(\eta)$ kann der geschätzte Wert y und die empirische Standardabweichung angegeben werden. Mit Hilfe des Konfidenzniveaus, das ebenfalls gegeben ist, kann auch das Konfidenzintervall bestimmt werden (JCGM 101:2008). Abbildung 2-17 illustriert das beschriebene Verfahren. Das Prinzip der Stichprobe besteht darin, unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Verteilung Zufallswerte zu erhalten. Daher muss nach dem Gesetz der großen Zahlen

die Anzahl der Stichproben M ausreichend groß gewählt werden, um eine entsprechende Genauigkeit bei der Schätzung des Ausgangsparameters zu erhalten (Raychaudhuri 2008).

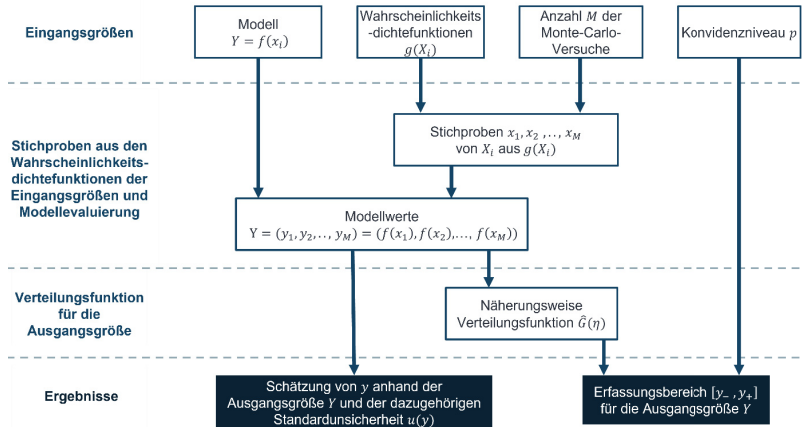


Abbildung 2-17: Verfahren nach GUM Supplement 1 (JCGM 101:2008)

DIN EN ISO 15530-3

In der Norm DIN EN ISO 15530-3 werden die allgemeinen Abläufe der Messunsicherheitsermittlung nach GUM konkretisiert. Auf der Basis von Normalmessungen oder Messungen von kalibrierten Werkstücken lassen sich Unsicherheiten von Koordinatenmessgeräten bestimmen. Dabei definiert die Norm eine eindeutige Vorgehensweise zur experimentellen Messunsicherheitsermittlung. Basierend auf diesem Standard sind weltweit anerkannte Kalibriermessungen möglich. Im Vergleich zur Budgetierung nach GUM ist dieses Verfahren deutlich einfacher in der Durchführung, da die zu untersuchenden Einflüsse bereits definiert und beschrieben sind. Als wichtige Voraussetzungen für dieses Vorgehen werden kalibrierte Messgeräte, stabile Umgebungsbedingungen sowie zu den kalibrierten Werkstücken mindestens ähnliche Bauteile benötigt. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, ist das kalibrierte Bauteil mindestens 20-mal wiederholt zu messen. Eine Auswertung der Messungen, des Kalibrierscheins und zusätzlicher Informationen ermöglicht die Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit U , deren numerisches Budget aus der Wurzel der Quadratsumme von vier Einzelbeiträgen

besteht. Das daraus resultierende Ergebnis wird mit dem Erweiterungsfaktor ($k = 2$) multipliziert. Die dazugehörige Formel 2-21 zeigt das numerische Budget. Dabei beschreibt u_{cal} die Standardunsicherheit der Kalibriermessung aus dem Kalibrierschein, u_p die Standardunsicherheit der Streuung des Messverfahrens, u_b die Standardunsicherheit der systematischen Abweichung des Messverfahrens und u_w die Standardunsicherheit aus Werkstoff- und Produktionsstreuungen des Ausdehnungskoeffizienten. Ferner beinhaltet sie Formabweichungen, Rauheiten und Elastizitäten. (DIN EN ISO 15530)

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad \text{Formel 2-21}$$

Die Standardunsicherheit der Streuung des Messverfahrens u_p wird durch die Standardabweichung des Mittelwerts μ von n Messwerten x_i definiert (DIN EN ISO 15530). Die Formel 2-22 beschreibt das Vorgehen der Berechnung.

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{Formel 2-22}$$

Die DIN EN ISO 15530-3 ermöglicht ein Vorgehen zur experimentellen Messunsicherheitsermittlung mittels Normalen oder kalibrierten Werkstücken, welche in dieser Arbeit genutzt wird, um die spezifischen Messunsicherheiten von optischer und taktile Koordinatenmesstechnik zu ermitteln.

VDI/VDE 2617 - Blatt 8

In der VDI/VDE Norm 2617 - Blatt 8 wird explizit die Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten beschrieben. Ferner spezifiziert diese Richtlinie ebenfalls in Anhang B weitere relevante Informationen zum GUM und der DIN EN ISO 15530-3, weshalb im Folgenden auf diese Aspekte eingegangen wird. Nach dem GUM ist eine Korrektur der bekannten, systematischen Abweichung notwendig (JCGM 100:2008). Falls diese in der DIN EN ISO 15530-3 nicht möglich ist, wird die Formel 2-21 um die systematische Abweichung b_{sys} erweitert. Daraus resultiert die Formel 2-23. Wobei b_{sys} der Schätzwert für die systematische Abweichung zwischen den Mittelwerten der Messungen und dem Kalibrierwert entspricht. Damit lässt sich die Unsicherheit durch Messungen an einem Normal ermitteln und durch Kalibrierung von Referenzbauteilen die Unsicherheit innerhalb der Produktionsumgebung bestimmen. (VDI/VDE 2617)

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2 + b_{sys}^2}$$

Formel 2-23

2.3.4 Zwischenfazit

Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Angabe der Messunsicherheit für jedes Messergebnis gefordert ist. Dadurch kann die Güte des Messergebnisses quantifiziert werden. Methodisch erfolgt die Messunsicherheitsermittlung nach den Richtlinien des GUM, der auch die Quantifizierung der Simulationsunsicherheit berücksichtigt.

2.4 Qualitätsprüfung

Für die Qualitätsprüfung im Allgemeinen werden nachfolgend die verschiedenen Prüfstrategien, die Rückführbarkeit von Messwerten und die Prüfprozesseignung erläutert.

Nach der DIN 55350 ist die Qualitätsprüfung als die Feststellung definiert, ob eine Einheit eine bestimmte Qualitätsanforderung erfüllt. Die Qualitätsprüfung wird anhand von definierten Prüfmerkmalen durchgeführt. Für die Prüfung ist festzulegen, auf welche Merkmale sich die Prüfung bezieht und welche Anforderung in Bezug auf die Qualität erwartet wird. Im allgemeinen Kontext der Qualitätsprüfung werden Begriffe wie Überprüfung, Nachprüfung oder Nachweisprüfung verwendet. Diese beschreiben Teile des Überbegriffs der Qualitätsprüfung. Für jeden dieser Anwendungsfälle sind die Begriffe in der DIN 55350 definiert. Die Qualitätsprüfung bezieht sich auf ein materielles oder immaterielles Produkt, deren Kombination, eine Tätigkeit oder einen Prozess. (DIN 55350; Pfeifer & Schmitt 2011b)

2.4.1 Prüfstrategien

Die Qualitätsprüfung lässt sich in verschiedene Prüfstrategien unterteilen. Unter einer vollständigen Prüfung ist die Prüfung aller festgelegten und definierten Qualitätsmerkmale zu verstehen. Damit diese nicht mit einer 100 %-Prüfung verwechselt wird, sollte der Begriff „Vollprüfung“ vermieden werden, denn eine Prüfung von 100 % bezieht sich auf die Prüfung aller Einheiten eines Loses. Im Vergleich zur vollständigen Prüfung werden bei der 100%-Prüfung jedoch nur ausgewählte Merkmale berücksichtigt. Weiter unterteilen lässt sich die 100 %-Prüfung in eine Sortier- und eine Klassierprüfung. Dabei ist die Sortierprüfung durch das Entfernen von Einheiten eines

Loses gekennzeichnet, welche die spezifizierten Qualitätsanforderungen nicht erfüllen. Im Vergleich dazu werden bei der Klassierprüfung keine Einheiten entfernt, sondern auf Basis von Merkmalsausprägungen in unterschiedliche Güteklassen eingeteilt. Bei der Stichprobenprüfung wird nur eine bestimmte Teilmenge des zu prüfenden Loses betrachtet. Der Prüfumfang kann bei der Stichprobenprüfung dynamisch variieren oder statisch festgelegt sein. Als letzte Prüfstrategie ist in der Norm auch ein Prüfverzicht möglich. Tabelle 2-5 fasst die möglichen Prüfstrategien zusammen. (DIN 55350)

Tabelle 2-5: Übersicht möglicher Prüfstrategien (DIN 55350)

Prüfstrategie	Umfang	Unterteilung
Vollständig 100 %	Sämtliche Merkmale aller Einheiten eines Loses. Ausgewählte Merkmale aller Einheiten eines Loses.	- 1) Sortierprüfung 2) Klassierprüfung
Stichprobe	Ausgewählte Merkmale einer Teilmenge eines Loses.	1) Statisch 2) Dynamisiert
Verzicht	Keine Einheit eines Loses.	-

2.4.2 Rückführbarkeit

Für die Vergleichbarkeit von Messergebnissen, die an unterschiedlichen Orten und Zeitpunkten ermittelt worden sind, bedarf es einer Kalibrierung. Gemäß der Norm DIN 1319-1 wird der Vorgang des Kalibrierens als die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen einem Messwert und dem dazugehörigen richtigen Wert beschrieben. Die betrachtete Zielgröße ist die Messabweichung eines Messgerätes. Eine Kalibrierung ist somit kein Eingriff in das Messgerät, sondern ermöglicht eine nachträgliche und rechnerische Korrektur des Ergebnisses. Ein Normal ist entsprechend der DIN 1319-1 als eine Maßverkörperung, ein Messgerät oder ein Referenzmaterial definiert, die alle eine Einheit oder bekannte Werte einer Größe darstellen, bewahren oder reproduzieren. Ein Normal dient als Bezugsmaßstab zur Kalibrierung. Im allgemeinen Kontext der Qualitätssicherung wird hierbei der Begriff der Rückführbarkeit eines Messergebnisses verwendet. (DIN 1319; Pfeifer & Schmitt 2011b)

In Deutschland wird die Kalibrierung auf ein nationales Normal zurückgeführt, welches bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) aufbewahrt ist. Das Bezugsnormal der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) dient zur Weitergabe des nationalen Normals von der PTB über die DAkkS zur Industrie. Basierend darauf lässt sich das Werksnormal eines Industriebetriebs auf das nationale Normal der PTB zurückführen. Dieses Vorgehen wird auch Kalibrierkette bezeichnet. Das Qualitätssicherungssystem

der DIN EN ISO 9001 - 9003 gewährleistet durch die eingeforderte Prüfmittelüberwachung die Rückführbarkeit aller Messergebnisse. Abbildung 2-18 zeigt abschließend die Kalibrierhierarchie in Deutschland. (Härtig et al. 2002)

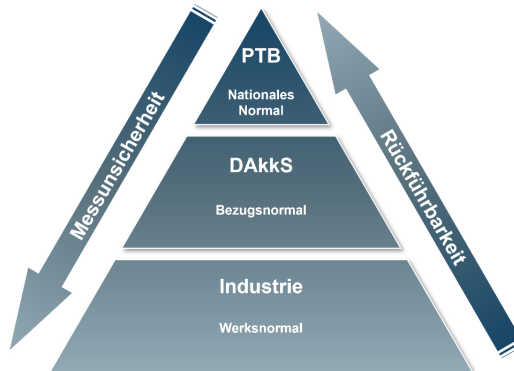


Abbildung 2-18: Kalibrierhierarchie in Deutschland nach (Härtig 2010)

2.4.3 Prüfprozesseignung

Eine Forderung der Norm DIN EN ISO 9001 ist, dass bereitgestellte Ressourcen für ihre Messtätigkeiten geeignet sind (DIN EN ISO 9001). Diese Eignung lässt sich beispielsweise durch ein angemessenes Verhältnis zwischen der Messunsicherheit und der Toleranz der Messgröße sicherstellen und wird als Prüfprozesseignung bezeichnet (VDI/VDE 2617). Die Norm VDI 2617 - Blatt 8 beschreibt das Vorgehen für die Ermittlung der Prüfprozesseignung und konkretisiert diese auf den Einsatz der Koordinatenmesstechnik. Basierend auf dieser Vorgabe setzt sich die Prüfprozesseignung aus der erweiterten Messunsicherheit U mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ und der definierten Toleranz T zusammen. Für eine eindeutige Konformitätsaussage besteht die Forderung nach einer geringen Messunsicherheit. Im Falle von zweiseitigen Toleranzen, wie es für Profil-Winkelabweichungen und Flankenlinien-Winkelabweichungen der Fall ist, ergibt sich das Prüfprozesseignungsverhältnis g_{pp} durch den in Formel 2-24 angegebenen Zusammenhang. Durch den Faktor 2 in der Formel wird die zweiseitige Toleranz entsprechend berücksichtigt. Bei den einseitigen Toleranzen ergibt sich das Verhältnis ohne entsprechenden Vorfaktor nach Formel 2-25. Das Prüfprozesseig-

nungsverhältnis g_{pp} darf gemäß der Norm den Grenzwert G_{pp} dabei nicht überschreiten. Durch die Berechnung des Quotienten lässt sich beurteilen, ob das Messverfahren für die jeweilige Messaufgabe geeignet ist. (VDI/VDE 2617).

$$g_{pp,zweiseitig} = 2 \cdot \frac{U}{T} \leq G_{pp} \quad \text{Formel 2-24}$$

$$g_{pp,einseitig} = \frac{U}{T} \leq G_{pp} \quad \text{Formel 2-25}$$

Der Grenzwert G_{pp} liegt gemäß VDI 2617 - Blatt 8 in einem Bereich von 0,1 bis 0,4 (VDI/VDE 2617). Die höhere Anforderung von 0,1 entspricht der goldenen Regel der Messunsicherheit, welche besagt, dass die Messunsicherheit einem Zehntel der Toleranz entsprechen sollte (Weckenmann & Gawande 1999). Eine hohe Anforderung führt jedoch auch zu einer signifikanten Steigerung des benötigten Messaufwands. Deshalb empfiehlt der Band 5 des Verbands der Automobilindustrie den Grenzwert von $G_{pp} = 0,3$ (VDA-5). Mit der Prüfprozesseignung lässt sich nachweisen, ob ein Messprozess für die entsprechende Prüfaufgabe geeignet ist.

2.4.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es von Bedeutung ist Messwerte zur Vergleichbarkeit auf ein kalibriertes Normal zurückzuführen. Ferner kann durch die Prüfprozesseignung die Fähigkeit eines Messgerätes nachgewiesen werden.

2.5 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung ist ein geeignetes Verfahren, wenn es darum geht Prozesse und Zusammenhänge systematisch verstehen und optimieren zu können (Siebertz 2017). Als Methode wird dabei nachfolgend das Latin Hypercube Sampling (LHS) erläutert.

2.5.1 Definition

Die statistische Versuchsplanung ist ein Verfahren zur strukturierten Umsetzung von Experimenten. Bezeichnet wird diese Vorgehensweise im Englischen als Design Of Experiments (DOE). Durch das strukturierte Aufstellen eines Versuchsplans lassen sich empirische Zusammenhänge eines Prozesses mit mehreren Einflussgrößen und einer Zielgröße beschreiben. Das grundlegende Konzept ist in Abbildung 2-19 dargestellt (Bandow & Holzmüller 2010). Es existiert grundsätzlich die Möglichkeit, alle Zustände

der Einflussgrößen als vollfaktoriellen Versuchsplan abzubilden. Jedoch erlangen reduzierte Versuchspläne aufgrund ihrer Kompaktheit und des damit einhergehenden geringeren Aufwand zunehmend an Bedeutung (Geiger & Kotte 2007; Schneider 2020).

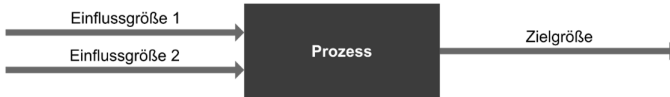


Abbildung 2-19: Konzept der statistischen Versuchsplanung nach (Bandow & Holzmüller 2010)

2.5.2 Latin Hypercube Sampling

In Abhängigkeit der Komplexität der Problemstellung existieren Ansätze zur linearen oder nichtlinearen Beschreibung von Versuchsplänen. Speziell für komplexe Probleme bieten sich Pläne auf der Basis von Latin Hypercube Designs (LHD) an. Ein LHD ist als Matrix zu verstehen, bei welcher stichprobenartig Matrixeinträge durch zufällige Permutationen ermittelt werden. Durch Normierung auf ein Einheitsintervall wird aus dem LHD ein Latin Hypercube Sampling (LHS). Diese Methode ist besonders zur Erstellung eines komplexen Versuchsraums geeignet. Basierend auf der Einteilung in Klassen verhält sich dieses Verfahren bei kleinen Stichprobenumfängen gleichmäßiger als Zufallszahlen. Dieser Vorteil ist in Abbildung 2-20 visuell dargestellt. (Siebertz et al. 2017; Viana 2016)

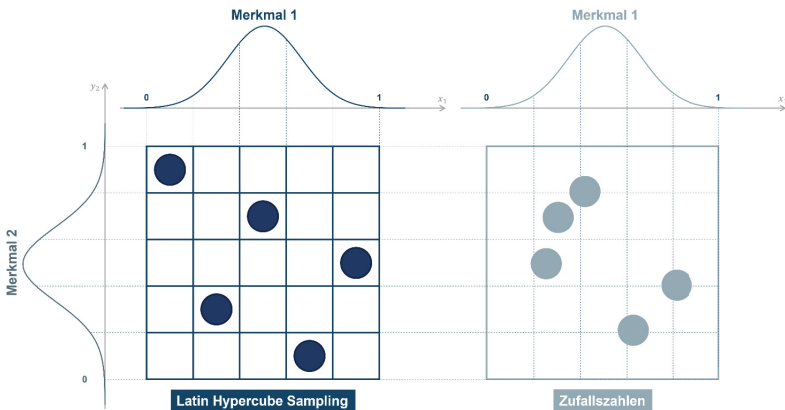


Abbildung 2-20: Vorteil des LHS (links) gegenüber Zufallszahlen (rechts) für Versuchsräume nach (Siebertz et al. 2017)

Der bevorzugte Einsatz von LHS liegt in Anwendungen, bei denen eine große Anzahl von Simulationen nicht durchführbar ist und eine Schätzung von sehr hohen Quantilen ($> 0,99$) nicht erforderlich ist (Helton & Davis 2000). Dabei liefert LHS stabilere analytische Ergebnisse und vermeidet das Auftreten von Clustering, während Zufallszahlen unabhängig voneinander gezogen werden und möglicherweise zu Clustern führen können. Durch die Einteilung des Parameterraums in Klassen soll eine gleichmäßige Abdeckung der Elemente in X und Y gewährleistet und die Effizienz der Stichprobenauswahl erhöht werden. Dieses probabilistische Verfahren weist jedem Stichprobenelement ein Gewicht zu. Aufgrund dieser effizienten Struktur eignet sich LHS insbesondere für Modelle mit begrenzter Stichprobengröße (Helton & Davis 2003).

2.5.3 Zwischenfazit

Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das Latin Hypercube Sampling eine effiziente Methode der statistischen Versuchsplanung darstellt, um mit einem geringen Stichprobenumfang komplexe Versuchsräume abzubilden.

2.6 Messdatenanalyse

Zur quantitativen Beschreibung und Bewertung der Messergebnisse, die in unterschiedlicher Form und Ausprägung vorliegen können, werden im Folgenden die Methoden der Künstlichen Intelligenz, die statistischen Kenngrößen und die Analyse von Signaldaten erläutert.

2.6.1 Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen

Künstliche Intelligenz (KI) bezieht sich auf die Nachahmung intellektueller menschlicher Tätigkeiten durch ein Computer-System. Maschinelles Lernen (ML) ist ein Teilbereich der KI, bei dem Algorithmen auf großen Datenmengen trainiert werden um bestimmte Aufgaben zu erlernen. KI und ML haben viele gemeinsame Anwendungen und die Methoden des ML werden im Rahmen der KI genutzt. Im maschinellen Lernen gibt es drei Kategorien: überwachtes Lernen, unüberwachtes Lernen und bestärkendes Lernen. Diese versuchen einen mathematischen Zusammenhang in Form einer Funktion zu erlernen, indem sie große Datenmengen nutzen. Beim überwachten Lernen sind sowohl Input- als auch Outputdaten vorhanden, beim unüberwachten Lernen nur Inputdaten. Beim überwachten Lernen spricht man von markierten Daten, die durch den erhöhten

Informationsgehalt im Vergleich zu nicht Markierten einen Vorteil darstellen. (Brühl 2019; Frochte 2020; Wang et al. 2016)

- **Überwachtes Lernen:** Hierbei sind sowohl Input- als auch Outputdaten vorhanden. Das Ziel ist es, eine Funktion zu finden, die die Inputdaten mit den Outputdaten in Verbindung bringt. Man unterscheidet dabei zwischen der Klassifikation und Regression (Brühl 2019; Frochte 2020).
- **Unüberwachtes Lernen:** Hier sind nur Inputdaten vorhanden und das Ziel ist es, Muster innerhalb der Daten zu finden. Hierbei spricht man von Clustering (Brühl 2019; Frochte 2020).
- **Bestärkendes Lernen:** Das System erhält positive oder negative Rückmeldungen auf seine Aktionen und lernt so, welche Aktionen zu positiven Ergebnissen führen (Brühl 2019; Frochte 2020).

2.6.1.1 Überwachtes Lernen

Zunächst werden die verschiedenen Methoden des überwachten Lernens näher betrachtet. Eine Methode davon stellt die Support-Vektormaschine (SVM) dar, die durch Hyperebenen einzelne Objekte in Klassen einteilt. Insbesondere bei nichtlinearen Klassengrenzen kann durch den sogenannten Kernel-Trick in einen höherdimensionalen Raum überführt werden. (Schölkopf et al. 2002). Der Algorithmus des K -Nearest-Neighbor (KNN) ermittelt Klassen auf Basis der Anzahl K direkte Nachbarpunkte. Ein Punkt erhält dabei die Klassenzuordnung, welche am häufigsten unter den K Nachbarpunkten auftritt. Somit findet während des Trainings lediglich eine Speicherung der Datenpunkte und keine Ermittlung einer Klassifizierungsvorschrift statt (Darrell et al. 2005). Im Vergleich dazu werden bei Entscheidungsbäumen (englisch: decision tree) nicht alle Merkmale parallel berücksichtigt. Dadurch erfolgt eine hierarchische Klassifizierung, welche sich als stufenweise Verzweigung eines Baums beschreiben lässt (Maimon & Rokach 2014). Der Naive-Bayes-Klassifikator basiert auf dem Satz von Bayes, welcher die Berechnung von bedingten Wahrscheinlichkeiten ermöglicht. Dabei werden die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Merkmalen in der jeweiligen Klasse ermittelt. Die Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit wird abschließend präferiert. Unter der Annahme, dass Merkmalsvektoren \vec{x} und die repräsentativen Objekte einer Klasse in einem systematischen Zusammenhang stehen, können die Merkmalsvektoren

ren und deren Klassenzuordnung zur Bestimmung von generalisierenden Klassenmodellen genutzt werden. Dadurch ermöglicht dieser neue Objekte mit bis dahin unbekannter Klassenzuordnung zu klassifizieren. Die Regression hingegen ermöglicht eine Betrachtung von kontinuierlichen Zielgrößen, bei der sich Zusammenhänge zwischen Merkmalen durch eine mathematische Funktion schätzen lassen, welche aus Datenpunkten ermittelt wird. Im Falle einer linearen Regression wird der entsprechende Zusammenhang durch eine Gerade approximiert. Nichtlineare Zusammenhänge benötigen aufwendigere Modellierungen, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Die Methode der Kreuzvalidierung prüft die Übertragbarkeit eines Modells, indem ein Datensatz in Trainings- und Validierungsteile unterteilt wird. Diese werden durch die k -fache Kreuzvalidierung erweitert, indem der Datensatz k -mal zufällig unterteilt wird, um eine verlässlichere Aussage zur Übertragbarkeit des Modells zu ermöglichen. (Runkler 2010; Wang et al. 2016)

2.6.1.2 Unüberwachtes Lernen (Statistische Formanalyse)

Die statistische Formanalyse hat ihren Ursprung in der maschinellen Bildverarbeitung, bei der in kurzer Zeit eine große Anzahl von Datenpunkten gesammelt wird. Diese Datenpunkte müssen hinsichtlich vorhandener Formparameter ausgewertet werden, um Funktionen wie Gestensteuerung zu ermöglichen (Stegmann & Gomez 2002). Matuszyk, Cardew-Hall & Rolfe beschäftigten sich mit einer statistischen Analyse von optischen Messpunktewolken von Stanzteilen (Matuszyk et al. 2010). Ziel dieser Untersuchung ist es, realistische Aussagen über das Verformungsverhalten zu treffen. Zu diesem Zweck werden die Datenpunkte der optischen Messungen hinsichtlich ihrer Dimension reduziert. Dies gelingt mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse und der Charakterisierung mittels eines Punktverteilungsmodells auf der Basis der zugrunde liegenden Korrelationen. Diese Dimensionsreduktion ist hilfreich, da sich die bei der Verformung von Bauteilen aufgenommenen Oberflächenpunkte nicht unabhängig voneinander verhalten (Matuszyk et al. 2010). Folglich bietet diese Charakterisierung die Möglichkeit, die in den Punktverteilungen beobachteten Multimodalitäten zu berücksichtigen.

2.6.2 Statistische Kenngrößen

Der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung wurden bereits im Kapitel 2.3 in Bezug auf die Messunsicherheit erläutert. Als weitere statistische Größe zum

Mittelwert dient der Median zur Beschreibung der mittleren Position einer Häufigkeitsverteilung. Dieser Wert ist, im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert unempfindlich gegenüber Ausreißern. Der Median \tilde{x} einer aufsteigend sortierten Stichprobe x_1, \dots, x_m mit m Messwerten berechnet sich für eine gerade und ungerade Anzahl an Werten durch Formel 2-26 und Formel 2-27. (Bourier 2010)

$$\tilde{x}_{gerade} = x_{\lfloor \frac{m+1}{2} \rfloor} \quad \text{Formel 2-26}$$

$$\tilde{x}_{ungerade} = \frac{1}{2} (x_{\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} + x_{\lfloor \frac{m}{2} \rfloor + 1}) \quad \text{Formel 2-27}$$

Zur Quantifizierung eines linearen Zusammenhangs zwischen Merkmalen, eignet sich der einheitenlose Korrelationskoeffizient r nach Bravais-Pearson. Der Wertebereich für r ist zwischen minus Eins (stark negative Korrelation) und Eins (stark positive Korrelation) definiert. Ist r nahe Null, liegt eine schwache Korrelation vor. Dadurch lassen sich kritische Abhängigkeiten von Merkmalen identifizieren. Der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson wird in Formel 2-28 repräsentiert, wobei $x_{1,i}$ ein Wert der Stichprobe des Merkmals 1, $x_{2,i}$ ein Wert der Stichprobe des Merkmals 2, \bar{x}_1 der Mittelwert der Stichprobe des Merkmals 1, \bar{x}_2 der Mittelwert der Stichprobe des Merkmals 2 und m die Anzahl der Messwerte darstellt. (Bourier 2010)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{1,i} - \bar{x}_1) \cdot (x_{2,i} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{1,i} - \bar{x}_1)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{2,i} - \bar{x}_2)^2}} \quad \text{Formel 2-28}$$

Die Qualität des trainierten Modells lässt sich durch den dimensionsbehafteten mittleren quadratischen Fehler (*RMSE*) oder das dimensionslose Bestimmtheitsmaß R^2 ermitteln. Der mittlere quadratische Fehler wird aus der Quadratwurzel des Mittelwerts aller m Fehlerquadrate berechnet. Innerhalb eines Fehlerquadrats wird der Prognosewert z_i von dem Messwert x_i subtrahiert. Der *RMSE*, welcher in Formel 2-29 beschrieben ist, hat sich als wichtige Fehlerkenngröße zur quantitativen Beurteilung von Prognosen etabliert. (Neill & Hashemi 2018)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - z_i)^2} \quad \text{Formel 2-29}$$

Im Vergleich zu der Fehlerbewertung über gemittelte Fehlerquadrate beschreibt das dimensionslose Bestimmtheitsmaß R^2 das Verhältnis der Quadratsumme der Prognose

zur Quadratsumme der Messwerte. Diese Kenngröße wird genutzt, um die Prognosegüte in Bezug auf die Messdatenstreuung zu quantifizieren. Bei einem Wert von 100 % bildet die Prognose den Zusammenhang ideal ab, da keine Streuung der Messdaten vorliegt und die Funktion den Prozess optimal abbildet. Diese Beziehung ist in Formel 2-30 dargestellt, wobei der Prognosewert durch z_i , der Messwert durch x_i und der arithmetische Mittelwert der Messwerte durch \bar{x} ausgedrückt wird. (Ait-Amir et al. 2015)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Formel 2-30}$$

Somit lassen sich umfangreiche Datenanalysen durchführen, welche die Konzeption sowie Realisierung eines datengetriebenen Regelkreises ermöglichen.

2.6.3 Analyse von Signalen

Die Beschreibung von Signalen mit mathematischen Methoden wird allgemein als Signalverarbeitung bezeichnet. Dabei geht es vor allem um die Erfassung der Bedeutung eines Signals und damit um die Informationsgewinnung (Hoffmann & Wolff 2014). Im Folgenden wird die Filterung und Analyse mittels Operatoren für zeitdiskrete Signale betrachtet. Filter sind Systeme, die gezielt das Spektrum von Signalen beeinflussen. Sie werden beispielsweise eingesetzt um den Messsignalen überlagerte Störungen zu entfernen (Beucher 2015). Zur Realisierung der Beeinflussung des Frequenzganges gibt es eine Vielzahl von Konzepten. In der Praxis werden häufig IIR-Filter (Infinite Impulse Response) eingesetzt, damit die Filterung auf leistungsschwacher Hardware realisiert werden kann. Dabei ist $x[n]$ das gemessene Signal, $x_f[n]$ das gefilterte Signal und n der Zeitindex. Die Filterkoeffizienten a_i und b_j bestimmen die Impulsantwort des Filters sowie den Frequenzgang (Beucher 2015).

$$x_f[n] = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_f[n - i] + \sum_{j=0}^n b_j \cdot x[n - j] \quad \text{Formel 2-31}$$

Im Folgenden werden die Konzepte des Tiefpassfilters, des Hochpassfilters und des gleitenden Mittelwerts als FIR-Filter (Finite Impulse Response) beschrieben. Tiefpassfilter schwächen alle Frequenzen oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ab. Frequenzen, die näher an der Grenzfrequenz liegen, werden schwächer gedämpft als solche, die weiter entfernt sind. Darüber hinaus haben IIR-Filter (Infinite Impulse Response) eine frequenzabhängige Phase, die nicht konstant ist. Dies führt zu Gruppenlaufzeitverzerrungen. Hochpassfilter hingegen funktionieren nach demselben

Prinzip. Der einzige Unterschied besteht darin, dass Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz abgeschwächt werden. (Werner 2006)

Der gleitende Durchschnitt m_M^k hat ein Systemverhalten wie ein Tiefpassfilter. Er ist jedoch ein FIR-Filter, bei dem alle Koeffizienten a_i in Formel 2-32 Null sind. Hier wird eine Folge des zeitlich veränderlichen Mittelwerts über k Stichproben aus der Sequenz $x(n)$ ermittelt. Die Anzahl der gemittelten Punkte bestimmt die Glättung des Signals. Bei einem solchen System tritt im Vergleich zu IIR-Filtern keine Gruppenlaufzeitverzerrung auf (Kreiß & Neuhaus 2006).

$$m_M^k[t] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x(n-i) \quad \text{Formel 2-32}$$

Eine Kreuzkorrelation untersucht die lineare Ähnlichkeit zweier diskreter Signale x und y auf eine Verschiebung in der Ausbreitungsrichtung u des Signals. Die Position des absoluten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion beschreibt den Verschiebungswert zwischen den beiden Signalen, von denen mindestens eines nicht verzerrt mit einem Mittelwert bei 0 sein muss.

$$\text{cross - corr} \{k\} = \frac{\sum_{i=1}^N x[i] * y[i+k]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 * \sum_{i=1}^N (y_{i+k} - \mu_y)^2}} \quad \text{Formel 2-33}$$

Die Normierung auf den Effektivwert des Einzelsignals begrenzt den Wertebereich zwischen -1 und 1. Ein Wert von 1 beschreibt, dass für die gegebene Verschiebung Signalgleichheit besteht. Werte von -1 bedeuten eine Gegenphasigkeit des Signals. Je mehr der Absolutwert gegen 0 abnimmt, desto geringer ist die Ähnlichkeit der verschobenen Signale. Dies bedeutet, dass Signale mit Kreuzkorrelationen nahe Null keine nennenswerten Ähnlichkeiten aufweisen (Hemmelmann 2007).

Die spektrale Leistungsdichte (PSD, Power-Spectral-Density) beschreibt die Leistung pro Frequenzeinheit, d.h. auf einem infinitesimalen Frequenzband für kontinuierliche Funktionen. Bei zeitdiskreten Funktionen ist die Bandbreite auf weniger als die Hälfte der Abtastfrequenz begrenzt (Hoffmann & Wolff 2014). Die Analyse dieser PSD ermöglicht die Bestimmung von periodischen Signalkomponenten (Werner 2006). Die spektrale Leistungsdichte $P_{xx}(f)$ ergibt sich aus dem Quotienten des Leistungsspektrums $S_{xx}(f)$ und der entsprechenden Abtastfrequenz f_s . Dies ermöglicht eine Analyse von periodischen Signalkomponenten.

2.6.4 Zwischenfazit

Die Messdatenanalyse ist von großer Bedeutung, da sie die Bewertung von Messdaten ermöglicht, die in komplexer Form vorliegen können. Mit Methoden der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens lassen sich große Datenmengen performant analysieren. Durch den Einsatz der Signalverarbeitung wird die Analyse und Synthese von Daten unterstützt.

2.7 Prozess- und Qualitätsregelung

Im Folgenden werden die relevanten Grundlagen zur Prozessregelung dargestellt. Nach deren Definition folgt eine Beschreibung ihrer einzelnen Elemente. Zum Abschluss werden die Funktionsbausteine zu dem System des Regelkreises im Kontext des Qualitätsmanagements kombiniert.

2.7.1 Definition

Basierend auf der DIN IEC 60050-351 ist eine Regelung ein Vorgang, bei dem eine variable Regelgröße auf der Basis von Messdaten mit einer variablen Führungsgröße verglichen und fortlaufend an die Führungsgröße angeglichen wird (DIN IEC 60050). Die Prozessregelung bezieht sich auf den Einsatz automatischer Regelungstechniken mit dem Ziel, die Qualität, Leistung und/oder Sicherheit eines Produktionsprozesses zu erhöhen. Der Vorteil der Regelung liegt in der Fähigkeit zur Kompensation von Störgrößen. Dennoch geht mit ihr der Nachteil einher, dass kontinuierliche Messungen sowie die zeitliche Verzögerung aufgrund der Datenerfassung, Auswertung und der erforderlichen Anpassungszeit erforderlich sind (Heinrich & Schneider 2019).

2.7.2 Elemente eines Regelkreises

Ein geschlossener Regelkreis setzt sich aus vier Komponenten zusammen: der Messtechnik, der Regelung, dem Stellglied und dem Prozess selbst. Generell besteht die Aufgabe der Messtechnik darin, Informationen über den zu regelnden Prozess zu erfassen. Die Regelung zielt darauf ab, Abweichungen zwischen den Messdaten und der Sollgröße zu minimieren, die den gewünschten Zustand repräsentiert. Das Stellglied wiederum modifiziert Prozessparameter, um den Zustand mit minimierten Abweichungen kontinuierlich aufrechtzuerhalten. Auf diese Weise soll der Regelkreis dazu dienen, Schwankungen im Prozess zu kompensieren. (Heinrich et al. 2020)

2.7.3 Qualitätsregelkreis

Im allgemeinen Kontext des Qualitätsmanagements sind Qualitätsmerkmale eines Bauteils innerhalb eines Produktionsprozesses zu regeln. Der Aufbau eines geschlossenen Qualitätsregelkreises, welcher sich aus den Elementen eines klassischen Regelkreises zusammensetzt, ist in Abbildung 2-21 dargestellt.

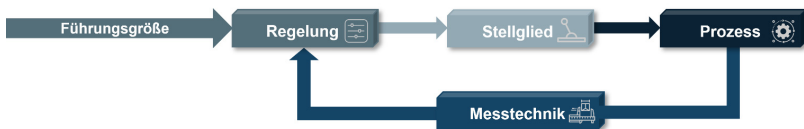


Abbildung 2-21: Vereinfachter Aufbau eines Qualitätsregelkreises nach (Heinrich et al. 2020)

Die Führungsgröße repräsentiert hierbei ein beliebiges Qualitätsmerkmal, welches durch Störungen innerhalb des Produktionsprozesses Schwankungen ausgesetzt ist. Durch die Rückführung von Informationen mittels Messtechnik kann das Qualitätsmerkmal an die Führungsgröße angeglichen werden. Bei diesem Vorgehen berechnet die Regelung einen Korrekturwert, der mithilfe eines Stellglieds in den Prozess eingekoppelt wird. Auf diese Weise ermöglicht der Qualitätsregelkreis eine Steuerung des Qualitätsmerkmals entsprechend seiner vorgegebenen Anforderungen. (Gevatter & Grünhaupt 2006; Heinrich & Schneider 2019)

2.7.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich ein Qualitätsregelkreis an den Grundelementen eines klassischen Regelkreises orientiert. Zentrales Element beim Qualitätsregelkreis ist die Messtechnik, mit welcher die Abweichung vom Soll-Qualitätszustand erfasst wird. Dadurch kann eine Rückführung der Messergebnisse realisiert werden.

3 Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt den Stand der Forschung auf den Themengebieten vor, die für den Lösungsansatz von Relevanz sind. Dafür werden zunächst die Anforderungen für die Implementierung eines adaptiven Qualitätsregelkreises in der Mikroverzahnungsfertigung definiert. Basierend darauf werden nachfolgend relevante wissenschaftliche Arbeiten erläutert und im Kontext mit den definierten Anforderungen verglichen. Abschließend wird das hieraus resultierende Forschungsdefizit zusammengefasst.

3.1 Anforderungen

In Bezug auf die dargelegte Motivation und die daraus resultierenden Grundlagen werden die Anforderungen (1) bis (3) abgeleitet. Diese repräsentieren die wesentlichen Bestandteile zur Implementierung eines adaptiven Qualitätsregelkreises in der Mikroverzahnungsfertigung und ermöglichen die Bewertung bereits bestehender Ansätze auf den relevanten Gebieten (vgl. Tabelle 3-1).

(1) Bewertung von Fertigungsabweichungen und Analyse der Funktion

Mikroverzahnungen weisen im Verhältnis zu ihrer Dimensionierung relativ hohe Fertigungsabweichungen auf. Aufgrund dieser Abweichungen sind funktionale Auswirkungen auf das Laufverhalten zu erwarten, welche in Form von akustischen Emissionen oder Vibrationen auftreten können. Neben der geometrischen Abweichungsanalyse ist die funktionsorientierte Qualitätsbewertung essenziell. Denn so kann die Funktionserfüllung anhand von in-line Messdaten echtzeitnah mit Ansätzen der funktionsorientierten Simulation unter Berücksichtigung der systematischen Unsicherheitsbetrachtung prognostiziert werden. Für die Validierung dieser Ansätze ist eine experimentelle Funktionsbestimmung von Relevanz.

(2) In-line Messung von Mikrozahnradern unter Berücksichtigung der Gesamtunsicherheit

Für die 100% Messung von Mikrozahnradern im Produktionstakt bedarf es einer schnellen optischen Messtechnik, die aufgrund der engen Toleranzen eine geringe Messunsicherheit aufweisen sollte. Zur vollständigen Erfassung der Messwerte innerhalb der Taktzeit sollte eine in-line Messtechnik-Integration angestrebt werden. Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheitsbeiträge ist von entscheidender Bedeutung, um die Messergebnisse und die analytische Funktionsprognose von Mikrozahnradern

exakt zu beschreiben. Neben der Ermittlung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge, ist eine Bestimmung der Gesamtunsicherheit von Relevanz, welche die funktionsorientierte Simulation berücksichtigt. Die Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge ist nach dem international standardisierten Vorgehen des GUM auszuführen.

(3) Echtzeitnahe Qualitätsregelung in der Produktion

Für die Betrachtung einer echtzeitnahen Regelung in der Produktion von Mikrozahlrädern ist die Berücksichtigung bestehender Ansätze von Bedeutung. Hier sind besonders die Strategien der maschinennahen Qualitätsregelung zu berücksichtigen.

3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf die Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen, der simulativen Zahnkontaktanalyse von Makroverzahnungen, der Verzahnungsmessung mit der optischen Fokussvariationstechnologie, zur Quantifizierung der Messunsicherheit bei der Einflanken-Wälzprüfung und zu Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung dargestellt.

3.2.1 Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen

Nach Goch (2003) geht die Herausforderung der Qualitätssicherung mit einem hohen messtechnischen Aufwand einher. Beispielsweise können optische Sonden Mikroverzahnungen mit einem Modul von 0,1 mm erfassen. Dieses taktile Verfahren wird jedoch aufgrund der empfindlichen Sonde bei jedem Flankenkontakt einer Biegung ausgesetzt. Somit ist eine standardisierte, linienbasierte Messung des Profils oder der Steigung nicht möglich, weshalb eine flächige Verzahnungsauswertung erforderlich ist (Goch 2003). Buchholz (2008) untersucht optimale Antaststrategien für die Koordinatenmesstechnik zur Charakterisierung der Kenngrößen nach (DIN 21772:2012). Darüber hinaus wurde bei der Untersuchung eine Methode entwickelt, mit welcher mittels Einsatz eines Double-Ball Mikroverzahnungsnormals die Messunsicherheit experimentell quantifiziert werden kann (Buchholz 2008; Fleischer et al. 2008). Basierend auf der Methode von Buchholz (2008) entwickelt Viering (2011) ein Zylindernormal für die experimentelle Untersuchung der Messunsicherheit bei Mikroverzahnungen (Lanza & Viering 2011; Viering 2011). Dunovska et al. (2015) stellen ein neu entwickeltes Mikroverzahnungsnormal auf Basis einer evolventischen Stirnverzahnung vor. Ziel ist es, geeignete Auswertestrategien für optische und computertomographische Messverfahren

zu entwickeln. Das Vorgehen wird im Anwendungsfall auch an der optischen Fokusvariationstechnologie demonstriert (Dunovska et al. 2015; Neuschaefer-Ruben et al. 2011). Jantzen et al. (2018a) adaptieren das Vorgehen von Kniel et al. (2015) auf ein Mikro-Innenverzahnungsnormal mit einer Stirn-Evolventenverzahnung, welches einen Modulbereich von 0,1 bis 1 mm abdeckt und taktil kalibriert ist. Ziel ist es, die Messunsicherheit bei der Messung von Mikro-Innenverzahnungen auf ein nationales Normal rückzuführen. Es werden bei der Untersuchung mittels taktile Kalibrierung erweiterte Unsicherheiten nach GUM von unter 1 Mikrometer erzielt. Auf Basis der Rückführbarkeit lassen sich vergleichende Messanalysen nach (DIN EN ISO 15530-3) durchführen (Jantzen et al. 2018).

Hauser (2007) entwickelt einen Einflanken-Wälzprüfstand für Mikro-Stirnradverzahnungen. Der Prüfstand ist für einen Modulbereich von 169 μm bis 500 μm konzipiert, auf dem die Zahnräder experimentell untersucht werden. Da es im Anwendungsfall von Mikrozahnrädern nur bedingt möglich ist, ein Lehrzahnrad (Meisterzahnrad) herzustellen, welches wesentlich genauer als das Prüfzahnrad ist, nutzt Hauser (2007) zwei Prüfzahnräder, die in Kombination gegeneinander abgewälzt werden. Aus den jeweiligen Drehwinkelmeßwerten der einzelnen Zahnräder resultiert die Einflanken-Wälzabweichung der Zahnradpaarung (Hauser 2007).

Häfner (2017) stellt eine Methode zur Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen von Mikroverzahnungen vor. Es werden dabei die Auswirkungen von Fertigungsabweichungen basierend auf funktionsorientierten Messdaten untersucht. Ziel des Vorgehens ist es, eine Funktionsprognose für die Zahnfußspannung von bereits produzierten Zahnrädern, unter Berücksichtigung und Reduktion der Unsicherheit zu ermöglichen. In der exemplarischen Anwendung werden Mikro-Stirnzahnräder mit einem Modul von 0,2 mm taktil und unter Berücksichtigung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit vermessen. Auf Basis der Messdaten werden mittels der Finite-Elemente-Simulation Berechnungen zur Zahnfußspannung durchgeführt und mit den experimentell erhobenen Daten aus einem entwickelten Lebensdauerprüfstand korreliert. Durch den Einsatz Bayesscher Statistik werden bereits vorhandene Informationen in Form von Vorwissen als Input in das Modell gespeist, um den experimentellen Versuchsaufwand zu minimieren. Die Inputunsicherheiten des Modells werden nach dem Vorgehen nach GUM ganzheitlich quantifiziert. (Haefner & Lanza 2017; Häfner 2017)

3.2.2 Ansätze zu simulativen Zahnkontaktanalysen von Makroverzahnungen

Im nachfolgenden Absatz stehen bereits bestehende Ansätze der simulativen Zahnkontaktanalyse im Fokus. Die bisherigen Untersuchungen der etablierten Systeme basieren auf Makroverzahnungen. Es wird angestrebt die Simulation auf das Anwendungsgebiet der Mikroverzahnungen zu übertragen.

Ein Ansatz zur lastfreien Zahnkontaktanalyse integriert Alxneit (2010) in der Software SimKoS (Alxneit 2010). Durch eine gezielte Parametervariation der Flankengeometrie von Hypoidverzahnungen, welche als Sonderform der Kegelräder eine bogenförmige Verzahnung aufweisen, werden die Auswirkungen auf den Drehfehler bei einem Verzahnungsmodul von 2,5 mm untersucht. Mittels lastfreiem Einflanken-Wälzprüfstand erfolgen die experimentellen Vergleichsmessungen des Drehfehlers. Die taktill gemessenen Zahnflanken werden als Input in der Software durch die entsprechenden Datenpunkte geometrisch beschrieben. (Alxneit 2010)

Bruyere et al. (2007) stellen eine Methode zur lastfreien Zahnkontaktanalyse vor. Der Input für die Analyse sind Datenpunkte von Zahnflanken, welche mittels Koordinatenmessgerät erfasst werden. Auf Basis der Messdatenpunkte werden Bezierflächen gebildet. Als Bezierfläche wird eine parametrisierte Fläche bezeichnet, die aus einer bestimmten Anzahl von Kontrollpunkten approximiert wird. Sie dient zur Darstellung und Beschreibung von Freiformflächen. Basierend darauf erfolgt die Zahnkontaktanalyse, aus welcher der Drehfehler als Ergebnis resultiert. Durch den Einsatz von Monte Carlo-Simulationen können mit diesem Ansatz verschiedene Verzahnungsabweichungen simuliert und der resultierende Drehfehler durch gezielte Zahnflankenmodifikation optimiert werden (Bruyere et al. 2007). Aufbauend auf dieser Methode stellen Dantan et al. (2008) einen Ansatz vor, der auf einer statistischen Analyse für die Toleranzanalyse und einen genetischen Algorithmus für die Toleranzsynthese von Zahnradtoleranzen abzielt (Bruyere et al. 2007; Dantan et al. 2007; Dantan et al. 2008).

Sich auf dieses Vorgehen stützend erfolgt durch Vincent et. al (2009) eine Erweiterung des Ansatzes auf Basis der durchgeführten Monte Carlo-Simulationen. Basierend auf dem GUM Supplement 1 (JCGM 101) wird zusätzlich simulativ die Messunsicherheit für den Drehfehler bestimmt. (Vincent et al. 2009)

Ferner bieten FE-basierte Zahnkontaktanalysen die Möglichkeit, das Abwälzverhalten von Verzahnungen mit spezifischer Geometrie mittels definierter Last zu simulieren. Dies ermöglicht es neben dem Drehfehler unter Last auch die Zahnfußspannung und Flankenpressung sowie das Tragbild der Flanken zu berechnen (Brecher et al. 2014b). Diese Berechnungsmöglichkeiten wurden in Programmen wie STIRAK (Brecher et al. 2014b; Brecher et al. 2010a; Cao 2002; Ingeli et al. 2015; Schäfer 2008) und ZaKo3D (Brecher et al. 2016; Brecher et al. 2014a; Brecher et al. 2014b; Brecher et al. 2010b; Hemmelmann 2007) implementiert. Hemmelmann (2007) validiert ZaKo3D mittels experimentellen Vergleichsmessungen und vergleicht neben den diskreten Ergebnissen auch die Signale aus Prüfstand und Simulation (Hemmelmann 2007). Sowohl bei STIRAK als auch bei ZaKo3D können Geometriedaten der Zahnflanken als Sollgeometrie unter Berücksichtigung der entsprechenden Toleranz sowie gemessene Zahnflanken in Form von Messdatenpunkten eingelesen werden. Diese werden in der Weiterverarbeitung in der Simulation als Bezierflächen abgebildet. Das verwendete numerische Verfahren ist eine Kombination aus diskreter und parametrischer Modellierung. Aufgrund der geringeren Rechenintensität werden FE-basierte Zahnkontaktanalysen im Vergleich zu den FEM-Berechnungen vornehmlich für die Variationsrechnung mit verschiedenen Verzahnungsparametern angewandt (Röthlingshöfer 2012). Das Programm STIRAK ist ausschließlich für die Simulation von Getriebestufen mit mehr als zwei Stirnzahnrädern ausgelegt. Andere Verzahnungsformen können mit diesem Programm nicht abgebildet werden (Schäfer et al. 2003). Ferner lassen sich charakterisierte Abweichungen an den Zahnflanken, die messtechnisch erfasst werden, nur für alle Zähne des Zahnrads kongruent betrachten. Bei Zako3D lassen sich neben den Stirnradverzahnungen auch andere Verzahnungsformen, wie beispielsweise Beveloidverzahnungen simulieren. Beveloidverzahnungen sind eine Sonderform, die aufgrund ihrer konischen Zahnform in beliebiger Achslage mit kleinem Achswinkel angeordnet werden können. Es kann mit dem Programm im Vergleich zu STIRAK keine Getriebestufe mit mehreren Zahnrädern simuliert werden. Das Programm beschränkt sich auf die Simulation eines Zahnradpaars, bei dem jede Zahnflanke mit individuellen Abweichungen betrachtet werden kann (Häfner 2017).

Mit der kommerziellen Software „Reany“ bietet die Firma Frenco GmbH eine Möglichkeit zur analytischen Zahnkontaktsimulation von Stirnzahnrädern. Lastfreie Zahnkontaktsimulationen können aufgrund der geringen Rechenintensität innerhalb von Sekun-

den durchführt werden. Eine analytische, lastfreie Zahnkontaktanalyse erfolgt in „Reany“ auf der Basis von mehreren interpolierten Profilschnitten. Im Gegensatz zu „ZaKo3D“ wird kein flächiger Datensatz untersucht. Durch Interpolation zwischen den Schnitten kann die Topologie jeder einzelnen Zahnflanke beschrieben werden. Aufgrund der Messdaten, welche sich in ihrer Struktur und Dichte erheblich unterscheiden können, wird in „Reany“ ein äquidistantes Referenzgitter erstellt. Zur Beschreibung in diesem Gitter werden alle gemessenen Zahnflanken abgewickelt und auf eine zweidimensionale Soll-Ebene in Profil- und Flankenrichtung projiziert. Die vorhandenen Abweichungen zur Idealgestalt werden orthogonal zu dieser Ebene beschrieben und lassen sich daraufhin an den Knotenpunkten des Referenzgitters auswerten. Zusätzlich zur simulierten Einflanken-Wälzprüfung und des daraus resultierenden Drehfehlers sowie einer Fast Fourier Transformation (FFT) der Signale, werden die klassischen Verzahnungskenngrößen als Ergebnis auf Basis der Messdaten ausgegeben (Frenco 2018b). Die Simulation erfolgt ausschließlich lastfrei und ohne Berücksichtigung von Reibung beim Abwälzen.

3.2.3 Ansätze zur Mikroverzahnungsmessung mit der optischen Fokusvariationstechnologie

Die optische Fokusvariationstechnologie ist Bestandteil der Untersuchung von Neuschaefer-Rube et al. (2011). Eine evolventische Mikroverzahnung mit einem Modul von 0,12 mm wird als exemplarisches messtechnisches Objekt für die Untersuchung herangezogen, um die Vorteile der Fokusvariation im Kontext von komplexen und filigranen Geometrien zu untermauern. Motiviert wird dieser Ansatz mit der eingeschränkten Nutzbarkeit von taktilen Messsystemen im kleinmoduligen Verzahnungsbereich. Die Verzahnung wird zunächst hochpräzise taktil und anschließend optisch mit der Fokusvariation Alicona InfiniteFocus G4 vermessen. Im Rahmen der Untersuchung werden die Messpunkteabweichungen zwischen dem taktilen und optischen Messverfahren analysiert und bewertet (Neuschaefer-Ruben et al. 2011).

Jantzen et al. (2018b) erweitern das Vorgehen der vergleichenden Analyse im Kontext der Mikroverzahnungsmessung mit mehreren Messprinzipien. Dabei werden taktile, optische und computertomografische Systeme zur Charakterisierung des Außen- und Innen-Mikroverzahnungsnormals der PTB verwendet. Für die Referenzmessung kommt ein taktiler hochpräzises Zeiss F25 Koordinatenmessgerät zum Einsatz. Jedoch kann

das kleinste Modul des Normals mit 0,1 mm aufgrund des zu großen Tastkugeldurchmessers nicht taktil erfasst und referenziert werden. Die Vergleichswerte mit geringer Unsicherheit werden nach der Kalibrierung mit einem taktilen Verzahnungsmessgerät Klingelnberg P40, einem Computertomographen Nikon MCT 225 CT, der optischen Fokusvariationstechnologie Alicona InfiniteFocus G4, einem optisch-taktilen Durchlichtmessgerät Werth Videocheck UA mit integriertem PTB Fasertastsystem verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Fokusvariation für das schnelle und kontaktlose Messen von Mikroverzahnungen geeignet ist. (Jantzen et al. 2019)

3.2.4 Ansätze zur Quantifizierung der Messunsicherheit bei funktionsorientierten Wälzprüfungen

Für die Validierung der analytischen Zahnkontaktanalyse bedarf es der experimentellen Einflanken-Wälzprüfung mittels Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand unter Berücksichtigung der dazugehörigen aufgabenspezifischen Messunsicherheit. Bisherige Ansätze fokussieren sich ausschließlich auf die Messunsicherheitsbestimmung von Makro- Ein- und Zweiflanken Wälzprüfständen. Es wird daher die Übertragbarkeit der bestehenden Ansätze auf den Anwendungsfall des Mikroprüfstands angestrebt.

Pueo et al. (2019) stellen in ihrer Arbeit einen allgemeinen Ansatz vor, um ein Unsicherheitsbudget aufzustellen, mit welchem die Messunsicherheit von Zweiflanken-Wälzprüfständen abgeschätzt werden kann. Sie gehen dabei gemäß des GUM und der ISO/IEC 17025 vor und listen die einzelnen Unsicherheitsbeiträge jeder Fehlerquelle auf. Dafür werden die Einflussfaktoren, welche sich auf das Messergebnis auswirken, identifiziert. Jeder Unsicherheitsbeitrag wird durch eine Normalverteilung mit ihrem Mittelwert und ihrer Standardabweichung repräsentiert, und die Gesamtunsicherheit wird durch die Addition der Einzelbeiträge (vgl. Kapitel 2.3.3) berechnet. Anschließend wurde das Unsicherheitsmodell an einem Zweiflanken-Wälzprüfstand für Makro-Schneckenräder experimentell angewandt. (EN ISO/IEC 17025; Pueo et al. 2019)

Pueo et al. (2020) stellen einen Ansatz zur Unsicherheitsermittlung von Einflanken-Wälzprüfständen am Beispiel von Makro-Schneckengetrieben vor. Gegenstand der Untersuchungen sind Schneckenräder in einem Modulbereich von 2 mm bis 12 mm. Aufgrund des Nichtvorhandenseins von Richtlinien zur Kalibrierung von Einflanken-Wälzprüfständen, wird ein tabellarisches Budget auf Basis des GUM entwickelt. Dabei wer-

den kritische Einflussgrößen identifiziert und mittels experimentell ermittelten Sensitivitätskoeffizienten gewichtet. Als Resultat können die erweiterten Messunsicherheiten für die funktionsorientierten Kenngrößen der Einflanken-Wälzprüfung ermittelt werden. Einige Aspekte dieser Untersuchung werden aus Normen der Zweiflanken-Wälzprüfung übernommen. Als relevante Unsicherheitsbeiträge werden die Kalibrierung des Prüfstands, die Ausrichtung der Schnecke (Lehrzahnrad) und des Schneckenrads (Prüfling), die horizontale und vertikale Verschiebung zur ursprünglichen Kalibrierung, die Höhenpositionierung sowie der Messprozess selbst berücksichtigt. Ein weiterer Aspekt ist die experimentelle Ermittlung der Sensitivitätskoeffizienten. Da sich jeder Beitrag mit unterschiedlicher Sensitivität auf die resultierende Unsicherheit auswirkt, ist eine individuelle Analyse aller Einflüsse notwendig. Durch eindimensionale Variation jeder Eingangsgröße kann die Sensitivität bezogen auf die Gesamtunsicherheit quantifiziert werden. (Pueo et al. 2020)

3.2.5 Ansätze zu Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung

Gravel (2011) stellt einen Ansatz zum Aufbau von einem Qualitätsregelkreis in der Zahnradfertigung, welche mit dem Wälzfräsverfahren hergestellt werden, vor. Der Qualitätsregelkreis besteht neben der Verzahnungsfertigung aus der Messtechnik zur Erfassung der Abweichungen und dem Korrekturalgorithmus. Ferner werden dabei die Ursachen von Fertigungsabweichungen beschrieben, um geeignete Korrekturmaßnahmen daraus ableiten zu können. Abweichungen der Zahnprofilform werden bei der Untersuchung auf Geometrieabweichungen des Wälzfräasers zurückgeführt. Einspannfehler des Wälzfräasers bewirken einen ungleichförmigen Eingriff der Schneiden und führen zu Abweichungen an den Zahnflanken. Zur Identifikation von Abweichungen werden in diesem Ansatz die klassischen Verzahnungskenngrößen herangezogen. (Gravel 2011)

Klocke et al. (2013) entwickeln eine Methode zur Korrektur von Fertigungsabweichungen am Beispiel eines 5-Achs-Fräsprozesses, bei dem mittels Simultanbearbeitung Zahnräder hergestellt werden. Die Korrekturwerte werden durch eine vollständige Verzahnungsmessung erhoben. Durch die adaptive Anpassung des NC-Programms auf Basis der Verzahnungsmessung kann der Fertigungsprozess mit dem Ziel zur Verringerung der Abweichungen optimiert werden. In diesem Kontext wird die Rückführung auf Basis von Messdaten als geschlossener Regelkreis zwischen Inputdaten in Form von Verzahnungskenngrößen, Fertigung und Messung bezeichnet. Eine Fertigungssimulation ermöglicht zudem die Vorhersage von Abweichungen, wodurch langfristige

Trends bereits vor der Korrekturwertrückführung kompensiert werden können. (Klocke et al. 2013)

Sun et al. (2018) entwickeln einen modellbasierten off-line Regelungsalgorithmus zur Vorhersage und Optimierung von Verzahnungsabweichungen für den Wälzfräsprozess. Als Algorithmus dient eine Partikelschwarmoptimierung mit Fehlerrückführung. Dieser Ansatz wird mit einem existierenden Modell verglichen und durch Experimente validiert. Zur Bestimmung der Prognosegüte dient der *RMSE*. Ziel des Ansatzes ist es, die Fertigungsabweichungen zu minimieren. Der Algorithmus bildet dabei die Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abweichungen und den Wälzfräsparametern ab. In dem Ansatz werden der Vorschub und Schnittgeschwindigkeit als Regelungsparameter genutzt. Die analysierten Verzahnungsabweichungen sind die Profil-Gesamtabweichung, die Flankenlinien-Gesamtabweichung sowie Teilungsabweichungen. Aus den Untersuchungen resultiert, dass die Prognosegüte des Modells mit der Anzahl an Trainingsdaten und der Anzahl an berücksichtigten Bearbeitungsparametern zunimmt. (Sun et al. 2018)

Einen modellbasierten off-line Regelungsalgorithmus für das Wälzfräsen von Makroverzahnungen stellen Wu et al. (2021) vor. Dabei wird der Zielkonflikt zwischen Maschineneffizienz, Herstellkosten und Fertigungsgenauigkeit untersucht. Am exemplarischen Anwendungsfall von Schrägverzahnungen wird ein Optimierungsmodell für diesen Zielkonflikt entwickelt. Zur Berücksichtigung der Maschineneffizienz werden die Bahnkurven des Fräsprozesses modelliert. Die Herstellungskosten werden auf Basis verschiedener Standzeiten des Wälzfräasers sowie der Leistungskurve der Fräsmaschine abgeleitet. Für die Optimierung der Fertigungsgenauigkeit dient eine, mittels Random-Forest-Algorithmus modifizierte, Korrelationsanalyse. Diese drei Teilmodelle werden durch einen Evolutionsalgorithmus zu einem Modell zusammengeführt. Die Gültigkeit des Gesamtmodells wird dabei experimentell validiert. (Wu et al. 2021)

3.3 Forschungsdefizit

Die relevanten Forschungsarbeiten, welche aus den Anforderungen für die Zielstellung resultieren, wurden in Kapitel 3.2 vorgestellt. Diese sind in einer tabellarischen Übersicht (vgl. Tabelle 3-1) mit thematischer Einordnung in die jeweiligen Bereiche dargestellt.

Eine Vielzahl von bestehenden Ansätzen im Bereich der Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen befasst sich mit der Messunsicherheitsermittlung von geometrischen Verzahnungskenngrößen. Keiner dieser Ansätze befasst sich dabei mit der in-line-Integration der Messtechnik in der Produktion. Die Einfluss- und Störgrößen der Produktion bleiben bei allen Ansätzen unberücksichtigt. Ebenfalls erfolgt eine funktionsorientierte Qualitätsbewertung von Mikroverzahnungen nur in den Ansätzen von Hauser (2007) und Haefner et al. (2018). Hauser (2007) ermöglicht mit der Entwicklung einer mikrospezifischen Einflanken-Wälzprüfung die Bewertung der Funktionskenngrößen, allerdings bleibt die Messunsicherheit unberücksichtigt. Einzig Haefner et al. (2018) berücksichtigt ganzheitlich alle Input- sowie Modellunsicherheiten, allerdings betrachtet dieser Ansatz nur die Funktion der Zahnfußspannung. (Häfner 2017; Hauser 2007)

Im Bereich der Makroverzahnungen wurden einige Ansätze zur simulativen Zahnkontaktanalyse entwickelt, mit welchen sich das funktionale Laufverhalten der Zahnräder bestimmen lässt. Die Ansätze von Alxneit (2010), Dantan et al. (2009) und Frenco (2018a) beschränken sich ausschließlich auf die lastfreie Zahnkontaktanalyse. Mittels FE-basierter Zahnkontaktanalyse analysieren Brecher et al. (2010a, 2010b, 2014, 2016), Cao (2002), Ingeli et al. (2015), Schäfer (2008) und Hemmelmann (2007) den Einfluss von Fertigungsabweichungen auch unter Last. Mit der Quantifizierung von Unsicherheiten, die sich aus den Input-Messdaten und den Berechnungen ergeben, beschäftigen sich nur Vincent et al. (2009). Keiner der Ansätze adressiert dabei die in-line Integration der Simulation für die funktionsorientierte Drehwegabweichung von Mikroverzahnungen.

Vorhandene Ansätze zur Mikroverzahnungsmessung mit der optischen Fokusvariationstechnologie fokussieren sich auf die Vergleichsmessung mit anderen Messprinzipien. Einzig Jantzen et al. (2018b) quantifiziert die Messunsicherheit an einen Innen- und Außenmikroverzahnungsnormale basierend auf einer hochpräzisen taktilen Referenzmessung und ermöglicht die Rückführbarkeit der Ergebnisse auf ein nationales Normal. Die Untersuchungen erfolgen ausschließlich unter Messraumbedingungen und haben keinerlei Bezug zur in-line Integration dieser Messtechnologie in die Produktion.

Zur Quantifizierung der Messunsicherheit von der Einflanken-Wälzprüfung ermöglicht der Ansatz von Pueo et al. (2020) ein methodisches Vorgehen auf Basis des GUM, bei dem ein tabellarisches Messunsicherheitsbudget entwickelt wird. Hierbei wird auch der

Berücksichtigung der Sensitivitätskoeffizienten Rechnung getragen. Jedoch wird dieser Ansatz an einem Schneckengetriebe und nicht an einem Stirn-Mikrozahnrad demonstriert.

Bestehende Ansätze von Gravel (2011), Klocke et al. (2013), Sun et al. (2018) und Wu et al. (2021) der Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung basieren auf der Reduzierung von Fertigungsabweichungen und fokussieren sich dabei ausschließlich auf die geometrischen Verzahnungskenngößen. Die Betrachtung von funktionsorientierten Kenngößen hinsichtlich der Drehwegabweichung sowie des Laufverhaltens geschieht dabei jedoch nicht. Ebenfalls erfolgt in den Ansätzen keine in-line Messtechnik Integration. Die Ausnahme bildet der Ansatz nach Gravel (2011). Bei allen Ansätzen bleibt die Inputunsicherheit des Messprozesses für die Strategien der maschinennahen Qualitätsregelung unberücksichtigt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass basierend auf den in Kapitel 3.1 erläuterten Anforderung aktuell noch kein Ansatz existiert, mit dem in-line Fertigungsabweichungen für Mikroverzahnungen unter Berücksichtigung der Unsicherheit gemessen, der Fertigungsprozess geregelt und Funktionsvorhersagen mit dazugehöriger Unsicherheit prognostiziert werden.

Tabelle 3-1: Übersicht der relevanten Forschungsarbeiten

Autoren	Anforderungen	(1)				(2)			(3)
		Besonderheit Mikroverzahnung	Unsicherheitsbetrachtung	Funktionsorientierte Simulation	Experimentelle Funktionsbestimmung	Optische Messtechnik bei Mikrozahnrädern	In-Line Messtechnikintegration	Bestimmung der Gesamtunsicherheit	Maschinenmaße Qualitätsregelung
3.2.1 Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen									
Goch (2003)	●	●	●	●	●	●	●	○	○
Buchholz (2008), Fleischer et al. (2008)	●	●	○	○	●	○	●	○	○
Lanza & Viering (2011), Viering (2011)	●	●	○	○	○	○	●	○	○
Dunovska et al. (2015)	●	●	●	●	●	○	●	●	○
Neuschaefer-Rube et al. (2011)	●	●	○	○	●	○	●	○	○
Jantzen et al. (2018a)	●	●	○	○	●	○	●	○	○
Hauser (2007)	●	○	○	●	○	○	○	○	○
Häfner (2017), Haefner & Lanza (2017)	●	●	●	●	○	○	●	○	○
3.2.2 Ansätze zur simulativen Zahnkontaktanalysen von Makroverzahnungen									
Alxneit (2010)	○	○	●	●	○	○	○	○	○
Bruyère et al (2007); Dantan et al. (2008)	○	○	●	●	○	○	○	○	○
Vincent et al. (2009)	○	●	●	●	○	○	○	○	○
Brecher et al. (2010a, 2010b, 2014a, 2014b, 2016); Cao 2002; Schäfer (2008)	○	○	●	●	○	○	○	○	○
Hemmelmann (2007)	○	○	●	●	○	○	○	○	○
Röthlingshöfer (2012)	○	○	●	○	○	○	○	○	○
Schäfer et al. (2003)	○	○	●	○	○	○	○	○	○
Frenco (2018a)	○	○	●	○	○	○	○	○	○
3.2.3 Ansätze zur Mikroverzahnungsmessung mit der optischen Fokusvariationstechnologie									
Neuschaefer-Rube et al. (2011)	●	●	○	○	●	○	○	○	○
Jantzen et al. (2018b)	●	●	○	○	●	○	○	○	○
3.2.4 Ansätze zur Quantifizierung der Messunsicherheit bei funktionsorientierten Walzprüfungen									
Pueo et al. (2019)	○	●	○	●	○	○	●	○	○
Pueo et al. (2020)	○	●	○	●	○	○	●	○	○
3.2.5 Ansätze zu Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung									
Gravel (2011)	○	●	○	○	○	○	○	○	●
Klocke et al. (2013)	○	○	○	○	○	○	○	○	●
Sun et al. (2018)	○	○	●	○	○	○	○	○	●
Wu et al. (2021)	○	○	●	●	○	○	○	○	●

- nicht erfüllt
 ● teilweise erfüllt
 ● erfüllt

4 Lösungsansatz

Im folgenden Kapitel wird eine Methode vorgestellt, die ein systematisches Vorgehen zur Integration eines adaptiven Qualitätsregelkreises, welcher exemplarisch in der Produktion von Mikroverzahnungsbauteilen zum Einsatz kommt, aufzeigt.

Ausgehend von der Problemstellung und den daraus resultierenden Forschungshypothesen sowie den zuvor dargelegten Defiziten im Stand der Forschung besteht die Zielsetzung darin, die Ansätze der Qualitätsregelung durch die in-line Integration der optischen Fokusvariations-Messtechnologie in Kombination mit einer im Produktionsstakt funktionsorientierten Simulation in die Prozesskette der Mikroverzahnungsfertigung zu implementieren. Abgeleitet aus dieser Zielsetzung ergibt sich folgendes Zielbild (siehe Abbildung 4-1).

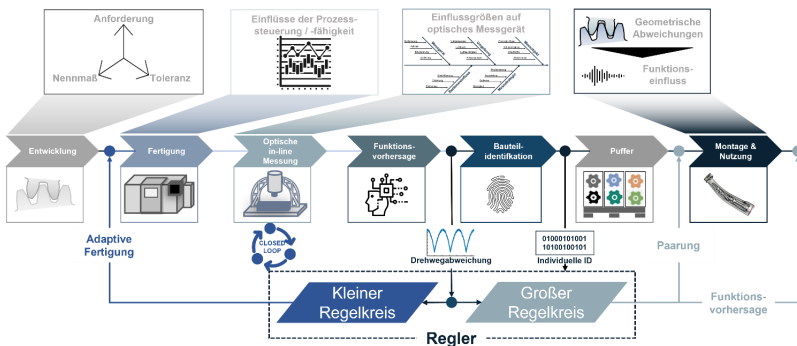


Abbildung 4-1: Zielbild Adaptiver Qualitätsregelkreis

Befähigt durch die prozessintegrierte optische Sensorik auf Basis der Fokusvariations-Messtechnologie soll der Produktionsprozess der Mikroverzahnungsfertigung mittels 100% Messung unter Berücksichtigung der messaufgaben-spezifischen Messunsicherheit innerhalb der vorgegebenen Taktzeit maschinennah (kleiner Regelkreis) durch die Anpassung der entsprechenden Fertigungsparameter geregelt werden. Auf Basis der extrahierten Messdaten soll eine echtzeitnahe analytische Simulation erfolgen, die das Funktionsverhalten der Mikroverzahnungsbauteile charakterisiert.

Ferner können durch die Vorhersage des Funktionsverhaltens und einer eindeutigen Bauteilidentifikation in der Montage Bauteilkomponenten auf Basis ihrer individuellen

Charakteristika gezielt zueinander gepaart (großer Regelkreis) werden, um eine optimale Funktionserfüllung der Baugruppe zu gewährleisten. Der Fokus dieser Arbeit bezieht sich auf den maschinennahen Qualitätsregelkreis (kleiner Regelkreis), der gleichzeitig die bauteilindividuellen Paarungsstrategien (großer Regelkreis) befähigen soll. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des von BMBF geförderte Verbundprojekt ProIQ (FKZ 13N14647) erhoben.

4.1 Aufbau des Lösungsansatzes

Der Lösungsansatz gliedert sich in fünf Kapitel. Zu Beginn erfolgt in Kapitel 5 die Messzeitoptimierung der optischen Fokusvariations-Messtechnologie hinsichtlich des zu erzielenden Produktionstakts. Dies beinhaltet auch die experimentelle Ermittlung der Messunsicherheit unter realen Produktionsbedingungen. Anschließend erfolgt in Kapitel 6 die Qualifizierung sowie die experimentelle Quantifizierung der Messunsicherheit des Einflanken-Wälzprüfstands zur Ermittlung der relevanten Funktionskenngößen. Mit der experimentellen Einflanken-Wälzprüfung wird im nächsten Kapitel 7 die analytische Drehwegsimulation validiert, mit der sich Funktionszusammenhänge ableiten lassen. Kapitel 8 definiert eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Simulations- bzw. Gesamtunsicherheit unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 und 6 ermittelnden Messunsicherheiten. Die Gesamtunsicherheit ist ein integraler Bestandteil für die in-line Auswertung der Messergebnisse, welche aus der optischen Messtechnik und der analytischen Simulation resultieren. Aufbauend auf den zuvor angewandten Methoden wird in Kapitel 9 ein Vorgehen zur Integration eines Qualitätsregelkreises vorgestellt. Die Erprobung und prototypische Realisierung des Qualitätsregelkreises wird am Beispiel eines Antriebsbauteils mit evolventischer Mikro-Stirnverzahnung, welches in einem Dentalinstrument verbaut wird, durchgeführt und validiert.

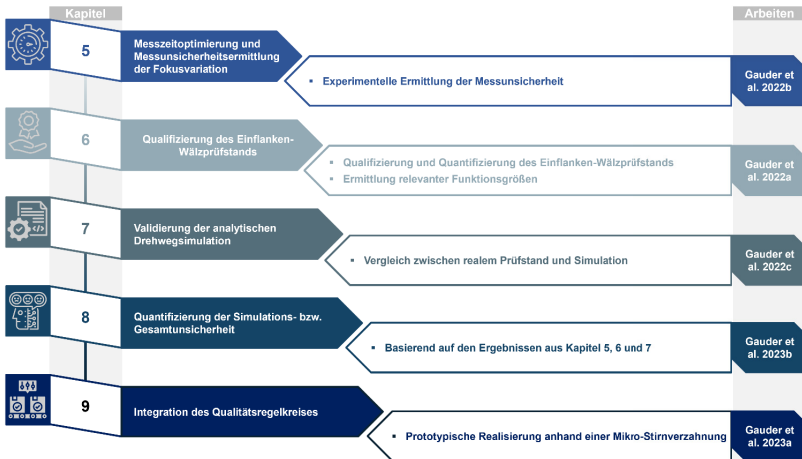


Abbildung 4-2: Zielsetzung und Struktur des Lösungsansatzes

Studentische Arbeiten, die im Rahmen dieser Arbeit sowohl inhaltlich als auch organisatorisch vom Autor der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden, sind im Folgenden in der Form (A_<Nachname><Jahr>) aufgeführt.

4.2 Ausgangssituation der prototypischen Realisierung

Zu Beginn ist eine Analyse des betrachteten Produkts bzw. Bauteils und dessen Produktionsprozesses von zentraler Bedeutung, um den Kontext der angestrebten Qualitätssicherungsstrategie zu konkretisieren und daraus geeignete Schritte für die Regelung abzuleiten. Als Produkt wird ein Dentalinstrument, welches als Winkelstück bezeichnet wird, betrachtet. Dieses ist in Abbildung 4-3 veranschaulicht und lässt sich in die Hauptbaugruppen „Kopftrieb“ und „Haltrieb“ unterteilen.

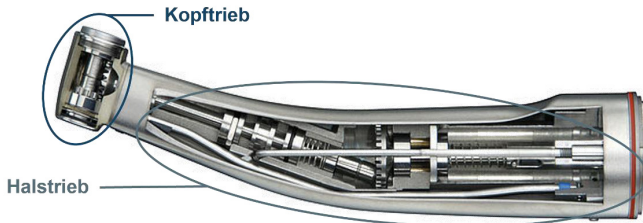


Abbildung 4-3: Dentalinstrument Winkelstück Typ „T1 Classic“ (Quelle: Dentsply Sirona)

Durch die Implementierung entsprechender Übersetzungsstufen im Hals- sowie Kopftrieb kann eine maximale Ausgangsdrehzahl von 200.000 min^{-1} erreicht werden. Aufgrund der verhältnismäßig hohen Drehzahl und den daraus resultierenden akustischen Emissionen, ist der Kopftrieb als funktionskritische Baugruppe dieses Dentalinstruments zu bewerten. Die Geräuschentwicklung sowie das Laufverhalten der Verzahnung haben dabei einen signifikanten Einfluss auf die Zuverlässigkeit und den Bedienkomfort des Gesamtproduktes. Die Einführung des adaptiven in-line Qualitätsregelkreises erfolgt prototypisch in der mechanischen Verzahnungsfertigung für die Kopfswelle (siehe Abbildung 4-4), die als zentrales Getriebeelement integraler Bestandteil des Kopftriebs ist.

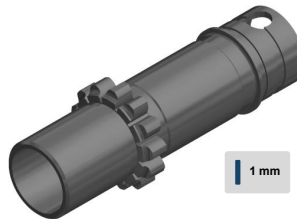


Abbildung 4-4: Kopfswelle des Winkelstücks

Bei der Verzahnung handelt es sich um ein Stirnrad mit evolvierender Profilform. Die relevante Verzahnungscharakteristik ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Parameter der untersuchten Mikroverzahnung

Parameter	Wert
Werkstoff	X105CrMo17
Fertigungsverfahren	Wälzfräsen
Modul m	0,280 mm
Zähnezahl z	13 [-]
Profilverschiebungsfaktor x	0,4 [-]
Kopfkreisdurchmesser d_a	4,424 mm
Teilkreisdurchmesser d	3,640 mm
Fußkreisdurchmesser d_f	3,220 mm
Zahnbreite b	0,900 mm

Eine wesentliche Anforderung an die Integration des Qualitätsregelkreises in den Fertigungsprozess der Kopfwelle, ist die Einhaltung der Taktzeit. Wenn die dafür notwendige Abfolge aus Reinigung, Messung, Auswertung und Regelung nicht innerhalb von fünf Minuten realisiert werden kann, ist eine Regelung der übernächsten Kopfwelle nicht möglich. Aufgrund dessen ist die Berücksichtigung des Zeitkorridors von eminenter Bedeutung. Der Messung muss zudem ein Reinigungsschritt vorgelagert sein, damit die Kopfwelle frei von fertigungsbedingten Verunreinigungen ist. Artefakte wie Öl oder Späne müssen prozesssicher im Bereich der Verzahnung entfernt werden. Ferner stellt die Automatisierung der Regelung eine Anforderung dar. Nach dem Einlegen der gereinigten Kopfwelle sollte diese ohne weiteren manuellen Eingriff vermessen, ausgewertet und auf Basis des Algorithmus die Werkzeugmaschine geregelt werden. Die Ergebnisse der Funktionsvorhersagen werden im Rahmen der beabsichtigten Qualitätskontrolle als Messverfahren betrachtet, wobei hier die Forderung nach der Prüfprozesseignung von $G_{pp} < 0,3$ [-] besteht (VDA-5). Des Weiteren soll die Klassifikationsgenauigkeit des Fräserdorn-Taumels über 80% liegen. Die Regelgüte des Systems sollte unter $2 \mu\text{m}$ liegen, um den hohen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden. Im Rahmen einer Analyse vom industriellen Anwendungspartner wurden die oben genannten Anforderungen unter Berücksichtigung der Produktspezifikationen und den technischen Produktionsfähigkeiten ermittelt. Die Anforderungsliste, die aus der Fertigungspraxis aus dem Bereich der Dentalinstrumentenfertigung abgeleitet wurde, an den Qualitätsregelkreis ist in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Anforderungen an den Qualitätsregelkreis

Anforderung	Spezifikation
1. Taktzeit	Reinigen, Messen, Auswerten und Regeln in 5 Minuten.
2. Reinigung	Keine Artefakte im Bereich der Verzahnung.
3. Automatisierung	Automatisierte Regelung ohne manuellen Eingriff.
4. Prüfprozesseignung (g_{pp})	< 0,3 [-]
5. Klassifikationsgenauigkeit des Fräserdorn-Taumels	> 80 %
6. Regelgüte ($RMSE$) des Systems	< 2 μm

5 Messzeitoptimierung und Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation

In dem folgenden Abschnitt wird die in-line Integration der optischen Messtechnik in den bestehenden Produktionsprozess der Kopfwelle erläutert. Im ersten Schritt wird dafür der Aufbau der Messtechnik in Form der Fokusvariation von Bruker Alicona beschrieben (Bruker Alicona 2023). Da dieses Verfahren eine Vielzahl an Messparametern aufweist, welche einen Einfluss auf die Messzeit und -unsicherheit haben, werden optimierte Parameter anhand der Anforderungen an den Qualitätsregelkreis identifiziert. Für das optimierte Messprogramm wird daraufhin eine Messunsicherheitsermittlung durchgeführt. Als Referenzverfahren dient eine taktile Kalibrierung auf Basis eines hochpräzisen Zeiss Koordinaten-Messgeräts (KMG, Zeiss F25). Um eine Prüfprozesseignung des optischen in-line Messsystems nachzuweisen, wird zudem eine entsprechende Untersuchung durchgeführt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Messdaten der Fokusvariation für die Nutzung im Rahmen des Qualitätsregelkreises geeignet sind. (Gauder et al. 2022c)

5.1 Versuchsaufbau für taktile und optische Messungen

Der nachfolgende Absatz beschreibt den Versuchsaufbau für die in-line Qualifizierung der Fokusvariation. In einem ersten Schritt wird der Aufbau zur Ermittlung eines geeigneten Reinigungsverfahrens beschrieben. Im darauffolgenden Abschnitt wird der Messaufbau für die taktilen Referenzmessungen beschrieben. Diese Messergebnisse werden abschließend systematisch mit verschiedenen Messprogrammen der Fokusvariation verglichen.

5.1.1 Einrichtung zur Ermittlung eines optimalen Reinigungsverfahrens

Um sicherzustellen, dass die Kopfwellen ohne jegliche Verunreinigung vermessen werden, muss ein robustes, schnelles und wiederholbares in-line Reinigungsverfahren entwickelt werden. Da die Bewertung der Geometrieabweichungen von Zahnrädern kenngrößenbasiert erfolgt, werden die verschiedenen Verzahnungskenngrößen durch unerwünschte Verunreinigungen während des Herstellungsprozesses durch die Anhaftung von Restöl oder Metallspänen beeinflusst. Es werden vier Methoden einzeln und in Kombination betrachtet, die eine schnelle, aber auch zuverlässige Reinigung ermöglichen sollen. (Gauder et al. 2022c)

Die aufwändigste dieser vier Methoden ist die Reinigung mit dem Reinigungskonzentrat Kluthe HP 2000. Dieses biologisch abbaubare Lösungsmittel basiert auf einer 5%igen wässrigen Lösung, die lipid- und schmutzlösende Eigenschaften aufweist. Ferner kann diese durch eine gezielte Temperierung die Reinigungsleistung verbessern. Für die Reinigung wird die Lösung auf 55 °C erhitzt, während die Kopfswelle 180 Sekunden lang in ein Ultraschallbad gelegt wird. Industrielles unverdünntes Isopropanol wurde als alternative Reinigungsmethode zur Entfernung von Verunreinigungen verwendet, die beim Wälzfräsen entstanden sind. Bei dieser Methode wurde das Zahnrad mit Hilfe einer Pinzette 30 Sekunden lang gleichmäßig in einem Behälter geschwenkt. Die beiden anderen Methoden sind das Abblasen mit Luftdruck, was etwa 5 Sekunden dauert, und das Abtupfen mit einer Knetmasse (UHU patafix®), was etwa 15 Sekunden in Anspruch nimmt. UHU patafix® ist unempfindlicher gegenüber Ölresten und Flüssigkeiten aus der Produktionsumgebung als vergleichbare Reinigungskneten, nimmt Staub sowie Flusen auf und hinterlässt nahezu keine Rückstände (Gauder et al. 2022c).

Basierend auf den vier erläuterten Methoden wird eine Auswahl und Reihenfolge experimentell bestimmt, um eine schnelle und effektive Reinigung des Zahnrads zu realisieren. Daher werden im Kapitel 5.3.1 die verschiedenen Methoden und ihre Variationen direkt nach der Produktion untersucht, bevor sie optisch vermessen werden. Mit der Alicona Live View Funktion, die wie ein hochpräzises 2D-Mikroskop funktioniert, können Verunreinigungen identifiziert werden. Darüber hinaus werden auch die resultierenden 3D-Messdaten selbst auf Verunreinigungen geprüft, um einen optimalen Reinigungsprozess mit kurzer Taktzeit zu ermitteln.

5.1.2 Taktile Referenzmessungen

Das hochpräzise taktile Messgerät vom Typ „F25“ der Firma Zeiss wurde für die Referenzmessung der Kopfswelle eingesetzt. Die Koordinatenmessmaschine ist mit luftgelagerten Achsen ausgestattet und steht auf einem separaten Fundament um die Schwingungsentkopplung zu gewährleisten. Mit einem maximal zulässigen Fehler von $E_0 = \left(0,25 + \frac{L}{666}\right) \mu\text{m}$ für eine Nennlänge L gilt dieses System als Stand der Technik in Bezug auf taktile Präzisionsmessungen (Jantzen et al. 2019). Das Referenzbauteil (Kopfswelle) wurde auf einem Justierelement ausgerichtet und mit einem präzisen

Nullpunktspannsystem auf der Maschine eingespannt. Der Messaufbau ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

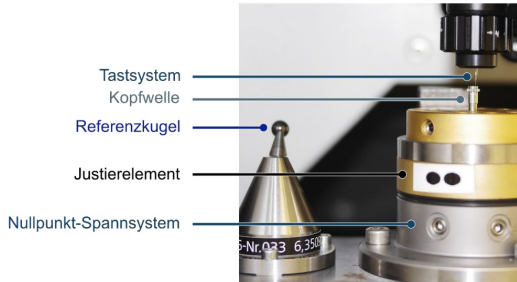


Abbildung 5-1: Aufbau der taktilen Kalibrierung des Zeiss F25

Die präzise Kalibriermessung an der zu untersuchenden Verzahnung der Kopfwelle wurde innerhalb von acht Stunden durchgeführt (Gauder et al. 2022c). Dabei werden 99 Profillinien pro Zahnflanke gemessen. In vorangegangenen Untersuchungen wurde zur Kalibrierung dieses KMG (Zeiss F25) das Außen-Mikroverzahnungsnormale der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) verwendet (Jantzen et al. 2018). Die nachfolgende Tabelle 5-1 zeigt die Parameter der taktilen Referenzmessung.

Tabelle 5-1: Parameter der taktilen Kalibrierung des Zeiss F25

Parameter	Wert/Einheit
Durchmesser der Tastkugel	120 μm
Länge des Tastschafts	2 mm
Material der Tastkugel	Rubinrot
Richtung des Tastkopfes	-z
Antastkraft	1 mN
Strategie der Messung	Einzelpunkt-Sondierung
Anzahl der Profillinien	99
Anzahl der Punkte pro Zeile	206
Durchschnittliche Dauer	~ 8 Stunden
Futtermittel	10 mm s ⁻¹
Filter	Keine
Temperaturbereich	20 °C \pm 0,5 °C

Diese Messparameter dienen als Grundlage für die 20 taktilen Wiederholmessungen der Referenzkopfwelle. Basierend auf der Referenzmessung lässt sich die optimale Messparameterkombination für die in-line Integration der Fokusvariationstechnologie

ermitteln. Dies ermöglicht auch eine Quantifizierung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durchführen.

5.1.3 In-line Einrichtung der Fokusvariationstechnologie

Die Fokusvariationstechnologie vom Typ „Bruker Alicona μ CMM“ wurde in-line und off-machine im Produktionsumfeld direkt neben der Werkzeugmaschine, an welcher die Kopfwelle produziert wird, platziert. Dadurch konnten kurze Wege von der Werkzeugmaschine zur angrenzenden Reinigungsstation und schließlich zum optischen Messgerät realisiert werden. Die für Messaufgaben herausfordernde Produktionsumgebung ist nach VDI 2627 - Blatt 1 als Messraumgüteklasse 4 (VDI/VDE 2627) zu klassifizieren. Das Datenblatt des Messgerätes ist im Anhang A1 in der Tabelle 0-1 zu finden. Im Folgenden wird auf die einzelnen Parameter der Fokusvariation eingegangen. Ein Parameter davon ist die Vergrößerung des jeweiligen Objektivs, aus welcher der Messpunktabstand zum Bauteil definiert wird. Eine erhöhte Vergrößerung führt dabei zu einer Reduktion des Messpunktabstands. Dies resultiert in einer höheren Auflösung in Bezug auf die definierte Fläche des Bauteils. Somit steigt die optische Auflösung des Objektivs mit zunehmender Vergrößerung. Basierend auf den filigranen Dimensionen der Mikroverzahnung wurden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich das Objektiv mit fünffacher Vergrößerung (Typ: 1500A) sowie das Objektiv mit zehnfacher Vergrößerung (Typ: 800A) verwendet (Gauder et al. 2022c). Die untersuchten Objektive sind im Anhang A1 in der Tabelle 0-2 genauer spezifiziert. Ein weiterer Parameter ist der Downsampling-Faktor, mit diesem können mehrere erfasste Messpunkte zu einem kombinierten Messpunkt zusammengefasst werden. Dadurch lässt sich die Anzahl der Messpunkte je nach Faktorstufe reduzieren. Des Weiteren kann dem kombinierten Messpunkt mehr Vertrauen entgegengebracht werden, da sich dieser aus mehreren Messpunkten zusammensetzt. Zudem bildet dieser Messpunkt den tatsächlichen Punkt auf der Oberfläche mit größerer Wahrscheinlichkeit ab. Die vertikale Auflösung ist einer weiterer Parameter, mit diesem lassen sich die messbaren Höhenstufen definieren, welche die Fokusvariationstechnologie detektieren kann. (Gauder et al. 2022c)

Durch eine integrierte hochauflösende Rotationseinheit, welche mit einem Dreibackenfutter ausgestattet ist, lassen sich Messungen in verschiedenen Rotationswinkeln realisieren. Dies ermöglicht eine komplette 3D-Messung der Kopfwelle entlang der Rotationsachse. Das Messsystem ist mit luftgelagerten Achsen ausgestattet, die auf einer temperaturstabilen Granitplatte montiert sind. Durch eine aktive Dämpfung ist das

Messsystem zusätzlich schwingungsentkoppelt. (Bruker Alicona 2020). In Abbildung 5-2 ist der Aufbau der Fokusvariation mit der zu messenden Kopfwelle dargestellt.

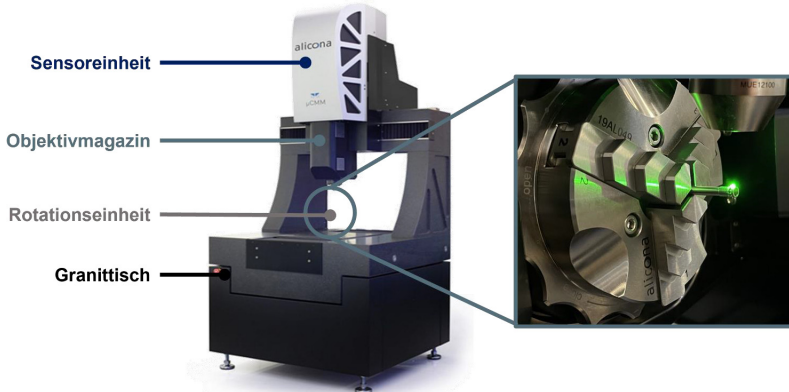


Abbildung 5-2: In-line Setup der Fokusvariation

Die hochauflösende Rotationseinheit besteht aus einer kombinierten Rotations- und Kippachse, welche den Winkel zwischen der optischen Achse und dem Normalenvektor der Oberfläche beschreibt. Somit lässt sich die Verzahnung der Kopfwelle durch verschiedene Rotationswinkel vollständig vermessen. Ein an die Kopfwelle angepasster Kippwinkel vermindert zudem Reflexionen im Zahnfußbereich. Die Angaben zur Genauigkeit des µCMM Messgerätes sind im Anhang A1 in der Tabelle 0-3 zu finden (Bruker Alicona 2020).

Im folgenden Abschnitt werden die bereits festgelegten Parameter erläutert. Da diese basierend auf Voruntersuchungen nur einen geringen Einfluss auf die Messzeit und -unsicherheit aufweisen, werden sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht variiert. Der definierte Kippwinkel von $+25^\circ$ ist ein bereits festgelegter Parameter. Dieser erzielt geringe Reflexionen im Fußbereich der Verzahnung und optimiert somit das optische Messverfahren. Des Weiteren wurde der integrierte Polarisationsfilter eingesetzt, um Reflexionen an der metallischen Oberfläche der Kopfwelle zu minimieren. Auf den integrierten Hochpräzisionsmodus, der die Achsen des Messgerätes vor jeder Messung kalibriert, musste aus Gründen der Messzeitoptimierung verzichtet werden. Dieser

würde über eine Minute an zusätzlicher Messzeit in Anspruch nehmen und ist somit im Kontext der zu realisierenden Taktzeit nicht anwendbar. (Gauder et al. 2022c)

Ein entsprechender Ausreißerfilter der maschinenintegrierten Software, welcher zwischen 0 (keine Filterung) und 1 (keine Messpunkte) definiert ist, erzielte ebenfalls verbesserte Ergebnisse im Rahmen von Voruntersuchungen (Gauder et al. 2022c).

Der Wert von 0,93 [-] reduzierte deutlich die Beeinträchtigung von parameterbasierten Verzahnungsabweichungen. Um sicherzustellen, dass jeder der 13 Zähne gleichmäßig erfasst wird, wurde der Überlappanteil der Messungen so eingestellt, dass die Anzahl der Messungen pro Umdrehung der Zähnezahle entspricht. Darauf aufbauend wurden die Belichtung und der Kontrast auf die Standardwerte von 1,81 ms und 0,60 [-] eingestellt. Basierend auf weiteren Untersuchungen wurden die Vergrößerung des Objektivs, die vertikale Auflösung sowie der Downsampling-Faktor als kritische Faktoren hinsichtlich der Messzeit und -unsicherheit identifiziert (Gauder et al. 2021; Gauder et al. 2019).

5.2 Methode zur Ermittlung optimaler in-line Messparameter unter Berücksichtigung von Messzeit und Messunsicherheit

Abgeleitet von den vorangegangenen Erkenntnissen wird die Fokusvariationstechnologie nun in drei Schritten untersucht. Im ersten Schritt wird eine auf der Latin-Hypercube-Sampling-Methode basierende statistische Versuchsplanung mit variierenden Messparametern durchgeführt, um daraus optimale Einstellungen in Bezug auf die taktile Referenzmessung zu extrahieren. Des Weiteren erfolgt die Ermittlung und Bewertung der erweiterten Messunsicherheit für das optimierte Messprogramm im zweiten Schritt. Im abschließenden Schritt wird eine Prozesseignungsanalyse durchgeführt.

5.2.1 Identifikation optimaler Messparameter

Die Parameter, die für die Messzeit und die dazugehörige Unsicherheit von Relevanz sind, sind die vertikale Auflösung, der Downsampling-Faktor sowie das verwendete Objektiv. Diese Parameter werden im Folgenden untersucht. Durch gezielte Variation mittels statistischer Versuchsplanung unter Anwendung des LHS sollen ideale Messparameter gefunden werden. Die drei untersuchten Parameter wurden dafür in definierten Bereichen variiert, welche in einem Messzeitbereich von weniger als drei bis

mehr als fünf Minuten liegen. Dadurch lassen sich Trends bei der Verzahnungsmessung hinsichtlich der Messzeit in Bezug zu der taktilen Referenzmessung erkennen. Diese Erkenntnisse ermöglichen ein erweitertes Verständnis der Bruker Alicona μ CMM und unterstützen bei der Ableitung eines optimalen Messprogramms. Des Weiteren ist es von Bedeutung, Variationsbereiche festzulegen, innerhalb derer sich nahezu alle Kombinationen abbilden lassen. Gleichzeitig sollen alle Einflussgrößen untereinander kompatibel sein, damit das Messprogramm ausführbar ist. Basierend darauf wurden die beiden Objektive mit der geringsten Vergrößerung ausgewählt. Ein höherer Vergrößerungsfaktor ist in Bezug auf eine geringe Messzeit nicht realisierbar. Dies zeigte sich ebenfalls bei der Variation des Downsampling-Faktors. In diesem Anwendungsfall sind ausschließlich die Faktorstufen 4, 8 sowie die höchste Stufe 16 für die Messzeitoptimierung von Relevanz, da die Stufen 1 und 2 die Anforderung an die in-line Messzeit überschreiten würden. Je nach Vergrößerung und Downsampling-Faktor kommen allerdings nur bestimmte Bereiche der vertikalen Auflösung in Frage. Dabei handelt es sich um Intervalle innerhalb hoher Auflösungen (geringe Zahlenwerte), weil das Downsampling, durch die Kombination von Punkten, eine Erhöhung der vertikalen Auflösung bewirkt. Demnach wird die vertikale Auflösung durch eine Kombination von Messpunkten positiv beeinflusst. Daraus ergibt sich ein zu variierender vertikaler Auflösungsbereich von 30 nm bis 500 nm. Die entsprechenden Variationsbereiche der Messparameter sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Variationsbereiche der Messparameter

Parameter	Variationsbreite
Vergrößerung des Objektivs	5x (1500A) und 10x (800A)
Downsampling	4, 8 und 16
Vertikale Auflösung	30 nm bis 500 nm

Mit der Definition des Variationsbereichs, kann ein Versuchsplan aus den relevanten Parameterkombinationen erstellt werden. Die Messung wird an einer Referenzkopfwelle durchgeführt. Zur Erstellung des Versuchsplans wurde die Methode des LHS angewandt, da sie mit kleinen Stichprobenzahlen aussagekräftige Ergebnisse erzielt. Aufgrund des Umfangs der realen Messungen und deren Auswertung wurde die Anzahl von 100 Messprogrammstichproben festgelegt. Mit Hilfe der MATLAB-Funktion *lhsdesign* (Anzahl der Stichproben, Anzahl der variierten Parameter) wurde ein gleichverteilter Versuchsplan für die Untersuchung erstellt. Die daraus resultierenden Vorschläge für die Parameter wurden entsprechend der Einstellbarkeit gerundet. Für das Objektiv ergaben sich die beiden Möglichkeiten der 5-fachen und 10-fachen Vergrößerung. Für

das Downsampling wurden die zufälligen Parametervorschläge den diskreten Stufen 4, 8 und 16 zugeordnet. Die vertikalen Auflösungswerte wurden auf 10 nm-Schritte gerundet, um realisierbare Parameter zu erhalten (Gauder et al. 2022c). Der resultierende Versuchsplan ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

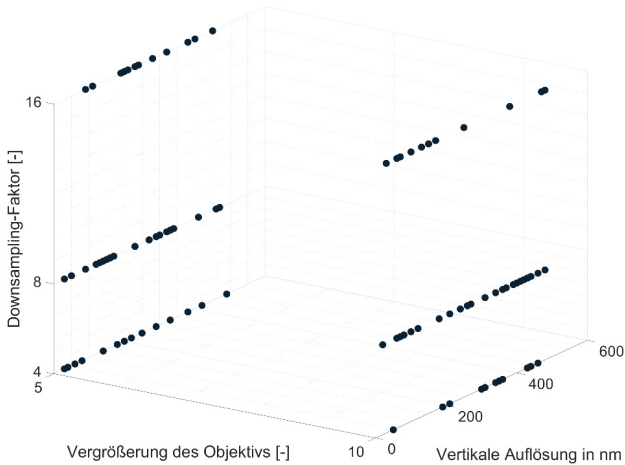


Abbildung 5-3: Visualisierung des Versuchsplans

5.2.2 Ausgewählte Methoden zur Bewertung der Messunsicherheit

Für die Ermittlung der spezifischen Messunsicherheit der Kopfwelle werden basierend auf den klassischen Verzahnungskenngrößen 20 Wiederholungsmessungen des gewählten, optimierten optischen Messprogramms mit 20 präzisen taktilen Referenzmessungen des Zeiss F25 KMG verglichen. Die Normen des Leitfadens zur Angabe der Messunsicherheit (GUM), DIN EN ISO 15530-3 und VDI/VDE 2617 Blatt 8 bildeten die Grundlage für die Ermittlung (DIN EN ISO 15530; JCGM 100:2008; VDI/VDE 2617). Anhand von ausgewerteten Kalibrierunsicherheiten auf Basis des Mikroverzahnungsnormals an der Zeiss F25 werden durch den Vergleich von klassischen Verzahnungskenngrößen optischer und taktiler Messdaten erweiterte Messunsicherheiten der Fokusvariationstechnologie ermittelt. Die erweiterte Messunsicherheit U_k kann durch die folgende Formel 5-1 ermittelt werden.

$$U_k = k * \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2}$$

Formel 5-1

Hierbei repräsentiert u_{cal} die Standardunsicherheit der taktilen Kalibrierungsmessung mittels Mikroverzahnungsnorm, u_p steht für die Standardunsicherheit des optischen Verfahrens, u_w repräsentiert die Standardunsicherheit aufgrund von Material- und Produktionsstreuung (vernachlässigbar aufgrund der Referenz-Kopfwellen), u_b entspricht der systematischen Abweichung (Bias) zwischen beiden Messverfahren und k drückt den Erweiterungsfaktor aus, der für ein Konfidenzintervall von etwa 95% dem Wert 2 entspricht. Die Erzielung einer möglichst geringen aufgabenspezifischen Messunsicherheit ist neben dem Einsatz eines dafür geeigneten Messgerätes auch von diversen Einflussfaktoren abhängig. (Weckenmann & Gawande 1999) Um die Einflussfaktoren auf die Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation in ihrer Gesamtheit zu minimieren, wurde ein Ishikawa-Diagramm in Abbildung 5-4 erstellt. Die Vermeidung und Minimierung von Einflussfaktoren, wie beispielsweise Temperatur, Verschmutzung usw. ist von hoher Bedeutung für die Erzielung einer geringen Messunsicherheit

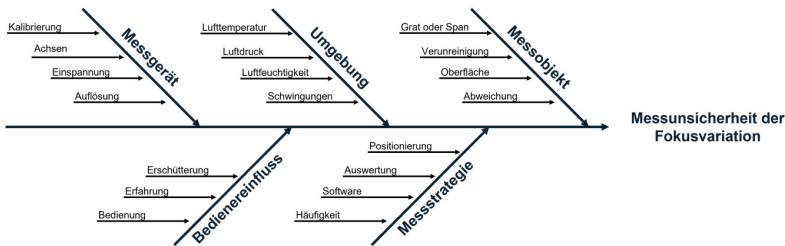


Abbildung 5-4: Ishikawa-Diagramm für die Einflussfaktoren auf die Unsicherheit der Fokusvariation nach (Gawander et al. 2022c)

5.2.3 Konzept der Prozesseignungsanalyse für die Validierung

Im letzten Schritt dieses Ansatzes wird die quantifizierte Unsicherheit in Bezug auf die Verzahnungstoleranzen bewertet. Als Grundlage dient hier die Prüfprozesseignung, wie sie in den Grundlagen im Kapitel 2.4.3 beschrieben wurde. Hier ist g_{pp} das Verhältnis aus der erweiterten Messunsicherheit des Messverfahrens U_{MP} und der einseitigen Toleranz T (VDI/VDE 2617). Nach VDA-5 sollte dieses Verhältnis kleiner oder gleich

einem Wert $\hat{G}_{pp} = 0,3$ (VDA-5) entsprechen. Die Formel für die Bestimmung setzt sich wie folgt zusammen.

$$g_{pp} = \frac{U_{MP}}{T} \leq G_{pp} = 0.3 \quad \text{Formel 5-2}$$

Bei zweiseitiger Toleranz wird der Zähler um den Faktor 2 erweitert, um den Toleranzbereich auszugleichen (VDI/VDE 2617). Die Formel ändert sich somit zu folgendem Ausdruck.

$$g_{pp} = 2 * \frac{U_{MP}}{T} \leq G_{pp} = 0.3 \quad \text{Formel 5-3}$$

Somit können Aussagen zur Prozesseignung getroffen werden. Problematisch ist die Bestimmung der Verzahnungstoleranzen, da die geltende Toleranznorm ISO 1328-1 für Zahnräder nur bis zu einem Zahnradmodul von 500 μm definiert ist (ISO 1328). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die Verzahnungstoleranzen der aktuell gültigen ISO 1328-1 für die Güteklasse 8 extrapoliert, wie es in Kapitel 2.1.5 aufgezeigt wurde. Auf diese Weise erhält man für jede ermittelte Messunsicherheit eine Aussage zur Prüfprozesseignung.

5.3 Ergebnisse der Messzeitoptimierung sowie der Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation

In diesem Kapitel werden die ausgewerteten Ergebnisse präsentiert. Zunächst wird ein geeignetes Reinigungsverfahren vorgestellt. Dann werden die optimalen Messparameter der Fokusvariation sorgfältig bestimmt. Dies dient als Grundlage für eine systematische Messunsicherheitsanalyse. Abschließend wird die Prüfprozesseignung auf Basis der ermittelten Unsicherheiten ausgewertet.

5.3.1 Identifizierung eines optimierten Reinigungsverfahrens

Zur Bestimmung eines effektiven Reinigungsverfahrens, welches im Spannungsfeld der Reinigungsdauer und dem entsprechenden Reinigungsgrad steht, wurde eine Matrix (siehe Abbildung 5-5) entwickelt, aus der die optimale Kombination abgeleitet werden kann. In dieser Matrix sind sieben Kombinationen (A-G) mit vier einzelnen Reinigungsschritten (Konzentrat, Lösungsmittel, Abblasen, Knetmasse) in Spalten dargestellt. Die daraus resultierende Reinigungszeit, sowie ein Bild 1 (aus der Perspektive des Bildsensors) und ein Bild 2 (aus der Perspektive der Punktwolke) ermöglichen eine

Auswahl anhand von Ist-Daten. Die Knetmasse (Spalte E) erzielt eine gute Reinigungswirkung. Die Verwendung von Konzentrat (Spalte C) oder Lösungsmittel (Spalte D) zeigt keine signifikante Verbesserung zum Ausgangszustand. Eine ungereinigte Referenz, die direkt aus der Fertigung kommt, ist in Spalte A dargestellt.

Nur die Kombination von Konzentrat oder Lösungsmittel in Verbindung mit Knetmasse zeigt optimale Ergebnisse. Allerdings ist die Abfolge von Lösungsmittel, Abblasen und Knetmasse (Spalte G) um etwa 75 % schneller als die Abfolge mit Konzentrat, Abblasen und Knetmasse (Spalte F), da hier kein Ultraschallbad zum Einsatz kommt. Damit ist der Ablauf in Spalte G das präferierte Reinigungsverfahren für diese in-line Anwendung. Somit wurde ein effektives und gleichzeitig schnelles Verfahren zur Reinigung von den untersuchten Kopfwellen mit einer maximalen Dauer von 50 Sekunden realisiert. (Gauder et al. 2022c)

REIHE	A	B	C	D	E	F	G
ABLAUF	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE	1. LÖSUNGSMITTEL 2. KONZENTRAT 3. DRUCKLUFT 4. KNETMASSE
DAUER	-	6 SEKUNDEN	180 SEKUNDEN	30 SEKUNDEN	15 SEKUNDEN	200 SEKUNDEN	50 SEKUNDEN
BILD 1							
BILD 2							
RANG	7.	6.	5.	4.	3.	2.	1.

Abbildung 5-5: Bewertungsmatrix für Reinigungsverfahren (Gauder et al. 2022c)

5.3.2 Identifizierung optimierter Messparameter

Nach Durchführung des Versuchsplans werden die 100 Messungen hinsichtlich der Messzeit und der Abweichung zu dem Mittelwert von 20 hochpräzisen, taktilen Referenzmessungen ausgewertet. Die erzielten optischen Messzeiten liegen in einem Bereich von 2,75 bis 5,25 Minuten. Der Zeitgewinn bei der Messung ist signifikant. Abbildung 5-6 veranschaulicht die Einflüsse der drei variierten Parameter auf die Messzeit.

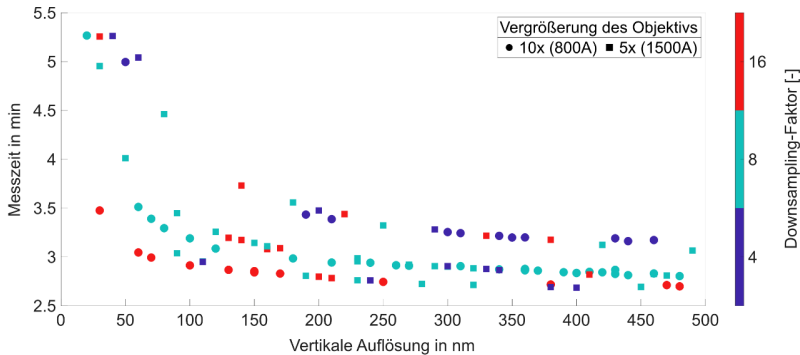


Abbildung 5-6: Analyse der Messzeit (Gauder et al. 2022c)

Dabei zeigt sich eine starke Empfindlichkeit der Messzeit in Bezug auf die vertikale Auflösung. Mit steigender vertikaler Auflösung (geringere Zahlenwerte) ist ein exponentielles Verhalten der Messzeit zu beobachten. Daraus resultiert, dass ein wesentlicher Faktor zur Optimierung der Messzeit die vertikale Auflösung ist. Der Einfluss des Downsamplings ist ebenfalls zu erkennen. Hier sinkt die Messzeit mit zunehmendem Downsampling-Faktor aufgrund der Datenkompression. Ein signifikanter Einfluss des Objektivs auf die Messzeit kann nicht festgestellt werden, da der Verfahrensbereich der Sensorachse bei beiden Objektiven, aufgrund des unveränderten Messprogramms, konstant bleibt. (A_Gözl 2022; Gauder et al. 2022c)

Im nächsten Schritt werden die Messungen der Fokusvariation mit der taktilen Referenzmethode verglichen. Zu diesem Zweck werden Vergleiche basierend auf den charakteristischen Verzahnungskenngrößen durchgeführt. Für Gesamt- und Winkelabweichungen in Profil- und Flankenrichtung wird der Median über alle 13 Zähne zum Median über 13 Zähne der 20 Referenzmessungen betrachtet. Neben der Abweichung werden die über 13 Zähne gemittelten Varianzen der Verzahnungsparameter ermittelt, um ein Verständnis für die Streuung der Parameter zu erhalten, die bei optischen Messverfahren von Bedeutung sind. Die Gesamtprofilabweichung F_{α} ist ein Extremparаметer, da er Differenzen zwischen minimalen und maximalen Abweichungen in Profilrichtung der Zahnflanke berücksichtigt. Daher ist dieser Parameter empfindlich gegenüber Ausreißern. Dieses Verhalten wird im linken Teil von Abbildung 5-7 illustriert.

Messungen mit einem niedrigen Downsampling-Faktor von 4 zeigen größere Abweichungen von der Referenzmessung als Messungen mit höherem Downsampling-Faktor. Dies ist auf die Eigenschaft des Downsamplings zurückzuführen, da benachbarte Punkte zusammengefasst und somit Ausreißer gefiltert werden. Daher führt ein höherer Downsampling-Faktor zu stabileren und zuverlässigeren Messergebnissen. Bei der Wahl des Objektivs ist die stärkere, zehnfache Vergrößerung (800A) der fünffachen (1500A) vorzuziehen. Die Abbildung 5-7 links zeigt die höhere Objektivvergrößerung, bei welcher aufgrund der besseren optischen Auflösung geringere Abweichungen von den Ergebnissen der taktilen Referenzmessung zu erkennen sind. Ein eindeutiger Einfluss der vertikalen Auflösung auf den Median der Abweichung kann in dieser Auswertung nicht festgestellt werden. Eine Bestätigung der Vergrößerungsstufe zeigt sich in der Varianzanalyse für diesen Parameter auf der rechten Seite von Abbildung 5-7. Die Varianz nimmt dadurch mit zunehmender Vergrößerung ab, da die Position der Messpunkte zuverlässiger abgeschätzt werden kann. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2022c).

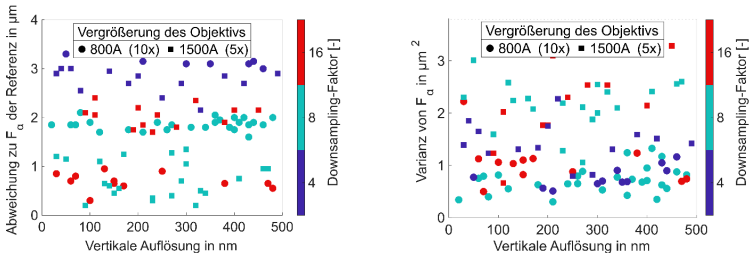


Abbildung 5-7: Profillesamtabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022c)

Diese Beobachtung setzt sich bei den nächsten Parametern fort. Die Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ berücksichtigt den Winkel einer gemittelten Ausgleichsgeraden der Abweichung in Profilrichtung. Das bedeutet, dass einzelne Ausreißer einen geringeren Einfluss haben, da die Abweichungen gemittelt werden. Die Analyse in Abbildung 5-8 auf der linken Seite bestätigt die Vermutung, dass das Objektiv mit zehnfacher Vergrößerung (800A) in Kombination mit dem Downsampling-Faktor von 16 optimale Ergebnisse unter Berücksichtigung der kurzen Messzeit liefert. Die Varianzanalyse auf der rechten Seite zeigt deutlich den Nachteil des Objektivs mit fünffacher Vergrößerung

(1500A). Auch hier ist der Einfluss der vertikalen Auflösung relativ gering, da die Grundauflösung durch die optische Auflösung des Objektivs und die Tatsache gegeben ist, dass die für dieses zeitoptimierte Messproblem erforderlichen Downsampling-Faktoren bereits einen Bereich von jeweils präzisen vertikalen Auflösungen erfordern. Wenn das Objektiv jedoch eine geringere optische Auflösung hat, wird der Einfluss der vertikalen Auflösung deutlich. Dies zeigt die Varianzanalyse von Abbildung 5-8 auf der rechten Seite. Die grundlegende optische Auflösung der beiden Objektive wird mit 0,4 mm bei fünffacher Vergrößerung und 0,1 mm bei zehnfacher Vergrößerung angegeben. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2022c)

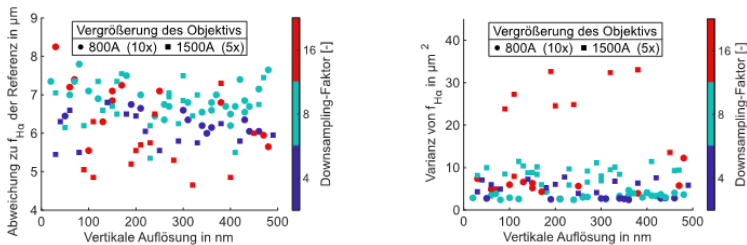


Abbildung 5-8: Profilwinkelabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022c)

Betrachtet man die Flankenrichtung, so ergibt sich ein ähnliches Verhalten für die Abweichungen und Variationen in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 erhält man ein ähnliches Verhalten. Darüber hinaus ist ein leichter Trend zu geringeren Abweichungen und Variationen in Kombination mit einer verbesserten vertikalen Auflösung zu erkennen. Es wird auch deutlich, dass sich in Profil- und Flankenrichtung das Objektiv mit stärkerer Vergrößerung und das erhöhte Downsampling als optimale Parameter herausstellen. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2022c)

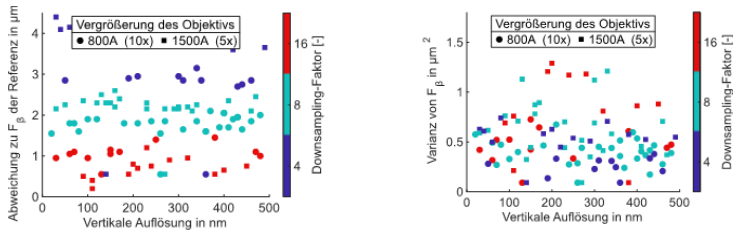


Abbildung 5-9: Gesamtfehler der Flankenabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022c)

Ein interessanter Effekt tritt bei der Kombination von hohem Downsampling-Faktor und geringer Objektivvergrößerung auf. Durch das Zusammenfassen vieler Messpunkte beim Downsampling wird die Anzahl der Messpunkte stark reduziert. Wenn das Objektiv mit geringerer optischer Auflösung nun bei einer kleineren Grundgesamtheit von Punkten weniger präzise Punkte aufnimmt, sind Ausreißer von besonderer Bedeutung. Dies erklärt die hohen Abweichungen bei dieser Kombination (eckig rote Punkte), wenn man deren Varianz in Abbildung 5-8, Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 berücksichtigt. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2022c)

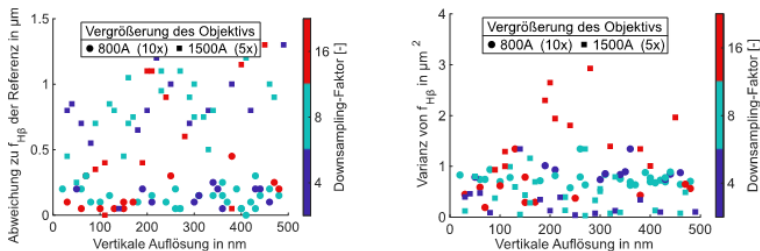


Abbildung 5-10: Abweichung der Flankenwinkelabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022c)

Die Annahme, dass der größere Messbereich mit der geringeren Vergrößerung des Fünffach-Objektivs einen größeren Informationsgehalt hat, die die Genauigkeit durch die Mehrfachpunktaufnahme kompensiert, kann somit widerlegt werden. Ferner verringert die Komprimierung durch Zusammenfassen der Punkte beim Downsampling die Wahrscheinlichkeit von Ausreißern und erhöht damit das Vertrauen, das einem

einzelnen optischen Messpunkt entgegengebracht werden kann. Die vertikale Auflösung wirkt sich in ihrem variablen Bereich primär auf die Messzeit aus und kann daher als Stellgröße zur Anpassung der Messzeit verwendet werden. Es wird empfohlen, ihren Wert an die Spezifikation der Messzeit anzupassen. Diese Schlussfolgerungen führen zu einem optimierten Messprogramm, das im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

5.3.3 Optimiertes Messprogramm

Die Erkenntnisse aus den Messreihen führen zu folgendem optimierten Messprogramm, dessen Parameter in Tabelle 5-3 aufgelistet sind. Der Alicona Real3D-Modus wurde verwendet, um vollständige Messungen an einem Zahnrad zu ermöglichen. Höhere optische Auflösungen sowie eine geringere Varianz führten zur Wahl des Objektivs mit zehnfacher Vergrößerung (800A). Ein hoher Downsampling-Faktor von 16 ermöglicht zuverlässige Messpunkte, was den Streuungseigenschaften optischer Messsysteme entgegenkommt. Bei der vertikalen Auflösung wurde der 5-Minuten-Zeitkorridor des Produktionsprozesses berücksichtigt. Dies führte zu einer Messzeit von weniger als 3,5 Minuten. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2022c)

Tabelle 5-3: Optimiertes Messprogramm

Parameter	Wert/Einheit
Strategie der Messung	Alicona Real3D
Vergrößerung	800A (10x)
Neigungswinkel	+25°
Belichtungszeit	1,810 ms
Kontrast	0,6 [-]
Vertikale Auflösung	0,030 µm
Seitliche Auflösung	3,914 µm
Downsampling	16 [-]
Mittlere Anzahl von Punkten	23,243
Breite der Messung	1,312 mm
Polarisierung	Aktiv
Präzisionsmodus	Inaktiv
Prozentsatz der Überschneidung	19 %
Ausreißer-Filter	0,93 [-]
Mittlere Messzeit	3,476 min

Um einen Eindruck von dem zeitoptimierten Messprogramm zu bekommen, sind eine gemessene Punktwolke sowie eine Visualisierung der Wiederholbarkeit in Abbildung 5-11 dargestellt. Die Wiederholbarkeit beschreibt die Standardabweichung eines Punktes, der mehrfach aufgenommen wurde. Es ergeben sich sehr geringe punktbezogene Wiederholbarkeiten von weniger als 7 Nanometern. Diese sind hauptsächlich

auf das verwendete Objektiv und den hohen Downsampling-Faktor zurückzuführen (A_Gözl 2022; Gauder et al. 2022c).

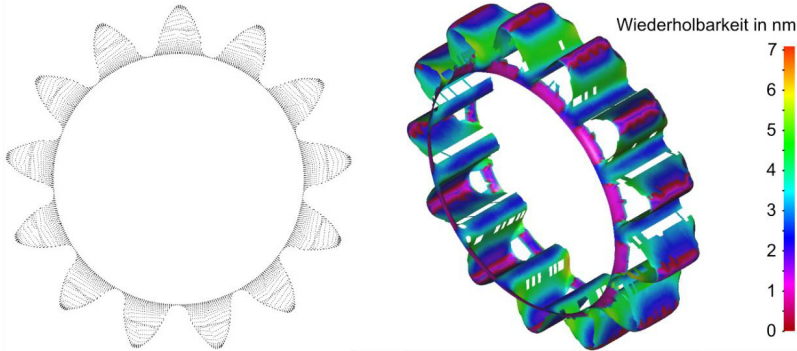


Abbildung 5-11: Punktwolke (links) und Punkt wiederholbarkeit (rechts) (Gauder et al. 2022c)

5.3.4 Messunsicherheiten des optimierten Messprogramms

Tabelle 5-4 zeigt die erweiterten Messunsicherheiten des entwickelten in-line Messprogramms für die optische Fokusvariationstechnologie μCMM von Alicona, welche mit Hilfe der Formel 5-1 berechnet wurde. Das Verfahren wurde nach (DIN EN ISO 15530) und (VDI/VDE 2617) durchgeführt. Das vollständige Budget sowie die ausführliche Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit sind im Anhang A2 in der Tabelle 0-7 dargestellt und erläutert. Der verwendete Auswertebereich der Verzahnung wurde auf Basis des Kontaktbereichs einer Abwälzsimulation aufgabenspezifisch ermittelt.

Tabelle 5-4: Erweiterte Messunsicherheiten ($k=2$) der einzelnen Verzahnungskenngrößen an der Alicona μCMM

Parameter	Erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) in μm
Profil-Gesamtabweichung F_α	1,96 μm
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$	3,36 μm
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$	1,47 μm
Profil-Balligkeit C_α	2,22 μm
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β	2,09 μm
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$	2,26 μm
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$	2,01 μm
Flankenlinien-Balligkeit C_β	1,05 μm

5.3.5 Unsicherheit der virtuellen Zahnweitenprognose

Die Unsicherheit der virtuellen Zahnweitenprognose wird experimentell durch taktile Vergleichsmessungen an der Zeiss F25 ermittelt. Dafür wird das Referenzzahnrad 20-mal taktil vermessen und die Zahnweiten in „Zeiss Gear Pro“ ausgewertet. Das Zahnrad wird daraufhin 20-mal optisch mit der Bruker Alicona μ CMM Fokusvariationstechnologie in der Produktionsumgebung vermessen und die Zahnweiten jedes Zahns mittels virtueller Messung in „MATLAB“ ermittelt. Als Unsicherheitsbeiträge werden die taktilen Kalibrierunsicherheiten auf Basis von Messungen am Mikroverzahnungsnormal der PTB für das Modul 0,2 mm sowie die Standardabweichungen der Mediane über die 13 Zähne beider Messreihen aus jeweils 20 Messungen verwendet. Die systematische Abweichung (Bias) von $0,37 \mu\text{m}$ zwischen den beiden Messverfahren, kann aufgrund der taktilen Kalibriermessungen des Referenzbauteils, kompensiert werden. Der GUM empfiehlt die Korrektur von bekannten systematischen Abweichungen (VDI/VDE 2617). Bei der Verwendung des kalibrierten Werkstücks auf dem kalibrierten, taktilen Koordinatenmessgerät (Zeiss F25) ist die Rückführbarkeit gewährleistet. Somit lassen sich die bekannten Differenzen zwischen den Messergebnissen der Wiederholmessungen korrigieren. Hierbei wird die systematische Abweichung zwischen den beiden Messverfahren im Budget, siehe Tabelle 0-22 im Anhang A11 als kompensierte systematische Abweichung ausgewiesen. Die erweiterte Unsicherheit der Zahnweitenmessung wurde mittels der Formel 2.14 berechnet und beträgt dabei $0,78 \mu\text{m}$ ($k=2$). Somit kann eine geringe Unsicherheit der Zahnweitenprognose nachgewiesen werden.

5.3.6 Ergebnisse der Prüfprozesseignung

Durch die ermittelten Messunsicherheiten lassen sich zum Abschluss der messtechnischen Integration Aussagen zur Prüfprozesseignung treffen. Eine letzte Herausforderung stellt die Bestimmung der Verzahnungstoleranzen dar, da die geltende Norm ISO 1328-1 lediglich bis zu einem Modul von $500 \mu\text{m}$ definiert ist (ISO 1328). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden in Absprache mit den Entwicklern des Anwendungspartners die Toleranzen für die Qualitätsklasse 8 extrapoliert. Auf diese Weise ergibt sich für jede Unsicherheit eine Aussage über die Prüfprozesseignung. Als Grenze wurde der konservative Wert von $G_{pp} = 0,3$ gewählt (VDA-5). Es zeigt sich, dass die Prozesseignung, trotz geringer Toleranzen, für alle betrachteten Verzahnungsabweichungen erreicht wird. Die Berechnungsgrundlage der extrapolierten Toleranzen ist in Kapitel 2.1.5 zu finden. Die nachfolgende Tabelle 5-5 zeigt

die Überprüfung der Prozesseignung basierend auf dem optimierten in-line Messprogramm.

Tabelle 5-5: Überprüfung der Prozesseignung des optimierten Messprogramms

Parameter	Eignungsgrad g_{pp}	Prozesseignung ($G_{pp} < 0.3$)
Profil-Gesamtabweichung F_{α}	0.10	✓
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$	0.28	✓
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$	0.10	✓
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β}	0.12	✓
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$	0.17	✓
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$	0.15	✓

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Unsicherheiten bei einer Messzeit von weniger als 3,5 Minuten relativ gering sind. Bei den schnellen in-line Messungen hat die Prozesseignungsanalyse gezeigt, dass die Anforderungen in Bezug auf die Toleranzen erfüllt werden. Ein weiterer Aspekt ist der Einfluss der vertikalen Auflösung auf die Messzeit. Die vertikale Auflösung erwies sich als geeignete Stellgröße, um die Messzeit zu reduzieren, ohne die Qualität der Ergebnisse signifikant zu verschlechtern. (Gauder et al. 2022c).

6 Qualifizierung des Einflanken-Wälzprüfstands

Die analytische Zahnkontaktanalyse, die im Qualitätsregelkreis zur echtzeitnahen Bewertung der funktionsorientierten Kenngrößen zum Einsatz kommt, soll mittels Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand validiert werden. Für die Ermittlung der Gesamtunsicherheit ist es notwendig, die Messunsicherheit des Prüfstands zu quantifizieren.

Aufgrund des Nichtvorhandenseins von Richtlinien zur Kalibrierung von Einflanken-Wälzprüfständen, wird ein tabellarisches Budget auf Basis des GUM erarbeitet. Dabei werden kritische Einflussgrößen identifiziert und diese mittels experimentell ermittelten Sensitivitätskoeffizienten gewichtet. Als Resultat können die erweiterten Messunsicherheiten für die funktionsorientierten Abweichungen der Einflanken-Wälzprüfung ermittelt werden (Pueo et al. 2020).

6.1 Experimenteller Aufbau

6.1.1 Einflanken-Wälzprüfstand für Mikrozahnräder

Hierfür wird ein speziell für dieses Projekt entwickelter Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand für Modul $< 0,5$ mm eingesetzt. Der Prüfstand ist in Kooperation mit der Firma Frenco entwickelt worden. Dieser weist vier bewegliche Achsen, die mit Mikrometerschrauben justiert werden können, auf, um Mikroverzahnungen verschiedener Module vermessen zu können. Die Achsen sind auf einer präzisionsgeläppten Granitplatte montiert. Darüber hinaus besitzt der Prüfstand eine treibende Rotationsachse auf der Eingangsseite sowie eine getriebene Achse inklusive Bremse auf der Ausgangsseite. Beide Rotationsachsen sind mit hochauflösenden Rotationsencodern der Firma Heidenhain ausgestattet (Auflösung: $\pm 2,5''$) (Gauder et al. 2022a). Auf der Eingangsseite wird die zu prüfende Kopfwelle auf einem Spanndorn fixiert und arretiert um dieses gegen ein Lehrzahnrad mit minimierten Abweichungen auf der Ausgangsseite abwälzen zu können. Die X-Achse wird dabei zur Einstellung des Kontaktpunktes in Richtung der Zahnbreite verwendet. Der Achsabstand zwischen den beiden Zahnrädern lässt sich mit der Y-Achse einstellen. Eine zweite X-Achse sowie eine schwenkbare C-Achse zur Vermessung von Kegelrädern werden in dieser Untersuchung nicht verwendet. Der Einflanken-Wälzprüfstand und die betrachteten Achsen sind in Abbildung 6-1 veranschaulicht.

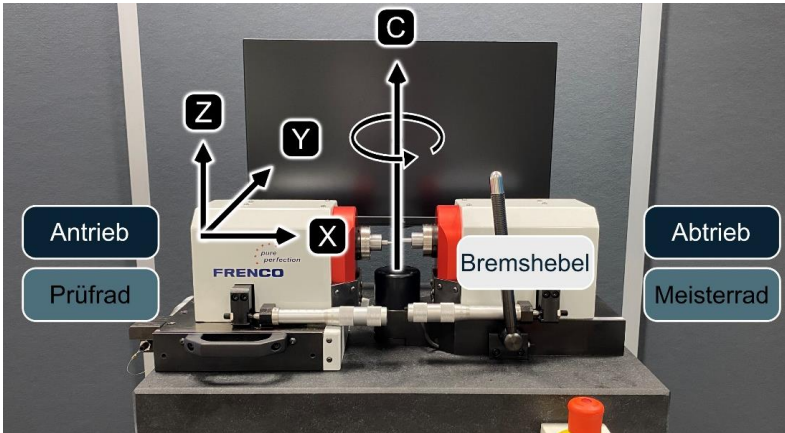


Abbildung 6-1: Aufbau und Achsen des Einflanken-Wälzprüfstands für Mikroverzahnungen (Gauder et al. 2022a)

Die Position des Einstellschlittens, der Spindelstock-Bremse und der Schwenkeinheit wird digital auf dem zugehörigen Bildschirm mit der Software "RMpro" angezeigt. Der Einstellschlitten ist mit einem inkrementellen Längenmessgerät der Firma Heidenhain und die Spindelstock-Bremse mit einem inkrementellen Längenmessgerät der Firma Numerik Jena ausgestattet. Zusätzlich ist die Schwenkeinheit mit einem Heidenhain-Drehgeber für die Erfassung der Winkelposition der C-Achse ausgestattet. In der nachfolgenden Tabelle 6-1 sind die installierten Achsen mit den entsprechenden Messauflösungen aufgelistet. Die Auswahl der Messsysteme erfolgte nach dem neuesten Stand der Technik, um bei den kleinen Abmessungen der Mikroverzahnungen möglichst geringe Unsicherheiten zu gewährleisten. Daher wurden die Komponenten unter Berücksichtigung von Genauigkeit, Masse, Reibung und Integration der Komponenten für den hochpräzisen Prüfstand ausgewählt (Gauder et al. 2022a).

Tabelle 6-1: Installierte Achsen und ihre Messauflösungen

Achse	Messsystem	Hersteller	Auflösung
Spindelstock-Bremse	Inkrementeller Längenmesskopf + Messskala	Numerik Jena	0,2 μm
Einstellschlitten	Inkrementeller Längenmaßstab	Heidenhain	0,1 μm
Schwenkeinheit	Drehgeber	Heidenhain	0.005°

Der Prüfstand ist am Antriebsspindelstock mit einem DC-Mikromotor mit Planetengetriebe mit integriertem hochauflösendem Drehgeber der Firma Faulhaber ausgestattet.

Die Winkelposition des Prüfzahnades wird mit einem hochauflösenden Drehgeber der Firma Heidenhain erfasst, der an der Hohlspindeleingangsschse des Prüfzahnades montiert ist. Dieser DC-Mikromotor mit integriertem Messsystem hat ein Anlaufmoment von $\leq 0,015$ Nm, ein Reibmoment von $\leq 0,025$ Nm und ein Rotorträgheitsmoment von $0,13 \cdot 10^{-3}$ kgm². Die Winkelstellung des Meisterzahnades wird ebenfalls mit einem Winkelmessmodul der Firma Heidenhain erfasst. Das Meisterzahnrad an der Spindelstockbremse wird mit einer Hysteresebremse der Firma Mobac konstant mit 0,0042 Nm gebremst. Die nachfolgende Tabelle 6-2 listet die relevanten Komponenten und deren Charakteristika auf.

Tabelle 6-2: Spezifikation der für den Einflanken-Wälzprüfung relevanten Komponenten

Achse	Komponente	Hersteller	Charakteristika	Genauigkeit des Systems
Spindelstock	DC-Kleinstmotor mit Planetengetriebe und Encoder	Faulhaber	Nenn Drehmoment: 41 mNm; Drehzahl: 5300 min ⁻¹ Inkrementelles Messverfahren	-
Spindelstock	Winkelmessmodul	Heidenhain	Max. Drehzahl: 300 min ⁻¹ Rotor Planlauf 1 µm	± 2.5"
Spindelstock-Bremse	Hysteresebremse (variables Bremsmoment)	Mobac	Max. Drehzahl: 4000 min ⁻¹ Bremsmoment: 0,01 – 1,4 mNm Inkrementelles Messverfahren	-
Spindelstock-Bremse	Winkelmessmodul	Heidenhain	Max. Drehzahl: 300 min ⁻¹ Rotor Planlauf 1 µm	± 2.5"

6.1.2 Meisterzahnäder

Für die Untersuchung wurden zwei Meisterzahnäder (Antriebs- und Abtriebsseite) mit minimalen Verzahnungsabweichungen mittels Funkenerosion hergestellt. Sie wurden für die Bestimmung der Messunsicherheiten und die Kalibrierung des Prüfstands benötigt. Das antriebsseitige Meisterzahnrad mit 13 Zähnen repräsentiert die Verzahnungscharakteristik der zu prüfenden Kopfwelle und befindet sich daher auf der angetriebenen Eingangsseite. Das abtriebsseitige Meisterzahnrad mit 40 Zähnen repräsentiert dagegen die Abtriebsseite. Beide Meisterzahnäder wurden nach DIN EN ISO/IEC

17025 geprüft (EN ISO/IEC 17025) und sind rückführbar auf DAkS-kalibrierte Referenznormale und PTB-Normale. Die aus den Messungen resultierenden Messunsicherheiten sind bekannt und werden ausgewiesen, die entsprechenden Prüferzertifikate sind im Anhang A3 in Tabelle 0-8 und Tabelle 0-9 aufgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 6-2 sind die an- und abtriebsseitigen Meisterzahnrad dargestellt, deren Abweichungen sind in Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 zusammengefasst.

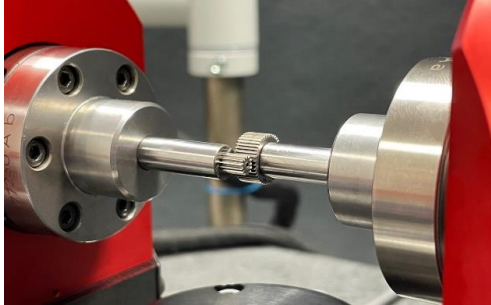


Abbildung 6-2: Meisterzahnrad $z = 13$ (links) und Meisterzahnrad $z = 40$ (rechts)

Im folgenden Abschnitt werden die messtechnischen Prüfzeugnisse mit einer allgemeinen Messunsicherheit von $2 \mu\text{m}$ bei einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ für die beiden Meisterzahnrad, siehe Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4, aufgelistet. Da die Herstellung von Mikrozahlradern sehr hohe Anforderungen an die Fertigung stellt, ist die Minimierung der Abweichungen von der Idealform von zentraler Bedeutung. Beide Meisterzahnrad (Lehrzahnrad) weisen geringfügige Fertigungsabweichungen auf, die für hochpräzise Messungen von Mikrozahlradern nicht ausreichend sind. Die Abweichungen der Meisterzahnrad beeinflussen das Messergebnis der geprüften Mikrozahlrad beim Abwälzen. Aus diesem Grund muss eine sogenannte Meisterradkompensation angewandt werden. Die Art der Kompensation wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Tabelle 6-3: Abweichungen des Lehrzahnrad mit $z = 13$ und $d = 3,640 \text{ mm}$

Parameter	Abweichung (linke Flanken)	Abweichung (rechte Flanken)
Profilgesamtabweichung F_α	$3,5 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	$2,9 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Teilunggesamtabweichung F_p	$3,7 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	$5,2 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$

Teilungseinzelabweichung f_p	1,3 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	2,0 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Flankenliniengesamtabweichung F_{β}	3,4 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	3,2 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Rundlaufabweichung F_r	4,3 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	

Tabelle 6-4: Abweichungen des Lehrzahnrad bei $z = 40$ und $d = 11.200 \text{ mm}$

Parameter	Abweichung (linke Flanken)	Abweichung (rechte Flanken)
Profilgesamtabweichung F_{α}	1,6 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	1,9 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Teilungsgesamtabweichung F_p	3,1 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	3,2 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Teilungseinzelabweichung f_p	1,0 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	0,8 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Flankenliniengesamtabweichung F_{β}	0,5 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	0,6 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Rundlaufabweichung F_r	4,2 $\mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$	

Die von der Firma Frenco entwickelte Software "RMpro" für Einflanken- und Zweiflanken-Wälzprüfstände enthält eine softwaregestützte Funktion zur Kompensation von Meisterzahnradabweichungen. Minimale Abweichungen lassen sich auch bei Meisterzahnradern nie vermeiden. Insbesondere bei hohen Zähnezahlen zwischen Prüf- und Meisterzahnrad beeinflussen Meisterzahnradabweichungen die Messergebnisse des Prüfzahnrad. Mit Hilfe der Meisterfehlerkompensation können diese Abweichungen bei der Auswertung der Messung reduziert werden und beeinflussen somit das Messergebnis nicht wesentlich. Die Meisterfehlerkompensation wird für das Meisterzahnrad ermittelt, das sich auf der Abtriebsseite des Prüfstands befindet. Dazu muss eine spezielle Messung durchgeführt werden, bei der die Zähnezahl des abtriebsseitigen Meisterzahnrades als Gesamtanzahl der Messumdrehungen verwendet wird. Dadurch wird das gesamte Abwälzverhalten des abtriebsseitigen Meisterzahnrades (Lehrzahnrad) ausgewertet. Es werden die Messkurven pro Umdrehung des Lehrzahnrad aufgenommen, die dann gemittelt und als Ausgleichskurve verwendet werden. Der Messvorgang entspricht einer normalen Messung, bei der die linke und rechte Flanke durch aufeinanderfolgendes Abwälzen des Zahnrades im und gegen den Uhrzeigersinn gemessen wird. Die Kompensation ist in Abbildung 6-3 zu sehen.

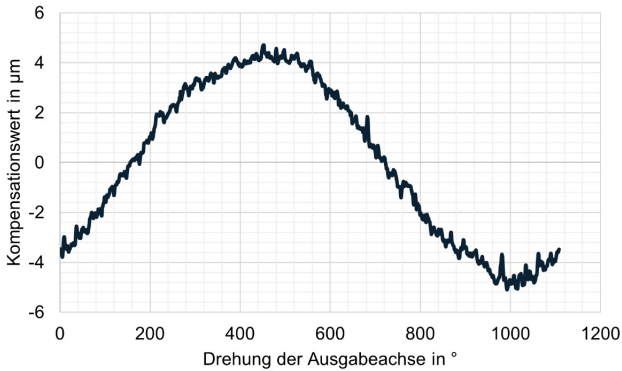


Abbildung 6-3: Meisterfehlerkorrektur der Abtriebsseite

6.1.3 Spanndorn für das Prüfzahnrad

Der Spanndorn dient dazu, die zu prüfenden hohlwelligen Mikrozahnäder (Kopfwelle) in einer definierten Position zu halten. Dazu wird er eingangsseitig im Spindelstock aufgenommen und durch eine Kerbe am Zylinder mit einem präzisionsgeschliffenen Gewindestift präzise und wiederholgenau in Position gehalten. Für die definierte Positionierung des Prüfzahnrades wird ein Endanschlag verwendet. Eine konvexe Form dient zum Ausgleich von Schwankungen des Prüfzahnrad-Innendurchmessers.

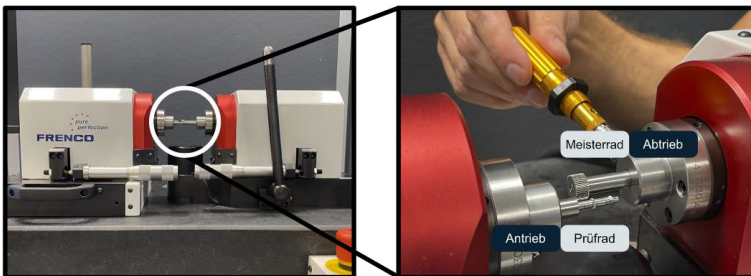


Abbildung 6-4: Montage des Lehrzahnads auf der Abtriebsseite

Mit Hilfe einer M1-Titanschraube, die mit einem definierten Drehmoment von 2,5 N/cm angezogen wird, wird die Kopfwelle über eine radiale Durchgangsbohrung mit einem

Gewinde am Spanndorn gegen ein mögliches Verdrehen relativ zur Eingangsachse fixiert.

Um mögliche Unsicherheiten des Spanndorns bzw. Aufspannungsgenauigkeiten selbst auszugleichen, wurde für diese Arbeit eine zusätzliche Spanndornkompensation programmiert. Wie bei der Meisterradkompensation ist hierfür eine spezielle Messung notwendig. Zunächst wurde der Rundlauf des Spanndorns mit einem digitalen Rundlaufprüfgerät an der am weitesten von der Spannstelle entfernten Stelle in der Nähe des Prüfzahnrades auf $< 5 \mu\text{m}$ voreingestellt. Je nach Ausführung des Zahnrad werden zwei (oder vier) Ausgleichsmessungen an demselben Zahnrad vorgenommen, wobei das Prüfzahnrad zwischen den einzelnen Messungen um 180° (oder 90°) auf dem Spanndorn gedreht wird. Das Zahnrad wird daher mit Hilfe einer Schraube befestigt, die in der Abbildung 6-4 zu sehen ist. Eine Kalibrierkopfwelle mit zwei Durchgangsbohrungen, die jeweils um 90° versetzt sind, ermöglicht eine noch präzisere Kompensation, da anstelle von zwei Positionen vier Spannpositionen für Kompensationsmessungen berücksichtigt werden. Die aufgenommenen Messkurven werden in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung miteinander verglichen, um einen daraus resultierenden Spanndornfehler zu kompensieren. Wie die Meisterradkompensation ist auch die Spanndornkompensation, wie sie in Abbildung 6-5 zu sehen ist, softwarebasiert und kann daher ebenso wie die Meisterfehlerkorrektur mit den Messergebnissen überlagert oder nicht überlagert werden. Die Spanndornkompensation gleicht jedoch lediglich den Rundlauffehler aus und orientiert sich daher an dem langwelligen Anteil der Einflanken-Wälzprüfung.

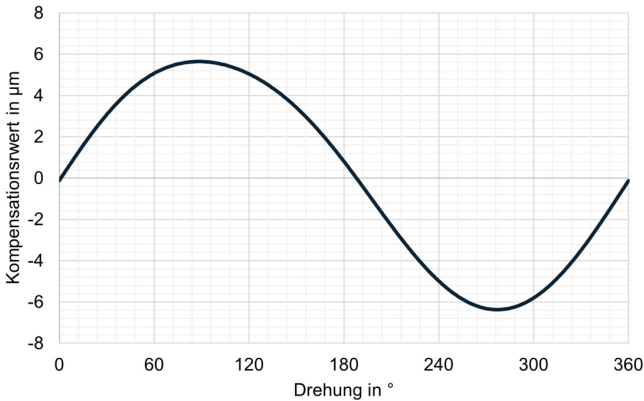


Abbildung 6-5: Spanndornkompensation auf der Antriebsseite

6.2 Laserinterferometrie zur Messung von Achsabweichungen

Mit Hilfe eines Laserinterferometriesystems können Positions- und Winkelmessungen durchgeführt werden. Die Lagegenauigkeit der Achsen der Prüfeinrichtungen beeinflusst hochpräzise Messungen. Daher müssen diese Unsicherheitseinflüsse untersucht werden. Mit dem Laserinterferometer werden hierzu mehrere Messreihen erfasst. Das eingesetzte Interferometer gilt zudem als hochpräzises Messsystem, das für die anspruchsvollen Anforderungen dieses Mikro-Prüfstands geeignet ist. Für die Positionsmessung wird der Laserstrahl in einem Interferometer mit einem halbtransparenten Spiegel in zwei Strahlen aufgeteilt. Ein Strahl wird in einem festen Reflektor als Referenz mit einem definierten Abstand reflektiert und der zweite Strahl wird in einem beweglichen Reflektor für die eigentliche Abstandsmessung reflektiert. Beide Strahlen werden vor dem Erreichen des Detektors zu einem einzigen Strahl rekombiniert. Durch Verschieben einer Achse des Prüfstands, auf der der bewegliche Reflektor montiert ist, wird die Positionsmessung durch die Änderung der Differenz zwischen den Wellenlängen des Messstrahls und des Referenzstrahls aufgrund ihrer Interferenz ausgewertet (Renishaw 2003). Abbildung 6-6 zeigt beispielhaft den Aufbau des Renishaw-Interferometers zur Messung der Position an der Y-Achse. Die rote Linie zeigt den unreflektierten Zustand des Strahls, die gelbe Linie seinen reflektierten Zustand und die grüne Linie den interferierten Zustand des Strahls.

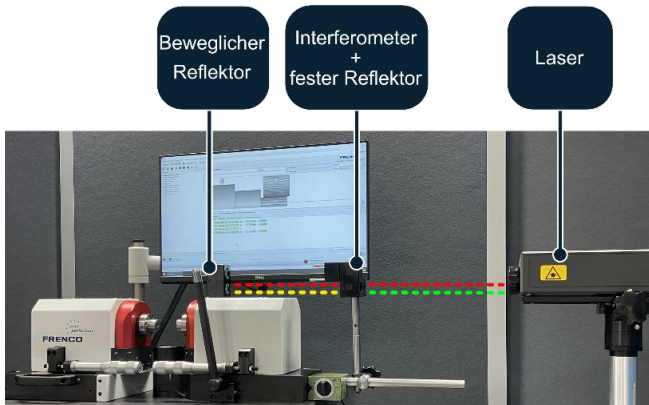


Abbildung 6-6: Positionsmessung der Y-Achsen des Prüfstands mit Hilfe der Laserinterferometrie

Die Winkelmessung erfolgt durch eine relative Drehung der beiden optischen Komponenten, die eine Differenz in den beiden optischen Pfaden verursacht. Diese Differenz wird erfasst und als Winkelgröße ausgegeben. Der Aufbau des Interferometers zur Winkelmessung ist im Anhang A4 in Abbildung 0-4 zu sehen. Die gemessenen Daten können dann mit den Weg- und Winkelmesssystemen und den Skalen des Prüfstands verglichen werden, um daraus den Fehler der Achsen zu bestimmen. Das Renishaw ML10 Laserinterferometer hat eine Systemgenauigkeit von $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$ (Renishaw 2003).

6.3 Evaluierung der Messunsicherheit

Im folgenden Kapitel soll die erweiterte Messunsicherheit für die vier Funktionsparameter der Einflanken-Wälzprüfung bei der Messung von geradzahnten Mikrozahlrädern ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden zunächst ein optimales Messprogramm und ein wiederholbarer Messablauf entwickelt und anschließend die Achsfehler mittels Laserinterferometrie analysiert. Diese Daten bilden zusammen mit verschiedenen Messreihen auf dem Prüfstand die Grundlage für ein Messunsicherheitsbudget nach GUM. (A_Hornung 2021; Gauder et al. 2022a)

6.3.1 Parameter des Messprogramms

Um ein optimales Messprogramm für diesen Prüfstand zu entwickeln, wurden folgende Parameter untersucht: die optimale Winkelgeschwindigkeit des Prüfzahnrad (Kopfwelle) sowie dessen Anzahl an Drehungen pro Messung. Die Bestimmung der optimalen Winkelgeschwindigkeit ist von großer Bedeutung, damit kein Einfluss der Eigenfrequenz des Einflanken-Wälzprüfstandes, hochfrequenter Schwingungen oder Biegung, die hochgenauen Messergebnisse beeinflusst. Für die Bestimmung wurden Wiederholungsmessungen für 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 und 90 °/s Winkelgeschwindigkeit ausgewertet. Der folgende Abbildung 6-7 zeigt einen Ausschnitt, wie sich der Übertragungsfehler bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten des Prüfzahnrad verhält.

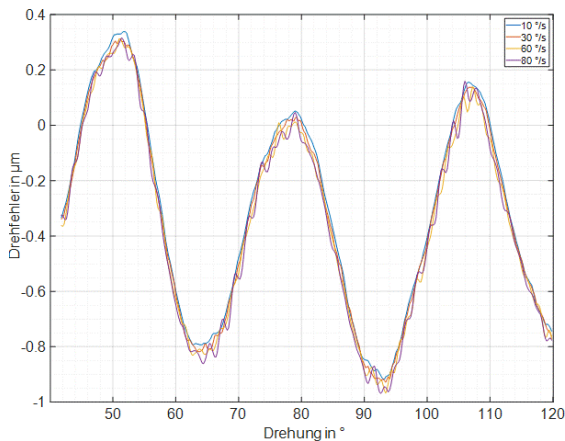


Abbildung 6-7: Einfluss der Winkelgeschwindigkeit des Prüfzahnrad (Kopfwelle) auf den Wälzweg für $d = 3.640$ mm (Gauder et al. 2022a)

Dies veranschaulicht deutlich, wie sich der Wälzweg mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit ändert. Die Wahl der Winkelgeschwindigkeit hängt nicht nur mit der Vermeidung dynamischer Effekte, sondern auch mit der Messzeit zusammen. Um sowohl hochpräzise Ergebnisse als auch eine kurze Messzeit zu erzielen, wurde eine niedrige Winkelgeschwindigkeit von 30 °/s festgelegt. Dies deckt sich auch mit der vorgeschriebenen Prüfgeschwindigkeit der VDI 2608 für Einflanken-Wälzprüfungen, die eine Geschwindigkeit von 5 - 30 min^{-1} vorschreibt (VDI 2608). Auch wenn diese Richtlinie nicht für Mikrozahnräder und entsprechende Prüfstände ausgelegt ist, entspricht

eine Winkelgeschwindigkeit von 30 °/s einer Rotationsgeschwindigkeit von 5 min⁻¹ und damit der geringsten Geschwindigkeitsvorgabe dieser Norm.

Um mögliche Resonanzfrequenzen bei einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit zu untersuchen, die die Unsicherheiten des Prüfstands beeinflussen könnten, wurde eine Differenzspektrumanalyse durchgeführt. Durch die Betrachtung der Differenz zweier Ordnungsspektren lassen sich markante Resonanzfrequenzen aufdecken (ISO 230). Zu diesem Zweck wurden zwei Signale unterschiedlicher Geschwindigkeiten (Anregungen) mit einem Tiefpassfilter gefiltert und ihre Differenzen für beide möglichen Fälle der Subtraktion berechnet, je nachdem, welches Signal subtrahiert wird. Diese Methode wird verwendet, um Frequenzen mit großen Amplituden sichtbar zu machen und Resonanzfrequenzen ihren Ordnungen zuzuordnen. Es ist zu beachten, dass bei doppelter Anregung die Resonanzfrequenz bei der halben Ausgangsordnung gefunden werden kann. Die Frequenz der herausragenden Ordnung bleibt gleich, aber die Ordnung wird halbiert, weil sie doppelt so oft angeregt wird. Darüber hinaus wurden die nachgewiesenen Korrelationen unter Verwendung eines Filters mit gleitendem Mittelwert als alternative Signalverarbeitung im Vergleich zu einem nicht spezialisierten Tiefpassfilter mit unendlicher Impulsantwort in vorangegangenen Untersuchungen zur Validierung überprüft. (Gauder et al. 2022a)

Die Analyse der Differenzspektren bei 30 °/s und 60 °/s Winkelgeschwindigkeit ergab keine eindeutigen Resonanzfrequenzen. Gleichzeitig zeigte die Analyse, dass keine relevanten Frequenzbereiche signifikant betroffen sind, da die beobachteten Unterschiede in vernachlässigbaren Nanometerdimensionen liegen. Eine zusätzliche Analyse durch Filterung des gleitenden Mittelwerts ergab sogar noch geringere Unterschiede, so dass mögliche Resonanzfrequenzen im Hintergrundrauschen untergehen. Folglich wird davon ausgegangen, dass die Einflüsse der Resonanzfrequenzen für diesen Einflanken-Wälzprüfstand für Mikroverzahnungen vernachlässigbar sind. Die tiefpassgefilterten Ergebnisse der Differenzspektrums-Analyse sind in Abbildung 6-8 für beide möglichen Fälle der Subtraktion dargestellt. Folglich kann gezeigt werden, dass es keinen Einfluss von Resonanzfrequenzen auf die verwendete Winkelgeschwindigkeit gibt. (Gauder et al. 2022a)

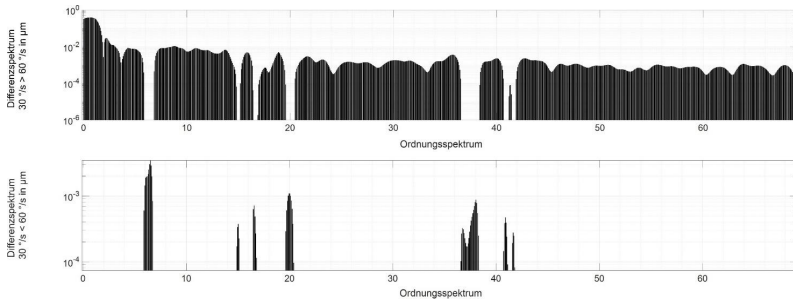


Abbildung 6-8: Analyse der Differenzspektren zwischen 30 °/s und 60 °/s für beide möglichen Subtraktionen, angegeben durch Vergleichsoperatoren in der Achsenbeschriftung (Gauder et al. 2022a)

Auch die Anzahl der Umdrehungen des Prüfzahnrad kann sich auf die Messzeit und die Messunsicherheit auswirken. Um die Messzeit in einer Dimension zu halten, die es erlaubt Messungen an einer ausreichenden Menge von Serienteilen durchzuführen und trotzdem aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden Versuche mit unterschiedlichen Umdrehungszahlen durchgeführt. Es wurde wieder eine Winkelgeschwindigkeit von 30 °/s aus der vorherigen Auswertung gewählt. Die folgende Abbildung 6-9 zeigt ein Beispiel für die abnehmende Einflanken-Wälzabweichung F'_i bei Erhöhung der Umdrehungszahl. Wie in Abbildung 6-9 dargestellt, stabilisieren sich die Ergebnisse oberhalb von 7 Umdrehungen des Prüfzahnrad. Die Ausreißer bei 13 und 16 Umdrehungen lassen sich auf das Grundrauschen des Einflanken-Wälzprüfstandes zurückführen und liegen im Submikrometerbereich. Unterhalb von 6 Umdrehungen nimmt die Einflanken-Wälzabweichung stetig zu, da sich die Unsicherheitseinflüsse über die abnehmende Anzahl der Umdrehungen weniger mitteln können. Die Messzeit bei 10 Umdrehungen beträgt ca. 5 Minuten und ist eine akzeptable Zeit für eine Einflanken-Wälzprüfung, um hochgenaue Messungen auch an größeren Chargen durchzuführen. (Gauder et al. 2022a)

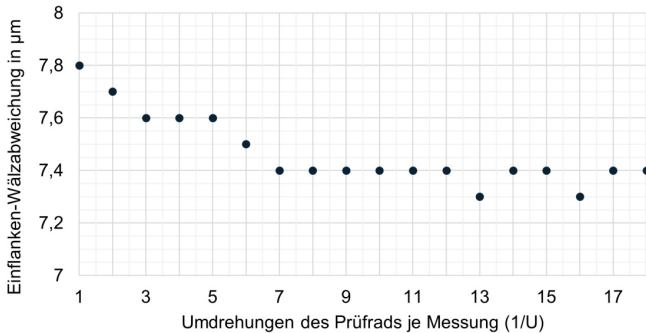


Abbildung 6-9: Einflanken-Wälzabweichung F'_i mit zunehmender Anzahl an Umdrehungen (Gauder et al. 2022a)

Ein interessanter Effekt ist ein Fehler während der Anlaufphase, der in Abbildung 6-10 für ein beispielhaftes, nicht kompensiertes Rohsignal einer Kopfswelle mit mehr als 10 Umdrehungen zu sehen ist. Der Fehler während der Anlaufphase durch die Welle-Nabe-Verbindung und die Spindelbeschleunigung kann sich auf die Messunsicherheit auswirken, da der Übertragungsfehler der ersten Umdrehung erhöht wird. Dieser Effekt kann durch eine Erhöhung der Anzahl der Messumdrehungen kompensiert werden, da eine durchschnittliche Übertragungsfehlerkurve berechnet wird. Dies erklärt die Stabilisierung der Ergebnisse mit zunehmender Anzahl der Umdrehungen in Abbildung 6-10. Darüber hinaus können unerwünschte Beiträge während der Anlaufphase des Prüfstands durch eine Verzögerung von ca. 10 Sekunden bis zum Beginn der eigentlichen Messung minimiert werden. (A_Hornung 2021)

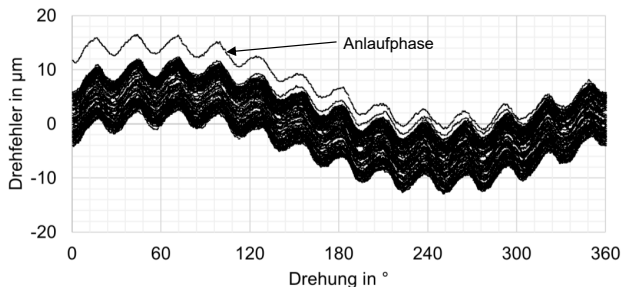


Abbildung 6-10: Beispielhaftes, nicht kompensiertes Rohsignal, das einen Fehler während der Anlaufphase für $d = 3,640 \text{ mm}$ zeigt (Gauder et al. 2022a)

Für die Durchführung von Unsicherheitsbeitragsmessungen an dem Prüfstand ist es erforderlich, mehrere Messreihen in wiederholbarer Weise zu definieren. Die Arten von Messreihen werden in Kapitel 6.4 eingehend beschrieben, wobei jede Messreihe aus 30 Einzelmessungen besteht, was einen relativ hohen Stichprobenumfang entspricht.

6.3.2 Unsicherheitsbewertung der Achspositioniergenauigkeit

Der Kalibrierungsprozess zur Bestimmung der Achsenpositioniergenauigkeit mit einem Laserinterferometer ist im Folgenden dargestellt. Zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit der X-Achse wurden fünf bidirektionale Anfahrten nach ISO 230-2 alle 0,5 mm von -1,5 bis +1,5 mm durchgeführt (ISO 230). Dieser erweiterte Bereich entspricht der doppelten Zahnbreite des Prüfzahnrad, um einen Bereich zu wählen, der viele unterschiedliche Größen von Mikrozahnradern umfasst. Die Messwerte des Achsmesssystems wurden mit denen des Interferometers verglichen. Die Positioniergenauigkeit der Achse wurde als Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum aller angefahrenen Positionen ermittelt. Abbildung 6-11 zeigt die ermittelte Positionsabweichung der X-Achse. Der Bereich der Positionsabweichung entsprach 1,7 μm , der für den resultierenden Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt wurde.

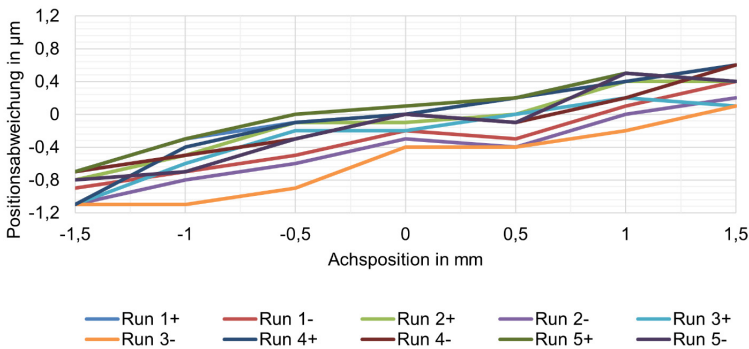


Abbildung 6-11: Ermittelte Positioniergenauigkeit der X-Achse mit fünf bidirektionalen Ansätzen (Gauder et al. 2022a)

Für die Positioniergenauigkeit der Y-Achse wurden fünf bidirektionale Anfahrten alle 0,05 mm von -0,01 mm bis 0,01 mm bei einem nominalen Achsabstand von 7,5 mm durchgeführt (ISO 230). Der Bereich der Positioniergenauigkeit der Y-Achse entsprach 0,3 μm und ist in Abbildung 0-3 im Anhang A4 zu sehen. Die Winkelabweichung der C-

Achse wurde mit fünf bidirektionalen Anfahrten alle $0,05^\circ$ von $-0,1^\circ$ bis $0,1^\circ$ nach ISO 230-1 (ISO 230) bestimmt. Der Bereich der Winkelgenauigkeit der C-Achse entsprach $0,0012^\circ$, was $4,32''$ entspricht. Dies lässt sich in der Abbildung 0-4 im Anhang erkennen.

6.3.3 Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten

Die Sensitivitätskoeffizienten zeigen als partielle Ableitungen den Beitrag jeder Fehlerquelle in Bezug zu den Kenngrößen der Einflanken-Wälzprüfung und werden auf jede Fehlerkomponente angewandt. Aufgrund der Komplexität der Einflanken-Wälzprüfung ist es notwendig, den Unsicherheitsbeitrag jeder Fehlerquelle einzeln zu bewerten. In diesem Unsicherheitsmodell liegen die Fehler bei den einzustellenden Achsen, mit welchen verschiedene Zahnradpaarungen geprüft werden können. Dabei hat jede Achse unterschiedliche Auswirkungen auf die Kenngrößen der Einflanken-Wälzprüfung. Die Sensitivitätskoeffizienten werden wie bei Pueo et al. (2020) experimentell charakterisiert (Pueo et al. 2020). Dafür werden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, bei denen schrittweise der Achsabstand in Y und X sowie der Winkel der C-Achse verändert wird. Der Sensitivitätskoeffizient der jeweiligen Kenngrößen entspricht der Steigung der linearen Regression der ermittelten Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass bei einem Bereich von $\pm 100 \mu\text{m}$ im Achsabstand der beiden Zahnräder in Y für die Kenngröße F'_i eine Steigung von 0,0006 vorliegt. Das zeigt, dass bei einem variierenden Achsabstand die Ergebnisse sehr stabil bleiben und sich auf einer horizontalen Geraden befinden. Dies liegt primär an der evolventischen Zahnform, welche stabil auf Achsabstandsänderungen reagiert (siehe Kapitel 2.1). Bei dem Winkel ergab sich bei einem Bereich von $\pm 0,1^\circ$ für die Kenngröße F'_i eine Steigung von 0,1111. Die Ergebnisse werden mit zunehmendem Winkel zur Null-Position stetig schlechter. Die Sensitivität der X-Achse ist 0, denn für das Prüfzahnrad (Kopfwelle) konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, an welcher Position zum Lehrzahnrad abgerollt wird. Die Kopfwelle selbst ist über die gesamte Zahnbreite im ständigen Eingriff. Die Sensitivitätskoeffizienten werden im Anhang A5 in Abbildung 0-5, Tabelle 0-10, Abbildung 0-6 und Tabelle 0-11 aufgezeigt.

6.4 Messunsicherheitsmodell der Einflanken-Wälzprüfung

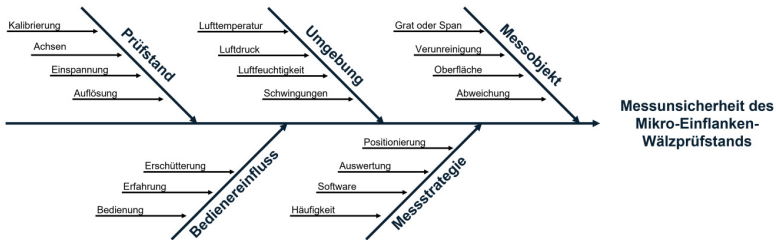


Abbildung 6-12: Ishikawa Diagramm aller wichtigen Einflussparameter auf die Messunsicherheit der Einflanken-Wälzprüfung (Gauder et al. 2022a)

Die Messunsicherheitsermittlung unterteilt sich in drei Hauptaspekte. Diese orientieren sich an dem allgemeinen Messablauf. Der erste Aspekt fasst die Unsicherheitsbeiträge während des Kalibrierprozesses zusammen. Der zweite Aspekt besteht aus den Unsicherheiten während des Einspannens der beiden Zahnräder. Den letzten Aspekt bilden die Unsicherheiten während der Messung, nachdem der Prüfstand eingestellt und die Zahnräder eingespannt sind. Daraus resultiert die allgemeine Formel 6-1.

$$U_k = k * \sqrt{u_0^2 + u_{clamp}^2 + u_{meas}^2} \tag{Formel 6-1}$$

In diesem Zusammenhang stellt U die erweiterte Unsicherheit unter Verwendung eines Erweiterungsfaktors von $k = 2$ dar, der ein Konfidenzintervall von etwa 95,5 % unter der Annahme einer Normalverteilung berücksichtigt. Die Standardunsicherheit aufgrund der Anfangskalibrierung des Prüfstands wird durch u_0 berücksichtigt. Ferner entspricht der Beitrag u_{clamp} der Standardunsicherheit der Einspannsituation aufgrund der Einbausituation des Prüfzahnrades (Kopfwelle) und des Meisterzahnrades (Lehrzahnrad). Der dritte Beitrag u_{meas} stellt die Standardunsicherheit bei den Messungen der Einflanken-Wälzprüfung dar, einschließlich der Genauigkeit der Winkelmessgeräte und ihrer dynamischen Auswirkungen. Die Kalibrierung und experimentelle Charakterisierung des Einflanken-Wälzprüfstandes wurde in einem Messraum bei Temperaturbedingungen von $20 \pm 0,5 \text{ °C}$ durchgeführt, um die Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Dieser Unsicherheitsansatz berücksichtigte Wiederholungsmessungen über mehrere Wochen, um Faktoren wie Zeit, Stabilität der Maschine und den Einfluss des Benutzers zu berücksichtigen (Gauder et al. 2022a).

6.4.1 Unsicherheit der Anfangskalibrierung

Die Unsicherheit des Kalibrierprozesses basiert im Detail auf den Achsfehlern und der Unsicherheit aufgrund von Abweichungen des Meisterzahnrad (Lehrzahnrad). Die Achsfehler werden dabei mittels Laserinterferometrie innerhalb des genutzten Verfahrenswegs ermittelt.

Die ermittelten extremalen Abweichungen werden gemeinsam mit experimentell ermittelten Sensitivitätskoeffizienten als Unsicherheiten der Achsfehler u_{0x} , u_{0y} , u_{0z} und u_{0c} berücksichtigt. Hierbei werden auch die Einflüsse der Temperatur sowie die Unsicherheit der Achsmesssysteme berücksichtigt. Die Unsicherheit des Meisterzahnrades $u_{0master.out}$ nach dessen Kompensation wird zudem mit Hilfe der Standardunsicherheit von Messreihen ermittelt. Hierbei wird das Meisterzahnrad gegen einen Meister-Prüfling, der die Verzahnungscharakteristik der Kofwelle aufweist, 30-mal abgewälzt und dessen funktionsorientierte Abweichungen statistisch ausgewertet. Daraus resultiert die Formel 6-2.

$$u_0 = \sqrt{u_{0x}^2 + u_{0y}^2 + u_{0z}^2 + u_{0c}^2 + u_{0master.out}^2} \quad \text{Formel 6-2}$$

Die erste Unsicherheitskomponente (u_{0x}) wird berechnet als die Quadratwurzel der quadratischen Summe der Unsicherheiten des Achsfehlers der X-Achse ($u_{0x_{\Delta X}}$), der Auflösung des Längenmesssystems des Prüfstands der X-Achse ($u_{0x_{MS-\gamma}}$), der Auflösung des Interferometers mit Kompensation zur Bestimmung des Achsfehlers ($u_{0x_{MD-I}}$), sowie der Temperaturschwankung des Prüfzahnrad im Messraum ($u_{0x_{\Delta T}}$). Der Sensitivitätskoeffizient c wurde angewandt und zeigt die Auswirkung des Achsabstandsfehlers der Zahnräder auf die Einflanken-Wälzprüfung F'_i , woraus der Ausdruck in Formel 6-3 resultiert.

$$u_{0x} = \sqrt{u_{0x_{\Delta X}}^2 + u_{0x_{MS-\gamma}}^2 + u_{0x_{MD-I}}^2 + u_{0x_{\Delta T}}^2} \quad \text{Formel 6-3}$$

$$u_{0x_{\Delta X}} = c_{x_{F'_i}} * \frac{R_{\Delta X}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-4}$$

$$u_{0x_{MS-\gamma}} = c_{x_{F'_i}} * \frac{a_x}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-5}$$

$$u_{0_{X_{MD-i}}} = c_{X_{F'_i}} \cdot \frac{U_{95(ML10)} \cdot \frac{l_{cal}}{l_{real}}}{\frac{k_{ML10}}{\sqrt{3}}}$$

Formel 6-6

$$u_{0_{X_{\Delta T}}} = c_{X_{F'_i}} \cdot (\alpha_i(\text{Stahl legiert}) \cdot b_{Kopfwelle} \cdot \Delta T)$$

Formel 6-7

Dabei ist $c_{X_{F'_i}}$ der Sensitivitätskoeffizient auf den Fehler bei der Messung in X-Richtung bezogen auf die Kenngröße F'_i . $R_{\Delta X}$ ist die Spannweite der Differenz des ermittelten Messfehlers zwischen der Positionierung über das Linearmesssystem der X-Achse und dem gemessenen Wert des Interferometers. a_X ist die Auflösung des Linearmesssystems der X-Achse. $U_{95(ML10)}$ ist die erweiterte Messunsicherheit des Interferometers bezogen auf die kalibrierte Messlänge l_{cal} , welche durch die reale Messlänge l_{real} geteilt wird. Anschließend wird durch den entsprechenden Erweiterungsfaktor dividiert, um die Standardunsicherheit anzugeben. α_i ist der Längenausdehnungskoeffizient, welcher multipliziert mit der Zahnweite $b_{Kopfwelle}$ des Prüfkörpers und der entsprechenden Temperaturschwankung ΔT des Messraums die Längenänderung des Prüfkörpers bestimmt.

Das identische Verfahren wird analog auf die Y-, Z- und C-Achse angewandt. Dabei sind jedoch mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Für die Y-, Z- sowie die C-Achse ist der Radius des Zahnrades für die Variation der Längenausdehnung von Relevanz. Bei der Z-Achse wird die maximale Toleranz für den Einbau der beiden Wellen aus der Zeichnung übernommen, da diese Achse fest ist und somit keine Messergebnisse erfasst werden können. Außerdem erfordert die Winkelachse C für eine konservative Abschätzung eine Umrechnung von der Einheit Grad in Mikrometer bezüglich des Kopfdurchmessers des größeren Meisterzahnrades von $d_a = 11,500$ mm. Der Unsicherheitsbeitrag des Meisterzahnrad nach der Kompensation des abtriebsseitigen Meisterzahnrad $u_{0_{masterout}}$ wurde experimentell anhand der Standardabweichung von 30 Wiederholungsmessungen gegen das Eingangs-Meisterzahnrad bestimmt. Damit lässt sich der Unsicherheitsbeitrag der Erstkalibrierung des Einflanken-Wälzprüfstands konservativ abschätzen.

6.4.2 Unsicherheit der Einspannsituation

Die Unsicherheitsbeiträge durch das Einspannen von Prüfzahnrad (Kopfwelle) und Meisterzahnrad werden durch die Standardunsicherheit von Wiederholungsmessungen ermittelt, bei denen das betrachtete Prüfzahnrad (Kopfwelle) vor jeder Messung gespannt wurde.

$$u_{clamp} = \sqrt{u_{clamp_{gear_{in}}}^2 + u_{clamp_{master_{out}}}^2} \quad \text{Formel 6-8}$$

$$u_{clamp_{gear_{in}}} = c_{clamp_{gear_{in}}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \Big|_{30 \text{ gear clampings}} \quad \text{Formel 6-9}$$

$$u_{clamp_{master_{out}}} = c_{clamp_{master_{out}}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \Big|_{30 \text{ master clampings}} \quad \text{Formel 6-10}$$

Die experimentelle Einflanken-Wälzprüfmessreihe unter Berücksichtigung der Einspannsituation wurde auch unter Verwendung eines Meisterzahnades für das Prüfzahnrad (Eingangsseite) untersucht, um zwischen dem Einfluss der Einspannfehler und der daraus resultierenden Unsicherheit des Messprozesses selbst zu differenzieren. Für $u_{clamp_{gear-in}}$ wird die Standardabweichung einer Messreihe bezüglich der Funktionsabweichungsparameter ermittelt, bei der das Zahnrad nach jeder Messung mit Hilfe der in Kapitel 6.1.3 erläuterten softwarebasierten Spanndornkompensation 30-mal vom Spanndorn gelöst und neu eingespannt wurde. Im Gegensatz dazu wurde $u_{clamp_{master-out}}$ anhand der Standardabweichung einer Messreihe zu den Funktionsabweichungsparametern ermittelt, bei der das Meisterzahnrad nach jeder Messung ausgespannt und anschließend 30-mal wieder eingespannt wurde. Dies zeigt die Unsicherheit der Spannsituation nach ihrer Kompensation.

6.4.3 Unsicherheit des Messprozesses

Des Weiteren sind die Unsicherheitsbeiträge des Messvorgangs selbst zu ermitteln, darunter die Streuung der Wiederholungsmessungen, die Beiträge der Drehachsen sowie die Unsicherheit des Umkehrspiels bei Vorwärts- und anschließenden Rückwärtsmessungen sowie die Unsicherheit der Auswertesoftware. Die Unsicherheit des Messvorgangs u_{meas} setzt sich zusammen aus der quadratischen Summe der Standardunsicherheit der Messung einer Kopfwelle aus der Serie $u_{meas_{scattering}}$, der Unsicherheit

des Winkelmesssystems (bezogen auf seine spezifizizierte Gesamtgenauigkeit) auf der Eingangsseite $u_{meas_{MS-in}}$ und auf der Ausgangsseite $u_{meas_{MS-out}}$, der Unsicherheit des Umkehrspiels im Rückwärtsbetrieb $u_{meas_{rev-backlash}}$, die Unsicherheit der Drehmomentänderung des Motors $u_{meas_{torque}}$, die Unsicherheit der Winkelgeschwindigkeit des Motors $u_{meas_{ang-speed}}$, die Unsicherheit der Bremskraft $u_{meas_{break-force}}$ und die Unsicherheit der Softwareauswertung des Messergebnisses $u_{meas_{software}}$ aufgrund des Diskretisierungsfehlers bei der Abtastung des analogen Eingangs in ein digitales Signal. Die entsprechende Zusammensetzung ist in Formel 6-11 dargestellt ist.

$$u_{meas} = \sqrt{u_{meas_{scatter}}^2 + u_{meas_{MS-in}}^2 + u_{meas_{MS-out}}^2 + u_{meas_{rev-backlash}}^2 + u_{meas_{torque}}^2 + u_{meas_{ang-speed}}^2 + u_{meas_{break-force}}^2 + u_{meas_{software}}^2} \quad \text{Formel 6-11}$$

$$u_{meas_{scatter}} = c_{meas_{scatter}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \text{Formel 6-12}$$

30 test gear measurements

$$u_{meas_{MS-in}} = c_{meas_{MS-in}} * \frac{2\pi * \frac{a_{MS-in}}{3600 * 360} * \frac{d_{a_{testgear}}}{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-13}$$

$$u_{meas_{MS-out}} = c_{meas_{MS-out}} * \frac{2\pi * \frac{a_{MS-out}}{3600 * 360} * \frac{d_{a_{mastergear}}}{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-14}$$

$$u_{meas_{rev-backlash}} = c_{meas_{rev-backlash}} * \frac{a_{rev-backlash}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-15}$$

$$u_{meas_{torque}} = c_{meas_{torque}} * \frac{a_{torque}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-16}$$

$$u_{meas_{ang-speed}} = c_{meas_{ang-speed}} * \frac{a_{ang-speed}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-17}$$

$$u_{meas_{break-force}} = c_{meas_{break-force}} * \frac{a_{break-force}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-18}$$

$$u_{meas_{software}} = c_{meas_{software}} * \frac{a_{software}}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 6-19}$$

Die Standardunsicherheit $u_{meas_{scattering}}$ repräsentiert eine Einflanken-Wälzprüfung einer Messreihe, bei der eine Serienkopfwelle 30-mal ohne Ausspannen hinsichtlich der Funktionsabweichungsparameter gemessen wurde. $u_{meas_{MS-in}}$ drückt die Standardunsicherheit des antriebsseitigen Winkelmesssystems aus. Da die Genauigkeit des

Winkelmesssystems a_{MS-in} in Winkelsekunden für $k = 1$ angegeben ist und die Kenngrößen der Einflanken-Wälzprüfung in μm angegeben sind, erfolgt eine Umrechnung bezogen auf den Kopfkreisdurchmesser des Prüfzahnrades (Kopfwelle. In ähnlicher Weise wird die Standardunsicherheit des Winkelmesssystems der Abtriebsseite a_{MS-in} berechnet, wobei jedoch der Kopfkreisdurchmesser des Meisterzahnades zur Umrechnung herangezogen wird. Die Unsicherheit des Flankenspiels $u_{meas_{rev-backlash}}$ betrifft nur die rechten Flanken, die nur bei der Drehung gegen Uhrzeigersinn nach vorangegangener Drehung im Uhrzeigersinn gemessen werden. Zu diesem Zweck wurde die Differenz der Messergebnisse einer kombinierten Messung mit den Messergebnissen eines Laufs gegen den Uhrzeigersinn verglichen, bei dem nur die rechten Flanken ohne Spiel gemessen wurden. Die Unsicherheiten von $u_{meas_{torque}}$, $u_{meas_{ang-speed}}$, $u_{meas_{break-force}}$ und $u_{meas_{software}}$ basieren auf konservativen Annahmen aus der Erfahrung im Umgang mit dem Prüfstand.

6.5 Ergebnisse und Messunsicherheitsbudget

Anschließend kann nun das vollständige Messunsicherheitsbudget vorgestellt werden. Durch die vier relevanten funktionsorientierten Parameter (F'_i, f'_i, f'_i, f'_k) sowie zwei verschiedene Drehrichtungen ergeben sich folglich acht Budgets. Nachfolgend wird das tabellarische Budget für die charakteristische Größe der Einzelflanken-Wälzabweichung F'_i für die Drehung im Uhrzeigersinn in Tabelle 6-5 dargestellt, alle weiteren Unsicherheitsergebnisse sind in Tabelle 6-6 zusammengefasst. Die ausführlichen Budgets werden im Anhang A6 von Tabelle 0-12 bis Tabelle 0-18 präsentiert. In jedem Budget sind die oben erarbeiteten Beiträge einzeln aufgeführt. Jeder Unsicherheitsbeitrag wird durch die Art des Einflusses nach GUM, die Standardmessunsicherheit, die Art der Verteilung und die entsprechende Gewichtung, die Standardunsicherheit, den Sensitivitätskoeffizienten sowie den resultierenden Unsicherheitsbeitrag beschrieben. Zusammenfassend wird das vollständige Messergebnis einschließlich Messunsicherheit und Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben.

Tabelle 6-5: Eines von acht Unsicherheitsbudgets (Einzeinflanken-Wälzabweichung F_i' in μm ; Uhrzeigersinn)

Unsicherheitseinfluss		GUM Methode	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilungsart	Gewichtung	Standardunsicherheit	Sensitivitätskoeffizienten	Unsicherheitsbeitrag
5		A/B	x	u(x)	-	\ G	u	c	u(y)
u_0	Kalibrierunsicherheit	-	-	-	-	-	-	-	0,0883
u_0_X	Kalibrierunsicherheit des Achsabstands in X	-	-	-	-	-	-	-	0,0000
u_0_X_ΔX	Positioniergenauigkeit der Achsen	A	-	1,7000	Rechteck	0,5774	0,9815	0	0,0000
u_0_X_MS_X	Auflösung Längenmesssystem	B	-	0,2000	Rechteck	0,5774	0,1155	0	0,0000
u_0_X_MD_I	Auflösungsinterferometer mit Kompensation	B	-	0,1750	Rechteck	0,5774	0,1010	0	0,0000
u_0_X_ΔT	Temperaturschwankungen des Prüfrads	B	-	0,0121	Rechteck	0,5774	0,0070	0	0,0000
u_0_Y	Kalibrierunsicherheit des Achsabstands in Y	-	-	-	-	-	-	-	0,0002
u_0_Y_ΔY	Positioniergenauigkeit der Achsen	A	-	0,4000	Rechteck	0,5774	0,2309	0,0006	0,0001
u_0_Y_MS_Y	Auflösung Längenmesssystem	B	-	0,1000	Rechteck	0,5774	0,0577	0,0006	0,0000
u_0_Y_MD_I	Auflösungsinterferometer mit Kompensation	B	-	0,1750	Rechteck	0,5774	0,1010	0,0006	0,0001
u_0_Y_ΔT	Temperaturschwankungen des Prüfrads	B	-	0,0356	Rechteck	0,5774	0,0206	0,0006	0,0000
u_0_Z	Kalibrierunsicherheit der Z-Achsenbefestigung	-	-	-	-	-	-	-	0,0001
u_0_Z_ΔZ	Positioniergenauigkeit der Achsen	B	-	0,4000	Rechteck	0,5774	0,2309	0,0006	0,0001
u_0_Z_ΔT	Temperaturschwankungen des Prüfrads	B	-	0,0356	Rechteck	0,5774	0,0206	0,0006	0,0000
u_0_C	Kalibrierunsicherheit der Winkelachse in C	-	-	-	-	-	-	-	0,0226
u_0_C_ΔC	Winkelgenauigkeit der Achsen	A	-	0,0001	Rechteck	0,5774	0,0001	0,1111	0,0000
u_0_C_MS_C	Auflösung Winkelmesssystem	B	-	0,0112	Rechteck	0,5774	0,0064	0,1111	0,0007
u_0_C_MD_I	Auflösungsinterferometer mit Kompensation	B	-	0,3500	Rechteck	0,5774	0,2021	0,1111	0,0225
u_0_C_ΔT	Temperaturschwankungen des Prüfrads	B	-	0,0356	Rechteck	0,5774	0,0206	0,1111	0,0023
u_0_master_out	Kalibrierunsicherheit des Meisterrads nach Kompensation	A	-	0,0854	Normal	1,0000	0,0854	1	0,0854
u_clamp	Unsicherheit der Einspannsituation	-	-	-	-	-	-	-	0,5066
u_clamp_gear_in	Unsicherheit der Einspannsituation	A	-	0,5017	Normal	1,0000	0,5017	1	0,5017
u_clamp_master_out	Einspannunsicherheit des Meisterrades	A	-	0,0702	Normal	1,0000	0,0702	1	0,0702
u_meas	Unsicherheit des Messprozesses	-	-	15,0300	-	-	-	-	0,9834
u_meas_scatter	Unsicherheit Streuung Messreihe Serienteil	A	-	0,0743	Normal	1,0000	0,0743	1	0,0743
u_meas_MS_in	Unsicherheit Winkelmesssystems Antriebsseite	B	-	0,0268	Rechteck	0,5774	0,0155	1	0,0155
u_meas_MS_out	Unsicherheit Winkelmesssystems Antriebsseite	B	-	0,0370	Rechteck	0,5774	0,0213	1	0,0213
u_meas_rev_backlash	Unsicherheit Umkehrspiel Verdrehsicherung	A	-	0,0000	Normal	1,0000	0,0000	1	0,0000
u_meas_torque	Unsicherheit Drehmomentschwankung Motor	B	-	0,0500	Rechteck	0,5774	0,0289	1	0,0289
u_meas_ang_speed	Unsicherheit Winkelgeschwindigkeit Motor	B	-	0,0500	Rechteck	0,5774	0,0289	1	0,0289
u_meas_break_force	Unsicherheit Bremskraft	B	-	0,0000	Rechteck	0,5774	0,0000	1	0,0000
u_meas_software	Unsicherheit Auswertung	B	-	0,0500	Rechteck	0,5774	0,0289	1	0,0289
Vollständiges Messergebnis:		F_i'	15,03	μm	\pm	1,05	μm	k =	2

Alle acht bewerteten Unsicherheiten sind in der nachfolgenden Tabelle 6-6 zu finden. Eine Diskussion der Unsicherheitsergebnisse und die Bewertung der einzelnen Beiträge erfolgt im nächsten Abschnitt.

Tabelle 6-6: Evaluierte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor $k = 2$)

Parameter	$U_{\text{Uhrzeigersinn}}$	$U_{\text{Gegen Uhrzeigersinn}}$
Einflanken-Wälzabweichung F_i'	1.05 μm	1.14 μm
Einflanken-Wälzsprung f_i'	0.51 μm	0.54 μm
Langwelliger Anteil f_i'	1.09 μm	1.10 μm
Kurzwelliger Anteil f_k'	0.35 μm	0.46 μm

Ein wichtiger Punkt ist die Berücksichtigung des Beitrags des Umkehrspiels $u_{\text{meas}_{\text{rev_backlash}}}$ bei der Änderung der Drehrichtung. Dies führt tendenziell zu leicht erhöhten Messunsicherheiten der rechten Flanken durch die Drehung gehen den Uhrzeigersinn bei vorhergehender Drehung im Uhrzeigersinn. Durch die Trennung der beiden Messungen aus dem kombinierten Verfahren kann dieser Unsicherheitsbeitrag

in Zukunft durch eine entsprechende Umrechnung in der Software eliminiert werden. Es zeigt sich auch, dass die beiden Parameter, die Abweichungen innerhalb einer Teilung und nicht einer ganzen Umdrehung beschreiben, weniger anfällig für einzelne Ausreißer sind. Dies spiegelt sich in einer deutlich reduzierten Unsicherheit wider. (Gauder et al. 2022a)

6.6 Untersuchung der Prüfprozesseignung

Die Ermittlung der Prozesseignung erfolgt nach dem in Kapitel 2.4.3 vorgestellten Vorgehen. Auf diese Weise lassen sich die Prozesseignung für die Einflanken-Wälzabweichung F'_i und den Einflanken-Wälzsprung f'_i ermitteln, da diese in den bestehenden Normen festgelegt sind. Im Folgenden sind die berechneten Verhältnisse für die Prozesseignung der beiden Parameter im Uhrzeigersinn und gegen den Uhrzeigersinn dargestellt. Hierfür sind zwei Normen relevant, die beide berücksichtigt werden. Die Norm DIN 3961 wurde bereits zurückgezogen und ist nur noch bis zu einem Modul von 1 mm definiert (DIN 3960; DIN 3961; DIN 3990). Die derzeit gültige ISO 1328-1 ist ebenfalls nur bis zu einem Modul von 1 mm definiert und darf nicht extrapoliert werden. Daher soll diese Analyse dazu dienen, einen Kontext für die Ergebnisse zu liefern. Da sich die üblichen Toleranzen bei kleineren Modulen im Bereich der Mikrogetriebe immer schneller verringern, sind die Untersuchungen als kritisch zu betrachten und nach ISO 1328-1 zwischen Hersteller und Lieferant zu vereinbaren. Dieses Problem zeigt die Komplexität der Auswertung dieser Ergebnisse (ISO 1328).

Tabelle 6-7: Untersuchung der Prozesseignung der bewerteten Unsicherheiten

Parameter	Standard	$G_{ppUhrzeigersinn}$	$G_{ppGegenUhrzeigersinn}$
Einflanken-Wälzabweichung F'_i	DIN 3961	0.04 (✓)	0.05 (✓)
Einflanken-Wälzsprung f'_i	DIN 3961	0.03 (✓)	0.04 (✓)
Einflanken-Wälzabweichung F'_i	ISO 1328-1	0.02 (✓)	0.02 (✓)
Einflanken-Wälzsprung f'_i	ISO 1328-1	0.04 (✓)	0.04 (✓)

6.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Unsicherheiten der Prüfeinrichtung sind bei den gegebenen Toleranzen relativ gering. Nicht nur das 30%-Ziel, sondern sogar das 10%-Ziel des g_{pp} Verhältnisses ("Goldene Regel der Messtechnik"), die in der Metrologie von großer Bedeutung ist, kann in beiden extrapolierten Normen eingehalten werden.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Messunsicherheit des Einflanken-Wälzprüfstands für Mikro-Stirnräder für deren Untersuchung geeignet ist. Es wurden

vergleichsweise geringe Unsicherheiten bei der Bestimmung von Funktionsparametern im Mikrometerbereich erfasst. Der Fokus zukünftiger Untersuchungen sollte auf der weiteren Reduktion von Unsicherheitseinflüssen, insbesondere der Einspannung des Prüfzahnrades sowie der Eliminierung des Beitrags des Verdreh- und Umkehrspiels liegen. Um eine noch geeignetere Methode zur Ermittlung der Unsicherheit dieser Art von Mikro-Wälzprüfständen zu entwickeln, bietet sich ein Mikrozahnradnormal für Einflanken-Wälzprüfungen an. Dadurch wäre die Unsicherheitsermittlung auf ein nationales Normal rückführbar. (A_Hornung 2021; Gauder et al. 2022a)

7 Validierung der analytischen Drehwegsimulation

Der vorliegende Ansatz analysiert die Unterschiede zwischen der experimentellen Einflanken-Wälzprüfung des Prüfstands aus Kapitel 6 und einer analytischen Drehwegsimulation auf Basis der optischen Messdaten der Fokusvariation (Abbildung 7-1). Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt dabei auf einem signalbasierten Vergleich des Abwälzverhaltens von Mikrozahnradern. Mit Hilfe von Methoden im Zeit- und Frequenzbereich wird die Leistungsfähigkeit dieses simulativen Ansatzes überprüft und mit den experimentellen Untersuchungen verglichen.

Die Verzahnungsabweichungen können mit Hilfe von Einflanken-Wälzprüfungen in Bezug auf die Drehwegabweichung untersucht werden. Als optische Messtechnik wird die Fokusvariationstechnologie μCMM von Bruker Alicona, in Kapitel 5 beschrieben, eingesetzt. Die daraus resultierenden Punktwolken werden mit der Reany-Zahnkontaktanalyse-Software von Frenco ausgewertet (Frenco 2018a). Abbildung 7-1 fasst diesen Ansatz zusammen.

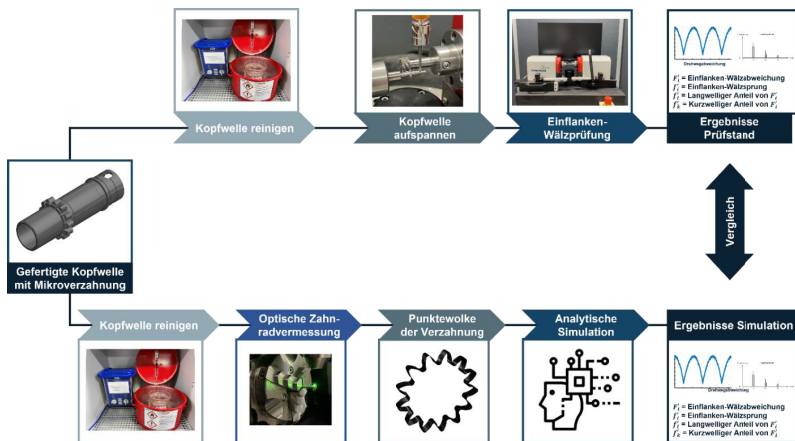


Abbildung 7-1: Allgemeines Vorgehen zum Vergleich von Prüfstand mit analytischer Drehweg-Simulation

7.1 Analytische Drehweg-Simulation

Für die analytische Zahnkontaktsimulation, welche im Qualitätsregelkreis zum Einsatz kommt, wurde die Software Reany der Firma Frenco verwendet (Frenco 2018a). Dabei

werden die im Kapitel 2.2.3 dargestellten Einflanken-Wälzabweichungen aller Zahnflanken sowie der Wälzweg, wie in Abbildung 7-2 zu sehen ist, aus den optisch erfassten Verzahnungsmessdaten ermittelt. Diese Informationen enthalten eine simulative Einflanken-Wälzprüfung (Frengo 2018b). Die Auswertung mittels der analytischen Zahnkontaktanalyse in Reany erfolgt über Profilschnitte an allen erfassten Zahnflanken. Durch Interpolation der Messwerte kann somit die Topologie jeder einzelnen Zahnflanke berechnet werden (Frengo 2018a). Das Bezugsraster liegt in der Ebene der abweichungsfreien, nominellen Zahnflanken. Eventuelle Abweichungen werden orthogonal zu den Sollflanken vorgegeben und an den Knotenpunkten des Referenzgitters weiter ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind als Beispiel in Abbildung 7-2 dargestellt.

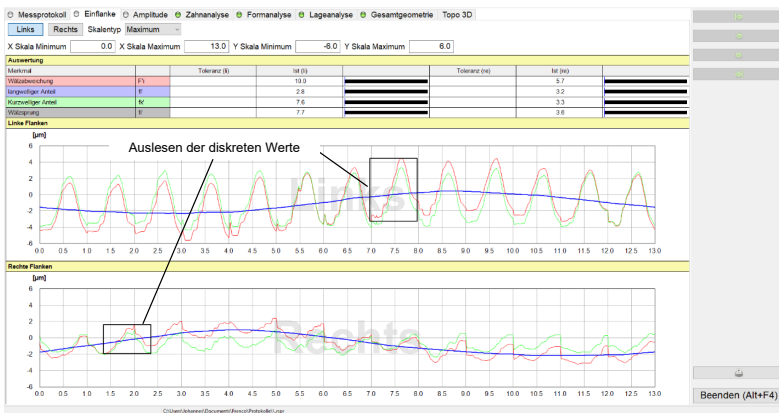


Abbildung 7-2: Simulative Zahnkontaktanalyse mit Frengo Reany

In der Arbeit von Hemmelmann wurde bereits eine Übereinstimmungsanalyse zwischen Einflanken-Wälzprüfstand und Zahnradsimulationen für Makroverzahnungen durchgeführt. Mittels verschiedenen Signalanalyseverfahren zwischen Prüfstandsmessung und Simulation konnten Korrelationen von bis zu 80 Prozent erreicht werden (Hemmelmann 2007). Dieser Ansatz wurde zur Validierung von Simulationen an Makrozahnrädern verwendet. Darüber hinaus basierten frühere Simulationsuntersuchungen weitgehend auf numerischen Analysen, die mehrere Minuten dauern, während die analytische Lösung von Reany nur wenige Sekunden in Anspruch nimmt (Brecher et al. 2010b; Dantan et al. 2010). Daran anknüpfend zielt dieser Ansatz darauf ab, optisch

gemessene in-line Daten von Mikro-Stirnrädern zu verwenden, die mit verschiedenen Analysemethoden nach Hemmelmann, wie der Kreuzkorrelation und der spektralen Leistungsdichte validiert werden (siehe Kapitel 2.6.3). Hier liegt der Schwerpunkt auf einer seriellen Anwendung dieses Simulationsansatzes, um funktionale Vorhersagen über die Parameter der Einzelflanken-Wälzprüfung in Taktzeit für die Serienproduktion zu ermöglichen (Gauder et al. 2022b; Hemmelmann 2007).

7.2 Experimentelles Vorgehen

Zur Ermittlung der Drehwegabweichung werden die Kopfwellen aus der Produktion mit dem Einflanken-Wälzprüfstand hinsichtlich ihrer funktionsorientierten Kenngrößen charakterisiert. Analog dazu erfolgt die Messung derselben Kopfwellen mittels der optischen Fokusvariationstechnologie basierend auf dem in Kapitel 5.3.3 optimierten in-line Messprogramm. Die funktionsorientierte Auswertung der Kenngrößen erfolgt im Anschluss mit der simulativen Zahnkontaktanalyse Reany von Frencio. Der Einflanken-Wälzprüfstand, welcher bereits in Kapitel 6.1.1 erläutert wurde, dient als Referenzmessmethode, mit der die optisch erfassten und simulierten Daten im Folgenden verglichen werden.

Die Datenbasis für die Analysen besteht aus 100 Kopfwellen der Serienproduktion, die den natürlichen Schwankungen des Herstellungsprozesses unterworfen sind. Ein Histogramm ihrer Einflanken-Wälzabweichung, welche auf dem Prüfstand gemessen wurden, ist in Abbildung 7-3 visualisiert.

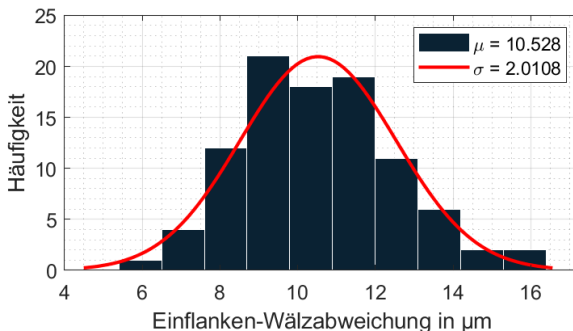


Abbildung 7-3: Histogramm der experimentellen Einzelflanken-Wälzabweichung von 100 Zahnradern auf dem Prüfstand

Bevor die optisch gemessenen Messpunktewolken simuliert werden können, müssen sie verarbeitet werden. Daher werden die generierten Daten mit Hilfe eines iterativen Closest-Point-Algorithmus (ICP) an der idealen CAD-Form der Kopfwelle ausgerichtet. Anschließend wird die Stirnfläche bestimmt und ein allgemeiner Schnitt durch den Zahnkontaktbereich durchgeführt. Im letzten Schritt werden die von der Zahnkontaktanalyse-Software benötigten Profilschnitte erstellt. Die Vorverarbeitung wird nochmals ausführlich in Kapitel 8.2.1 beschrieben.

7.3 Vergleichende Signalanalyse

7.3.1 Methodisches Vorgehen

Für die analytische Simulation ist es notwendig, die Zahnkontaktanalyse durch die Analyse des Signals zu untersuchen. Nach einer Vorverarbeitung der Signale werden Hochpassfiltertechniken getestet, um eine optimale Extraktion der kurzwelligen Komponente der Signale zu ermöglichen. Diese Filterung unterstützt einen Vergleich, da die kurzwellige Komponente keine Exzentrizitäten der Einspannung enthält, die die Auswertungen beeinflussen könnten. Der signalbasierte Vergleich zwischen Einflanken-Wälzprüfung und Simulation dient der Beantwortung von drei Fragen. Diese sind für eine industrielle Anwendung der Auswertestrategie im Rahmen eines Qualitätsregelkreises von Bedeutung. Die erste Fragestellung ist, wie hoch ist die Übereinstimmung der Signale aus der Simulation und dem Einflanken-Wälzprüfung im Hinblick auf zukünftige Paarungsstrategien innerhalb der Montage. Diese Bewertung erfolgt mittels Kreuzkorrelation. Des Weiteren sind Frequenzanalysen notwendig, um das akustische Verhalten zu bewerten. Dies wird mit Hilfe der Korrelationskoeffizienten der Fourier-Spektren und der spektralen Leistungsdichte (PSD) bewertet. Schließlich muss die Frage nach der Existenz eines systematischen Verhaltens der Simulation untersucht werden. Die Analyse auf systematisches Verhalten erfolgt zum einen durch statistische Betrachtungen der Fourierspektren und PSD sowie der Übertragungsfunktion (Gauder et al. 2022b). Abschließend wird die Methodik des Vergleichs zusammengefasst (siehe Abbildung 7-4).

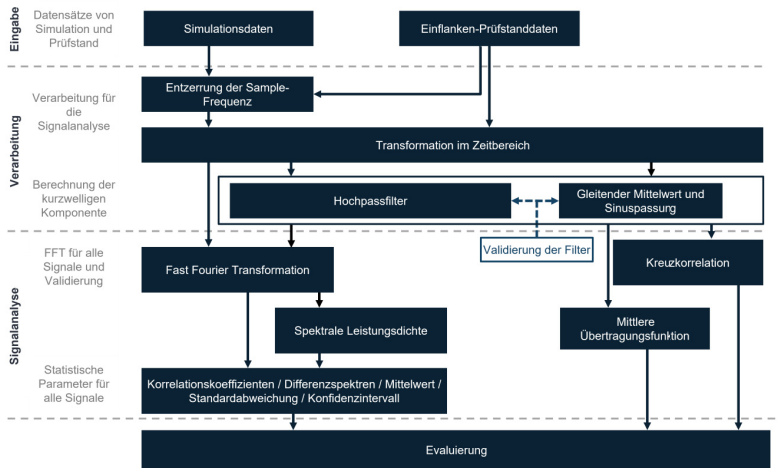


Abbildung 7-4: Methodik dieses Ansatzes (Gauder et al. 2022b)

7.3.2 Filtermethoden zur Beseitigung unerwünschter Exzentrizitäten

7.3.2.1 Hoch- und Tiefpassfilter

Der verwendete Prüfstand misst mit Hilfe eines inkrementellen Drehgebers die Winkelinkremente während des Zahneingriffs in Schritten von $0,2^\circ$. Die Differenz zwischen Ist- und Soll-Winkelwert ergibt das normierte Signal des Übertragungsfehlers, welches in Abbildung 7-2 gezeigt ist. Das Signal des Übertragungsfehlers besteht aus einem langwelligen Anteil, der durch Exzentrizitäten aufgrund der Einspannung entsteht, und einem kurzwelligen Anteil, der durch Geometrieabweichungen beim Zahneingriff hervorgerufen wird. Die kurzwelligen Anteile sind für einen Vergleich der Übertragungsfehlerkurven aus dem Prüfstand mit denen der Simulation von Interesse, da sie eine Vorhersage über den Zahneingriff und das Funktionsverhalten des Getriebes erlauben. Eine unerwünschte Exzentrizität beim Spannen des Prüflings beeinflusst die Vergleichbarkeit der Datensätze. Aus diesem Grund werden die Signale des Übertragungsfehlers des Prüfstands und der Simulation mit Hilfe eines Filters auf den kurzwelligen Anteil

eingeschränkt. Auf diese Weise können Einflüsse aus der Einspannsituation im Prüfstand und der Simulation eliminiert werden. Dies erfordert jedoch die Kenntnis der entsprechenden Abtastfrequenz und der Grenzfrequenz (VDI 2608).

Die Drehzahl des Prüfzahnrades ist mit $30 \text{ }^\circ/\text{s}$ bekannt und somit kann die Drehperiode T_{Rotation} mit 12 s bestimmt werden. Mit Hilfe der Drehperiode und der Zähnezahl z kann die Frequenz des idealen Zahneingriffs f_{Zahn} auf 1,083 Hz bestimmt werden. Das gleiche Verfahren kann zur Bestimmung der Grenzfrequenz der idealen langwelligen Komponente verwendet werden. In diesem Fall wird von einer Exzentrizität nach VDI 2608 ausgegangen, bei der es während einer Zahnradumdrehung ein Maximum oder Minimum gibt (VDI 2608). Daraus ergibt sich eine Periode von 6 s und eine Frequenz f_{longwave} von 0,166 Hz. Die Abtastfrequenz kann aus der Anzahl der Datenpunkte und der Rotationszeit basierend auf dem vorgestellten Vorgehen bestimmt werden. Damit lässt sich ein Hochpassfilter entwerfen, der die kurzwellige Komponente aus dem Gesamtsignal herausfiltert, indem er die niederfrequenten Komponenten unterdrückt.

7.3.2.2 Gleitender Durchschnitt und Sinus-Fit-Filter

Die Ergebnisse der Hochpassfilterung können einer Gruppenlaufzeitverzerrung unterliegen und somit das Ausgangssignal beeinflussen. Zusätzlich zu diesem herkömmlichen IIR-Filter wird daher eine Kombination aus FIR-Filter und Sinus-Fit verwendet, um die langwellige Komponente auszuschließen. Die verwendete Methode wird im Folgenden erläutert. Zu Beginn wird das Signal importiert und ein gleitender Mittelwertfilter angewendet. Dabei wird der Quotient aus der Anzahl der Datenpunkte und der Anzahl der Zähne gemittelt. Auf diese Weise können Frequenzen größer oder gleich $f_{\text{shortwave}}$ eliminiert werden. Im nächsten Schritt wird ein Sinus mit einem variierenden Frequenzbereich in die verbleibende Schwingung eingepasst. Mit Hilfe der ermittelten Sinusfunktion der langwelligen Komponente kann dann das kurzwellige Signal durch Differenzbildung zwischen dem Gesamtsignal und der Sinuskurve extrahiert werden. Schließlich wird das Signal zur weiteren Verarbeitung exportiert. Abbildung 7-5 veranschaulicht dieses Vorgehen.



Abbildung 7-5: Optimiertes Filter zur Extraktion der kurzwelligen Komponente des Übertragungsfehlers (Gauder et al. 2022b)

7.3.3 Identifizierung der optimalen Filtermethode

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf der kurzwelligen Komponente der Signale, da diese nach Exzentrizitäten gefiltert wird. Um die kurzwelligen Anteile der Signale vergleichen zu können, werden im Folgenden die beiden beschriebenen Filtermethoden anhand einer Größe verglichen, die als *filter accuracy* definiert ist. Diese Größe wird an einem Datensatz mit 1000 künstlich erzeugten Signalen mit unterschiedlichen Frequenzen im Bereich der Originaldaten berechnet. Für die kurzwelligen Komponenten $S_{filter,i}$ wird der mittlere quadratische Fehler (RMSE) in Bezug auf ein ideales Kurzwellensignal berechnet $S_{ideal,i}$. Anhand des RMSE lässt sich der relative Informationsgehalt der gefilterten Signale zum ursprünglichen kurzwelligen Signal bestimmen. Zu diesem Zweck wird die maximale Amplitude des idealen Kurzwellensignals mit $\max(\text{abs}(S_{ideal,i}))$ bestimmt, um den RMSE zu relativieren. So werden höhere Werte des RMSE der gefilterten Signale nicht potentiell überschätzt. Wenn das Signal fehlerfrei extrahiert wird, erreicht diese eingeführte Größe von 100 %, da der RMSE in diesem Fall Null ist.

$$Filter\ accuracy = \frac{\max(\text{abs}(S_{ideal,i})) - RMSE(S_{filter,i}; S_{ideal,i})}{\max(\text{abs}(S_{ideal,i}))} \cdot 100, \quad \text{Formel 7-1}$$

$$i \in [1, 1000]$$

Abbildung 7-6 zeigt die Ergebnisse für die Bewertung der Filtergenauigkeit. Darüber hinaus zeigt die Abbildung die Verteilung der beiden Filtermethoden. Hier ist eine deutlich größere Streuung innerhalb der hochpassgefilterten Daten zu beobachten. Auch der Mittelwert ist deutlich niedriger als bei dem implementierten alternativen Ansatz mit gleitendem Durchschnitt und Sinus-Fit.

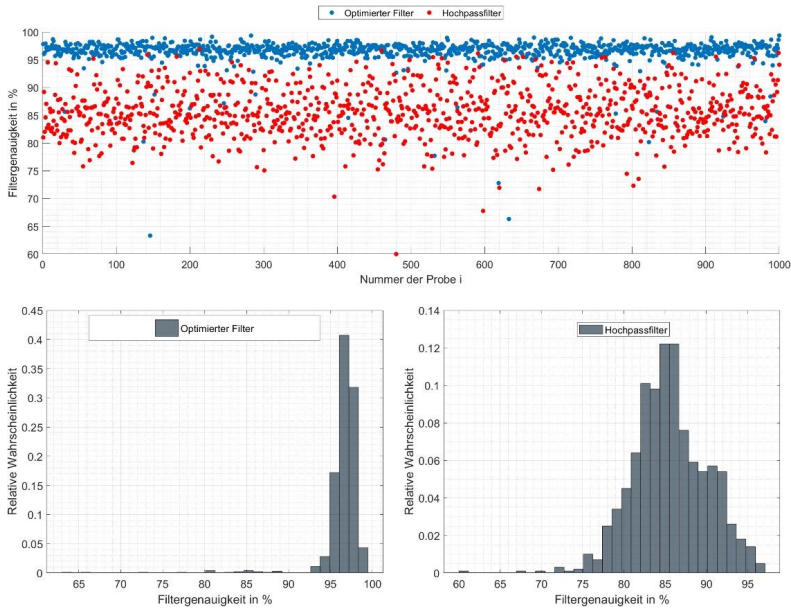


Abbildung 7-6: Untersuchung der Filtergenauigkeit (Gauder et al. 2022b)

7.3.4 Vergleich der Simulationsdaten mit den Daten des Prüfstands

Im folgenden Abschnitt werden die gefilterten und ungefilterten Signale aus dem Prüfstand und der Simulation verglichen. Abbildung 7-7 zeigt ein Beispiel der ungefilterten Kurven eines Bauteils für beide Methoden. Es besteht ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven.

Abbildung 7-8 zeigt die Kreuzkorrelationen und die spektralen Korrelationen zwischen den Signalen aus dem Einflanken-Wälzprüfstand und der Simulation. Die Kreuzkorrelationen beschreiben die Position des absoluten Maximums, bei dem sich die Signale τ am ähnlichsten sind. Der Grad der Übereinstimmung wird durch den Wert des Maximums beschrieben. Bei einem Wert von 1 [-] sind die Signale identisch und bei einem Wert von 0 [-] gibt es keine Übereinstimmung. Im Zeitbereich ist eine hohe Übereinstimmung der Signale festzustellen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse für die gefilterten Signale deutlich stabiler und höher. Es sind Ausreißer zu beobachten, bei denen

die Kreuzkorrelation des ungefilterten Signals höher ist als die Kreuzkorrelation des gefilterten Signals. Diese Ausreißer sind auf den Algorithmus der Simulation zurückzuführen.

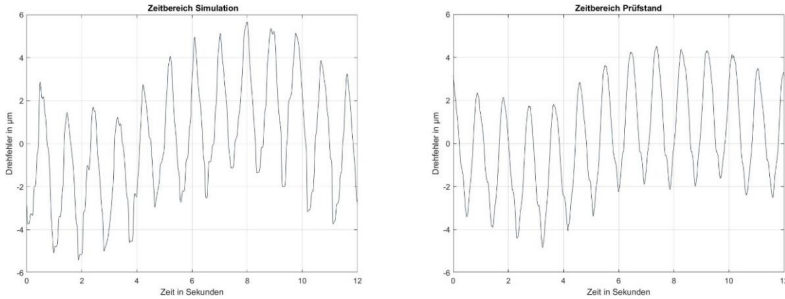


Abbildung 7-7: Zeitreihensignal für Simulation (links) und Prüfstand (rechts) (Gauder et al. 2022b)

Eine detaillierte Untersuchung der Ergebnisse in Abbildung 7-8 unterstützt diese Beobachtungen. Bei den ungefilterten Signalen ist die größere Varianz der Kreuzkorrelation zu erkennen. Dieser Beitrag resultiert aus dem Einfluss der Exzentrizität, die aus den Aufspannfehlern resultiert. Trotz der größeren Streuung bei den ungefilterten Signalen sind die auftretenden Kreuzkorrelationen mit einem Medianwert von 0,810 [-] im Vergleich zu Ergebnissen aus dem Makrobereich als hoch zu bewerten. Noch deutlichere Kreuzkorrelationen sind bei den gefilterten Signalen zu beobachten. Hier wird ein Medianwert von 0,866 [-] erreicht. Auch die Streuung ist geringer. Dies ist auf das optische Messverfahren und die kleinen Abmessungen der Zahnräder im Mikrometerbereich zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen zeigen sowohl bei den gefilterten als auch bei den ungefilterten Signalen deutliche Korrelationen im Zeitbereich. Bei der Kreuzkorrelation wurden auch die Korrelationen der Frequenzspektren berücksichtigt. Die beobachteten hohen Werte der Kreuzkorrelationen werden durch die noch höheren Korrelationen der Spektren verstärkt. Hier werden sowohl für die gefilterten als auch für die ungefilterten Signale Median-Korrelationen von rund 95 % beobachtet. Dabei sind die Unterschiede zwischen den Signaltypen erwartungsgemäß deutlich geringer. Dies liegt daran, dass bei der Betrachtung der Spektren die langwellige Komponente eine untergeordnete Rolle spielt, wodurch die Koeffizienten nur geringfügig beeinflusst werden. Die vorhandenen Unterschiede zwischen den beiden Fällen sind im Wesentlichen

auf isolierte Filtereffekte und erhöhte Exzentrizitäten zurückzuführen. Anhand der Kreuzkorrelationen und Korrelationskoeffizienten kann die Simulation schließlich als geeignet hinsichtlich der Verlaufsdarstellung bewertet werden. Für beide Parameter lassen sich im Vergleich zu bestehenden Simulationsansätzen deutlich stärkere Korrelationen im Median beobachten (Hemmelmann 2007).

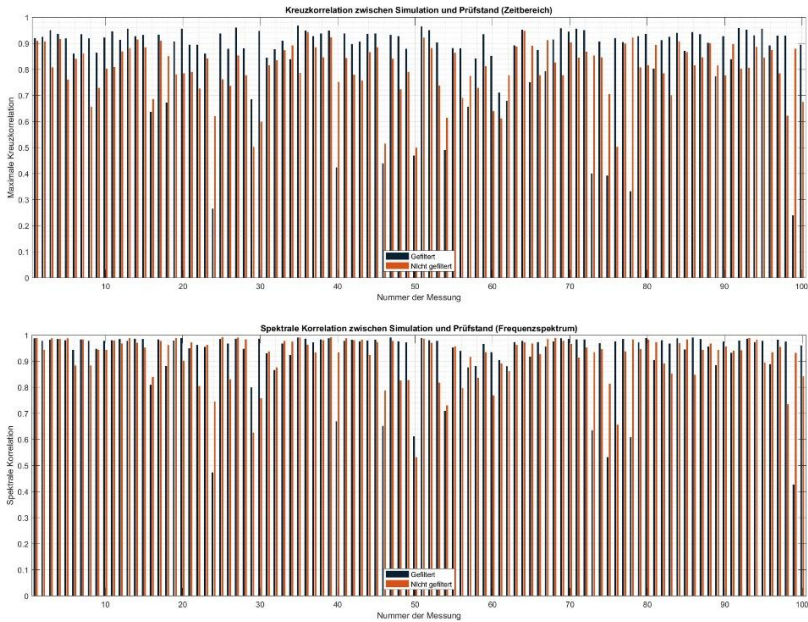


Abbildung 7-8: Kreuzkorrelation und spektrale Korrelationsanalyse (Gauder et al. 2022b)

Für eine umfassende Analyse wurde auch die PSD der gefilterten Signale betrachtet. Die beobachteten Korrelationen sind noch höher als die im Fourier-Spektrum. Dies liegt daran, dass bei der Betrachtung nur die Flächen unter den Kurven, die überwiegend minimale Unterschiede aufzeigen, geringer gewichtet werden. Das beobachtete Ergebnis steht im Gegensatz zu den Untersuchungen von Hemmelmann (Hemmelmann 2007). Dies liegt im Wesentlichen daran, dass bei Mikrozahnrädern die Amplituden nur gering ausgeprägt sind und die Leistungsänderungen pro Frequenz nicht so deutlich

wie bei Makrozahnrädern auftreten. Die mittlere Korrelation aller drei Analysen ist zusammengefasst in Tabelle 7-1. Trotz einiger Ausreißer zeigen die mittleren Korrelationen erhebliche Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der Simulation und denen des Prüfstands (Gauder et al. 2022b).

Tabelle 7-1: Mittlere Korrelationskoeffizienten für die Fourier-Spektren und die spektrale Leistungsdichte

Methode	Mittlere Korrelation in %
FFT (ungefiltert)	92%
FFT (gefiltert)	93%
PSD	94%

Zur Untersuchung des systematischen Verhaltens der Simulation wurden auch die mittleren PSD betrachtet. Dabei wurden die Differenzspektren für die gefilterten Signale ermittelt. Hier können die Oberschwingungen der entsprechenden Zahneingriffsfrequenzen untersucht werden. Allerdings traten neben den Harmonischen keine weiteren dominanten Frequenzen auf. Für die Oberschwingungen sind relativ hohe Standardabweichungen zu beobachten. Eigenfrequenzen oder andere Phänomene werden im Vergleich zu den Ergebnissen von Hemmelmann nicht beobachtet (Hemmelmann 2007). Dies ist auch auf die kleinen Strukturabmessungen der Mikrozahnräder zurückzuführen.

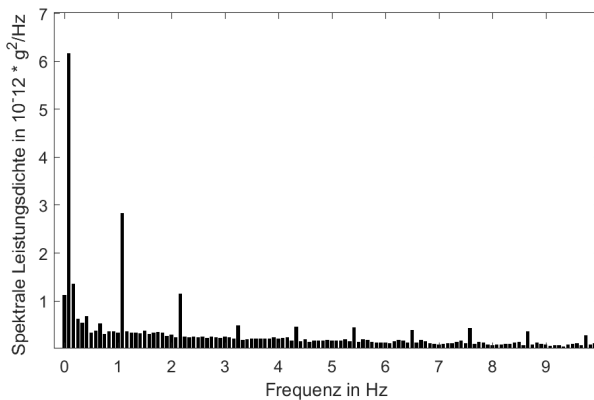


Abbildung 7-9: Mittlere Differenz der spektralen Leistungsdichte (Gauder et al. 2022b)

Das beobachtete Fehlen eines systematischen Verhaltens zwischen Simulation und Einzelflankenwölzprüfstand wurde zusätzlich unter Verwendung einer gemittelten Übertragungsfunktion wie in der Arbeit von Hemmelmann untersucht (Hemmelmann

2007). Die Ergebnisse zeigen kein systematisches Verhalten und reduzieren vor allem die Korrelationen zwischen Simulation und Einflanken-Wälzprüfstand. Zusammenfassend kann daher die Simulation hinsichtlich der Darstellung des Verlaufs als valide bewertet werden. Die Ergebnisse der Korrelationen von Abbildung 7-8 verdeutlichen die Eignung für den vorgesehenen Einsatz innerhalb eines Qualitätsregelkreises in der Mikrozahnradsfertigung. Aufgrund des fehlenden systematischen Verhaltens ist keine zusätzliche Kompensation der vorhandenen Differenzen möglich und notwendig. Die beobachtbaren Ausreißer der Korrelation können durch Optimierungen hinsichtlich der streuenden optischen Messung und der Simulationssoftware weiter reduziert werden.

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zwischen der Simulation und dem Prüfstand ein hohes Maß an Übereinstimmung besteht. Die verbleibenden Unterschiede sind auf fünf Haupteffekte zurückzuführen. Erstens ist zu beachten, dass die Reibung beim Abwälzen der Zahnräder in der analytischen Simulation nicht berücksichtigt wurde. Zweitens wurde durch das Bremsmoment des Prüfstands ein geringer Widerstand aufgebracht, der im analytischen Modell nicht berücksichtigt werden kann. Darüber hinaus erlaubt die simulative Methode eine Betrachtung ohne dynamische Effekte. Diese sind durch die Bewegung des Prüfstandes gegeben, wurden aber durch die geringe Geschwindigkeit minimiert. Ein weiterer Effekt betrifft Ausreißer in der optischen Messtechnik. Diese wurden durch die Optimierung der Parameter der Messtechnik und die Filterung von Ausreißern bei der Verarbeitung entscheidend reduziert, führen aber dennoch zu geringen Abweichungen. Der fünfte Aspekt ist die Interpolation der Messpunkte in der Simulation selbst. Diese kann bei Lücken in den optischen Messdaten zu Abweichungen führen, da eine Interpolation stattfindet. Abschließend sind die Ergebnisse für beide Methoden in Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 für zufällig ausgewählte Messungen dargestellt. Die Simulation ist eng mit den Ergebnissen des Prüfstandes verbunden. Einzelne Ausreißer unterstreichen die geringen Abmessungen und die hohen Anforderungen im Mikrometerbereich. Betrachtet man die Ergebnisse im Zusammenhang mit der kurzen Messzeit von weniger als 3,5 Minuten, so wird die Leistungsfähigkeit dieses simulativen Ansatzes deutlich. Die vollständige Auflistung der Ergebnisse ist im Anhang A8 in Tabelle 0-19 und Tabelle 0-20 dargestellt.

Tabelle 7-2: Vergleich der Ergebnisse zwischen Simulation (SIM) und Einflanken-Wälzprüfstand (EWP) bezüglich der linken Flanken

Linke Flanken									
Abweichung	F'_l in μm		f'_l in μm		f'_i in μm		f'_k in μm		
	SIM	EWP	SIM	EWP	SIM	EWP	SIM	EWP	
Messnummer									
1	8.5	6.8	5.2	5.3	4.0	2.0	5.5	5.3	
3	12.4	11.3	8.8	8.5	5.1	4.1	8.2	8.2	
18	9.4	10.1	5.8	4.4	4.8	6.6	5.6	3.8	
21	11.5	11.4	7.1	8.1	4.1	4.0	7.9	7.9	
25	8.7	8.7	3.8	4.8	5.5	5.2	3.5	3.8	
26	14.8	13.5	12.5	9.3	3.6	4.7	12.3	8.9	
49	17.2	12.5	9.8	9.9	7.4	3.5	10.1	9.5	
51	9.4	7.6	5.5	5.8	4.6	2.3	5.7	5.4	
52	14.9	13.7	9.9	10.0	5.6	4.1	10.1	9.9	
57	8.6	11.3	4.8	5.5	3.9	6.6	5.1	5.1	

Tabelle 7-3: Vergleich der Ergebnisse zwischen Simulation (SIM) und Einflanken-Wälzprüfstand (EWP) bezüglich der rechten Flanken

Rechte Flanken									
Abweichung	F'_r in μm		f'_r in μm		f'_i in μm		f'_k in μm		
	SIM	EWP	SIM	EWP	SIM	EWP	SIM	EWP	
Messnummer									
1	9.5	7.3	7.4	5.3	3.4	2.4	7.2	5.1	
3	11.9	11.9	8.6	7.8	4.6	4.7	9.0	7.4	
18	9.3	9.6	4.4	3.2	5.9	7.4	4.3	2.5	
21	10.1	8.5	6.7	5.4	4.4	3.9	7.4	5.3	
25	11.8	9.7	7.6	5.7	5.4	4.9	7.0	5.4	
26	11.6	10.5	8.1	7.5	4.1	4.4	8.3	6.9	
49	14.1	12.9	8.3	7.9	6.0	6.2	8.5	7.4	
51	12.9	7.0	8.4	5.8	5.2	1.6	8.5	5.7	
52	8.5	7.5	3.6	4.2	6.1	4.0	3.2	4.0	
57	11.1	11.3	7.9	6.6	3.7	5.6	8.0	6.3	

Zu Visualisierung der Abweichungen zwischen Simulation und Prüfstand, sind zwei Histogramme in Abbildung 7-10 dargestellt, die die Abweichungen zwischen beiden Methoden für die linke und rechte Flanke darstellen.

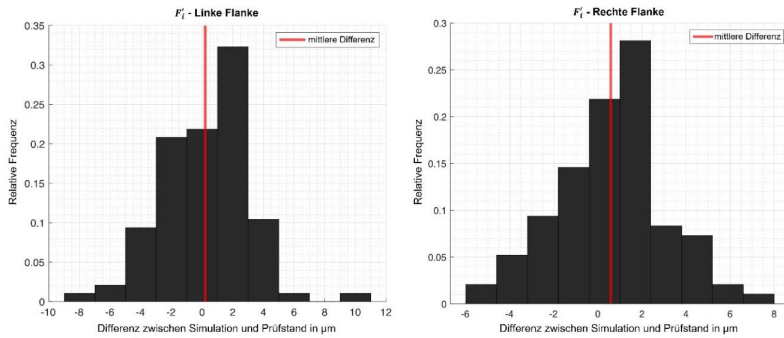


Abbildung 7-10: Unterschied zwischen Simulation und Prüfstand (Gauder et al. 2022b)

8 Quantifizierung der Simulations- bzw. Gesamtunsicherheit

Die simulative Einflanken-Wälzprüfung von Zahnrädern ermöglicht die Integration der funktionsorientierten Qualitätssicherung in den Produktionsprozess der Mikroverzahnungsfertigung. Mit Hilfe von optischen in-line Messungen kann eine simulierte Einflanken-Wälzprüfung durchgeführt werden. Mit dem Ziel der Integration zur Korrektur von Produktionsparametern und einer Funktionsprognose zielt dieses Kapitel auf eine Unsicherheitsbewertung einer analytischen Zahnkontaktanalyse-Software ab. Basierend auf optischen Messungen der Fokusvariationstechnik und experimentellen Einflanken-Wälzprüfungen auf dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand werden aufgabenspezifische Simulationsunsicherheiten für die vier Parameter der Einflanken-Wälzprüfung ermittelt. Dieser Ansatz verwendet einen optimierten Latin Hypercube Sampling (LHS)-Ansatz, um künstlich erzeugte Zahnradpunktvolken mit spezifizierten Abweichungen für eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) zu generieren, die auf dem Vorgehen des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) zur Bestimmung von Modellunsicherheiten basiert. In diesem Kapitel wird das Verfahren in mehrere Teilschritte untergliedert. Zunächst wird der Ansatz für die Bewertung der Simulationsunsicherheit vorgestellt. Danach werden die Eingangsdaten der optischen Messtechnik und des Mikro-Einflanken-Prüfstandes erläutert. Anschließend werden Merkmale abgeleitet, um Muster innerhalb der optischen Messungen zu beschreiben. Nach der Generierung künstlicher Zahnräder werden die Datensätze automatisch mit der analytischen Zahnkontaktanalyse-Software Reany der Firma Franco simuliert. In Kombination mit Simulationsdaten und 100 hergestellten Mikrozahnrädern (Kopfwelle), die mit Messungen und Unsicherheiten des Einflanken-Wälzprüfstands verglichen werden, wird eine aufgabenspezifische Simulationsunsicherheit ermittelt.

8.1 Ansatz für die Bewertung der Simulationsunsicherheit

8.1.1 Methode

Eine zuverlässige Simulation des Abwälzens von Zahnrädern erfordert die Bewertung der zugehörigen Unsicherheiten nach dem GUM Supplement 1 (JCGM 101:2008). Die erweiterte Simulationsunsicherheit U_{SIM} (siehe Formel 8-4) besteht aus der Standardunsicherheit u_{bias} , die aus systematischen Abweichungen (Bias) resultiert, der Standardunsicherheit u_{MU} die sich aus den Einflussfaktoren der Simulation ergibt (Varianz),

und der Standard-Kalibrierunsicherheit $u_{cal, EWP}$, die der Unsicherheit der Referenz (Prüfstand) entspricht, sowie einem Erweiterungsfaktor k , der im Rahmen der Metrologie auf 2 gesetzt wird (Friedman 1997; JCGM 100:2008). Als Referenz wurde ein hochpräziser Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand verwendet. Die daraus resultierende Kalibrierunsicherheit wurde für den Prüfstand bereits experimentell nach GUM (JCGM 100:2008) ermittelt (vgl. Kapitel 6.5). Abschließend wird die Unsicherheit aufgrund der Einflussfaktoren der Simulation (Varianz) und der Abweichungen zwischen der Simulation und des Prüfstands (Bias) berücksichtigt (vgl. Kapitel 7).

Im Rahmen der Auswertestrategie ist die Unsicherheit der Einflussfaktoren die Messunsicherheit der optischen Messungen (vgl. Abbildung 8-1, 1. Messunsicherheit), da die Eingangsgrößen der Simulation die Punktwolken der Mikrozahnräder (Kopfwelle) sind. Die Einflussfaktoren der Funktionsprognose sind daher die Fertigungsabweichungen der Punktwolken, die mit Messunsicherheiten angegeben werden müssen. Das bedeutet, dass der Unsicherheitsbereich der Einflussfaktoren gleich der Messunsicherheit der Zahnradparameter entspricht (vgl. Abbildung 8-1, 2. Skin Model Shape Ableitung). Die zugehörige Standardunsicherheit wird mit einer Monte-Carlo-Simulation nach GUM Supplement 1 ermittelt (JCGM 101:2008).

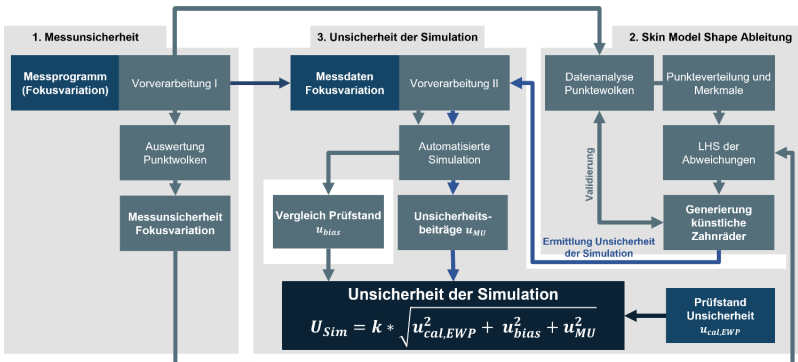


Abbildung 8-1: Methode zur Bestimmung der spezifischen Simulationsunsicherheit (Gauder et al. 2023b)

Die Standardunsicherheit aufgrund des systematischen Modellverhaltens der Simulation wird schließlich durch einen parameterbasierten Vergleich der Simulationsdaten mit zugeordneten Einflanken-Wälzprüfungen des beschriebenen Mikro-Einflanken-Prüfstands ermittelt. Kombiniert mit der bereits ermittelten Kalibrierunsicherheit des

Prüfstands kann abschließend die resultierende spezifische Simulationsunsicherheit bewertet werden. Abbildung 8-1 ermöglicht einen Überblick über die Methode zur Ermittlung der Simulationsunsicherheit.

8.1.2 Vorgehensweise

Eine Monte-Carlo-Simulation erfordert Zufallsexperimente in einer Anzahl von deutlich über 1.000 und Methoden, die Stichproben aus ganzen Populationen sammeln (Helton & Davis 2003; JCGM 101:2008). Die notwendigerweise gezielte Beeinflussung der Eingangsgrößen kann nur mit künstlich erzeugten Zahnrädern erreicht werden. Dies liegt daran, dass Objekteigenschaften explizit ohne zusätzliche Unsicherheitseinflüsse beeinflusst werden können. Zudem ist die notwendige Anzahl von Variationen für physikalische Komponenten nicht realisierbar. Künstlich erzeugte Datensätze unterliegen aus Gründen der Vergleichbarkeit der Anforderung ihre Eingangsgrößen bestmöglich zu repräsentieren. Generierte Skin Model Shapes müssen daher die Fertigungsabweichungen und das Messabbild möglichst genau abbilden. Dazu werden vorverarbeiteten Messdaten von Werkstücken analysiert und abweichungsspezifische Merkmale der vorhandenen optischen Messpunktfolgen ermittelt. Diese werden in einer Anforderungsmatrix hinterlegt und bei der Erzeugung von Skin Model Shapes berücksichtigt. Die künstliche Generierung von Verzahnungen ermöglicht somit bei ausreichender Variation die Bestimmung der Standardunsicherheit durch die Unsicherheit der Einflussfaktoren. Eine weit verbreitete Praxis ist die Quasi-Zufallsstichprobe. Das auf diese Weise erzeugte Stichprobenelement ist unabhängig von allen anderen Elementen. Daher entspricht die zugewiesene Wahrscheinlichkeit einer wiederholten Stichprobe der Gesamtwahrscheinlichkeit der Grundgesamtheit. Bei Zufallsstichproben gibt es keine Garantie, dass die erhaltenen Stichproben den zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsbereich repräsentieren. Wichtige Teilmengen mit geringen Wahrscheinlichkeiten, aber signifikanten Auswirkungen können daher unterrepräsentiert sein (Gauder et al. 2023b). Daher wird das LHS (vgl. Kapitel 2.5.2) angewendet, um Fertigungsabweichungen und das Messabbild bei der Erzeugung der künstlichen Punktfolgen möglichst genau abzubilden und zu repräsentieren.

8.2 Analyse der optischen Messdaten

Bei der Erzeugung von künstlich generierten Daten ist es von Bedeutung, dass diese mit den aufgezeichneten Messdaten der Fokusvariationstechnologie korrespondieren.

Andernfalls wird ein hohes Maß an einer realen Annäherung nicht erreicht. Daher werden die Messdaten der Fokusvariation analysiert, um sie in großer Zahl und mit bestimmten Modifikationen künstlich zu reproduzieren.

8.2.1 Vorverarbeitung

Bevor die Messdaten ausgewertet werden können, müssen sie vorverarbeitet werden. Erst dann können die Analysen durchgeführt werden. Deshalb werden die optischen Messdaten der Fokusvariation zunächst als TXT-Datei importiert. Im nächsten Schritt werden die Daten in zwei Dimensionen (X und Y) an die CAD-Nominalform vorjustiert. Nachdem die Stirnfläche erkannt und ein Schnitt auf einen groben Verzahnungsbereich durchgeführt wurde, wird der Datensatz mit einem Iterativen Closest-Point-Algorithmus (ICP) an das CAD-Modell angeglichen, wie es in der Abbildung 8-2 dargestellt ist.

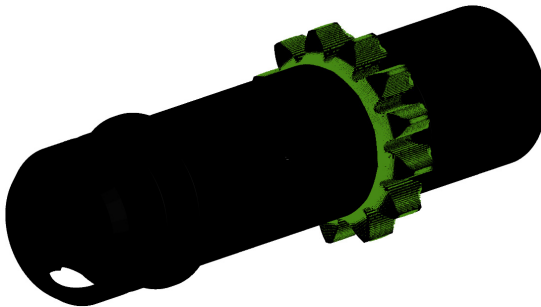


Abbildung 8-2: ICP Fit der Punktwolke (grün) an das CAD Modell (schwarz)

Mit dieser Methode lassen sich Fehler beim Einspannvorgang wiederholbar kompensieren. Nach der Feinabstimmung auf den relevanten Bereich der Verzahnung werden die Artefakte der Stirnfläche gefiltert, um die Daten abschließend mit dem ICP fein auszurichten. Abbildung 8-3 zeigt diesen Prozess.

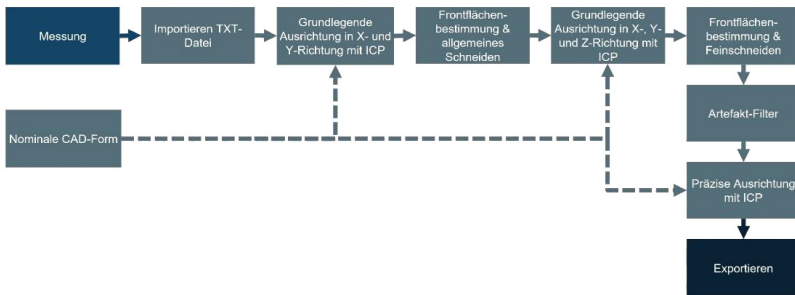


Abbildung 8-3: Vorverarbeitung I der Messdaten für die weitere Analyse (Gauder et al. 2023b)

8.2.2 Clustering

In einem ersten Schritt werden die aufgezeichneten Messungen der Fokusvariation auf Anomalien und Muster untersucht. Die Visualisierung innerhalb des Flanken-Koordinatensystems zeigt deutliche Cluster, wie der blaue Kasten in Abbildung 8-4 aufzeigt. Pro Zahn lassen sich 14 Cluster feststellen, wobei die Messpunkte auf einer Flankenlinie liegen. Die Cluster sind auf das optische Prinzip der Fokusvariation zurückzuführen. Bei der Fokusvariation werden Bildebenen übereinandergestapelt. Der Abstand zwischen den Bildebenen ist entlang der Z-Achse äquidistant, aber die Evolvente beschreibt eine Kurve mit abnehmender Steigung ausgehend vom Zahnfußbereich. Die Evolvente legt im Fußbereich mehr und im Kopfbereich weniger Strecke zwischen zwei Bildebenen zurück. Dies führt zu Clustern mit einem zunehmenden Abwärtsweg (Kopfbereich). Diese Beziehung ermöglicht es, die Eigenschaften des Messabbildes innerhalb und zwischen den Clustern zu analysieren. Für das weitere Vorgehen wurde ein Clustering mittels K-Means und den Messdaten von 20 Wiederholungsmessungen der Fokusvariation durchgeführt. Sie wurden mit dem Algorithmus nach einer Einteilung in linke und rechte Flanken klassifiziert. Die beobachteten Ergebnisse des mittleren absoluten prozentualen Fehlers (MAPE) wurden unter 1% durchgeführt. Somit erreicht diese Methode ein hohes Maß an Wiederholbarkeit (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b). Nachfolgend wurde eine statistische Formanalyse innerhalb und zwischen den identifizierten Clustern durchgeführt.

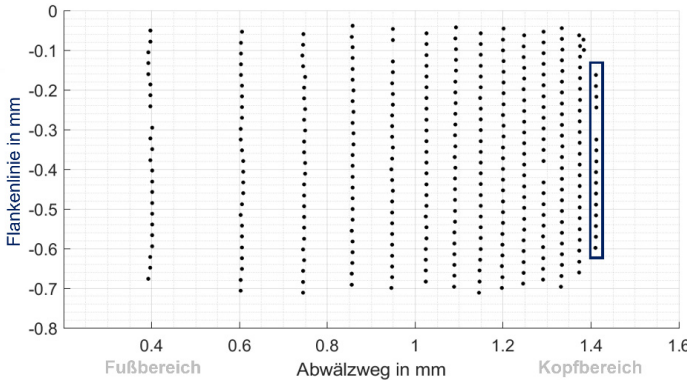


Abbildung 8-4: Cluster innerhalb einer Punktwolke im Flanken-Koordinatensystems

8.2.3 Statistische Formanalyse

Zur Charakterisierung des Messabbildes wird der aus der Formanalyse bestehende Ansatz von Matuszyk, Cardew-Hall und Rolfe auf das vorliegende Problem übertragen (Matuszyk et al. 2010). Eine Komplexitätsreduktion wird durch die Betrachtung von Punkten innerhalb des Flanken-Koordinatensystems und die Untersuchung aller drei Raumdimensionen erreicht. Im ersten Schritt wird das Punktverteilungsmodell für die Cluster bestimmt und die Positionsinformation in der Profilrichtung (erste Dimension des Flanken-Koordinatensystems) beschrieben. Im zweiten Schritt werden Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten und die Position in der Flankenrichtung (zweite Dimension) charakterisiert. Der nächste Schritt beschreibt die Position in Abweichungsrichtung (dritte Dimension) und schließt die Interaktion mit Punkten aus anderen Clustern ein. Im letzten Schritt wird das Zufallsverhalten der Abweichungen analysiert. Somit können anschließend realistische, künstliche Punktwolken von dem Mikrozahlrad erzeugt werden.

Im ersten Schritt wird das Punktverteilungsmodell für die Cluster bestimmt und die Positionsinformation in der Profilrichtung (erste Dimension des Flanken-Koordinatensystems) beschrieben. Im zweiten Schritt werden Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten und die Position in der Flankenrichtung (zweite Dimension) charakterisiert. Der nächste Schritt beschreibt die Position in Abweichungsrichtung (dritte Dimension) und schließt

die Interaktion mit Punkten aus anderen Clustern ein. Im letzten Schritt wird das zufällige Verhalten der Abweichungen analysiert. So können in späteren Schritten realistische, künstliche Punktwolken von dem Mikrozahnrad erzeugt werden. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Die Charakterisierung in Profilrichtung beschreibt das Verhalten von Messdatenpunkten innerhalb ihres Clusters. Die Kenntnis über die Art der zugrundeliegenden Verteilung innerhalb der Cluster ist entscheidend für das Messabbild entlang des Wälzweges. Um eine zuverlässige Datenbasis zu haben, werden die Datenpunkte eines Clusters über alle 20 Messungen hinweg betrachtet. Hier können auftretende Phänomene aufgrund des größeren Stichprobenumfangs zuverlässiger beschrieben werden. Ein Anderson-Darling-Test der Daten ergab das Fehlen einer Normalverteilung. Stattdessen haben sie den Charakter einer komplexen multimodalen Verteilung. Gaußsche Mischverteilungsmodelle (GMM) sind geeignet, solche komplexen multimodalen Verteilungen zu charakterisieren (Lauer 2004). Diese Gaußschen Mischverteilungen bilden ein cluster- und zahnspezifisches Punktverteilungsmodell (PDM). Dazu wird eine multimodale Verteilung aus Normalverteilungen (ND) nach Überprüfung der Normalverteilungsannahme nach Andersen-Darling und mit Hilfe eines Maximum-Likelihood-Schätzers angepasst. Für die Datenpunkte sind Verteilungen von bis zu einer Kombination von fünf Normalverteilungen zulässig, um ein Overfitting zu vermeiden. Die Maximum-Likelihood-Methode wird im Allgemeinen zur Schätzung von Parametern aus Messdaten verwendet. Im Falle einer negativen Log-Likelihood-Funktion können Algorithmen untersucht werden, da sie häufig minimiert werden. Dabei ist der negativste Wert der negativen Log-Likelihood-Funktion das Maximum der Likelihood-Funktion, bei dem die realisierte Verteilung der beobachteten Daten am besten angenähert ist. Daher dient die negative Log-Likelihood als Bewertungskriterium für die gegebenen Verteilungen. Abbildung 0-8 im Anhang A10 zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der negativen logarithmischen Likelihood der Cluster der linken und rechten Flanke, wie sie in Abbildung 8-4 zu sehen sind, über 20 Wiederholmessungen für alle 13 Zähne. Für die linken Flanken ist eine hohe Wahrscheinlichkeit im Bereich von $[-2876; -777]$ zu beobachten. Die rechten Flanken zeigen ebenfalls einen guten Bereich der Wahrscheinlichkeit zwischen $[-2551; -481]$. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Abbildung 0-9 im Anhang A10 zeigt ein Beispiel für die sich ergebende Wahrscheinlichkeitsdichte der Abwälzposition innerhalb eines Clusters für einen Zahn. Diese Verteilungen werden für alle Einzelcluster exportiert. Für die spätere Verarbeitung in der Skin

Model Shape Erstellung wird jedoch anstelle des hier dargestellten Abwälzweges der Wälzwinkel der Evolventengeraden benötigt (DIN ISO 21771). Zu diesem Zweck werden die Verteilungen in die entsprechenden Verteilungen im Bereich des Wälzwinkels transformiert. Mit Hilfe des zum Punkt gehörenden Radius und des Basisdurchmessers des Zahnrades kann auf die Koordinate des Basiskoordinatensystems geschlossen werden. Diese Information kann dann verwendet werden, um den Wälzwinkel auf einer Geraden mit Hilfe der Kreisevolventengeometrie [Basisradius r_b multipliziert mit der Evolventenfunktion des Eingriffswinkels α] und der Evolventenfunktion [$inv(\alpha) = tan(\alpha) - \alpha$] zu ermitteln (DIN ISO 21771). Die resultierenden Verteilungen im Bereich des Wälzwinkels werden ebenfalls als Verteilungsobjekte innerhalb einer Matrix exportiert und dienen als Vorgabe für die Positionen in X- und Y-Richtung der nicht-abweichenden Zahnflanken bei der Erstellung der Skin Model Shapes. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Die Flankenrichtung beschreibt die Dimension entlang der Zahnbreite. In Abbildung 8-4 ist eine signifikante Regelmäßigkeit der Punkte innerhalb eines Clusters zu erkennen, die bereits untersucht wurde. Diese Regelmäßigkeit im Messabbild zeigt sich auch bei der Analyse der Punktabstände. Aufgrund der optischen Messmethode können jedoch Ausreißer auftreten. Das Verhalten von Messpunkten in Flankenrichtung wird anhand der Auftretenswahrscheinlichkeit des entsprechenden Messpunktes innerhalb der Wiederholungsmessungen bestimmt. Zur Charakterisierung werden die Punkte in Flankenrichtung dann in Teilräume mit individuellen Auftretenswahrscheinlichkeiten unterteilt. Die Punktabstände ergeben sich aus den Pixelabständen von $0,76 \mu\text{m}$ und dem gewählten Downsampling-Faktor, der Quadrate von Pixeln zusammenfasst. Der Downsampling-Faktor von 16 führt zu Messpunktabständen von etwa $24,5 \mu\text{m}$. Für die Darstellung der Lage und des Auftretens der Punkte wurden für alle Cluster aller Zähne die entsprechenden Positionen mit zugeordneten Wahrscheinlichkeiten ermittelt. Abbildung 0-10 im Anhang A10 visualisiert diese Auftretenswahrscheinlichkeit. Bei den linken Flanken sind generell nur wenige Datenpunkte mit geringen Wahrscheinlichkeiten zu beobachten. Hier dominieren einzelne Ausreißer, da die Form der Fertigungsabweichung der messtechnischen Erkennung entgegenkommt, während die gut gefertigte rechte Flanke eine schlechtere Erkennungsmöglichkeit aufweist, siehe grün bis blaue Punkte in der Abbildung 0-10 im Anhang A10. In Flankenrichtung schließlich ist kein signifikantes Verhalten für die Auftretenswahrscheinlichkeit zu erkennen, da hier alle

Punkte mit hoher Auftrittswahrscheinlichkeit vorliegen. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Die Formabweichung in Profilrichtung beschreibt den Abweichungsbereich um eine regressierte Messpunktklinie. Die untersuchten Zahnräder zeigen ein systematisches Muster in Profilrichtung, und dieses systematische Muster sowie zufällige Ausreißer sind für die Formabweichung verantwortlich. Ein systematisches Verhalten der Form des Zahnrades in Profilrichtung wird in Abbildung 0-11 im Anhang A10 hinsichtlich des Abweichungsmaßes des Flanken-Koordinatensystems. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Das systematische Verhalten zwischen Clustern ist daher ein Faktor, der untersucht werden muss. Die beobachteten Wechselwirkungen werden daher für jeden Zahn innerhalb der Messungen einzeln bestimmt. Zu diesem Zweck wird für jedes Cluster das Verhältnis zwischen der Abweichung und der maximalen positiven oder negativen Abweichung bestimmt. Die innerhalb der Messung auftretenden Formkoeffizienten werden dann über die 20 Wiederholungsmessungen gemittelt. Daraus ergibt sich eine Matrix mit zahnspezifischen Beiträgen der Cluster zur Bauteilform. Für das systematische Verhalten in der Abweichungsdimension werden jedoch die Messpunkte über Cluster hinweg sowohl für die Zähne als auch für die Messungen einzeln betrachtet. Das beobachtete Verhalten zwischen Clustern wird durch den Anteil an der Abweichung des Clusters beschrieben. Anschließend wird die Differenz zwischen der größten und kleinsten Abweichung gebildet und auf einen Bereich von $[-1,1]$ normiert. Das Ergebnis ist eine systematische S-förmige Struktur der Flanke, wie in Abbildung 0-11 im Anhang A10 zu erkennen ist. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Untersuchungen in Flankenrichtung ergaben überwiegend zufällige und schwach interagierende Abweichungen innerhalb eines Zahns. Für diese Untersuchung wird die Flanke in Abschnitte entlang der Zahnbreite unterteilt, um unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten und Skalierungsfaktoren für Ausreißer zu berücksichtigen. In einem nächsten Schritt wurden Ausreißerwahrscheinlichkeiten für die übrigen Bereiche ermittelt. Dazu wurden die Messpunktabweichungen innerhalb der Cluster über 20 Messungen betrachtet. Die Zahnflanke wird daher in neun Abschnitte unterteilt, und die Auftretenswahrscheinlichkeit von Ausreißern sowie die Abweichung der Ausreißer werden für jeden Zahn und jede Flanke einzeln bestimmt. Diese Unterteilung wird aufgrund der Bedingung, dass mindestens zwei Punkte innerhalb eines Abschnitts liegen müssen,

und des mittleren Punktabstands in Kombination mit der Zahnbreite gewählt. Abbildung 0-12 im Anhang A10 zeigt die Pearson-Korrelationen zwischen den auftretenden Abweichungen der jeweiligen Unterräume mit denen der anderen Zähne. Hier sind deutliche Korrelationen zwischen fast allen Zähnen zu erkennen. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Diese Korrelationen ist auch in geringerer Form zwischen den Clustern Zahnflanke zu beobachten, wie es in Abbildung 0-13 im Anhang A10 zu sehen ist. Dies zeigt zudem die schwachen Abhängigkeiten von zufälligen Ausreißern von einem bestimmten Zahn oder Cluster. Es kann daher festgestellt werden, dass eine cluster- und zahnspezifische Beschreibung der Randbedingungen nicht notwendig ist. Abbildung 8-5 veranschaulicht die Ausreißereigenschaften der Formanalyse. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

Die Häufung von Ausreißern ist im äußeren Bereich deutlich an den blauen Punkten erkennbar und nimmt im inneren Bereich der Flankenrichtung ab, siehe Abbildung 8-5. Im Ergebnis wurden die auftretenden Abweichungen der Messdaten intensiv analysiert, um in den folgenden Kapiteln als Grundlage für die Erstellung künstlich erzeugter Verzahnungspunktwolken zu dienen. (A_Bott 2022; Gauder et al. 2023b)

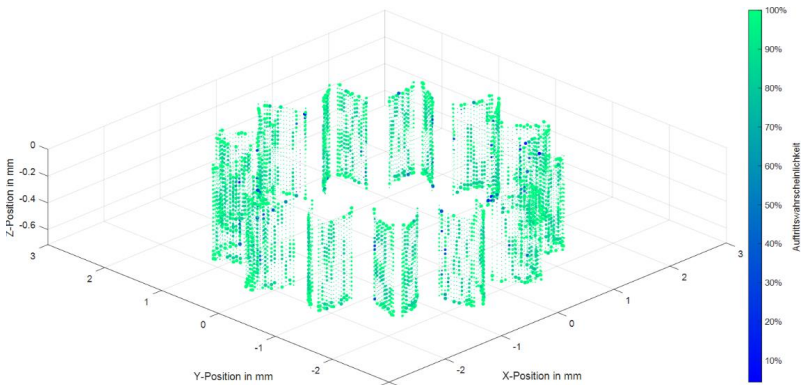


Abbildung 8-5: Auftretenswahrscheinlichkeit für die Datenpunkte aus 20 Messungen

8.3 Generierung von künstlichen Zahnrädern

In diesem Abschnitt wird die künstliche Generierung der Zahnräder erläutert. Dazu wird beschrieben, wie ein hoher Realitätsgrad der künstlich erzeugten Daten erreicht wird.

Im Allgemeinen hat die nominelle Form des Zahnrads im Vergleich zur Punktwolke, die mit der Reany-Software ausgewertet wurde, aufgrund ihrer optimalen Punktmuster einen geringen Realitätsgrad. Der Realitätsgrad wird durch die aus der Formanalyse gewonnenen Bedingungen erhöht. Diese optimiert den künstlich erzeugten Datensatz mit einem durch das optische Messverfahren charakteristischen Messabbild. Um den Realitätsgrad der Daten zu maximieren, wird zusätzlich der Bereich der bewerteten Unsicherheiten des Messverfahrens auf die Datensätze aufgesampelt. Auf diese Weise können realistische Abbilder der optischen Messdaten künstlich erzeugt werden. Abbildung 8-6 visualisiert dieses Vorgehen.

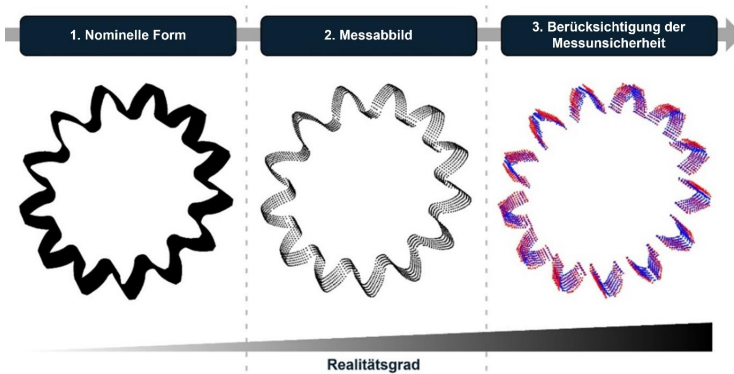


Abbildung 8-6: Stufen des Realitätsgrades der Punktwolken (Gauder et al. 2023b)

Die Erstellung einer Geometrie, die dem Messabbild der Fokusvariation ähnelt, ist der erste Schritt im Generierungsprozess (vgl. Abbildung 8-6). Dabei werden für jeden Datenpunkt zufällig entsprechend der jeweiligen Wahrscheinlichkeit Punkte gezogen und damit die in dieser Ausprägung vorhandenen Punkte des Clusters und ihre Position in Flankenrichtung festgelegt. Für jeden der Datenpunkte wird ein Wälzwinkel aus der zugrundeliegenden Verteilung gezogen. Diese Sequenzschritte werden für jedes Cluster durchgeführt, wodurch die Darstellung eines Messabbildes basierend auf der Fokusvariationstechnologie entsteht.

Im anschließenden Schritt erfolgt die Übertragung der ermittelten Flankenstruktur auf die ideale Geometrie. Hierzu wird der Wälzweg berechnet und ein Stützpunktegitter

generiert. Dieses Gitter ist in Flankenrichtung gleichmäßig verteilt, während in Profilrichtung die Gitterpunkte auf den Mittelpunkten der jeweiligen Cluster positioniert werden. Die Verschiebungsvektoren für die Stützpunkte werden mithilfe des in der statistischen Formanalyse abgeleiteten Koeffizienten, des Skalierungsfaktors und der halben Formabweichung ermittelt. Die halbe Formabweichung wird verwendet, da die Koeffizienten in einem Raum von -1 bis $+1$ angesiedelt sind. Die resultierende Punktwolke wird durch kubische Splines in eine Oberfläche interpoliert und an den Stellen der vorhandenen Datenpunkte ausgewertet. Die dadurch erhaltene Verschiebung in Normalenrichtung der Evolvente für jeden einzelnen Datenpunkt wird auf die ursprüngliche Flanke aufgesampelt. Diese Strukturierung der Flanken erfolgt separat für rechte und linke Seiten. Im nächsten Schritt werden die Fertigungsabweichungen auf die Punktwolke übertragen. Hierbei wurde die Methode von Schiller et al. (2022) unter Berücksichtigung der Laufzeiteffizienz optimiert, wobei nicht notwendige Funktionen wie die Berücksichtigung von Balligkeiten entfernt wurden (Schiller et al. 2022). Schließlich wird die zufällige Abweichung auf die Punktwolke angewendet. Dies erfordert die Erstellung eines Stützpunktegitters und die Berechnung des Verschiebungsvektors. Letzterer ergibt sich aus dem Produkt von zufälligen Ziehungen, die den vorher ermittelten Wahrscheinlichkeiten in den Flankenbereichen und der beobachteten Größe der Ausreißer in diesen Bereichen entsprechen. Dieses Vorgehen wird für sämtliche Zähne wiederholt. Am Ende des Prozesses erfolgt der Export der resultierenden Punktwolke. Der Code des Generierungsprozesses ist im Anhang A7 in Abbildung 0-7 zusammengefasst.

Bei einer Variation der Eingangsparameter müssen die geometrischen Eigenschaften der relevanten Bereiche des Zahnrads variiert werden. Die Verwendung von variierenden Zahnradabweichungsparametern, angewandt auf das erzeugte Messabbild, kann somit die Variation der Messunsicherheit repräsentieren. Es ist zu beachten, dass sich die jeweilige Gesamtabweichung aus der Kombination von Form- und Winkelabweichung ergibt. Daher wurden diese beiden Größen für Profil- und Flankenrichtung berücksichtigt. Die Teilung wird aus dem Bogenabschnitt der Verzahnung zwischen zwei Flanken (links und links oder rechts und rechts) bestimmt. Die zur Bestimmung verwendeten Messpunkte unterliegen jedoch bereits der auftretenden Messunsicherheit der einzelnen Flanken. Die Messunsicherheit der Teilung entspricht einer Überlagerung der Messunsicherheiten aus den Punkten der Zahnflanken. Eine Berück-

sichtigung der Unsicherheit der Teilungsabweichungen zusätzlich zu den Messunsicherheiten der Zahnflanken würde daher eine Überschätzung der auftretenden Unsicherheiten bedeuten. Die Addition der Teilungsabweichungen wird daher in dem verfolgten Ansatz nicht durchgeführt, da sie bereits indirekt berücksichtigt wird. Veranschaulicht wird dieser Effekt in Abbildung 8-7 dargestellt, wobei der Unsicherheitsbereich der Teilungs-Einzelabweichung f_{pi} durch die bereits vorhandenen Unsicherheitsbereiche der Messpunkte repräsentiert wird. (Gauder et al. 2023b)

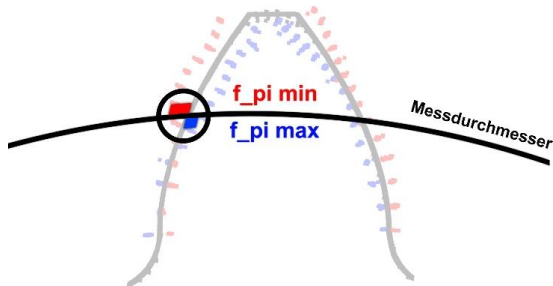


Abbildung 8-7: Indirekte Berücksichtigung der Unsicherheiten des Teilungsabweichung (Gauder et al. 2023b)

8.3.1 Validierung

Um eine Bewertung des Funktionsverhaltens der erstellten Skin Model Shapes anhand des implementierten Ansatzes vorzunehmen, werden für jede der 20 Wiederholmesungen der Kopfswelle jeweils 100 entsprechende künstliche Verzahnungen generiert und daraufhin simuliert. Diese Vorgehensweise zielt darauf ab, eine Minimierung der Beeinflussung durch statistische Effekte zu erreichen. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse für die vier Kenngrößen der Einflanken-Wälzprüfung aus Tabelle 2-4 ausgelesen und die Simulationsgenauigkeit der künstlich generierten Verzahnungen ermittelt. Die folgende Gleichung zeigt beispielhaft den Zusammenhang für die Einflanken-Wälzabweichung F'_i der j-ten Messdaten (mess) und der k-ten Skin Model Shape (SM).

$$\text{Simulationsgenauigkeit}_{F'_{i,jk}} = \left(1 - \frac{F'_{i,meas,j} - F'_{i,SM,jk}}{F'_{i,meas,j}} \right) * 100 [\%] \quad \text{Formel 8-1}$$

Diese Simulationsgenauigkeit erlaubt die Bewertung der Repräsentativität des implementierten Ansatzes. Durch die Generierung von 100 Skin Model Shapes ergibt sich eine Schwankungsbreite der Ergebnisse. Für die nachfolgende Bewertung werden die

Maxima und Minima der Genauigkeit zwischen beiden Methoden und dem Median betrachtet. Die Simulationsgenauigkeit wird für die Einflanken-Wälzprüfung der linken Flanken betrachtet. Die Simulationsgenauigkeit in Abbildung 8-8 zeigt, dass maximale Genauigkeiten an den linken Flanken von bis zu 99,998% beobachtet werden können. Der Median liegt ebenfalls über 90%.

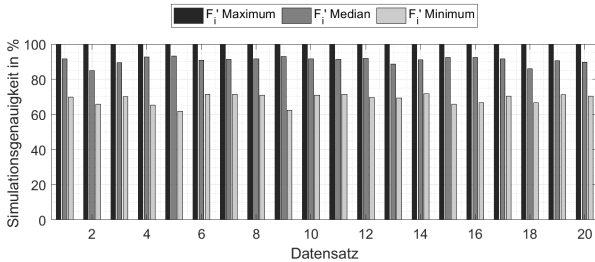


Abbildung 8-8: Simulationsgenauigkeit der Skin Model Shapes für 20 Datensätze der Einflanken-Wälzabweichung der linken Flanken (Gauder et al. 2023b)

Ähnliche Spannen sind für die Maximal- und Medianwerte an den rechten Flanken zu beobachten, siehe Abbildung 8-9. Somit können für die Einflanken-Wälzabweichung die erzielten Ergebnisse als durchweg positiv und vorteilhaft betrachtet werden. Der Minimalwert von ca. 65% für die linke Flanke und ca. 50% für die rechte Flanke beeinflusst die Bewertung nur minimal. Diese Schwankungen resultieren aus dem statistischen Charakter der gegebenen Verteilungen und Extremwertkombinationen. Die beobachteten Maximalwerte sowie der Median von über 90% validieren die Darstellung des Messabbildes durch die Skin Model Shapes. Folglich kann der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Charakterisierung von Messabbildern und die entsprechende Darstellung mittels Skin Model Shapes zur Bestimmung der Simulationsunsicherheit verwendet werden. (Gauder et al. 2023b)

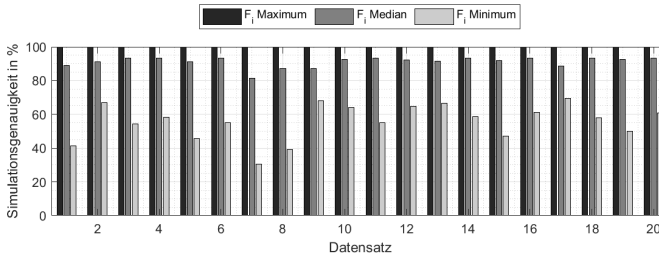


Abbildung 8-9: Simulationsgenauigkeit der Skin Model Shapes für 20 Datensätze der Einflanken-Wälzabweichung der rechten Flanken (Gauder et al. 2023b)

8.4 Monte-Carlo-Simulation von Skin Model Shapes

Das Konfidenzniveau der MCS-Verteilungsschätzung für den Anfangsparameter hängt von der Anzahl der durchgeführten Ziehungen ab. Die Anzahl der Stichproben $M = 10^6$ wird hier als Standard verwendet (JCGM 100:2008). Aufgrund der Simulationsdauer von etwa 11 Sekunden ist die Durchführung von einer Million Versuchen jedoch nicht realisierbar. Diese würden etwa 128 Tage in Anspruch nehmen. Ferner ist auch hier ein ausreichendes Konfidenzniveau nicht gewährleistet. Daher wird für das MCS ein adaptiver Ansatz gewählt. Zum einen kann die notwendige Simulationszeit reduziert werden und zum anderen kann das Konfidenzniveau garantiert werden. Der darauf basierende adaptive Ansatz wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Janssen et al. erweitert bzw. modifiziert (Janssen 2013; JCGM 101:2008). Zu diesem Zweck werden die empfohlenen Stichproben von $M = 10^6$ als Ausgangswert herangezogen und die Anzahl der Stichproben mit Hilfe eines optimierten LHS bei gleichem angestrebten Konfidenzniveau auf 15.000 reduziert. Für das LHS werden die Zahnradparameter aus Tabelle 5-4 entsprechend den Bereichen von Tabelle 8-1 variiert. Daraus ergibt sich eine Matrix, dass für jede der 26 Zahnflanken eine Form- und Winkelabweichung für die Profil- und Flankenrichtung enthält. Bei der Zahnradgenerierung werden die individuell vorgegebenen Abweichungen auf die Zahnflanke geprägt, so dass die Variation der Parameter im Messunsicherheitsbereich auf das zuvor erzeugte Messabbild angewendet wird (Gauder et al. 2023b).

Tabelle 8-1: Variationsbereich der Unsicherheit der Zahnradparameter

Unsicherheit	Richtung der Flanke	Richtung des Profils
Winkelabweichung	[-2,3 μm ; 2,3 μm]	[-3,4 μm ; 3,4 μm]
Formabweichung	[0 μm ; 4,0 μm]	[0 μm ; 3,0 μm]

Nun müssen die Unsicherheiten durch Modifikationen auf das Messabbild appliziert werden. Die Flanken-Winkelmodifikation beschreibt den zunehmenden Rückzug der Flanke über die Zahnbreite, wie in Abbildung 8-10 zu sehen ist. Die Verschiebung eines beliebigen Punktes auf der Flanke erfolgt immer entlang ihrer Normalen. Daher kann der Abstand der Verschiebung mit dem Strahlensatz ermittelt werden, wobei $C_{H\beta}$ die tatsächliche Änderung ist, b die Zahnbreite, b_i die Breitenanteile und c_i den Anteil der Abweichung repräsentiert (vgl. Formel 8-2). Nach der Bestimmung des Wälzweges über den Radius kann diese Berechnung analog für die Profil-Winkelabweichung durchgeführt werden.

$$\frac{C_{H\beta}}{b} = \frac{c_i}{b_i} \rightarrow c_i = C_{H\beta} * \frac{b_i}{b}$$

Formel 8-2

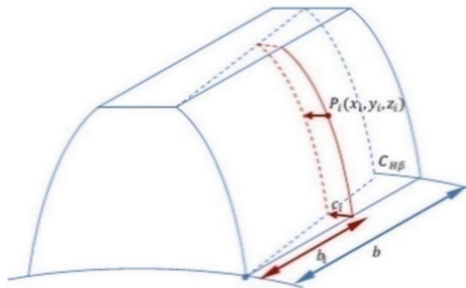


Abbildung 8-10: Änderung des Flankenwinkels

Im Vergleich zu den Winkelabweichungen wurden die Formabweichungen durch systematisches und zufälliges Verhalten erzeugt, welches in der Formanalyse untersucht wurde. Um die generierten Daten zu simulieren, ist eine zweite Vorverarbeitung notwendig. Die generierten Daten werden erneut mit Hilfe eines ICP-Algorithmus an der CAD-Nominalform ausgerichtet. Nach der Bestimmung der Stirnfläche und dem Zuschnitt auf die relevanten Bereiche der Verzahnung werden einzelne Ausreißer durch Abstände gefiltert. Im letzten Schritt werden die von Reany benötigten Profilschnitte erstellt. Nach dem Export stehen die generierten Daten dann für die Simulation bereit.

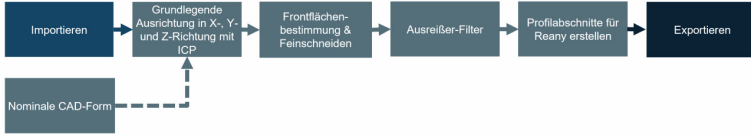


Abbildung 8-11: Vorverarbeitung II, in dem die erzeugten Zahnräder für die Simulation vorbereitet werden (Gauder et al. 2023b)

8.5 Simulation der künstlich generierten Zahnräder

Im nächsten Schritt werden die generierten Skin Model Shapes automatisch mit der Software Reany simuliert und deren Drehwegabweichung und Verzahnungsabweichungen in einer CSV-Datei gespeichert. Die Automatisierung des Simulationsprozesses hinsichtlich des Ladens neuer Dateien und der Speicherung der Initialisierungsparameter erfolgt über eine Batch-Datei. Nach der Simulation werden die Chargen in Bezug auf ihre statistischen Parameter ausgewertet und auf ihre Stabilität untersucht. Abbildung 8-12 veranschaulicht das allgemeine Vorgehen zur Bestimmung der Standardunsicherheit aus der Simulation pro Charge n .

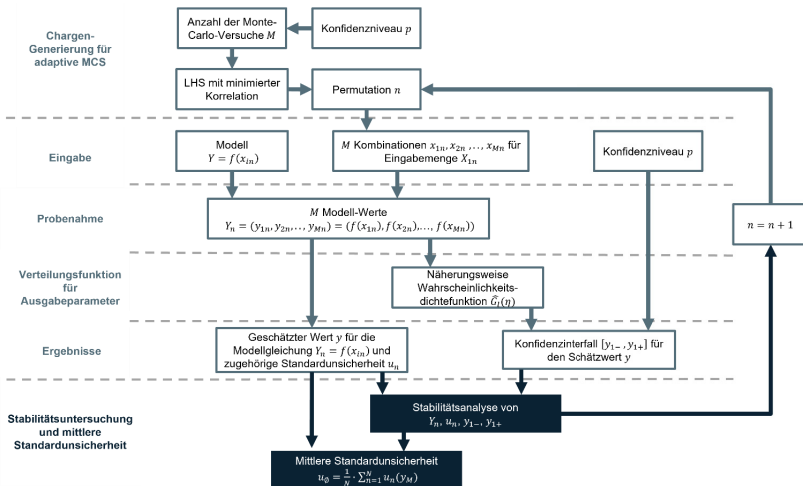


Abbildung 8-12: Modifizierter Ansatz zur Bestimmung der Standardunsicherheiten der Simulation auf der Grundlage von Messunsicherheiten gemäß GUM Supplement 1 (Gauder et al. 2023b; JCGM 101:2008)

Schließlich kann die resultierende Standardunsicherheit u_ϕ aus einem stabilen Mittelwert der Standardunsicherheiten u_n der N Chargen mit y_M Simulationsergebnissen nach der folgenden Formel 8-3 pro Charge n abgeschätzt werden. Hier ist aufgrund der Untersuchungen von Janssen et al. eine Stabilisierung der Ergebnisse innerhalb weniger Chargen zu erwarten (Janssen 2013). Dadurch kann die notwendige Simulationszeit erheblich reduziert und gleichzeitig ein Vertrauensniveau gewährleistet werden.

$$u_\phi = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N u_n(y_M) \quad \text{Formel 8-3}$$

Der Zeitbedarf zwischen Generierung und Simulationsergebnis für die Skin Model Shapes setzt sich zusammen aus der Zeit für die Generierung der Punktwolke, der Vorverarbeitung II für den Import in Reany und der Simulation selbst. In den drei Komponenten werden Übertragungszeiten berücksichtigt. Tabelle 8-2 zeigt die ermittelten Zeiten für die einzelnen Schritte in der Monte-Carlo-Simulation.

Tabelle 8-2: Laufzeit der einzelnen Module innerhalb der Monte-Carlo-Simulation

Generierung	Vorverarbeitung	Simulation	Ergebnis
2,08 s	6,04 s	11,00 s	19,12 s

Mit Hilfe des raumfüllenden LHD und des adaptiven Ansatzes kann die Zykluszeit einer Simulationscharge, entsprechend des Ablaufs in Abbildung 8-12, auf 3,3 Tage begrenzt werden. Aufgrund des optimierten LHS-Designs ist die Stabilität der Simulationsergebnisse auch bei der zweiten Charge zu erwarten. Dies wird nach dem GUM mit Hilfe der Standardunsicherheit überprüft. Zur Bestimmung dieser Parameter wurde die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion auf Basis der Modellwerte durch lineare Interpolation der Vektoren der aufsteigend sortierten Ausgangsgrößen ermittelt. Die erhaltene Verteilung ermöglicht die Bestimmung des Erwartungswertes, der Varianz und der Grenzen des Konfidenzintervalls einer Charge mit 15.000 Stichproben (vgl. Kapitel 8.3.1). Die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 8-13 veranschaulicht die resultierende Ähnlichkeit mit einer Normalverteilung. (Gauder et al. 2023b)

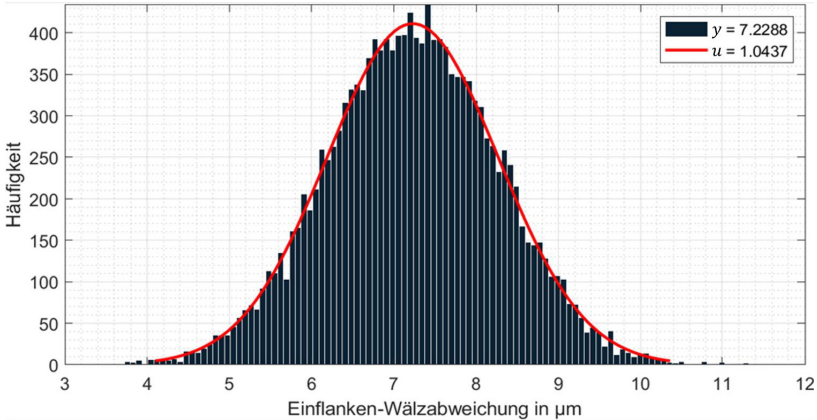


Abbildung 8-13: Häufigkeitsverteilung mit angepasster Normalverteilung der Charge 2 (Gauder et al. 2023b)

Nach GUM Supplement 1 gelten die Ergebnisse des adaptiven Verfahrens als stabil, wenn die zweifache Standardabweichung der Mittelwerte und die Standardabweichungen sowie Konfidenzintervallgrenzen für alle Variablen kleiner als die erforderliche Güte der Approximation der Wahrscheinlichkeitsdichte sind (JCGM 101:2008). Die Stabilität der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation ist erst gegeben, wenn alle acht Parameter stabil sind (vier Parameter der Einfanken-Wälzprüfung sowohl für die linken als auch rechten Flanken). Tabelle 8-3 zeigt die Veränderung der Ergebnisse y und die Standardunsicherheit u für die Einfanken-Wälzabweichung der linken Flanken. Diese Tabelle veranschaulicht die Ergebnisse für die Parameter der einzelnen Chargen, jeweils mit 15.000 Stichproben (vgl. Kapitel 8.3.1), sowie die daraus resultierende zweifache Standardunsicherheit der Parameter über die Chargen hinweg. Dabei sind nur geringfügige Veränderungen im einstelligen Nanometerbereich für die zweifache Standardunsicherheit festzustellen. Die minimalen und maximalen Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls zeigen hier die deutlichsten Veränderungen. Allerdings befinden sich auch diese nur im niedrigen zweistelligen Nanometerbereich. Der erforderliche Genauigkeitsgrad bei der Approximation der Wahrscheinlichkeitsdichte und somit der Standardunsicherheit beträgt 100 nm. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse gemäß der Definition des GUM Supplement 1 als stabil anzusehen (JCGM 101:2008). Dies gilt ebenfalls für alle anderen Ergebnisse. Der signifikanteste Wert für das Konvergenzkriterium liegt bei 38 nm, deutlich unterhalb der Zielgrenze. Daher kann die durchschnittliche

Standardunsicherheit der Chargen als repräsentative Standardunsicherheit des Modells betrachtet werden (Gauder et al. 2023b). Dies wurde in einer anschließenden Untersuchung noch validiert, bei der die Charge auf 1000 Stichproben reduziert wurde, um die Stabilität der Parameter iterativ zu überprüfen. Nach jeder Charge wurde die zweifache Standardabweichung erneut berechnet. Die Stabilität ist gegeben, sobald alle acht Parameter konstant unter eine Stabilitätsgrenze von 100 nm fallen. Abbildung 8-14 zeigt die Auswertung einer „worst-case“ Betrachtung. In diesem Fall haben die ermittelten Parameter den Grenzwert vor 30.000 Proben unterschritten. Die Stabilität ist somit gemäß GUM Supplement 1 nachgewiesen (JCGM 101:2008).

Tabelle 8-3: Ergebnisse, Unsicherheiten und Stabilität der Chargen in μm

$F'_{i,left}$	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Stabilität über Charge 1, 2 $2 s_{[1,2]}$	Stabilität über Charge 1, 2, 3 $2 s_{[1,2,3]}$
y_{mean}	7.2294	7.2288	7.2323	0.0008	0.0038
y_{min}	5.1262	5.1648	5.1579	0.0216	0.0317
y_{max}	9.3326	9.3161	9.3067	0.0232	0.0261
u	1.0516	1.0437	1.0372	0.0112	0.0144

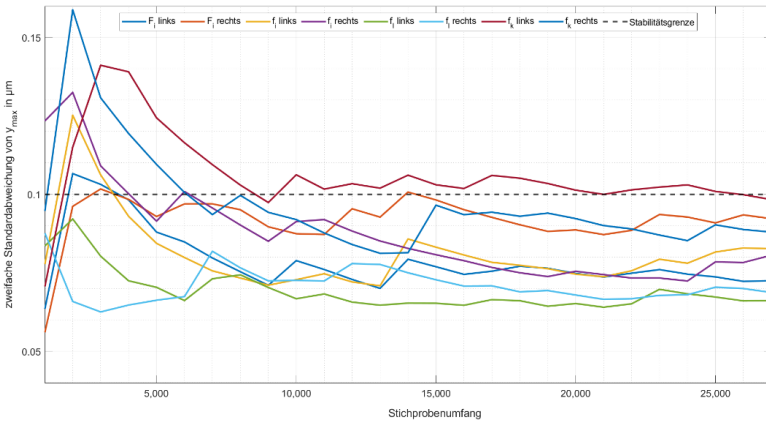


Abbildung 8-14: Stabilitätsanalyse der untersuchten Funktionsparameter (Gauder et al. 2023b)

8.6 Diskussion der Ergebnisse

8.6.1 Bewertung der Simulationsunsicherheit

Abschließend wird die Simulationsunsicherheit quantifiziert. Sie besteht aus der Standardunsicherheit $u_{cal,EWP}$ der Kalibrierung des Einflanken-Wälzprüfstands, der Standardunsicherheit u_{bias} aus der systematischen Abweichung zwischen Simulation und Prüfstand und der Standardunsicherheit u_{MU} für die Messunsicherheit bei der optischen Vermessung der Verzahnung für die Simulation, mit einem Erweiterungsfaktor k nach GUM (JCGM 100:2008). Der Erweiterungsfaktor bestimmt die Größe des Vertrauensintervalls.

$$U_{Sim} = k * \sqrt{u_{cal,EWP}^2 + u_{bias}^2 + u_{MU}^2} \quad \text{Formel 8-4}$$

Der Beitrag u_{bias} der zu ermittelnden Simulationsunsicherheit beschreibt die Standardunsicherheit in der Differenz zwischen Einflanken-Wälzprüfstand und Simulation. Zur Ermittlung des Beitrags werden 100 Stichproben aus der Serienfertigung zum Vergleich herangezogen. Diese wurden mit Hilfe eines Prüfstands einer Einflanken-Wälzprüfung unterzogen. Die exportierten Daten und Merkmale ($F'_i; f'_i; f'_k; f'_l$) wurden automatisch ausgewertet. Zur Ermittlung der Simulationsergebnisse wurden die Bauteile mittels Fokusvariation optisch vermessen und einer automatisierten Verarbeitung mit Preprocessing und Simulation unterzogen. Dies gewährleistet die Vergleichbarkeit der Parameter und Signale für spätere Auswertungen. Die resultierenden Simulationsdaten wurden ebenfalls auf ihre Eigenschaften hin bewertet. Im nächsten Schritt wurden die Parameter aus dem Einflanken-Wälzprüfung des jeweiligen Zahnrades mit denen der Simulation verglichen. Die Standardunsicherheit u_{bias} aus der systematischen Abweichung zwischen Simulation und Prüfstand wird als Root Mean Square Error (RMSE) anhand der 100 untersuchten Zahnräder aus der Serienfertigung ermittelt.

$$u_{bias} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (F_{i,n,EWP} - F_{i,n,SIM})^2}{N}} \quad \text{Formel 8-5}$$

Für die Bestimmung der Standardunsicherheit u_{MU} aufgrund von Messunsicherheiten werden die exportierten CSV-Dateien der Simulation zur Parameterauswertung (vgl. Tabelle 2-4) importiert und ausgelesen. Die ermittelten Werte werden auf ihre Verteilung hin untersucht und die zugrunde liegende Standardabweichung der Daten ermittelt, siehe Tabelle 8-4. Die Kalibrierunsicherheit des Einflanken-Wälzprüfung $u_{cal,EWP}$

wird aus der gegebenen erweiterten Kalibrierunsicherheit durch Division mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ermittelt.

$$u_{cal,EWP} = \frac{U_{cal,EWP}}{k} \quad \text{Formel 8-6}$$

Auf diese Weise wurde schließlich die Simulationsunsicherheit ermittelt. Tabelle 8-4 zeigt die Unsicherheitsbeiträge und die daraus resultierenden Messunsicherheiten. Die Ergebnisse wurden über die linke und rechte Flanke gemittelt. Der größte Beitrag bei allen Parametern resultiert aus der Standardunsicherheit aufgrund der Abweichung zwischen Prüfstand und Simulation u_{bias} . Die Streuung dominierend mit einer Standardabweichung von 2,67 μm .

Tabelle 8-4: Unsicherheitsbeiträge und daraus resultierende Messunsicherheiten

Parameter	$u_{cal,EWP}$	u_{MU}	u_{bias}	$U_{Sim,k=2}$
F'_l	0,55 μm	0,99 μm	2,67 μm	5,8 μm
f'_l	0,26 μm	1,09 μm	1,72 μm	4,1 μm
f'_r	0,55 μm	0,73 μm	2,29 μm	4,9 μm
f'_k	0,21 μm	1,08 μm	1,92 μm	4,4 μm

8.6.2 Qualifizierung

Die Ergebnisse der Funktionsvorhersagen werden im Rahmen der beabsichtigten Qualitätskontrolle als Messverfahren betrachtet, wobei hier die Forderung nach der Prüfprozesseignung besteht. Zur Bestimmung der Eignung des Messverfahrens werden die Toleranzgrenzen der Funktionsparameter benötigt. Allerdings gibt es für die untersuchten Mikrozahnräder keine Normen oder Richtlinien. Der Gültigkeitsbereich der ISO 1328-1 berücksichtigt nur Zahnräder bis zu einem Modul m (ISO 1328). Da es keine Richtlinien oder Normen für die Tolerierung von Mikrozahnradern gibt, werden die entsprechenden Vorgaben auf den vorliegenden Fall extrapoliert, wie es bereits in den Grundlagen im Kapitel 2.1.5 beschrieben wurde, um daraus das Toleranzfenster zu bestimmen. Nur so kann die Prüfprozesseignung des Messverfahrens nach VDI/VDE 2617 Blatt 8 beurteilt werden (VDI/VDE 2617). Unter Anwendung der VDI/VDE 2617 Blatt 8 ergeben sich die Prüfprozesseignung für die Einflanken-Wälzabweichung und der Einflanken-Wälzsprung nachfolgender Formel. Es ist zu beachten, dass es sich um einseitige Toleranzen handelt, siehe Formel 2-25. Das Verhältnis g_{pp} zwischen der erweiterten Unsicherheit U und der einseitigen Toleranz T sollte kleiner sein als ein Grenzwert $G_{pp} = 0,3$ (VDA-5; VDI/VDE 2617).

Für die ermittelten Toleranzbereiche und die zuvor bewerteten Unsicherheiten der Funktionsprognosen kann schließlich die Prüfprozesseignung ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-5 dargestellt und demonstrieren die Eignung.

Tabelle 8-5: Analyse der Prüfprozesseignung

Parameter	Toleranz	Erweiterte Unsicherheit	Verhältnis der Prüfprozesseignung g_{pp}
F'_i	26 μm	5,8 μm	0.223
f'_i	16 μm	4,1 μm	0.256

9 Integration des Qualitätsregelkreises

Das folgende Kapitel befasst sich mit der adaptiven Regelung von Fertigungsabweichungen beim Produktionsprozess des Mikrowälzfräsens. Das Ziel ist es, einen Regelungsalgorithmus in der Serienproduktion zu etablieren. Dazu wird die optische Fokusvariationsmesstechnik zur in-line Messung von Mikrozahnradern eingesetzt. Anschließend werden die Auswertung der Messergebnisse auf Basis trainierter Modelle und die Rückführung von Korrekturparametern auf die Werkzeugmaschine durch Regelungsalgorithmen ermöglicht. Kritische Parameter des Fertigungsprozesses werden durch Vorversuche identifiziert, die mittels Latin Hypercube Sampling (LHS) variiert werden. Der daraus resultierende Versuchsplan definiert gezielte Abweichungen für die Herstellung von Kopfwellen, die reale Produktionsschwankungen aufweisen. Die Auswertung nach den kenngrößenbasierten Verzahnungsabweichungen ermöglicht die Modellierung von Einflussgrößen durch Methoden des Maschinellen Lernens. Basierend darauf wird ein Korrekturalgorithmus entwickelt, mit dem die Werkzeugmaschine bei Fertigungsabweichungen geregelt werden kann. (Gauder et al. 2023a)

9.1 Entwicklung eines adaptiven Qualitätsregelkreises

Dieser Absatz beschreibt die Konzeption und Realisierung eines adaptiven Qualitätsregelkreises in der Mikroverzahnungsfertigung von Dentalinstrumenten. Dabei werden das Wälzfräsen, die Datenverarbeitung, der Regelungsalgorithmus, das Dashboard zur Visualisierung und die Validierung betrachtet. So kann diese komplexe Aufgabe durch die Betrachtung der einzelnen Elemente eines Regelkreises strukturiert gelöst werden. Der Ansatz des adaptiven Qualitätsregelkreises wird grafisch in der Abbildung 9-1 dargestellt.

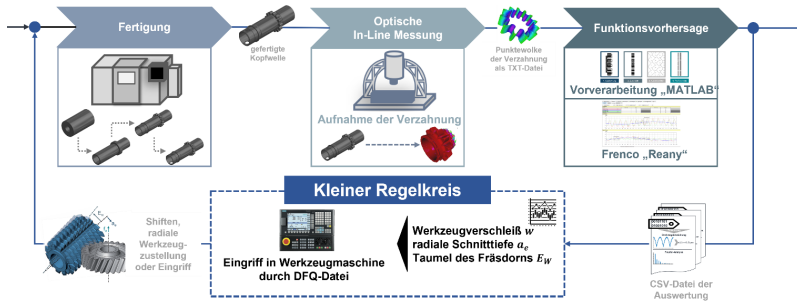


Abbildung 9-1: Darstellung des Qualitätsregelkreises

9.2 Analyse des Wälzfräsprozesses

Im Folgenden wird der Fokus auf den Wälzfräsprozess gelegt, mit welchem die evolventische Verzahnung an der Kopfwelle erzeugt wird. Die entsprechenden Fertigungsparameter des aktuellen Serienprozesses sind in Tabelle 9-1 aufgelistet. Als Frässtrategie wird das Gegenlauffräsen verwendet, bei dem sich die Schneide entgegen der Vorschubrichtung des Zahnrades bewegt. Der axiale Vorschub f_a beträgt 0,05 mm. Die Werte für die radiale Zustellung a_e werden gegenwärtig durch manuelle Korrekturen aufgrund von Zahnweitenmessungen am Bauteil ermittelt. Dabei ist die Zahnweite W_3 als der Abstand zwischen zwei parallelen Ebenen einer linken und einer rechten Flanke über drei Zähne definiert. Ferner sollte die Winkelstellung des Fräasers genau 0° betragen und der Fräsdorn sollte nicht taumeln.

Tabelle 9-1: Parameter des Wälzfräsprozesses

Parameter	Spezifikation
Strategie beim Fräsen	Gegenlauffräsen
Axialer Vorschub f_a	0,050 mm
Radiale Zustellung a_e	Manuell entsprechend der Zahnweite W_3
Schnittgeschwindigkeit v_c	7,5 m/min
Winkelstellung des Fräasers	0°
Taumeln des Fräsdorns E_W	$0 \mu\text{m}$

Der für die Herstellung der Verzahnung verwendete Wälzfräser ist in Tabelle 9-2 beschrieben. Es wird ein Werkzeug von dem Hersteller Diametall verwendet, das einen Außendurchmesser von 16 mm und einen Bohrungsdurchmesser von 8 mm aufweist. Die Breite des einschneidigen Fräasers beträgt 10 mm. Der Fräser hat insgesamt 15 Stollen. Im nächsten Abschnitt folgt eine Zuordnung für die Anwendung.

Tabelle 9-2: Parameter des verwendeten Fräasers

Parameter	Wert
Hersteller	Diametall
Äußerer Durchmesser	16.000 mm
Bohrungsdurchmesser	8.000 mm
Breite	10.000 mm
Steigungswinkel	1° 3'
Anzahl der Gänge	1 [-]
Anzahl der Stollen	15 [-]

9.2.1 Versuchsreihe mit eindimensionalen Variationen

Um die Einflüsse des Wälzfräsens in Bezug auf die Geometrieabweichungen der Mikrozahnräder zu untersuchen, wurden experimentelle Versuchsreihen durchgeführt. Die relevanten Einflussgrößen wurden einzeln variiert, so dass mehrdimensionale Wechselwirkungen ausgeschlossen werden konnten. Diese wurden dann in einer zweiten Versuchsreihe untersucht. Als mögliche Einflussgrößen wurden die radiale Zustellung a_g , der Taumel des Fräsdorns E_W , der axiale Vorschub des Werkzeugs f_a , die Winkellage des Fräasers axial zum Werkstück, die Frässtrategie des Werkzeugs im Vergleich zum gegenwärtigen Gegenlaufräsen und der Verschleiß des Fräasers betrachtet.

Bekannte Variationen der einzelnen Einflüsse innerhalb der Produktion wurden erweitert, um mögliche Trends zu verstärken. Jede gezielte Variation wurde dreimal wiederholt, um Ausreißer zu minimieren. Die individuell variierten Parameter und ihre Schwankungsbreiten sind in Tabelle 9-3 aufgeführt. Die radiale Zustellung a_g wurde in einem Bereich der Zahnweite W_3 von $2,188 \text{ mm} \pm 0,090 \text{ mm}$ in sechs Schritten linear variiert, um ihren Einfluss auf die Zahnweite zu bewerten. Der Taumel des Fräsdorns E_W wurde durch gezieltes Einstellen zwischen $0 \text{ } \mu\text{m}$ und $30 \text{ } \mu\text{m}$ variiert. Der axiale Vorschub des Werkzeugs f_a wurde in einem Bereich von $0,050 \text{ mm} \pm 0,015 \text{ mm}$ variiert. Die Winkellage des Fräasers in Bezug auf das Werkstück wurde um $\pm 45'$ variiert, wobei eine Winkelminute ($1'$) entspricht $\frac{1^\circ}{60}$. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Gleichlauffräsens im Vergleich zum bisherigen Gegenlaufräsen untersucht. Abschließend wurde das Langzeitverhalten beim Werkzeugverschleiß w von jeweils 100 ausgewerteten Zahnrädern untersucht, um die Zahnradabweichungen beim Werkzeugverschleiß zu analysieren. Mit diesem Vorgehen kann der Einfluss auf unerwünschte Verzahnungsabweichungen aufgezeigt werden. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2023a)

Tabelle 9-3: Variationsbereiche der eindimensionalen Versuchsreihen

Parameter	Minimum	Mittlerer Wert	Maximum
Radiale Zustellung a_e	$W_3 = 2,098$ mm	$W_3 = 2,188$ mm	$W_3 = 2,278$ mm
Taumeln des Fräsdorns E_W	0 μ m	15 μ m	30 μ m
Axialer Vorschub f_a	0,035 mm	0,050 mm	0,065 mm
Winkellage des Fräsers	-45'	0'	+45'
Strategie beim Fräsen	Gegenlaufräsen	-	Gleichlaufräsen
Werkzeugverschleiß w	100 Teile	1800 Teile	3600 Teile

Die Ergebnisse der eindimensionalen Variationen sind teilweise im nachfolgenden Absatz, sowie im Anhang A12 aufgeführt.

9.2.2 Identifikation kritischer Einflussgrößen

Bei der Identifizierung der kritischen Einflussgrößen wurden die größten Effekte bei der radialen Zustellung a_e und dem Taumel des Fräsdorns E_W erfasst. Alle relevanten Größen sind in Abbildung 9-2 visualisiert. Während die radiale Zustellung a_e einen direkten Einfluss auf die Zahnweite hat, verändert der Taumel des Fräsdorns E_W die Evolvente des Zahns in zwei Geraden, was eine Änderung der Profilgeometrie zur Folge hat. Die Winkellage des Fräsers zeigt aufgrund der kleinen Winkel und der geringen Zahnbreite von 0,900 mm keine erkennbare Veränderung. Gleiches gilt für die Frässtrategie. Nur im nicht funktionsrelevanten Zahnfußbereich treten marginale Veränderungen auf. Die Verschleißexperimente zeigen lineare Trends im Verzahnungsprofil mit zunehmendem Verschleiß, die im Abschnitt des Korrekturalgorithmus näher betrachtet werden. Ein starker Einfluss des axialen Vorschubs f_a kann nicht festgestellt werden. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2023a)

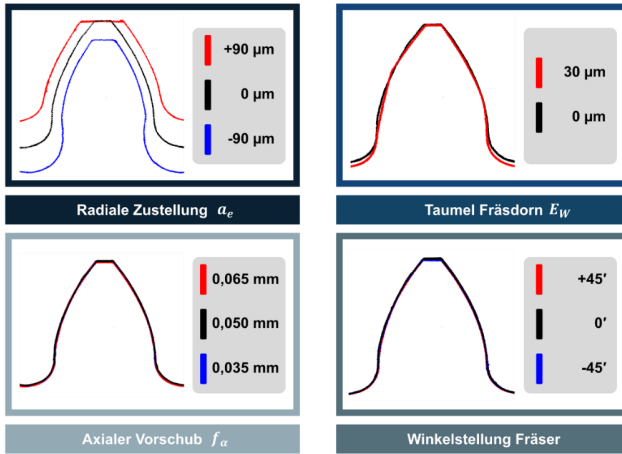


Abbildung 9-2: Auswirkung der Einflussgrößen auf das Zahnprofil (Gauder et al. 2023a)

9.2.3 Versuchsreihe mit mehrdimensionalen Variationen

Auf Basis der Ergebnisse der eindimensionalen Versuchsreihen wurden die radiale Zustellung a_e , der Taumel des Fräsdorns E_W und der axiale Vorschub f_a genauer betrachtet, um die mehrdimensionalen Wechselwirkungen zu analysieren. Der axiale Vorschub wurde aufgrund seiner einfachen Regelbarkeit und möglicher Wechselwirkungen mit a_e und E_W gewählt. Das Prinzip ist in Abbildung 9-3 dargestellt, um die drei Parameter zu visualisieren. Hier ist der Fräser in dunkelgrauer Farbe dargestellt und das hergestellte Zahnrad in grau. Je größer die radiale Zustellung a_e ist, desto mehr Material wird abgetragen, was wiederum die Geometrie des Zahns beeinflusst. Der Taumel des Fräsdorns E_W wird leicht transparent durch eine überlagerte Extremposition des Fräses dargestellt. Dieser Parameter quantifiziert das Taumelverhalten des Fräsdorns, der sich oszillierend auf das Werkstück überträgt. Der axiale Vorschub f_a ist die Geschwindigkeit, mit der sich das Werkzeug durch das Werkstück bewegt. Ein angepasster Vorschub kann dabei die Oberfläche der Verzahnung verändern. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2023a)

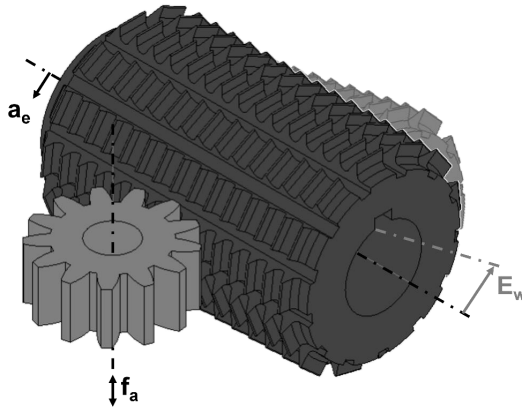


Abbildung 9-3: Kritische Einflussgrößen beim Wälzfräsen nach (Klocke & Brecher 2016)

Nach der Analyse der Einflussgrößen des Wälzfräsprozesses in Bezug auf die Verzahnungsabweichungen werden nun die relevanten Maschinenparameter im Rahmen von mehrdimensionalen Modifikationen in Kombination verändert, um einen Überblick über deren überlagerte Wechselwirkungen zu erhalten. Dazu wurde ein sequentieller Plan unter Verwendung des LHS entwickelt, der im nächsten Abschnitt erläutert wird. Die Ergebnisse der mehrdimensionalen Versuchsreihen dienen als Grundlage für den Korrekturalgorithmus, der aus den Zusammenhängen zwischen Einflussgrößen und den resultierenden Verzahnungsabweichungen Korrekturwerte errechnet. (Gauder et al. 2023a)

Nach der Identifikation der kritischen Einflussgrößen in Bezug auf die Verzahnungsabweichungen werden diese in einen Algorithmus überführt, der die Einflussgrößen darstellen kann. Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe der Versuchsplanung ein Modell ermittelt. Aufgrund der sehr zeitintensiven Produktion von Versuchsteilen mit variierenden Parametern bietet sich ein Modell an, das mehrdimensionale Zusammenhänge mit einer kleinen Stichprobengröße abbilden kann. Hierfür wurde die LHS Modellierung verwendet, die diesen Anforderungen gerecht wird. Die Anzahl der variierenden Stichproben wurde auf 200 festgelegt. Mit Hilfe der Funktion "lhsdesign" in "MATLAB" wurde unter Verwendung von LHS ein Versuchsraum erstellt. Die im Vorfeld als kritisch identifizierten Einflussgrößen wurden als zu variierende Parameter ausgewählt. Diesmal wurden die Parameter in einem reduzierten Korridor variiert, um eine

realistische Streuung für die anschließende Analyse darstellen zu können. (Gauder et al. 2023a)

Die radiale Zustellung a_e wurde in einem minimalen Bereich von $W_3 = 2,188 \text{ mm} \pm 0,020 \text{ mm}$ variiert. Der Taumel des Fräserdorns E_W wurde von $0 \text{ }\mu\text{m}$ bis $20 \text{ }\mu\text{m}$ verändert. Darüber hinaus wurde der axiale Vorschub f_a in einem Intervall von $0,050 \text{ mm} \pm 0,015 \text{ mm}$ variiert. Das Modell bietet einen entsprechenden Versuchsraum für alle 200 zu fertigenden Zahnräder, wobei alle drei Parameter für jedes Teil gleichzeitig variiert wurden, um realistische Überlagerungen der Einzeleffekte sichtbar zu machen. Tabelle 9-4 fasst die Variationsbreite der mehrdimensionalen Versuchsreihe zusammen. Alle anderen Prozessparameter blieben während des Durchlaufs unverändert und wurden überprüft, um eine Verfälschung der Ergebnisse auszuschließen. Der Einfluss anderer Effekte wurde durch die verteilte Produktion der Versuchsteile über einen längeren Zeitraum reduziert.

Tabelle 9-4: Variationsbreite der mehrdimensionalen Versuchsreihen

Parameter	Minimum	Mittlerer Wert	Maximum
Radiale Zustellung a_e	$W_3 = 2,168 \text{ mm}$	$W_3 = 2,188 \text{ mm}$	$W_3 = 2,208 \text{ mm}$
Taumeln des Fräsdorns E_W	$0 \text{ }\mu\text{m}$	$10 \text{ }\mu\text{m}$	$20 \text{ }\mu\text{m}$
Axialer Vorschub f_a	$0,035 \text{ mm}$	$0,050 \text{ mm}$	$0,065 \text{ mm}$

In der nachfolgenden Tabelle 9-5 ist ein Auszug von den ersten 5 der insgesamt 200 produzierten Zahnräder zu sehen. Zur Identifikation wird jedes Zahnrad mit einer eindeutigen Nummer versehen. Zusätzlich sind die entsprechenden Variationsparameter für a_e , E_W , und f_a angegeben. Die vollständige Auflistung von den 200 produzierten Zahnrädern mit den dazugehörigen Variationsparametern kann der Tabelle 0-21 in Anhang A8 entnommen werden.

Tabelle 9-5: Auszug aus dem Versuchsplan der mehrdimensionalen Parametervariation

ID-Nummer	Radiale Zustellung a_e	Taumeln des Fräsdorns E_W	Axialer Vorschub f_a
DoE - 001	$W_3 = 2,204 \text{ mm}$	$4 \text{ }\mu\text{m}$	$0,036 \text{ mm}$
DoE - 002	$W_3 = 2,177 \text{ mm}$	$20 \text{ }\mu\text{m}$	$0,039 \text{ mm}$
DoE - 003	$W_3 = 2,179 \text{ mm}$	$10 \text{ }\mu\text{m}$	$0,056 \text{ mm}$
DoE - 004	$W_3 = 2,190 \text{ mm}$	$18 \text{ }\mu\text{m}$	$0,049 \text{ mm}$
DoE - 005	$W_3 = 2,203 \text{ mm}$	$2 \text{ }\mu\text{m}$	$0,049 \text{ mm}$

Zusätzlich zum Versuchsplan ist eine Visualisierung aller Kombinationen in Form eines Versuchsraums hilfreich. Die drei variierten Parameter spannen die Achsen auf, die den Versuchsraum der in Abbildung 9-4 gezeigten Grafik darstellen.

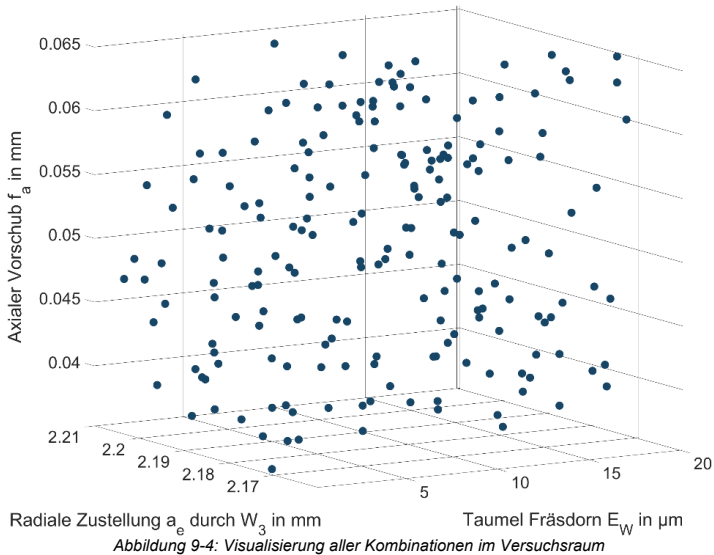


Abbildung 9-4: Visualisierung aller Kombinationen im Versuchsraum

Das LHS hat einen gleichmäßig verteilten Versuchsplan mit einem kleinen Stichprobenumfang geschaffen. Ein größerer Umfang erscheint in der Produktionsumgebung eines Serienprozesses unrealistisch. Jedes der 200 Versuchsteile wurde nach der Produktion mit der Fokusvariation vermessen und auf Basis der Verzahnungskenngrößen ausgewertet. Da bei der zahnindividuellen Analyse der Kopfwelle mit 13 Zähnen auch 13 Ergebnisse pro Flanke generiert werden, konnten daraufhin auch statistische Kenngrößen wie Mittelwert (MW), Median (MED), Minimum (MIN), Maximum (MAX) und Standardabweichung (STD) abgeleitet werden. Diese extrahierten Informationen unterstützen die nachfolgende Analyse bei der Identifizierung kritischer Einflussgrößen des Wälzfräsprozesses. Als Methode zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen den Einflussgrößen und den Verzahnungsabweichungen wurde die Korrelationsanalyse eingesetzt. Die ermittelten Abweichungen und die daraus abgeleiteten statistischen Parameter wurden mit den Vorgaben aus dem Versuchsplan korreliert. Starke lineare Zusammenhänge wurden für die radiale Zustellung und den Tammel des Fräsdorns gefunden, jedoch keine Zusammenhänge für den axialen Vorschub. (A_Gölz 2022; Gauder et al. 2023a)

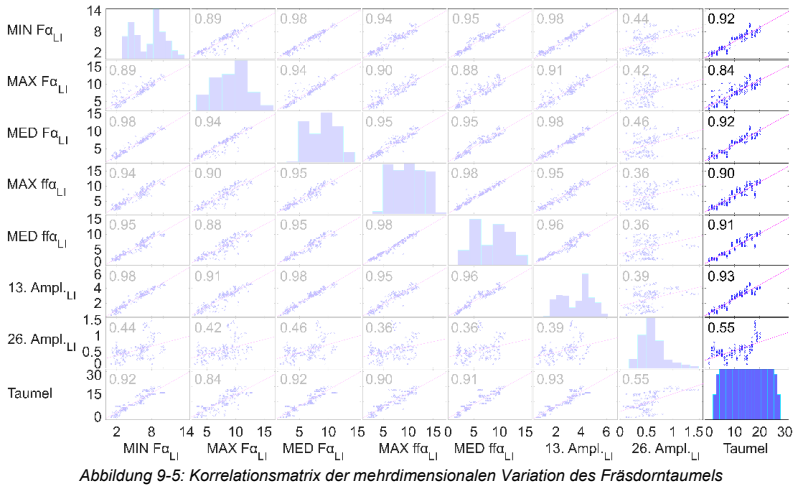


Abbildung 9-5: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des Fräsdorn-Taumels

Die Korrelationsanalysen zeigen lineare Korrelationen von bis zu 93 % für den Fräsdorn-Taumel E_W und lineare Korrelationen von über 99 % für die radiale Zustellung a_e in Bezug auf die kenngrößenbasierten Verzahnungsabweichungen. In Abbildung 9-5 ist Korrelationsmatrix für den Fräsdorn-Taumel E_W dargestellt. Eine vollständige Auflistung der korrelierenden Merkmale folgt im Abschnitt für den Korrekturalgorithmus, sowie im Anhang A12. Von besonderer Bedeutung ist die letzte Spalte in Abbildung 9-5. In dieser Spalte werden die hoch korrelierten Verzahnungsabweichungsparameter, welche auf der Ordinate aufgetragen sind, mit dem Taumel des Fräsdorns verglichen. Die durchweg linearen Zusammenhänge wurden mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson beschrieben. Der jeweilige Korrelationskoeffizient r ist in den Diagrammen innerhalb eines Intervalls $[0, 1]$ angegeben. Die statistischen Parameter (z.B. MIN, MW, MED) wurden nach dem bereits erläuterten Schema benannt. Diesem Schema folgt die Angabe der jeweiligen Verzahnungsabweichung (z.B. die Profil-Gesamtabweichung F_{α}). Mit der Amplitude ist die jeweilige Amplitude der FFT der simulierten Einflanken-Wälzprüfung repräsentiert. Darüber hinaus wird bei jedem Parameter (LI oder RE) zwischen der linken und der rechten Flanke unterschieden. Die Variationen der Parameter wirken sich primär auf die linken Flanken des Mikrozahlrads aus. So konnte durch die mehrdimensionale Variation der Parameter gezeigt werden, dass

starke lineare Korrelationen zwischen der radialen Zustellung und dem Taumeln des Fräserdorns bei einigen Verzahnungsabweichungen bestehen.

9.3 Verarbeitung von Messdaten

Nachdem die Wirksamkeit eines entwickelten Reinigungsverfahrens und die Prozesseignung der optischen Messtechnik und der analytischen Drehwegsimulation in den Kapiteln 5.3 und 7.3 nachgewiesen wurden, wird im folgenden Abschnitt die entwickelte Datenverarbeitung erläutert. Diese Verarbeitung umfasst den gesamten Qualitätsregelkreis und bildet die Schnittstelle zwischen den einzelnen Elementen des Regelungssystems.

9.3.1 Messung und Datenexport

Der Messvorgang muss zu Beginn der Datenverarbeitung initiiert werden. Dazu wird das optimierte Messprogramm über die Bruker Alicona "Automation Manager" Software durch Anklicken gestartet. Nach dieser Eingabe erfolgt die Datenverarbeitung und Qualitätskontrolle automatisch. Ist die Messung abgeschlossen, wird die Punktwolke automatisch als TXT-Datei auf einem Netzlaufwerk gespeichert. Somit sind die Messung und der Export automatisiert. Die folgende Codebox zeigt einen Ausschnitt aus einer exportierten Datei. Die Anzahl der Messpunkte ist in der Kopfzeile angegeben. Die folgenden Zeilen enthalten die X-/Y-/Z-Koordinaten der erfassten Messpunkte woraus die Punktwolke generiert wird.

```
GPoint3DVector { 23298 n {  
-0.000253 -0.014993 0.001863  
-0.000524 -0.015006 0.001833  
-0.000500 -0.015009 0.001840  
-0.000475 -0.015014 0.001845  
-0.000450 -0.015015 0.001852
```

9.3.2 Messdatenvorverarbeitung

Vor der Auswertung der Messdaten müssen diese zunächst vorverarbeitet werden. Der Messdatensatz muss nach dem Export für die nachfolgende Auswertung initial ausgerichtet werden. Dafür wurde ein Skript in "MATLAB" entwickelt, das die Vorverarbeitung der Daten automatisch durchführt. Nach dem automatischen Import der Punktwolke wird diese, wie bereits in Kapitel 8.2.1 beschrieben, mit einem ICP-Algorithmus vorjustiert. Die entsprechenden Definitionen und Konventionen für die untersuchte Verzahnung sind in Abbildung 9-6 dargestellt. Anschließend wird die Punktwolke auf

die relevanten Verzahnungsbereiche zugeschnitten. Basierend darauf erfolgt eine Ausreißerfilterung, um Artefakte, die die Auswertung verfälschen könnten, zu entfernen. Abschließend werden 6 Profilschnitte, wie in Kapitel 8.3.1 beschrieben, entlang der Flankenlinie erstellt. Das Vorgehen wird nachfolgend in Abbildung 9-7 nochmals vereinfacht veranschaulicht. Dieser Schritt ist notwendig, um die Messdaten in der Softwareumgebung "Reany" von Frenco auszuwerten. Die anschließende Auswertung der Daten wird im folgenden Abschnitt erläutert.

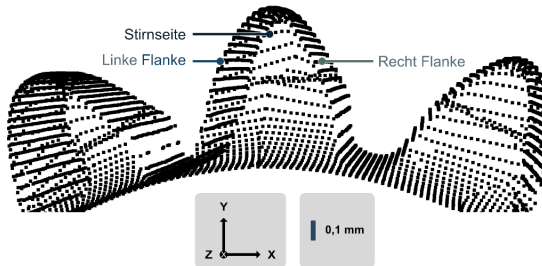


Abbildung 9-6: Definition am untersuchten Zahnrad

Als Simulations- und Auswertesoftware wurde das Tool "Reany" von der Firma Frenco verwendet, welches sich über die Windows-Eingabeaufforderung automatisieren lässt. Aufgrund der kurzen Simulations- und Auswertedauer von weniger als 13 Sekunden ist die Software für die in-line Integration prädestiniert. Neben der Auswertung klassischer Verzahnungsabweichungen ermöglicht Frenco auch die analytische Simulation einer Einzelflanken-Wälzprüfung, wie es bereits in Kapitel 7.1 beschrieben wurde. Nachfolgend wird der genaue Ablauf der Auswertung mit "Reany" beschrieben.

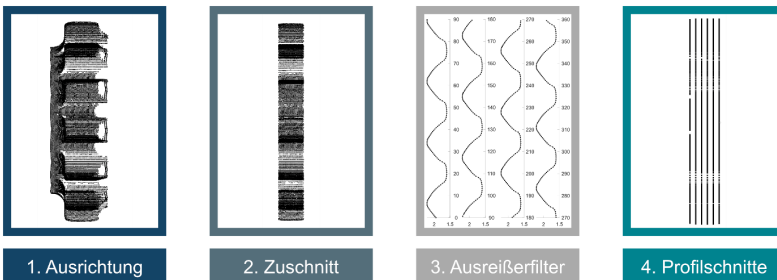


Abbildung 9-7: Vereinfachter Ablauf der Messdatenvorverarbeitung (A_Gölz 2022)

9.3.3 Ermittlung von Verzahnungsabweichungen

Die sechs Profilschnitte entlang der Flankenlinie sind der Input für die Software "Reany". Die Zahnflankentopologien können durch Interpolation der Schnitte in Richtung des Profils und der Flankenlinien berechnet werden. Da sich die Punktwolken in Struktur und Dichte unterscheiden können, ist es notwendig, ein einheitliches Referenzgitter zu definieren, siehe Abbildung 9-8. Das Referenzgitter ist dasselbe wie die Punktwolke. Auf diese Weise können Messdaten aus verschiedenen Verfahren miteinander verglichen werden. Des Weiteren vermeiden Extrapolations- und Interpolationsalgorithmen das Problem von nicht äquidistanten Gitterpunktabstände. Das Referenzgitter liegt in der Ebene der abweichungsfreien, nominellen Zahnflanken. Gemäß dieser Definition sind die Abstände in Profilrichtung und in Richtung der Flankenlinien äquidistant. Die Abweichungen von der definierten Idealform werden dann für alle Messpunkte in der zum Grundzylinder tangentialen Flankenebene berechnet. Auf dieser Ebene können abweichungsfreie Zähne im zweidimensionalen Bezugsgitter exakt beschrieben werden. Zähne mit Abweichungen werden dagegen orthogonal zum Referenzgitter aufgetragen und an den Knotenpunkten des Referenzgitters ausgewertet. Neben den klassischen Verzahnungsabweichungen (F_α , $f_{H\alpha}$, $f_{f\alpha}$, F_β , $f_{H\beta}$, $f_{f\beta}$, F_p , f_p) nach ISO 1328-1 kann die Software auch die Parameter der Einflanken-Wälzprüfung (F'_i , f'_i , f'_l , f'_k) (ISO 1328) inklusive der dazugehörigen Frequenzanalyse auswerten. Des Weiteren wertet die Software auch die Zahndicken (ZD), Lückenweiten (LW) und Teilungsgeometrien (TG) von jedem einzelnen Zahns aus. Die Auswertung aller oben genannten Parameter erfolgt synchron in weniger als 13 Sekunden. Nach der erfolgten Auswertung werden die Ergebnisse als CSV-Datei auf einem Netzlaufwerk gespeichert. Zur eindeutigen Identifikation trägt die Datei den gleichen Namen wie die Messdaten, die beim Export zusätzlich mit einem Zeitstempel versehen werden.

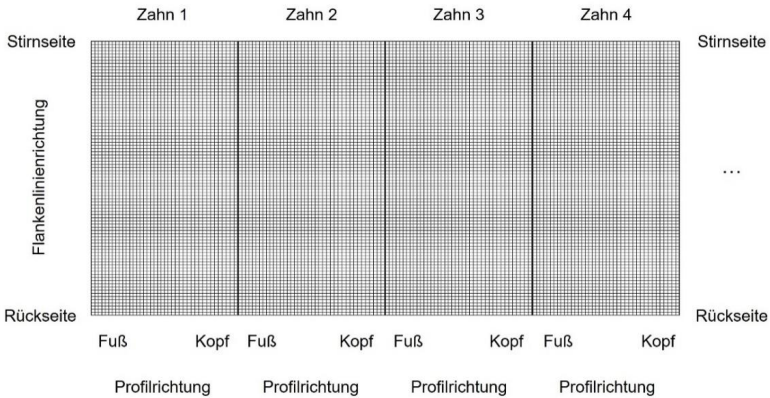


Abbildung 9-8: Referenzgitter für die analytische Zahnkontaktanalyse (Quelle: Frenco GmbH)

Nachdem die Verzahnungsabweichungen ausgewertet wurden, werden sie im Korrekturalgorithmus zur Ermittlung der Korrekturwerte für den Wälzfräsprozess verwendet. Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen erläutert.

9.4 Analyse der Daten des Korrekturalgorithmus

Der Korrekturalgorithmus ist das zentrale Stellglied im Qualitätsregelkreis. In diesem Abschnitt wird die Entwicklung der ihm zugrundeliegenden Modelle beschrieben. Die systematische Abweichungsanalyse bildet die Grundlage für die Modelle zur Vorhersage und Korrektur von Fertigungsabweichungen. Diese Korrekturwerte werden zur Regelung an die Werkzeugmaschine zurückgeführt.

Die ausgewerteten Verzahnungsabweichungen stellen die Basis für den Korrekturalgorithmus dar. Der Ansatz verfolgt das Ziel, mit wenigen Experimenten einen effizienten Korrekturalgorithmus in den Produktionsprozess zu implementieren. In der Voruntersuchung zeigt bereits die eindimensionale Variation starke lineare Zusammenhänge des Fräsdrontaumels, der radialen Zustellung und des Werkzeugverschleißes in Bezug auf die Verzahnungsabweichungen. Die mehrdimensionale Variation kann diese Ergebnisse mit Hilfe von 200 Versuchsteilen und einer Langzeituntersuchung entsprechend untermauern. Basierend auf den hohen Korrelationen von teilweise über 90 % sind eine Vorhersage der Einflussgrößen und der daraus abgeleiteten Korrektur realisierbar. Regressionsmodelle sowie Methoden des Maschinellen Lernens werden entsprechend untersucht, um optimale Ergebnisse zu erzielen. (Gauder et al. 2023a)

Anhand der Abweichungen werden die Zusammenhänge und Mechanismen zwischen den Einflussgrößen und den Verzahnungsabweichungen analysiert und daraus charakteristische Größen abgeleitet. Da die importierte CSV-Datei Ergebnisse für die linke und rechte Flanke der 13 Zähne liefert, können statistische Kenngrößen (Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, Standardabweichung) abgeleitet werden. Alle betrachteten Merkmale werden mit Hilfe eines Merkmalsvektors \vec{X} beschrieben. Aus dem Drehwinkelabweichungssignal der simulierten Einflanken-Wälzprüfung können weitere Merkmale extrahiert werden. Zu diesem Zweck wird eine Sinusfunktion mit der Periode 2π in das von "Reany" simulierte Drehwinkelabweichungssignal eingepasst. Der Merkmalsvektor \vec{X} kann somit um die Amplituden, die Phasenverschiebung und den Y-Offset zum abweichungsfreien Zustand (Übertragungsfehler = 0 μm) der Sinusfunktionen erweitert werden. Die beschriebene Sinusanpassung ist als Beispiel in Abbildung 9-9 dargestellt.

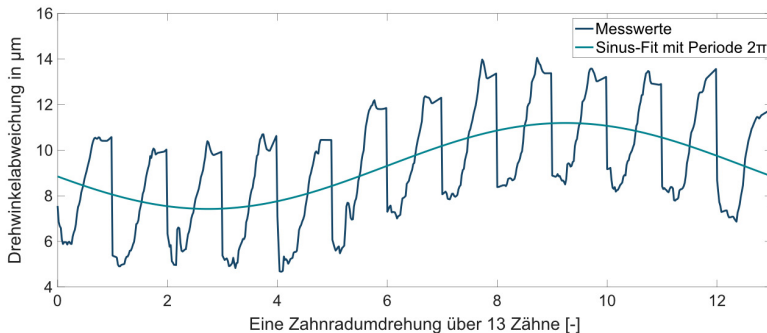


Abbildung 9-9: Sinusförmiger Fit des Drehwinkelabweichungssignal zur Ableitung weiterer Parameter (Gauder et al. 2023a)

Bei der Untersuchung der radialen Zustellung a_e wurde festgestellt, dass die manuelle Messung der Zahnweite über drei Zähne W_3 , welche mit einer Messschraube gemessen wird, mit einer hohen Messunsicherheit behaftet ist (Gauder et al. 2023a). Daher wurde in diesem Kontext ein automatisiertes Messverfahren entwickelt, das die Unsicherheit der Zahnweitenbewertung reduziert. Dieses Verfahren basiert auf der Auswertung der Punktwolke und verfolgt das Ziel, dem Korrekturalgorithmus zuverlässige Messergebnisse der Zahnweite zu liefern. Hierzu wird die optisch erfasste Punktwolke

des Zahnrades auf eine Ebene projiziert. Danach erfolgt die virtuelle Zahnweitenmessung an einem zufällig ausgewählten Zahn. Im initialen Schritt wird die projizierte Ebene so ausgerichtet, dass der Zahn exakt positioniert ist. Die linke Flanke des nächsten linken Zahns und die rechte Flanke des folgenden rechten Zahns werden dann als Auswertebereiche definiert. Abschließend wird der Abstand der Zahnweite berechnet und eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt.

Zu diesem Zweck wird der Abstand zwischen jedem Punkt der linken Flanke $\overrightarrow{OP_l}$ zu jedem Punkt der rechten Flanke $\overrightarrow{OP_r}$ bestimmt. Für jede Auswertung wird ein Vektor \vec{v} berechnet, der senkrecht zur Verbindungslinie zwischen den beiden Punkten und den Punkten außerhalb des Zahnrades liegt. Diese Vektoren werden für die Plausibilitätsprüfung verwendet. Dabei werden zwei parallele Geraden $\overline{G_l(a)} = \overrightarrow{OP_l} + a \cdot \vec{v}$ und $\overline{G_r(b)} = \overrightarrow{OP_r} + b \cdot \vec{v}$ aufgestellt. Diese bilden die Messschenkel der virtuellen Messschraube. Es kann somit nachgewiesen werden, dass die Geraden für alle $a, b \geq 0$, nicht innerhalb des Zahnrades liegen. Nach Erfüllung dieser Bedingung kann die Zahnweite gemessen werden. Die virtuelle Messung und die Plausibilitätsprüfung werden in Abbildung 9-10 dargestellt.

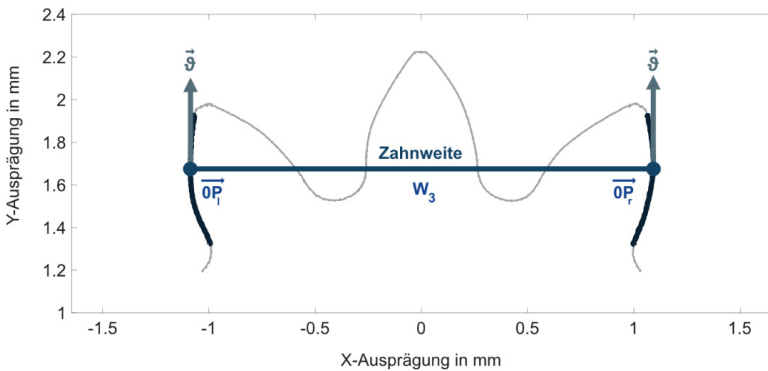


Abbildung 9-10: Virtuelle Zahnweitenmessung mit integrierter Plausibilitätsprüfung (Gauder et al. 2023a)

Der maximal zulässige Abstand zwischen den beiden Flanken ergibt sich aus der Zahnweite W_3 . Dieser Vorgang wird für alle 13 Zähne wiederholt, indem das Zahnrad

nach jeder Berechnung um $2\pi/13$ im Uhrzeigersinn gedreht wird. Die resultierende Zahnbreite wird durch den ausreißergefilterten Median aller 13 Ergebnisse berechnet.

Nach der Erfassung der Verzahnungsabweichungen des Merkmalsvektors \vec{X} , ist es von Bedeutung, die Zusammenhänge zwischen dem Merkmalsvektor \vec{X} und den als kritisch identifizierten Einflussgrößen zu ermitteln. Diese können mit dem Einflussgrößenvektor $\vec{I} = (a_e, E_W, f_a, w)$ beschrieben werden. Neben der radialen Zustellung a_e , dem Taumel des Fräsdorns E_W und dem axialen Vorschub f_a wird auch der Verschleiß w des betrachteten Fräasers untersucht. Die Beziehungen zwischen dem Einflussgrößenvektor \vec{I} und dem Merkmalsvektor \vec{X} dienen als Basis für die Vorhersagemodelle des Korrekturalgorithmus. Basierend darauf wurde für jede Einflussgröße eine Korrelationsmatrix mit dem gesamten Merkmalsvektor \vec{X} für jede Einflussgröße berechnet. Im nachfolgenden Abschnitt werden die entsprechenden Ergebnisse der vier Einflussgrößen beschrieben.

Bei der radialen Zustellung a_e gibt es mehrere stark linear korrelierte Merkmale. Diese setzen sich aus dem Offset der Sinusanpassung, der Zahndicke, der Lückenweite und der Teilungsgeometrie zusammen. Insgesamt weisen 10 Merkmale eine lineare Korrelation von mehr als 90 % aus und sind daher für die Regelung geeignet. In der Tabelle 9-6 sind die entsprechenden Merkmale aufgelistet. Es ist zu beachten, dass die Koeffizienten gerundet sind. Die starke Korrelation des Offsets ist auf die wiederholbare Ausrichtung des Bauteils und die absoluten Achsabstände der simulierten Zahnräder in "Reany" zurückzuführen. Diese Information ist bei konventionellen Einflanken-Wälzprüfstand nicht verfügbar, da hier nur ein Winkelsignal aufgezeichnet wird. Dadurch kann im Signal kein Offset durch die veränderte Zahndicke erkannt werden. (Gauder et al. 2023a)

Tabelle 9-6: Stark korrelierende Merkmale der radialen Zustellung a_e

Merkmal	Abkürzung	Lineare Korrelation
Offset des Sinus-Fits rechts	Offset _{RE}	+100 %
Offset des Sinus-Fits links	Offset _{LI}	+99 %
Mittelwert der Teilungsgeometrie rechts	MW TG _{RE}	+97 %
Mittelwert der Zahndicke	MW ZD	+96 %
Mittelwert der Lückenweite	MW LW	+96 %
Minimum der Zahndicke	MIN ZD	+95 %
Mittelwert der Teilungsgeometrie links	MW TG _{LI}	+95 %

Maximum der Zahndicke	MAX ZD	+94 %
Maximum der Lückenweite	MAX LW	+93 %
Minimum der Lückenweite	MIN LW	+93 %

Die Taumelanalyse des Fräsdorns E_W zeigt ebenfalls starke Korrelationen mit mehreren Merkmalen. Diese sind jedoch etwas geringer als bei der radialen Zustellung a_e . Die stärksten Korrelationen konnten für die Profil-Abweichungen und Amplituden der simulierten FFT ermittelt werden. Die durch den Taumel resultierenden Abweichungen sind überwiegend auf den linken Zahnflanken ausgeprägt. In Tabelle 9-7 sind die am stärksten korrelierenden Merkmale aufgelistet.

Tabelle 9-7: Korrelierende Merkmale des Fräsdorns Taumel E_W

Merkmal	Abkürzung	Lineare Korrelation
Amplitude der 13. Ordnung der FFT links	13. Ampl. L_I	+93 %
Minimum der Profil-Gesamtabweichung links	MIN $F_{\alpha} L_I$	+92 %
Median der Profil-Gesamtabweichung links	MED $F_{\alpha} L_I$	+92 %
Median der Profil-Formabweichung links	MED $f_{f\alpha} L_I$	+91 %
Maximum der Profil-Formabweichung links	MAX $f_{f\alpha} L_I$	+90 %
Maximum der Profil-Gesamtabweichung links	MIN $F_{\alpha} L_I$	+84 %
Amplitude der 26. Ordnung der FFT links	26. Ampl. L_I	+55 %

Im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Einflussgrößen weist der Axialvorschub f_a weder starke lineare noch nichtlineare Korrelationen auf. Die lineare Korrelation beträgt lediglich 21 %, weshalb der Einfluss des Vorschubs für das betrachtete Mikro-zahnrad als gering angesehen werden kann. Dem zufolge ist der Axialvorschub für die Regelung in diesem Anwendungsfall nicht von Relevanz. Die Merkmale, die mit dem Axialvorschub f_a korrelieren, sind in absteigender Reihenfolge in Tabelle 9-8 aufgelistet.

Tabelle 9-8: Korrelierende Merkmale des axialen Vorschubs f_a

Merkmal	Abkürzung	Lineare Korrelation
Median der Flankenlinien-Gesamtabweichung rechts	MED $F_{\beta} RE$	+21 %
Median der Flankenlinien-Formabweichung rechts	MED $f_{f\beta} RE$	+19 %

Minimum der Flankenlinien-Winkelabweichung links	MIN $f_{H\beta \text{ LI}}$	+18 %
Amplitude der 26. Ordnung der FFT rechts	26. Ampl. $_{RE}$	+17 %

Aufgrund der geringen Korrelation des axialen Vorschubs reduziert sich der für die Korrektur betrachtete Einflussgrößenvektor auf $\vec{I} = (a_e, E_W, w)$. Die letzte Einflussgröße, die im nächsten Abschnitt analysiert werden soll, ist der Werkzeugverschleiß w , der durch Langzeitversuche ermittelt wurde.

Im Gegensatz zu den drei Einflussgrößen, die durch mehrdimensionale Variation untersucht wurden, kann der Werkzeugverschleiß w durch Langzeitversuche bewertet werden. Wird ein kritischer Verschleißzustand erreicht, sollte das Werkzeug geschliffen werden, um keine abweichungsbehafteten Teile zu produzieren. Derzeit liegt dieser Prozess in der Verantwortung des Bedieners, der dies subjektiv beurteilt. Eine automatisierte Bewertung auf Basis der Messwerte, die auch den Shiftvorgang einschließt, ist ein wichtiger Aspekt in der Qualitätsregelung. Allerdings tritt dieser Zustand erst nach mehreren tausend Teilen ein. In der Studie wurde dieser Zeitpunkt nach etwa 3500 Teilen erreicht. Die messtechnische Analyse jedes hundertsten Teils liefert die Datenbasis für die entsprechende Korrelationsanalyse. Hier zeigten drei Profilabweichungen eine lineare Korrelation von über 70 %, wobei nur negative Korrelationen auftraten. Diese drei Merkmale sind in Tabelle 9-9 aufgelistet. (Gauder et al. 2023a)

Tabelle 9-9: Korrelierende Merkmale des Werkzeugverschleißes

Merkmal	Abkürzung	Lineare Korrelation
Median der Profil-Winkelabweichung links	MED $f_{H\alpha \text{ LI}}$	-78 %
Median der Profil-Winkelabweichung rechts	MED $f_{H\alpha \text{ RE}}$	-75 %
Median der Profil-Formabweichung links	MED $f_{f\alpha \text{ LI}}$	-71 %

Somit konnten für drei der vier betrachteten Einflussgrößen stark korrelierte Zusammenhänge identifiziert werden. Im folgenden Abschnitt werden die zugrundeliegenden Vorhersagemodelle des Korrekturalgorithmus mittels Regressionen und Klassifikationen entwickelt. (Gauder et al. 2023a)

9.5 Training des Korrekturalgorithmus

Die folgenden Vorhersagemodelle stellen die Beziehungen zwischen den Einflussgrößen (vgl. Tabelle 9-3) und den Merkmalen (vgl. Tabelle 9-6, Tabelle 9-7, Tabelle 9-8

und Tabelle 9-9) her. Dafür eignen sich im Wesentlichen Regressions- und Klassifikationsverfahren. Aufgrund der linearen Zusammenhänge mit der radialen Zustellung a_e wird dieses Verhalten mittels multipler linearer Regression modelliert. Die resultierende Güte des Modells wird anschließend bewertet. Für das Training des Algorithmus werden die Merkmale mit der höchsten Korrelation herangezogen (siehe Tabelle 9-6). Da sich die Qualität der Regression durch das Hinzufügen weiterer Merkmale nur begrenzt erhöht, muss eine entsprechende Selektion getroffen werden. (Gauder et al. 2023a)

Für die entsprechende Merkmalselektion werden die 200 produzierten Kopfwellen nach dem Zufallsprinzip in zehn gleich große Teile aufgeteilt. Davon werden neun Teile als Trainingsdaten und der zehnte Teil als Validierungsdatensatz definiert. Danach werden die Merkmale in absteigender Reihenfolge nach ihren Korrelationskoeffizienten sortiert. Im nächsten Schritt wird eine lineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt, bei der nur das Merkmal mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten als Eingangsvektor verwendet wird. Für dieses Modell werden das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{ad}^2 und der Root Mean Square Error ($RMSE$) auf Basis der Validierungsdaten ermittelt. Dieser Schritt wird für alle zehn Merkmale wiederholt. Der gesamte Prozess wird mit einer anderen Aufteilung erneut wiederholt, bis jeder Teil einmal als Validierungsdatensatz verwendet wurde, um eine zuverlässige Auswahl der Merkmale zu treffen. Zur abschließenden Validierung werden die Verläufe des adjustierten Bestimmtheitsmaßes und der $RMSE$ über die Anzahl der Wiederholungen gemittelt. Die entsprechenden Verläufe über die Anzahl der berücksichtigten Merkmale sind in Abbildung 9-11 dargestellt.

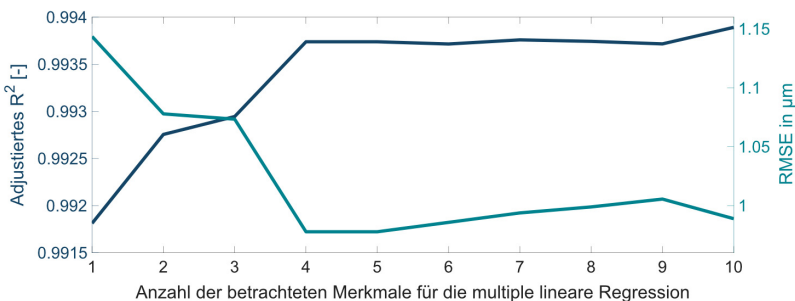


Abbildung 9-11: Training der multiplen linearen Regression für die radiale Zustellung (Gauder et al. 2023a)

Bereits nach fünf Merkmalen ergibt sich keine signifikante Verbesserung mehr. Daher werden die fünf am höchsten korrelierenden Merkmale (Offset_{RE}, Offset_{LI}, MW TG_{RE}, MW ZD, MW LW) aus Tabelle 9-6 als Grundlage für die Regression ausgewählt. Die $RMSE a_e$ von 0,904 μm entspricht der Regelgüte des radialen Zustellungsmodells und berechnet sich nach der Formel 2-29. Da die verwendete Werkzeugmaschine, bedingt durch die Auflösung, nur in Schritten von 1 μm korrigieren kann, wird dies als gutes Ergebnis angesehen.

Des Weiteren wurde eine Messunsicherheitsermittlung der virtuellen Zahnweitenmessung realisiert. Diese Ermittlung ist notwendig, da die radiale Zustellung a_e beim Anwendungspartner durch die Messung der Zahnweite W_3 bestimmt wird. Die Messunsicherheit der virtuellen Zahnweitenmessung wird experimentell mittels taktiler Vergleichsmessung an dem Koordinatenmessgerät Zeiss F25 bestimmt. Dazu wird die Referenzkopfwelle 20-mal taktil gemessen und die Zahnweiten mit der Verzahnungssoftware "Zeiss Gear Pro" ausgewertet. Danach wird die Kopfwelle in der Produktionsumgebung beim Anwendungspartner 20-mal optisch mit der Fokusvariationstechnologie vermessen und die Zahnweiten der einzelnen Zähne durch die virtuelle Messung mit "MATLAB" ermittelt. Als Unsicherheitsbeiträge werden die taktile Kalibrierunsicherheit auf Basis von Messungen am Mikrozahnradnormal der PTB für das Modul 0,2 mm und die Standardabweichungen der Mediane über die 13 Zähne beider Messreihen aus 20 Messungen verwendet. Die systematische Abweichung (Bias) zwischen beiden Messverfahren kann durch die taktile Kalibriermessung an der Referenzkopfwelle kompensiert werden. Die Regression für die Korrektur orientiert sich an dem taktilen Referenzverfahren. Diese Methode ermöglicht eine präzise Prognose und Korrektur. Die erweiterte Unsicherheit der virtuellen Zahnweitenmessung beträgt 0,78 μm ($k = 2$) und wurde mit der Formel 2-20 ermittelt. Das ausführliche Budget wird im Anhang A11 präsentiert. Damit kann eine relativ geringe Unsicherheit für die Zahnweitenprognose nachgewiesen werden.

Im Vergleich zur radialen Zustellung a_e , die in Mikrometerauflösung automatisch geregelt werden kann, ist der Taumel des Fräsdorns E_W nur manuell mit Hilfe einer Messuhr einstellbar. Die Einstellung des Taumels erfolgt bei Rüsten der Werkzeugmaschine durch den Bediener. Der Bedienerinfluss auf den Taumel ist relativ hoch. Aus diesem Grund soll der Bediener mit Hilfe einer dreistufigen Ampel in Form eines Assistenzsys-

tems über den entsprechenden Taumel am Werkzeug informiert werden. Dieses System kann während der Serienfertigung den Zustand des Fräsdorns erfassen und bei Bedarf entsprechend warnen. Dadurch ist es möglich, proaktiv in den Prozess einzugreifen und den Rundlauf des Fräsdorns zu justieren. Daher wird für diesen Einflussfaktor die Klassifizierung präferiert. Basierend auf den zugrunde liegenden Toleranzen und den Auswirkungen auf die Abweichungen, wurden folgende Klassen festgelegt, die in Tabelle 9-10 aufgelistet sind.

Tabelle 9-10: Spezifizierte Klassen für die Taumel-Erkennung

Taumeln des Fräsdorns E_W	Klasse	Farbe der Ampel	Konsequenz
$E_W \leq 7 \mu\text{m}$	0 [-]	Grün	E_W in Ordnung
$7 \mu\text{m} < E_W \leq 14 \mu\text{m}$	1 [-]	Gelb	E_W überprüfen
$14 \mu\text{m} < E_W$	2 [-]	Rot	E_W korrigieren

Auf Basis der Klassengrenzen in Tabelle 9-10 werden verschiedene Klassifikationsverfahren auf die 200 experimentell erzeugten Daten angewandt und validiert. Die Validierung erfolgt durch die 10-fache Kreuzvalidierung, deren Verlustfunktion $f_{error,class}$ den Anteil der falsch klassifizierten Validierungsbeispiele $n_{mis,class}$ in Bezug auf die Gesamtanzahl der Validierungsbeispiele $n_{sum,class}$ (siehe Formel 9-1) repräsentiert.

$$f_{error,class} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{n_{mis,class}}{n_{sum,class}} \quad \text{Formel 9-1}$$

Da es für die Klassifikation entscheidend ist, dass die Taumelklassen der Fräsdorne nicht falsch zugeordnet werden, wurde für das Training der Klassifikatoren eine Kostenmatrix $M_{costs,class}$ erstellt (siehe Formel 9-2). So kann eine falsche Klassifizierung vermieden werden.

$$M_{costs,class} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix} \quad \text{Formel 9-2}$$

Zur Merkmalsauswahl des Taumelklassifikators werden die Merkmale von Tabelle 9-7 entsprechend ihrer Korrelation sortiert und nacheinander zum Merkmalsvektor des Klassifikators hinzugefügt. Bei jedem neuen Merkmal wird der Klassifikator erneut trainiert, die Hyperparameter aller verwendeten Modelle, siehe Tabelle 9-11, werden optimiert und die Verlustfunktion $f_{error,class}$ wird berechnet. Aufgrund der geringen Stichprobengröße wird die 10-fache Kreuzvalidierung 30-mal mit verschiedenen Aufteilungen

gen wiederholt. Wenn sich das Ergebnis durch Hinzufügen des letzten Merkmals verbessert, verbleibt es im Merkmalsvektor des Klassifikators. Dieses Verfahren führt zu den Verlustfunktionen von Abbildung 9-12 für gängige Klassifikationsverfahren.

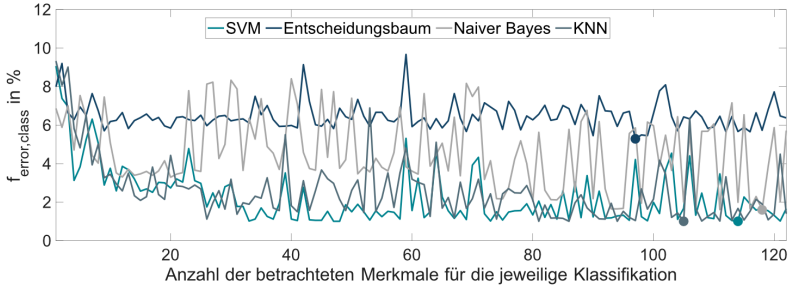


Abbildung 9-12: Verlustfunktion für die jeweilige Klassifikation (Gauder et al. 2023a)

Vier verschiedene Methoden zur Modellierung des Taumelklassifikators werden auf ihre Verlustfunktionen hin überprüft. Es handelt sich um die Support-Vektor-Maschine (SVM), den Entscheidungsbaum, den Naive-Bayes-Klassifikator und den K-Nearest-Neighbor-Algorithmus (KNN). Die Punkte in Abbildung 9-12 markieren das Minimum der jeweiligen Verlustfunktion. Es ist vorwegzunehmen, dass die SVM bei der Validierung in Kapitel 9.9 durch Serienteile noch bessere Ergebnisse erzielt als der KNN-Algorithmus und somit als optimale Methode für die Modellierung des Taumelklassifikators ausgewählt wird. Eine Liste der in allen vier Modellen verwendeten Parameter und Merkmale findet sich in Tabelle 9-11.

Tabelle 9-11: Parameter der untersuchten Methoden zur Taumelklassifizierung von Fräsdornen

Klassifikator	Hyperparameter	Eigenschaften	Verlust
MATLAB SVM (One-vs-All)	Kernel-Funktion: Gauß Box Constraint: 932.7509 [-] Kernel Scale: 5.3121 [-]	MED $F_{\alpha \text{ LI}}$	$f'_i \text{ LI}$
		MIN $F_{\alpha \text{ LI}}$	78. Ampl. LI
		MED $f_{f\alpha \text{ LI}}$	MED $f_{H\alpha \text{ LI}}$
		13. Ampl. LI	STD $F_{\beta \text{ RE}}$
		MAX $f_{f\alpha \text{ LI}}$	MED $F_{\alpha \text{ RE}}$
		26. Ampl. LI	STD $F_{\beta \text{ LI}}$
MATLAB KNN	Anzahl der Nachbarn: 1 Entfernung: Minkowski	MED $F_{\alpha \text{ LI}}$	91. Ampl. LI
		MED $f_{f\alpha \text{ LI}}$	52. Ampl. LI
		26. Ampl. LI	39. Ampl. RE
		$f'_k \text{ LI}$	MIN ZD
		78. Ampl. RE	$f'_i \text{ RE}$

MATLAB Entscheidungs- baum	Split-Kriterium: GDI Min. Elternteil: 10 Min Blatt: 2 Max Splits: 92	MED $F_{\alpha LI}$	13. Ampl. LI	5,29 %
		MED $f_{f\alpha LI}$	MED $f_{f\alpha RE}$	
		MAX $F_{\alpha LI}$	STD $f_{H\beta LI}$	
		26. Ampl. LI	MAX $f_{H\beta LI}$	
		MED $F_{\alpha LI}$	65. Ampl. LI	
MATLAB Naive Bayes	Verteilung: Normal	MED $f_{f\alpha LI}$	MIN $F_{\alpha RE}$	1,60 %
		MIN $F_{\alpha LI}$	39. Ampl. RE	
		$f'_k LI$	STD $F_{\beta RE}$	
		MAX $f_{H\alpha RE}$	MAX $f_{f\alpha RE}$	

Als letzte der zu korrigierenden Einflussgrößen wird der Werkzeugverschleiß w betrachtet, der durch das automatisierte Shiften des Werkzeugs geregelt werden kann. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse in Tabelle 9-9 veranschaulichen, dass sich die drei stark korrelierten Merkmale proportional zur Anzahl der produzierten Teile verhalten. Für jedes der drei Merkmale werden Grenzwerte in Tabelle 9-12 definiert, die den Werkzeugverschleiß im Rahmen von linearen Regressionen indizieren. In diesem Versuch trat der Verschleißzustand nach etwa 3500 produzierten Bauteilen ein.

Tabelle 9-12: Spezifische Grenzwerte für die Auslösung des Verschiebevorgangs

Merkmal	Abkürzung	Grenzwert
Median der Profil-Winkelabweichung links	MED $f_{H\alpha LI}$	< -0,50 μm
Median der Profil-Formabweichung links	MED $f_{f\alpha LI}$	< +3,40 μm
Median der Profil-Winkelabweichung rechts	MED $f_{H\alpha RE}$	< -0,05 μm

Es ist zu beobachten, dass die korrelierenden Merkmale mit zunehmendem Verschleiß abnehmen. Ferner ist ersichtlich, dass die gleichen Merkmale die Taumelklassifizierung beeinflussen. Allerdings unterscheiden sich beide Modelle dadurch, dass der Verschleiß durch negative Abweichungen und der Fräsdorn-Taumel durch erhebliche positive Abweichungen charakterisiert sind. Eine wechselseitige Beeinflussung kann somit ausgeschlossen werden. Des Weiteren werden alle drei Merkmale durch den Median beschrieben, wodurch die Ausreißer bei der Langzeituntersuchung reduziert werden. Der Werkzeugverschleiß wird am Beispiel der Profil-Winkelabweichung für die linken Zahnflanken in Abbildung 9-13 visualisiert.

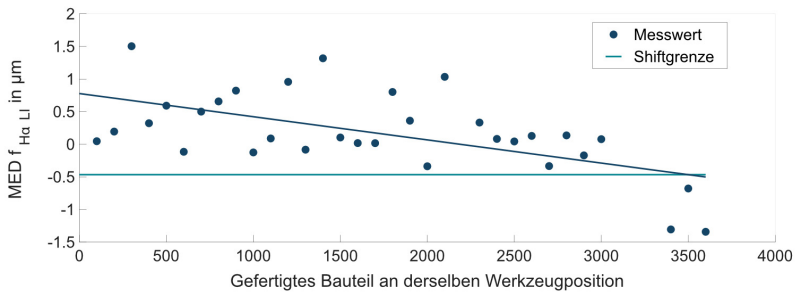


Abbildung 9-13: Langzeituntersuchung der Profilwinkelabweichung für linke Flanken (Gauder et al. 2023a)

Die daraus resultierende Korrelationsmatrix ist für die Langzeituntersuchung in Abbildung 9-14 dargestellt. Hierbei zeigen sich hohe negative Korrelationen, welche sich für eine Regelung des Merkmals eignen.

Diese Langzeituntersuchung vervollständigt die Modellierung des Qualitätsregelkreises. Für die adaptive Regelung der Zahnweite wird eine multiple lineare Regression verwendet. Die Taumelerkennung des Fräsdorns basiert auf einer Support-Vektor-Maschine. Der Werkzeugverschleiß wird durch die Grenzen der linearen Regressionen unter Verwendung von adaptiven Shiftyklen geregelt. Nachdem die Algorithmen entwickelt wurden, wird im folgenden Abschnitt die Entscheidungslogik für die Korrektur ausgearbeitet.

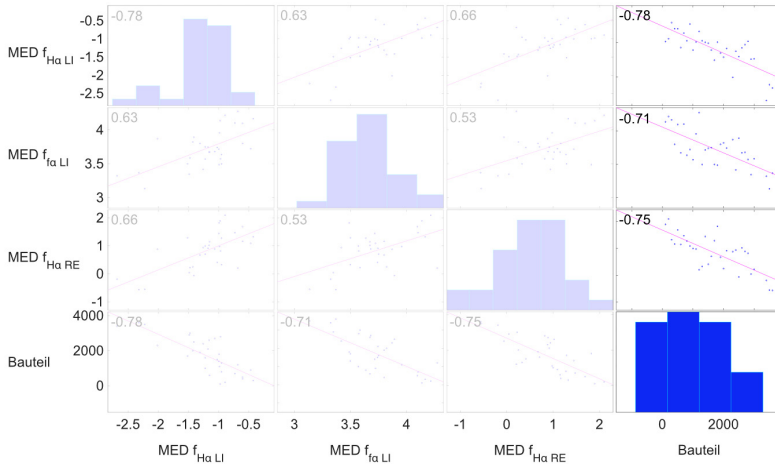


Abbildung 9-14: Korrelationsmatrix der Langzeituntersuchung des Werkzeugverschleißes (Gauder et al. 2023a)

9.6 Entscheidungslogik für die Korrektur

Im folgenden Schritt müssen für die entwickelten Modelle Korrekturhypothesen definiert werden, um die Algorithmen auf den Kontext der Werkzeugmaschine zu beziehen. Für die adaptive Korrektur der radialen Zustellung a_e muss die prognostizierte Zahnweite $W_{3,prog}$ von der nominellen Zahnweite subtrahiert werden $W_{3,nom}$. Diese Berechnung ergibt den inkrementellen Korrekturwert $a_{e,corr}$, der in der Einheit Millimeter an die CNC-Steuerung der Werkzeugmaschine übergeben wird (siehe Formel 9-3).

$$a_{e,corr} = (W_{3,prog} [mm] - W_{3,nom} [mm]) \tag{Formel 9-3}$$

Auf Basis der SVM-Klassifikation wird der Taumel detektiert und mittels Ampelsystem visualisiert, um den Bediener über Zustand zu informieren. Dieser Ansatz dient als Auslöser für einen Eingriff in den Fertigungsprozess, bei dem der Taumel mittels Messuhr händisch justiert wird. Dies erfolgt, wenn die in der Tabelle 9-10 definierten Klassengrenzen überschritten werden. Wenn zwei der drei definierten Grenzwerte der Verschleißmerkmale \vec{X}_w (siehe Tabelle 9-12) überschritten werden, wird die binäre Shift-Regelung aktiviert. Basierend darauf wird der entsprechende Shiftbefehl $X_{s,action}$ automatisch an die CNC-Steuerung übertragen (siehe Formel 9-4).

$$X_{S,action}(\vec{X}_w) = \begin{cases} 0, & num_{lower_limit}(\vec{X}_w) < 2 \\ 1, & num_{lower_limit}(\vec{X}_w) \geq 2 \end{cases} \quad \text{Formel 9-4}$$

Damit wurde eine Entscheidungslogik für die adaptive Qualitätsregelung beim Wälzfräsen von Mikrozahnradern geschaffen. Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der Rückmeldung der Korrekturwerte an die Steuerung der Werkzeugmaschine zum Schließen des Regelkreises.

9.7 Rückführung der Korrekturwerte an die Werkzeugmaschine

Nachdem die zuvor beschriebene Entscheidungslogik die Korrekturwerte berechnet hat, müssen diese Ergebnisse an die Werkzeugmaschine rückgeführt werden, um den Qualitätsregelkreis zu schließen. Dazu werden die Korrekturwerte der Einflussparameter in eine DFQ-Textdatei auf dem Netzlaufwerk geschrieben, die an die Steuerung der Werkzeugmaschine angepasst ist. Von dort kann die Fancu-Schnittstelle "Focas" die Korrekturwerte einlesen und an die CNC-Steuerung (Hersteller Fancu) übertragen. Die entsprechenden Variablen der DFQ-Datei sind in der nachfolgenden Tabelle 9-13 aufgelistet. Der Korrekturwert für die radiale Zustellung wird in die Werkzeugkorrekturtafel der Steuerung übertragen, der Verschiebefehl wird in den G-Code der Steuerung übertragen.

Tabelle 9-13: Variablen der DFQ-Textdatei zum Importieren der Korrekturwerte

Beeinflussender Parameter	Variable der DFQ-Datei
Radiale Zustellung a_e in mm	K0001/2 (Radiale Zustellung)
Taumel des Fräsdorns E_W in μm	K0001/3 (Prozess-Stopp)
Shift-Befehl $X_{S,action}$ [-]	K0001/1 (Axiale Zustellung)

Die kritischen Parameter des Verzahnungsprozesses, die die Qualität der Verzahnung beeinflussen, können somit korrigiert werden. Neben dem Steuerungsaspekt sind die Speicherung und Visualisierung der gesammelten Informationen für die Einbindung aller am Prozess beteiligten Mitarbeiter von essenzieller Bedeutung. Daher wird ein Dashboard als Schnittstelle zwischen Mensch und Werkzeugmaschine entwickelt, welches im folgenden Abschnitt erläutert wird.

9.8 Grafische Benutzeroberfläche für die Mensch-Maschine-Kommunikation

Die Integration eines Qualitätsregelkreises in einen bestehenden Produktionsprozess ist eine Herausforderung, wenn die Mitarbeiter nicht in das automatisierte System eingebunden sind. Ein dem Steuerungssystem zugeordnetes Informationssystem als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine ist für die Akzeptanz dieser Qualitätssicherungsmethode unerlässlich. Daher wird in diesem Abschnitt die Entwicklung einer grafischen Software-Schnittstelle, "GearPanel" genannt, beschrieben.

Zu Beginn der Entwicklung dieser grafischen Benutzeroberfläche wurde eine Zielsetzung ausgearbeitet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung der durchgeführten Korrekturen, der auftretenden Verzahnungsabweichungen und der vorliegenden Langzeitrends. Zusätzlich zu dieser informativen Funktion werden alle Messdaten, Qualitätsmerkmale und Korrekturwerte auf dem Netzlaufwerk zur Langzeitarchivierung gespeichert. Die Oberfläche des Dashboards ist in fünf Bereiche unterteilt, um die Transparenz der adaptiven Qualitätsregelung zu gewährleisten. Angedacht sind die Bereiche dazu, Informationen über den aktuellen Zustand des Fertigungsprozess zu liefern. Die einzelnen Bereiche bieten Informationen über den Status der Regelung, die Verläufe der simulierten Einflanken-Wälzprüfung, die Kennwerte der relevanten Verzahnungsabweichungen, eine Frontansicht der Stirnprofilschnitte und Zeitreihen zur Beobachtung von Langzeiteffekten. Dieses System bildet die Basis für eine menschenzentrierte Integration dieses Qualitätsregelkreises. Im nächsten Abschnitt wird die Umsetzung dazugehörige Umsetzung beschrieben.

Es wurde eine Visualisierung in "MATLAB" entwickelt, die die Informationen des Regelkreises auf dem Monitor darstellt. Die Oberfläche des sogenannten "GearPanel" ist in Abbildung 9-15 dargestellt. Im linken oberen Fenster wird der Zustand der zu regelnden Einflussgrößen angezeigt (1). Der aktuelle Korrekturwert der radialen Zustellung wird als Zahlenwert angezeigt. Die Detektion des Fräsdorntaumels ist als dreistufige Ampel visualisiert. Eine weitere Ampel unterhalb signalisiert zweistufig der Shift-Regelung. Das untere linke Fenster visualisiert die Signale der simulierten Einflanken-Wälzprüfung (2). Die Ergebnisse der funktionsorientierten und kenngrößenbasierten Verzahnungsabweichungen sind in der Mitte des Dashboards zu finden (3). So werden auch die Ergebnisse der kompletten Zahnradabweichung dargestellt. Zur Überprüfung des kritischen Zahnprofils befindet sich im oberen rechten Fenster eine Visualisierung

des geschnittenen Stirnprofils basierend auf dem aktuellen Messdatensatz (4). Das rechte untere Fenster ermöglicht die Darstellung von Zeitreihen und Frequenzanalysen (5). Zu diesem Zweck kann in der Mitte des Dashboards die jeweilige Ansicht ausgewählt werden. Anschließend werden die Messergebnisse der letzten Bauteile als Zeitreihe dargestellt, um langfristige Trends zu veranschaulichen. Zusätzlich sind die Toleranzen und die ermittelten Unsicherheiten der betrachteten Verzahnungsabweichungen hinterlegt. Mit diesem Dashboard können die automatisierten Prozesse nachvollziehbar visualisiert werden. Die Validierung der Entscheidungslogik erfolgt im nächsten Abschnitt.

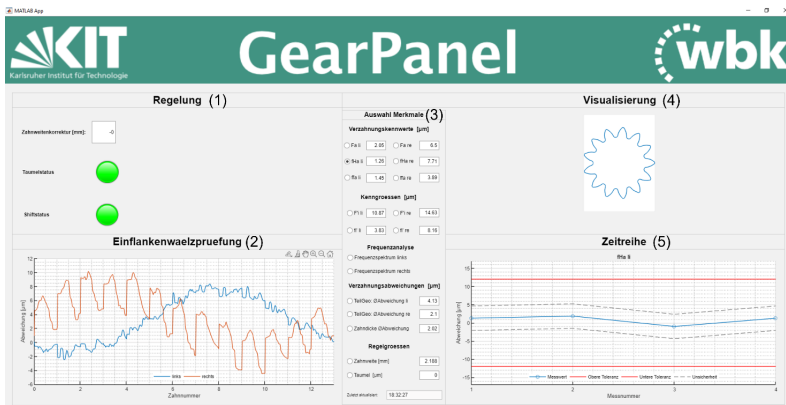


Abbildung 9-15: Schnittstelle der "GearPanel"-Dashboard als ganzheitliches Informationssystem (A_Gözl 2022)

9.9 Validierung

Die Wirksamkeit des Qualitätsregelkreises wird abschließend in der Serienfertigung validiert. Dabei wird die Regelgüte der radialen Zustellung während des Serienprozesses ermittelt. Hierfür werden 20 Zahnradpaare aus der Serienproduktion mit Abweichungen und entsprechenden Korrekturen analysiert, wie es in der nachfolgenden Abbildung 9-16 illustriert ist. Die Restabweichung der korrigierten Bauteile wird zur Validierung herangezogen. Aus den 20 Zahnradpaaren wurde eine $RMSE$ von 0,9 μm erzielt, was mit den Ergebnissen der Trainingsdaten korrespondiert und die Funktionalität dieses Modells in der Praxis unterstreicht. Aufgrund der Systemauflösung der Werkzeugmaschine, kann die radiale Schnitttiefe nur in ganzen Mikrometerschritten

variiert werden. Angesichts dieser Limitierung kann die Regelgüte als positiv bewertet werden.

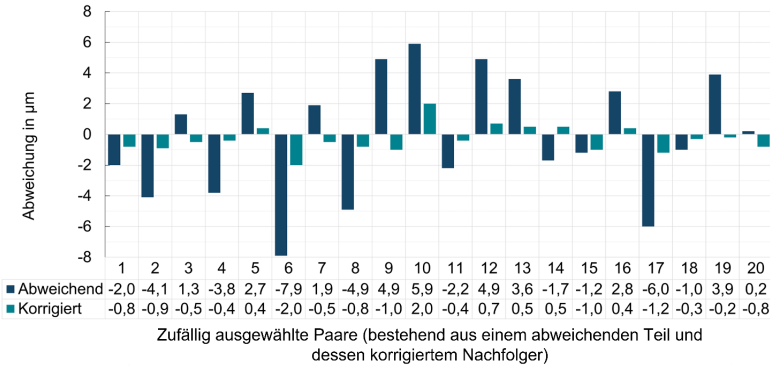


Abbildung 9-16: Validierung der radialen Zustellung von 20 produzierten Zahnrädern aus der Serienproduktion (Stichprobe) (Gauder et al. 2023a)

Für die Validierung der Werkzeugverschleißerkennung wurden 45 Serienbauteile mit zufälligen Verschleißzuständen betrachtet. Der aktuelle Zustand wurde mit einer Prognosegüte von 97,8 % detektiert. Abschließend wird die Klassifikationsgüte der Taumelerkennung untersucht. Für jede der drei Klassen werden 15 zufällig ausgewählte Serienbauteile analysiert und von den betrachteten Algorithmen klassifiziert. Aus dieser Methode ergeben sich Konfusionsmatrizen und Verlustfunktionen zur Bestimmung der optimalen Methode. Aufgrund des geringen Verlustes von 8,89 % lässt sich ableiten, dass die SVM am besten für die Taumelklassifikation des Fräsdorns geeignet ist. Dieses Ergebnis entspricht einer validierten Klassifikationsgüte von 91,11 %. Alle anderen Algorithmen weisen erhöhte Fehlerraten auf, wobei die Güte des Entscheidungsbaums 66,78 %, die des KNN 53,33 % und die des Naive Bayes 51,12 % beträgt. Mit der SVM konnte ein solides Modell für die Taumeldetektion entwickelt werden, dessen Genauigkeit von über 90 % als angemessen betrachtet werden kann. Die Konfusionsmatrix der SVM während der Validierung ist in der nachfolgenden Abbildung 9-17 dargestellt.

Tatsächliche Klasse \ Prognostizierte Klasse	0	1	2
0	15	0	0
1	1	12	2
2	0	1	14

Abbildung 9-17: Konfusionsmatrix der ausgewählten SVM während der Validierung des Fräsdorntaumels (Gauder et al. 2023a)

Damit wurden die einzelnen Modelle für die Regelung erfolgreich für den in-line Einsatz in der Praxis validiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Übertragbarkeit der datenbasierten Entscheidungsfindung auf verschiedene Qualitätsprobleme durch strukturierte Versuchsreihen. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert.

9.10 Diskussion der Ergebnisse

Abschließend werden die erzielten Ergebnisse mit den zu Beginn definierten Anforderungen verglichen (siehe Tabelle 4-2), um die Gesamtzielerreichung zu ermitteln. Die erste Anforderung ist eine Zykluszeit von weniger als fünf Minuten. Die Summe aus dem Reinigungsprozess inklusive aller Handlingszeiten (0,83 Minuten), der Messung (3,48 Minuten), der Datenauswertung (0,21 Minuten) und der eigentlichen Regelung (0,08 Minuten) ergibt eine Zykluszeit von etwa 4,6 Minuten. Diese Zykluszeit erfüllt die ursprüngliche Anforderung und ermöglicht einen Puffer von 23 Sekunden. Das entwickelte Reinigungskonzept ermöglicht zudem eine schnelle und effektive Entfernung von Verschmutzungen im Bereich der Verzahnung. Des Weiteren konnte der Regelungsprozess automatisiert werden, so dass vom Start der Messung bis zur Korrektur an der Werkzeugmaschine keine manuellen Eingriffe notwendig sind. Einzig bei der Taumelkorrektur bedarf es einem manuellen Eingriff. Auch die Prüfprozesseignung konnte für alle relevanten Merkmale des Qualitätsregelkreises nachgewiesen werden, weshalb die in-line Messtechnik in Kombination mit der analytischen Funktionssimulation für

diese Anforderung geeignet ist. Die letzten beiden Anforderungen betreffen die Klassifikationsgenauigkeit des Fräsdorns und die Regelgüte der radialen Zustellung. Hier wurde für die Klassifikation mit der Support-Vektor-Maschine eine Klassifikationsgüte von 91,11 % erreicht, was die Zielvorgabe von über 80 % übertrifft. Die Regelgüte der radialen Zustellung beträgt 0,9 μm und liegt damit deutlich unter der Anforderung von 2,0 μm . Insgesamt konnten die Anforderungen an den Qualitätsregelkreis vollständig erfüllt werden. Dieser Beitrag zeigt, dass komplexe Mikrozahnräder bereits heute im Rahmen des Regelkreises durch die konsequente Integration von in-line Messtechnik für die Qualitätssteigerung optimiert werden können.

10 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt der Abgleich der in Kapitel 3.1 gestellten Anforderungen mit dem erarbeiteten Lösungsansatz zur Integration eines adaptiven Qualitätsregelkreises. Ferner wird geprüft, ob die Nachweise der forschungsleitenden Hypothesen (siehe Kapitel 1.3) erbracht wurden. Abschließend folgt ein Ausblick am Ende des Kapitels.

10.1 Diskussion

Der Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit entwickelt eine Methode zur Integration eines adaptiven Qualitätsregelkreises in der Serienproduktion eines Mikroverzahnungsbauteils, welches eine relevante Funktion in einem Dentalinstrument hat. Die erste Anforderung des Lösungsansatzes widmet sich der Bewertung von Fertigungsabweichungen und Analyse der Funktion. Hierbei steht die funktionsorientierte Qualitätsbewertung in Form der Einflanken-Wälzprüfung im Fokus der Betrachtung. Um die echtzeitnahe funktionsorientierte Simulation auf Basis von optischen in-line Messdaten adäquat zu validieren, werden mit einem experimentellen Prüfstand Vergleichsmessungen durchgeführt. Durch den Einsatz von Methoden im Zeit- und Frequenzbereich konnte ein signalbasierter Vergleich zwischen dem Prüfstand und der Simulation durchgeführt werden. Die Auswertungen zeigen, dass zwischen den Ergebnissen aus dem Prüfstand und der Simulation ein hohes Maß an Übereinstimmung besteht. Im Wesentlichen lassen sich die Differenzen im Ergebnis auf mechanische Effekte, wie zum Beispiel die Reibung und das Bremsmoment, zurückführen, die in der Simulation nicht abgebildet werden. Des Weiteren führen Ausreißer und Lücken innerhalb der optischen Messdaten, die als Input für die funktionsorientierte Simulation interpoliert werden, trotz entsprechender Filterung zu marginalen Abweichungen.

Die zweite Anforderung befasst sich mit der in-line Messung von Mikrozahnradern unter Berücksichtigung der Gesamtunsicherheit. Durch den Einsatz eines statistischen Versuchsplans auf Basis eines Latin Hypercube Designs (LHD) wird unter Bewertung der aufgabenspezifischen Unsicherheit ein Messprogramm, welches unterhalb der geforderten Taktzeit eine minimale Messunsicherheit aufweist, abgeleitet. Die umfangreichen Auswertungen und die Identifizierung der kritischen Einstellparameter haben eine Balance zwischen der Forderung einer geringen Messunsicherheit und einer reduzier-

ten Messzeit ermöglicht. Es kann festgestellt werden, dass der Parameter der vertikalen Auflösung sich als geeignete Stellgröße erwies, um die Messzeit zu reduzieren, ohne dabei die Messunsicherheit signifikant zu erhöhen. Für die Ermittlung der Gesamt- bzw. Simulationsunsicherheit wird als weitere Inputgröße neben der Messunsicherheit der optischen Fokusvariationstechnologie die Unsicherheit des Funktionsprüfstands experimentell erfasst. Aufgrund des Nichtvorhandenseins einer Richtlinie zur Kalibrierung von Einflanken-Wälzprüfständen, wurde auf Basis des GUM ein tabellarisches Unsicherheitsbudget erstellt. Mit diesem Ansatz ist es möglich, die kritischen Einflussgrößen zu identifizieren und mittels experimentell ermittelten Sensitivitätskoeffizienten zu gewichten. Auf Basis dessen konnten die erweiterten Messunsicherheiten für die funktionsorientierten Merkmale der Einflanken-Wälzprüfung ermittelt werden. Die Auswertungen zeigen, dass die im Verhältnis zur Toleranz sehr geringen Messunsicherheiten für den Ansatz geeignet sind. Durch den Einsatz eines optimierten Latin Hypercube Sampling (LHS) Ansatzes konnten künstlich erzeugte Punktwolken des betrachteten Mikrozahnrades mit den charakteristischen Abweichungen unter Berücksichtigung der bekannten Messunsicherheit generiert werden. Auf Basis der künstlich generierten Zahnräder wurde mittels Monte-Carlo-Simulation (MCS) gemäß dem Vorgehen nach GUM die Modell- bzw. Gesamtunsicherheit für die vier relevanten Merkmale der Einflanken-Wälzprüfung ermittelt. Es kann festgestellt werden, dass die ermittelten Unsicherheiten der Funktionsprognose, welche die jeweiligen Inputunsicherheiten berücksichtigt, in Bezug auf die Toleranz als geeignet betrachtet werden können.

Die letzte Anforderung bezieht sich auf die echtzeitnahe Qualitätsregelung in der Produktion. Durch den Einsatz eines Latin Hypercube Sampling (LHS) konnten die kritischen Parameter, welche die Abweichungen an der Verzahnung beeinflussen, mittels gezielter Variation identifiziert werden. Auf Basis der Auswertung der kenngrößenbasierten Verzahnungsabweichungen, konnte ein Modell, welches die relevanten Einflussgrößen durch Methoden des Maschinellen Lernens berücksichtigt, entwickelt werden. Darauf aufbauend wurde ein Korrekturalgorithmus abgeleitet, mit welchem die Werkzeugmaschine beim Auftreten von Fertigungsabweichungen geregelt wird. Es wurde nachgewiesen, dass das Zahnweitenmaß, der Taumel des Fräsdorns und der Werkzeugverschleiß korrigiert werden können.

Abschließend lässt sich für die Gesamtbewertung festhalten, dass die Forschungshypothesen (siehe Kapitel 1.3) und die dargelegten Anforderungen (siehe Kapitel 3.1) aufgrund der Durchführung der Methode im exemplarischen Anwendungsfall an einem

Verzahnungsbauteil eines Dentalinstrumentes sowie der Validierung, durch die Integration in die Serienproduktion, bestätigt werden könnten.

10.2 Ausblick

Der untersuchte Ansatz deckt bereits die wichtigsten Charakteristika eines Qualitätsregelkreises für den Einsatz in der Mikroverzahnungsfertigung am Beispiel des WälzfräSENS ab. Weitere Forschungsarbeiten könnten zusätzliche Restriktionen und Freiheitsgrade in die Betrachtung aufnehmen. Die messtechnische Bewertung des Werkzeuges und die Einbeziehung von Werkstoffeigenschaften des Halbzeuges wären interessante Ergänzungen. Da diese Erweiterung die Komplexität erhöht, müssten im Zuge dessen zusätzliche Modelle und Korrekturalgorithmen entwickelt werden. Außerdem könnten weitere Herstellungsverfahren für die Mikroverzahnungsfertigung, wie zum Beispiel das Wälzschälen, untersucht werden. Darüber hinaus gilt es auch, die Möglichkeit des Transfers auf die Fertigung von Makroverzahnungen zu untersuchen.

Ein großes Potential zur methodischen Weiterentwicklung bietet die Integration von inprozess Messtechnik innerhalb der Werkzeugmaschine. Hier können mittels multisensorischer Integration Abweichungen während der Fertigung durch den Einsatz eines Softsensors erfasst werden. Der Softsensor fusioniert dabei die einzelnen physikalischen Messgrößen zu den relevanten fertigungsabweichenden Zielgrößen. Mit diesem Ansatz könnte eine kurzzyklische und hauptzeitparallele Regelung realisiert werden. Ferner könnte aus den erfassten Daten auch eine funktionsorientierte Verifikation abgeleitet werden.

Des Weiteren ist auch der Einsatz von schnelleren optischen Messverfahren in Betracht zu ziehen, da sich durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren die entsprechenden Taktzeiten verkürzen. Dabei ist die aufgabenspezifische Unsicherheit jedoch kritisch zu analysieren.

Potential zur methodischen Weiterentwicklung des Verfahrens zur Unsicherheitsermittlung der Einflanken-Wälzprüfung besteht in einer weiterführenden explorativen Betrachtung der Unsicherheiten des Prüfstands. Der Fokus sollte auf der weiteren Reduktion von Unsicherheitseinflüssen, insbesondere der Einspannung des Prüfzahnrades sowie der Eliminierung des Beitrags des Verdrehspiels liegen. Zusätzlich bietet sich die Entwicklung eines Mikro Zahnradnormals für die Einflanken-Wälzprüfung an. Dadurch wäre die Unsicherheitsermittlung auf ein nationales Normal rückführbar.

Weiterhin besteht großes Potential in der Erforschung von Paarungsstrategien zur Qualitätsregelung auf Basis von Funktionsmodellen. Dadurch lässt sich das Funktionsverhalten von hochpräzisen Produkten optimieren. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf in der Entwicklung von Strategien zur Qualitätsregelung über Unternehmensgrenzen hinweg sowie in der horizontalen Integration von Zulieferern und Kunden.

11 Zusammenfassung

Durch den fortschreitenden Trend der Miniaturisierung in der Industrie gewinnen Mikroverzahnungen branchenübergreifend an Bedeutung. Diese sind ein integraler Bestandteil mikromechanischer Systeme und werden beispielsweise in der Medizintechnik für die kinematische Übertragung von Drehmomenten bei Dentalinstrumenten verwendet. Dabei forcieren wettbewerbskritische akustische Emissionen und Vibrationen während des Betriebs neue Ziele für die Qualitätssicherung. Diese Einflüsse sind durch Fertigungsabweichungen und den daraus resultierenden Drehwegabweichungen von unmittelbarer Relevanz für die Funktion der Mikrogetriebe. Dabei lassen sich nur wenige Erkenntnisse der bereits umfangreich untersuchten Makroverzahnungen auf Mikroverzahnungen übertragen, welche in aktuell geltenden Normen keine Berücksichtigung finden. Durch die technologischen Grenzen aktueller Fertigungsverfahren weisen Mikroverzahnungen, in Relation zu ihren Strukturabmessungen, verhältnismäßig hohe geometrische Abweichungen auf, welche es in der qualitätsgetriebenen Serienproduktion der Zukunft zu minimieren gilt.

Basierend auf diesem Trend steigen auch die Anforderungen an die Hersteller von Hochpräzisionskomponenten in Bezug auf die Fertigung und Qualitätssicherung (Durakbasa et al. 2018). Die auftretenden Fertigungsabweichungen bei der Herstellung von Mikroverzahnungen gefährden das Funktionsverhalten von hochpräzisen Produkten.

Eine Möglichkeit zur Reduktion von geometrischen Abweichungen stellt die Qualitätsregelung in der Produktion dar. Durch den Einsatz von Regelkreisen in der Fertigung lassen sich Toleranzen nahe der technologischen Grenzen innerhalb des Produktionssystems besser beherrschen (Lanza et al. 2015).

Um das dargestellte Defizit zu beheben, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methode zur adaptiven in-line Qualitätsregelung in der Mikroverzahnungsfertigung vorgestellt. Die entwickelte Methode ermöglicht das Regeln von qualitätskritischen Merkmalen durch den Einsatz einer 100% in-line Messung. Durch die methodische Anwendung von statistischen Versuchsplänen konnte die optische Fokusvariationstechnologie für die in-line Messaufgabe qualifiziert werden. Diese in-line Integration ermöglicht Messungen innerhalb der Taktzeit bei geringer Messunsicherheit. Durch den Einsatz eines experimentellen Funktionsprüfstands konnte die analytische in-line Funktionssimulation validiert werden. Mit Hilfe von Skin Model Shapes wurde die Simulationsunsicherheit unter Berücksichtigung der Unsicherheit des experimentellen Prüfstands und

der Unsicherheit der optischen Fokusvariationstechnologie ermittelt. Die Implementierung der Funktionssimulation ermöglicht echtzeitnahe Funktionsprognosen, unter minimaler Gesamtunsicherheit im Produktionsumfeld. Mit Methoden des Maschinellen Lernens konnte ein Korrekturalgorithmus entwickelt werden, der bei erfassten Abweichungen die entsprechenden Parameter der Werkzeugmaschine korrigiert.

Die entwickelte Methode konnte im industriellen Anwendungsfall bei der Serienproduktion zur Herstellung von Dentalinstrumenten exemplarisch demonstriert werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es möglich ist, die Produktion adaptiv auf Basis der inline Qualitätsbewertung anzupassen, um die Spezifikationen, die nahe der technologischen Grenzen liegen, zu erreichen. Diese Arbeit zeigt, dass komplexe Mikrozahnräder bereits heute im Rahmen des Regelkreises durch die konsequente Integration von inline Messtechnik für die Qualitätssteigerung optimiert werden können.

Liste eigener Veröffentlichungen

Böttger et al. 2021

Böttger, D.; Stampfer, B.; Gauder, D.; Lanza, G.; Schulze, V.; Straß, B. & Wolter, B. (2021), „Working point determination of 3MA micromagnetic NDT-technique for production integrated detection of white layer during turning of AISI4140“, *Procedia CIRP*, 101, S. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.002>.

Böttger et al. 2020

Böttger, D.; Stampfer, B.; Gauder, D.; Straß, B.; Häfner, B.; Lanza, G.; Schulze, V. & Wolter, B. (2020), „Concept for soft sensor structure for turning processes of AISI4140“, *tm - Technisches Messen*, 87(12), S. 745–756. <https://doi.org/10.1515/teme-2020-0054>.

Böttger et al. 2022

Böttger, D.; Straß, B.; Wolter, B.; Güray, A.; Gauder, D.; Schulze, V. & Lanza, G. (2022), „In-situ Materialanalyse mit Mikromagnetik und ML-Verfahren“(112), S. 797–801. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-11-12-71>.

Gauder et al. 2021

Gauder, D.; Goelz, J.; Biehler, M.; Diener, M. & Lanza, G. (2021), „Balancing the trade-off between measurement uncertainty and measurement time in optical metrology using design of experiments, meta-modelling and convex programming“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, S. 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.06.016>.

Gauder et al. 2020

Gauder, D.; Biehler, M.; Stampfer, B.; Häfner, B.; Schulze, V.; Lanza, G.; Böttger, D.; Strass, B. & Wolter, B. (2020), „Softsensorgestützte Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen 42CrMo4/Development of a reference force model for soft sensor supported surface conditioning during longitudinal turning of AISI 4140 QT“, *wt Werkstattstechnik online*, 110, S. 758–762. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2020-11-12-22>.

Gauder et al. 2022

Gauder, D.; Biehler, M.; Gölz, J.; Schulze, V. & Lanza, G. (2022), „In-process acoustic pore detection in milling using deep learning“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, S. 125–133.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.008>.

Gauder et al. 2023

Gauder, D.; Gölz, J.; Jung, N. & Lanza, G. (2023), „Development of an adaptive quality control loop in micro-production using machine learning, analytical gear simulation, and inline focus variation metrology for zero defect manufacturing“, *Computers in Industry*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103799>.

Gauder et al. 2023

Gauder, D.; Bott, A.; Gölz, J. & Lanza, G. (2023), „Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using monte carlo simulation and skin model shapes for zero defect manufacturing of micro gears“, *Computers in Industry*, 146.

<https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103854>.

Gauder et al. 2022

Gauder, D.; Gölz, J.; Hornung, N. & Lanza, G. (2022), „Uncertainty determination of a novel single flank rolling test facility for micro spur gears“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 39(5), S. 332–344.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.08.014>.

Gauder et al. 2022

Gauder, D.; Gölz, J.; Bott, A. & Lanza, G. (2022), „Comparative analysis between single flank rolling test for micro gears and analytical simulation of optical measurements“, *tm - Technisches Messen*, 89(9), S. 580–593.

<https://doi.org/10.1515/teme-2022-0041>.

Gauder et al. 2022

Gauder, D.; Gölz, J.; Bott, A.; Jung, N. & Lanza, G. (2022), „Inline qualification of focus variation metrology for a series production of micro gears“, *tm - Technisches Messen*, 89(9), S. 594–611. <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0047>.

Gauder et al. 2019

Gauder, D.; Wagner, R.; Gözl, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnrädern hinsichtlich des Geräuschverhaltens“, *tm - Technisches Messen*, 86(9), S. 469–477. <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0090>.

Gauder et al. 2021

Gauder, D.; Biehler, M.; Gözl, J.; Stampfer, B.; Böttger, D.; Häfner, B.; Wolter, B.; Schulze, V. & Lanza, G. (2021), „Development of a methodical approach for uncertainty quantification and meta-modeling of surface hardness in white layers of longitudinal turned AISI4140 surfaces“, *tm - Technisches Messen*, 88(11), S. 661–673. <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0037>.

Schiller et al. 2022

Schiller, V.; Gauder, D.; Gözl, J.; Bott, A.; Wannenwetsch, M. & Lanza, G. (2022), „Generation of Artificial Learning Data to Train Functional Meta-Models of Micro Gears“, *Procedia CIRP*, 114, S. 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.010>.

Stampfer et al. 2020

Stampfer, B.; Böttger, D.; Gauder, D.; Zanger, F.; Häfner, B.; Straß, B.; Wolter, B.; Lanza, G. & Schulze, V. (2020), „Experimental identification of a surface integrity model for turning of AISI4140“, *Procedia CIRP*, 87, S. 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.067>.

Stampfer et al. 2022

Stampfer, B.; Bachmann, J.; Gauder, D.; Böttger, D.; Gerstenmeyer, M.; Lanza, G.; Wolter, B. & Schulze, V. (2022), „Modeling of surface hardening and roughness induced by turning AISI 4140 QT under different machining conditions“, *Procedia CIRP*, 108, S. 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.050>.

Wagner et al. 2020

Wagner, R.; Fischer, J.; Gauder, D.; Haefner, B. & Lanza, G. (2020), „Virtual in-line inspection for function verification in serial production by means of artificial intelligence“, *Procedia CIRP*, 92, S. 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.126>.

Wurster et al. 2021

Wurster, M.; Häfner, B.; Gauder, D.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Fluid automation—a definition and an application in remanufacturing production systems“, *Procedia CIRP*, 97, S. 508–513. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.267>.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema (A_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden.

A_Bott 2022

Bott, A. (2022), *Entwicklung einer intelligenten Auswertestrategie zur Funktionsprognose von Mikrozahnrädern unter Verwendung von Skin Model Shapes*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gölz 2022

Gölz, J. (2022), *Adaptive Qualitätsregelkreise - Prozessübergreifende in-line Integration optischer Sensorik zur dynamischen Funktionsoptimierung von Hochpräzisionsbauteilen für die datengetriebene Produktion der Zukunft*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hornung 2021

Hornung, N. (2021), *Messunsicherheitsermittlung eines Einflanken-Wälzprüfstands für Mikrozahnräder zur Validierung eines Simulationstool*, Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe.

Ait-Amir et al. 2015

Ait-Amir, B.; Pougnet, P. & El Hami, A. (2015), *Embedded Mechatronic Systems 2*, Elsevier BV, Amsterdam, The Netherlands.

Alxneit 2010

Alxneit, H. (2010), *Optimierung des Übertragungsverhaltens konischer Außenstirnräder mit kreuzenden Achsen*, Universität Stuttgart IKTD, Stuttgart. ISBN: 3922823742.

Anwer et al. 2013

Anwer, N.; Ballu, A. & Mathieu, L. (2013), „The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design“, *CIRP annals*, 62(1), S. 143–146.

Bandow & Holzmüller 2010

Bandow, G. & Holzmüller, H. H. (2010), *"Das ist gar kein Modell!". Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 3834984841.

Bender & Göhlich 2020

Bender, B. & Göhlich, D. (2020), *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau Anwendungen*, Springer-Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 3662597128.

Beucher 2015

Beucher, O. (2015), *Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 3662459655.

Bourier 2010

Bourier, G. (2010), „Beschreibende Statistik“ in *Statistik-Übungen*, Hrsg. G. Bourier, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 5–100.

Brecher et al. 2016

Brecher, C.; Löpenhaus, C. & Knecht, P. (2016), „Design of acoustical optimized bevel gears using manufacturing simulation“, *Procedia CIRP*, 41, S. 902–907.

Brecher et al. 2014a

Brecher, C.; Brumm, M. & Henser, J. (2014), „Calculation of the tooth root load carrying capacity of beveloid gears“, *American Gear Manufacturers Association, AGMA, Alexandria-USA*, S. 52–61.

Brecher et al. 2014b

Brecher, C.; Brumm, M. & Henser, J. (2014), „Calculation of the tooth root load carrying capacity of beveloid gears“, *Gear Technology*, 31(4), S. 52–61.

Brecher et al. 2010

Brecher, C.; Gorgels, C.; Kauffmann, P.; Röthlingshöfer, T.; Flodin, A.; Henser, J. & Höganäs, A. B. (Hrsg.) (2010), *3D tooth contact analysis-simulation possibilities for PM gears*.

Brecher et al. 2010

Brecher, C.; Gorgels, C.; Kauffmann, P.; Röthlingshöfer, T.; Flodin, A. & Henser, J. (Hrsg.) (2010), *ZaKo3D-simulation possibilities for PM gears*.

Brinkmann 2012

Brinkmann, B. (2012), *Internationales Wörterbuch der Metrologie*, Beuth Verlag, Berlin.

Brühl 2019

Brühl, V. (2019), „Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen und Big Data–Grundlagen. Marktpotenziale und wirtschaftspolitische Relevanz“, *WiSt-Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 48(11), S. 34–41.

Bruker Alicona 2020

Bruker Alicona (2020), *CMM*. <https://www.alicon.com/de/produkte/cmm/>.

Bruker Alicona 2023

Bruker Alicona (2023), *Fokus-Variation*. <https://www.alicon.com/de/technologien/fokus-variation> [18.09.2023].

Brunner & Wagner 2011

Brunner, F. J. & Wagner, K. W. (Hrsg.) (2011), *Taschenbuch Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis*, Carl Hanser Fachbuchverlag, München. ISBN: 3446425160.

Bruyere et al. 2007

Bruyere, J.; Dantan, J.-Y.; Bigot, R. & Martin, P. (2007), „Statistical tolerance analysis of bevel gear by tooth contact analysis and Monte Carlo simulation“, *Mechanism and Machine Theory*, 42(10), S. 1326–1351.

Buchholz 2008

Buchholz, I. (2008), *Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3832269541.

Cao 2002

Cao, J. (2002), *Anforderungs-und fertigungsgerechte Auslegung von Stirnradverzahnungen durch Zahnkontaktanalyse mit Hilfe der FEM*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3832209131.

Colledani et al. 2014

Colledani, M.; Ebrahimi, D. & Tolio, T. (2014), „Integrated quality and production logistics modelling for the design of selective and adaptive assembly systems“, *CIRP annals*, 63(1), S. 453–456. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.120>.

Colledani & Tolio 2006

Colledani, M. & Tolio, T. (2006), „Impact of quality control on production system performance“, *CIRP annals*, 55(1), S. 453–456.

Dantan et al. 2007

Dantan, J.-Y.; Bruyere, J.; Baudouin, C. & Mathieu, L. (2007), „Geometrical specification model for gear-expression, metrology and analysis“, *CIRP annals*, 56(1), S. 517–520.

Dantan et al. 2010

Dantan, J. Y.; Vincent, J. P.; Goch, G. & Mathieu, L. (2010), „Correlation uncertainty—Application to gear conformity“, *CIRP annals*, 59(1), S. 509–512.

Dantan et al. 2008

Dantan, J.-Y.; Bruyere, J.; Vincent, J.-P. & Bigot, R. (2008), „Vectorial tolerance allocation of bevel gear by discrete optimization“, *Mechanism and Machine Theory*, 43(11), S. 1478–1494.

Darrell et al. 2005

Darrell, T.; Indyk, P. & Shakhnarovich, G. (2005), *Nearest-neighbor Methods in Learning and Vision: Theory and Practice*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. ISBN: 0262256959.

Data Bridge Market Research 2021

Data Bridge Market Research (2021), *Global Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) Market - Industry Trends and Forecast to 2028*. <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-micro-electro-mechanical-system-mems-market#> [26.05.2023].

Dietrich & Schulze 2017

Dietrich, E. & Schulze, A. (2017), *Eignungsnachweis von Prüfprozessen: Prüfmitelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, München. ISBN: 3446451714.

DIN 1319

DIN 1319 (1995), *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe (DIN 1319-1:1995-01)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 21772:2012

DIN 21772:2012 (2012), *Zahnräder, Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung, Definitionen der Abweichungen (DIN 21772:2012)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 3960

DIN 3960 (1987), *Definitionen, Parameter und Gleichungen für evolventenverzahnte Stirnräder und Zahnradpaare (zurückgezogen) (DIN 3960:1987)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 3961

DIN 3961 (1978), *Toleranzen für zylindrische Verzahnungen - Grundflächen (zurückgezogen) (DIN 3961:1978)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 3961:1978-08

DIN 3961:1978-08 (1978), *Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Grundlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 3990

DIN 3990 (1987), *Calculation of load capacity of cylindrical gears; introduction and general influence factors (DIN 3990-1:1987)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 55350

DIN 55350 (2021), *Begriffe zum Qualitätsmanagement (DIN 55350:2021-10)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 780

DIN 780 (1977), *Modulreihe für Zahnräder; Moduln für Stirnräder (DIN 780-1:1977-05)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 867

DIN 867 (1986), *Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern (Zylinderrädern) für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau (DIN 867:1986-02)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 868

DIN 868 (1976), *Allgemeine Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zahnräder, Zahnradpaare und Zahnradgetriebe (DIN 868:1976-12)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 15530

DIN EN ISO 15530 (2018), *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Technique for Determining the Uncertainty of Measurement - Use of Calibrated Workpieces or Measurement Standards (DIN EN ISO 15530-3)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 17450

DIN EN ISO 17450 (2012), *Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 1: Model for geometrical specification and verification (DIN EN ISO 17450-1:2012)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 9001

DIN EN ISO 9001 (2015), *Qualitätsmanagementsysteme-Anforderungen (ISO 9001:2015-11)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN IEC 60050

DIN IEC 60050 (2014), *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (DIN IEC 60050-351:2014-09)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN ISO 21771

DIN ISO 21771 (2014), *Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung - Begriffe und Geometrie (DIN ISO 21771:2014-08)*, Beuth Verlag, Berlin.

Dunovska et al. 2015

Dunovska, V.; Krause, M. & Kniel, K. (2015), „Messung von Mikroverzahnung— Entwicklung von Verfahren zur Eignungsprüfung von Messgeräten für die Mikroverzahnungsmessung, Forschungsvereinigung Antriebstechnik eV (FVA)—Arbeitskreis Messtechnik, Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben Nr. 567 II, Heft 1144; Forschungsvereinigung Antriebstechnik eV (FVA): Frankfurt, Germany, 2015“, *FVA-Forschungsvorhaben 567 II(1144)*.

Durakbasa et al. 2018

Durakbasa, N. M.; Bauer, J. M.; Bodur, O. & Poszvek, G. (Hrsg.) (2018), *Challenges of miniaturizing a precision gear*, Springer. ISBN: 978-3-319-92267-6.

EN ISO/IEC 17025

EN ISO/IEC 17025 (2018), *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (EN ISO/IEC 17025:2018)*, Beuth Verlag, Berlin.

Fleischer et al. 2008

Fleischer, J.; Buchholz, I.; Härtig, F. & Dai, G. (2008), „Mikroverzahnungsprüfkörper μ -DBA für evolventische Profillinienabweichungen (Geometrical Standards for Micro Gears μ -DBA)“, *tm-Technisches Messen*, 75(3), S. 168–177.

Frenco 2018a

Frenco (March/April 2018), „REANY – Gear Inspection Software Melds Data from Multiple Sources“, *Gear Technology*. <https://www.geartechnology.com/ext/re-sources/issues/0318x/frenco-reany.pdf?1633054920> [18.09.2023].

Frenco 2018

Frenco (2018), *Reany brochure. Analyse – Beratung – Verbesserung*. https://www.frenco.de/dateien/prospekte/frenco_ursachenanalyse.pdf [18.09.2023].

Friedman 1997

Friedman, J. H. (1997), „On bias, variance, 0/1—loss, and the curse-of-dimensionality“, *Data mining and knowledge discovery*, 1(1), S. 55–77.

Frochte 2020

Frochte, J. (2020), *Maschinelles Lernen*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 978-3-446-46144-4.

Gauder et al. 2023a

Gauder, D.; Gölz, J.; Jung, N. & Lanza, G. (2023), „Development of an adaptive quality control loop in micro-production using machine learning, analytical gear simulation, and inline focus variation metrology for zero defect manufacturing“, *Computers in Industry*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103799>.

Gauder et al. 2021

Gauder, D.; Goelz, J.; Biehler, M.; Diener, M. & Lanza, G. (2021), „Balancing the trade-off between measurement uncertainty and measurement time in optical metrology using design of experiments, meta-modelling and convex programming“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, S. 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.06.016>.

Gauder et al. 2023b

Gauder, D.; Bott, A.; Gölz, J. & Lanza, G. (2023), „Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using monte carlo simulation and skin model

shapes for zero defect manufacturing of micro gears“, *Computers in Industry*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103854>.

Gauder et al. 2022a

Gauder, D.; Gölz, J.; Hornung, N. & Lanza, G. (2022), „Uncertainty determination of a novel single flank rolling test facility for micro spur gears“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 39(5), S. 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.08.014>.

Gauder et al. 2022b

Gauder, D.; Gölz, J.; Bott, A. & Lanza, G. (2022), „Comparative analysis between single flank rolling test for micro gears and analytical simulation of optical measurements“, *tm - Technisches Messen*, 89(9), S. 580–593. <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0041>.

Gauder et al. 2022c

Gauder, D.; Gölz, J.; Bott, A.; Jung, N. & Lanza, G. (2022), „Inline qualification of focus variation metrology for a series production of micro gears“, *tm - Technisches Messen*, 89(9), S. 594–611. <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0047>.

Gauder et al. 2019

Gauder, D.; Wagner, R.; Gölz, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnradern hinsichtlich des Geräuschverhaltens“, *tm - Technisches Messen*, 86(9), S. 469–477. <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0090>.

Geiger & Kotte 2007

Geiger, W. & Kotte, W. (2007), *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme-Perspektiven*, Springer-Verlag, Heidelberg. ISBN: 383489429X.

Gevatter & Grünhaupt 2006

Gevatter, H.-J. & Grünhaupt, U. (2006), *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-21207-2.

Goch 2003

Goch, G. (2003), „Gear metrology“, *CIRP annals*, 52(2), S. 659–695.

Gorgels et al. 2007

Gorgels, C.; Schröder, T. & Klocke, F. (2007), „Hartfeinbearbeitung kleinmoduliger Verzahnungen“, *FVA-Forschungsvorhaben 567 II*(Nr. 813).

Gravel 2011

Gravel, G. (2011), „Simulation und Korrektur von Verzahnungsabweichungen- Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion“, *VDI-Bericht*, 2148.

Haefner & Lanza 2017

Haefner, B. & Lanza, G. (2017), „Function-oriented measurements and uncertainty evaluation of micro-gears for lifetime prognosis“, *CIRP annals*, 66(1), S. 475–478.

Häfner 2017

Häfner, B. (2017), *Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3844053239.

Härtig 2010

Härtig, F. (2010), „Rückführung von der Mikro- zur Größtverzahnung: 256. PTB-Seminar: Verzahnungsmesstechnik“, *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*.

Härtig et al. 2002

Härtig, F.; Schwenke, H. & Weiskirch, C. (2002), „Messung von Mikroverzahnungen“, *VDI BERICHTE*, 1673, S. 247–258.

Härtig et al. 2009

Härtig, F.; Kniel, K. & Rost, K. (2009), „Messung von Mikroverzahnung. Studie zum Bedarf und den Möglichkeiten der Messung von kleinen Verzahnungen“, *FVA-Forschungsvorhaben 5671*(908).

Hartmann et al. 2012

Hartmann, W.; Hausotte, T.; Dummer, D. & Wudy, K. (2012), „Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile“, *RTejournal-Forum für Rapid Technologie*.

Hauser, S. 2007

Hauser, S. (2007), *Konzepte zur Validierung geometrischer Charakteristika von Mikroverzahnungen und-getrieben*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000007817>.

Heinrich et al. 2020

Heinrich, B.; Linke, P. & Glöckler, M. (2020), „Grundlagen zur Automatisierung“ in *Grundlagen Automatisierung*, Hrsg. B. Heinrich, Springer-Vieweg, Wiesbaden, S. 1–29.

Heinrich & Schneider 2019

Heinrich, B. & Schneider, W. (2019), *Grundlagen Regelungstechnik*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-26741-4.

Heizmann & Imkamp 2011

Heizmann, M. & Imkamp, D. (2011), „Automatisierung und Integration. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion“, *Fertigungsmesstechnik 2020*, S. 27–35.

Helton & Davis 2003

Helton, J. C. & Davis, F. J. (2003), „Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems“, *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), S. 23–69. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9).

Helton & Davis 2000

Helton, J. C. & Davis, F. J. (2000), *Sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis*. <https://pdfs.semanticscholar.org/0b26/9e8f4c8f1a046455c0d9b68324e739a8c580.pdf> [18.09.2023].

Hemmelmann 2007

Hemmelmann, J. E. (2007), *Simulation des lastfreien und belasteten Zahneingriffs zur Analyse der Drehübertragung von Zahnradgetrieben*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3832268375.

Herrigel 2015

Herrigel, G. (2015), „Globalization and the German industrial production model“, *Journal for Labour Market Research*, 48(2), S. 133–149.

Hoffmann & Wolff 2014

Hoffmann, R. & Wolff, M. (2014), *Intelligente Signalverarbeitung 1: Signalanalyse*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 3662453231.

Ingeli et al. 2015

Ingeli, J.; Brunn, M. & Brecher, C. (2015), „Asymmetrische Zahnlückengeometrie. Untersuchung des Einflusses von asymmetrischen Zahnlückengeometrien auf das

Laufverhalten von Stirnrad-Verzahnungen“, *FVA-Forschungsvorhaben 484II(1126)*.

ISO 1328

ISO 1328 (2013), *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification - Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth (ISO 1328-1:2013)*, Beuth Verlag, Berlin.

ISO 1328

ISO 1328 (2018), *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification - Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth (ISO 1328-1:2018)*, Beuth Verlag, Berlin.

ISO 230

ISO 230 (2012), *Test code for machine tools - Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions (ISO 230-1:2012)*, Beuth Verlag, Berlin.

ISO 230

ISO 230 (2014), *Test code for machine tools - Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes (ISO 230-2:2014)*, Beuth Verlag, Berlin.

Janssen 2013

Janssen, H. (2013), „Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence“, *Reliability Engineering & System Safety*, 109, S. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.08.003>.

Jantzen et al. 2019

Jantzen, S.; Stein, M.; Dietzel, A. & Kniel, K. (2019), „Microgear measurement standards: Comparing tactile, optical and computed tomography measurements“, *Gear Technology*, August, S. 52–63. <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0819x/microgear-measurement.pdf> [18.09.2023].

Jantzen et al. 2018

Jantzen, S.; Neugebauer, M.; Meeß, R.; Wolpert, C.; Dietzel, A.; Stein, M. & Kniel, K. (2018), „Novel measurement standard for internal involute microgears with modules down to 0.1 mm“, *Measurement Science and Technology*, 29(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae6f4>.

JCGM 100:2008

JCGM 100:2008 (2008), *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (JCGM 100:2008)*.

JCGM 101:2008

JCGM 101:2008 (2008), *Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method (JCGM 101:2008)*, Joint Committee for Guides in Metrology.

JCGM 104:2009

JCGM 104:2009 (2009), *Evaluation of measurement data—an introduction to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement' and related documents (JCGM 104:2009)*, Joint Committee for Guides in Metrology.

JCGM 200:2012

JCGM 200:2012 (2012), *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JCGM 200:2012)*, Joint Committee for Guides in Metrology.

Klocke et al. 2013

Klocke, F.; Brumm, M. & Staudt, J. (2013), „Freiformfräsen von Verzahnungen: Untersuchungen zur Prozessfähigkeit auf Universalfräsmaschinen“, *wt Werkstatt-technik online*, 103(10), S. 808–812.

Klocke & Brecher 2016

Klocke, F. & Brecher, C. (2016), *Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 9783446431409.

König & Schmitt 2018

König, N. & Schmitt, R. H. (2018), „Klein, kleiner, Nano. Optische Oberflächen-messverfahren zur Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen“, *Inspect*(19), S. 50–52.

Kraus & Merklein 2022

Kraus, M. & Merklein, M. (2022), „Analysis of the Part Quality and Process Stability when Producing Metallic Micro Parts by Multi-Stage Bulk Forming from Sheet Metal“, S. 724–731. <https://doi.org/10.4028/p-sl9j59>.

Kreiß & Neuhaus 2006

Kreiß, J.-P. & Neuhaus, G. (2006), *Einführung in die Zeitreihenanalyse*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 3540335714.

Lanza et al. 2015

Lanza, G.; Haefner, B. & Kraemer, A. (2015), „Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching“, *CIRP annals*, 64(1), S. 399–402.

Lanza et al. 2019

Lanza, G.; Haefner, B.; Schild, L.; Berger, D.; Eschner, N.; Wagner, R. & Zaiß, M. (2019), „In-line measurement technology and quality control“ in *Metrology*, Hrsg. W. Gao, Springer-Verlag, Singapore, S. 399–433.

Lanza & Viering 2011

Lanza, G. & Viering, B. (2011), „A novel standard for the experimental estimation of the uncertainty of measurement for micro gear measurements“, *CIRP annals*, 60(1), S. 543–546.

Lauer, M. 2004

Lauer, M. (2004), *Entwicklung eines Monte-Carlo-Verfahrens zum selbständigen Lernen von Gauß-Mischverteilungen*. Dissertation, Universität Osnabrück.

Linke & Börner 2013

Linke, H. & Börner, J. (Hrsg.) (2013), *Stirnradverzahnung. Berechnung - Werkstoffe - Fertigung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 978-3-446-47036-1.

Maimon & Rokach 2014

Maimon, O. Z. & Rokach, L. (2014), *Data mining with decision trees: theory and applications*, World scientific, Singapore. ISBN: 9814590096.

Matuszyk et al. 2010

Matuszyk, T. I.; Cardew-Hall, M. J. & Rolfe, B. F. (2010), „The kernel density estimate/point distribution model (KDE-PDM) for statistical shape modeling of automotive stampings and assemblies“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(4), S. 370–380.

McGrath & Bedi 2004

McGrath, C. & Bedi, R. (2004), „The association between dental anxiety and oral

- health-related quality of life in Britain“, *Community dentistry and oral epidemiology*, 32(1), S. 67–72.
- Mease et al. 2004
Mease, D.; Nair, V. N. & Sudjianto, A. (2004), „Selective assembly in manufacturing: statistical issues and optimal binning strategies“, *Technometrics*, 46(2), S. 165–175.
- Mieke 2014
Mieke, S. (2014), *Kurze Einführung in die Berechnung der Messunsicherheit nach GUM*. https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.2_festkoerpermechanik/1.22/276._PTB-Seminar.Teil_1.MU-Drehmoment_GUM.pdf [18.09.2023].
- Müller 2016
Müller, H. (2016), *Geräusentwicklung von Verzahnungen: Nichts sehen, nichts hören, nichts sagen*. https://klingelnberg.com/fileadmin/News/White_Paper/ANTRIEBSTECHNIK_GERAEUSCHENTWICKLUNG_VON_VERZAHNUNGEN_NICHTS_SEHEN_NICHTS_HOEREN_NICHTS_SAGEN_WHITEPAPER_2017_01_09_DE.pdf [18.09.2023].
- Neill & Hashemi 2018
Neill, S. P. & Hashemi, M. R. (2018), *Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea*, Academic Press, London. ISBN: 9780128104491.
- Neuschaefer-Ruben et al. 2011
Neuschaefer-Ruben, U.; Bartscher, M.; Neukamm, M.; Neugebauer, M.; Härtig, F. & Goebels, J. (Hrsg.) (2011), *Measurement of micro gears: comparison of optical, tactile-optical, and CT measurements*, SPIE. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7864/1/Measurement-of-micro-gears--comparison-of-optical-tactile-optical/10.1117/12.872413.full?SSO=1> [18.09.2023].
- Paucksch et al. 2008
Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M. & Tikal, F. (2008), *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 3834802794.

Pesch 2021

Pesch, B. (2021), *Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM*, Books on Demand, Norderstedt. ISBN: 3753490172.

Pesch 2010

Pesch, B. (2010), *Messunsicherheit. Basiswissen für Einsteiger und Anwender*, Books on Demand, Norderstedt. ISBN: 3839190266.

Pfeifer & Schmitt 2011

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (Hrsg.) (2011), *Fertigungsmesstechnik*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 3486711350.

Pfeifer & Schmitt 2011

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (2011), „Fertigungsmesstechnik“ in *Fertigungsmesstechnik*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.

Pueo et al. 2019

Pueo, M.; Acero, R.; Lope, M. A. & Santolaria, J. (2019), „Measurement uncertainty evaluation model in radial composite gear inspection“, *Precision Engineering*, 60, S. 222–234. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.015>.

Pueo et al. 2020

Pueo, M.; Acero, R.; Lope, M. A. & Santolaria, J. (2020), „Uncertainty budget analysis for worm and worm gear single-flank rolling tests“, *Measurement*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107051>.

Raychaudhuri 2008

Raychaudhuri, S. (Hrsg.) (2008), *Introduction to monte carlo simulation*, IEEE. ISBN: 142442707X.

Renishaw 2003

Renishaw (2003), *ML10 laser measurement system. Laser system support disk, manual and brochure*, Renishaw plc, New Mills, UK.

Roth 2001

Roth, K. (2001), *Zahnradtechnik Stirnrad- Evolventenverzahnungen. Geometrische Grundlagen, Profilverschiebungen, Toleranzen, Festigkeit*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-18141-2.

Röthlingshöfer 2012

Röthlingshöfer, T. (2012), *Auslegungsmethodik zur Optimierung des Einsatzverhaltens von Beveloidverzahnungen*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3844010203.

Runkler 2010

Runkler, T. A. (2010), *Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-9353-6.

Sampaio Fernandes et al. 2006

Sampaio Fernandes, J. C.; Carvalho, A. P.; Gallas, M.; Vaz, P. & Matos, P. A. (2006), „Noise levels in dental schools“, *European Journal of Dental Education*, 10(1), S. 32–37.

Schäfer et al. 2003

Schäfer, J.; Schlattmeier, H. & Weck, M. (2003), „FVA-Nr. 377–Heft 723–Kontaktmodell mehrfacher Zahneingriff: Berechnung von Stirnradpaarungen mit Mehrfacheingriffen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, *Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt/Main*.

Schäfer 2008

Schäfer, J. (2008), *Erweiterung des Linienkontaktmodells für die Finite-Elementebasierte Zahnkontaktanalyse von Stirnradverzahnungen*, Shaker-Verlag, Düren. ISBN: 3832272682.

Schiller et al. 2022

Schiller, V.; Gauder, D.; Gözl, J.; Bott, A.; Wannenwetsch, M. & Lanza, G. (2022), „Generation of Artificial Learning Data to Train Functional Meta-Models of Micro Gears“, *Procedia CIRP*, 114, S. 67–72.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.010>.

Schleich et al. 2014

Schleich, B.; Anwer, N.; Mathieu, L. & Wartzack, S. (2014), „Skin Model Shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering“, *Computer-Aided Design*, 50, S. 1–15.

Schmitt & Damm 2008

Schmitt, R. & Damm, B. E. (2008), „Prüfen und Messen im Takt. Wie sie mit Inline-Messtechnik ihre Wertschöpfung maximieren“, *QZ*, 53, S. 57–59.

Schneider 2020

Schneider, M. (2020), *Datenanalyse für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure*, Springer Spektrum, Heidelberg. ISBN: 3662618664.

Schölkopf et al. 2002

Schölkopf, B.; Smola, A. J. & Bach, F. (2002), *Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. ISBN: 0262194759.

Schuth & Buerakov 2017

Schuth, M. & Buerakov, W. (2017), *Handbuch Optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 3446436618.

Shao et al. 2020

Shao, N.; Ding, X. & Liu, J. (2020), „Tolerance analysis of spur gears based on skin model shapes and a boundary element method“, *Mechanism and Machine Theory*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103658>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X19310481>.

Siebertz et al. 2017

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), „Varianten der statistischen Versuchsplanung“ in *Statistische Versuchsplanung*, Hrsg. K. Siebertz, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 139–158.

Siebertz 2017

Siebertz, K. (Hrsg.) (2017), *Statistische Versuchsplanung*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Stegmann & Gomez 2002

Stegmann, M. B. & Gomez, D. D. (2002), „A brief introduction to statistical shape analysis“, *Informatics and mathematical modelling*, *Technical University of Denmark, DTU*, 15(11).

Sun et al. 2018

Sun, S.; Wang, S.; Wang, Y.; Lim, T. C. & Yang, Y. (2018), „Prediction and optimization of hobbing gear geometric deviations“, *Mechanism and Machine Theory*, 120, S. 288–301.

Toal 2008

Toal, D. (2008), *Mechatronics 2008 : Proceedings of the 11th Mechatronics Forum Biennial International Conference, 23-25 June 2008, University of Limerick, Ireland*, University of Limerick, Limerick. ISBN: 9781905952052.

VDA-5

VDA-5 (2021), *Mess-u. Prüfprozesse (VDA-5)*, VDA Band 05, Berlin.

VDI 2608

VDI 2608 (2001), *Tangentiale Verbundprüfung und radiale Verbundprüfung von Stirnrädern, Kegelrädern, Schnecken und Schneckenrädern (VDI 2608:2001)*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2731

VDI 2731 (2009), *Mikrogetriebe - Grundlagen (VDI 2731:2009)*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI/VDE 2612

VDI/VDE 2612 (2018), *Messen und Prüfen von Zahnrädern - Auswertung von Profil- und Schrägungsmessungen an Stirnrädern mit Evolventenprofil (VDI/VDE 2612 - Blatt 1:2018)*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI/VDE 2617

VDI/VDE 2617 (2018), *Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their testing - Test process suitability of measurements with coordinate measuring machines (VDI/VDE 2617 - Part 8)*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI/VDE 2627

VDI/VDE 2627 (2015), *Messräume - Klassifizierung und Kenngrößen - Planung und Ausführung (VDI/VDE 2627-1)*, Beuth Verlag, Berlin.

Viana 2016

Viana, F. A. C. (2016), „A tutorial on Latin hypercube design of experiments“, *Quality and reliability engineering international*, 32(5), S. 1975–1985.

Viering, B. 2011

Viering, B. (2011), *Mikroverzahnungsnorm. Eine Methode zur experimentellen Ermittlung der Messunsicherheit bei Mikroverzahnungen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Vincent et al. 2009

Vincent, J.-P.; Dantan, J.-Y. & Bigot, R. (2009), „Virtual meshing simulation for gear conformity verification“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1), S. 35–46.

Wagner, R. 2020

Wagner, R. (2020), *Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Wang et al. 2016

Wang, H.; Lei, Z.; Zhang, X.; Zhou, B. & Peng, J. (2016), „Machine learning basics“, *Deep learning*, S. 98–164.

Weckenmann 2012

Weckenmann, A. (2012), *Koordinatenmesstechnik: flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 3446407391.

Weckenmann & Gawande 1999

Weckenmann, A. & Gawande, B. (1999), „Koordinatenmesstechnik: Flexible Meßstrategien für Maß“, *Form und Lage 2nd edition Carl Hanser Verlag GmbH Co KG (München)*, 224.

Werner 2006

Werner, M. (2006), *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB: Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen; mit 67 Tabellen*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN: 3834800430.

Winkel et al. 2003

Winkel, O.; Schlattmeier, H. & Klocke, F. (2003), „Hart-Feinbearbeitung von Stirnrädern I“, *FVA-Forschungsvorhaben 4301(707)*.

Wittel et al. 2017

Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J. & Spura, C. (2017), *Roloff/Matek Maschinenelemente*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-17896-3.

Wu et al. 2021

Wu, D.; Yan, P.; Guo, Y.; Zhou, H. & Yi, R. (2021), „Integrated optimization method for helical gear hobbing parameters considering machining efficiency, cost

and precision", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(3), S. 735–756.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bezeichnung am Zahn nach (Wittel et al. 2017)	6
Abbildung 2-2: Konstruktion einer Evolvente (Wittel et al. 2017)	7
Abbildung 2-3: Bezeichnungen einer Evolventenverzahnung (Wittel et al. 2017)	7
Abbildung 2-4: Darstellung der negativen (links) und positiven (rechts) Profilverschiebung (Klocke & Brecher 2016)	9
Abbildung 2-5: Parameter des Wälzfräsprozesses nach (Klocke & Brecher 2016)	10
Abbildung 2-6: Shiftbereich eines Wälzfräasers (Klocke & Brecher 2016)	11
Abbildung 2-7: Geometrische Verzahnungskenngrößen: (a) Profilabweichungen $F\alpha$, (b) Einzelteilungsabweichung f_p , Darstellung nach (DIN 21772)	12
Abbildung 2-8: Profil- und Flankenlinienabweichungen nach (Klocke & Brecher 2016)	13
Abbildung 2-9: links extrapolierte Toleranzen für F_i' (Verzahnungsqualität 7) und rechts extrapolierte Toleranzen für f_i' (Verzahnungsqualität 7)	16
Abbildung 2-10: Integrationsgrad der Messtechnik nach (Lanza et al. 2019)	19
Abbildung 2-11: links: Aufbau der Fokusvariation (Schuth & Buerakov 2017), rechts: Kontrastauswertung der Fokusvariation nach (Weckenmann 2012)	21
Abbildung 2-12: Funktionale Prüfverfahren für Verzahnungen (VDI 2608)	24
Abbildung 2-13: Einflanken-Wälzprüfung nach (Klocke & Brecher 2016)	25
Abbildung 2-14: Oben und unten: Beispielhaftes Ergebnis einer Einflanken-Wälzprüfung nach (DIN 3960)(schwarz = Drehwinkelabweichung; grau = langwelliger Anteil der Drehwinkelabweichung; hellgrau = kurzwelliger Anteil der Drehwinkelabweichung)	25
Abbildung 2-15: Fast Fourier Transformation nach (Klocke & Brecher 2016; Müller 2016)	26

Abbildung 2-16: Typische Profilabweichungen und ihre Auswirkungen (VDI 2608)	28
Abbildung 2-17: Verfahren nach GUM Supplement 1 (JCGM 101:2008)	34
Abbildung 2-18: Kalibrierhierarchie in Deutschland nach (Härtig 2010)	38
Abbildung 2-19: Konzept der statistischen Versuchsplanung nach (Bandow & Holzmüller 2009)	40
Abbildung 2-20: Vorteil des LHS (links) gegenüber Zufallszahlen (rechts) für Versuchsräume nach (Siebertz et al. 2017)	40
Abbildung 2-21: Vereinfachter Aufbau eines Qualitätsregelkreises nach (Heinrich et al. 2020)	48
Abbildung 4-1: Zielbild Adaptiver Qualitätsregelkreis	61
Abbildung 4-2: Zielsetzung und Struktur des Lösungsansatzes	63
Abbildung 4-3: Dentalinstrument Winkelstück Typ „T1 Classic“ (Quelle: Dentsply Sirona)	64
Abbildung 4-4: Kopfwelle des Winkelstücks	64
Abbildung 5-1: Aufbau der taktilen Kalibrierung des Zeiss F25	69
Abbildung 5-2: In-line Setup der Fokusvariation	71
Abbildung 5-3: Visualisierung des Versuchsplans	74
Abbildung 5-4: Ishikawa-Diagramm für die Einflussfaktoren auf die Unsicherheit der Fokusvariation nach (Gauder et al. 2022b)	75
Abbildung 5-5: Bewertungsmatrix für Reinigungsverfahren (Gauder et al. 2022b)	77
Abbildung 5-6: Analyse der Messzeit (Gauder et al. 2022b)	78
Abbildung 5-7: Gesamtfehler der Profilabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022b)	79
Abbildung 5-8: Abweichung der Profilform (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022b)	80
Abbildung 5-9: Gesamtfehler der Flankenabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022b)	81

Abbildung 5-10: Abweichung der Flankenwinkelabweichung (links) und Varianzanalyse (rechts)(Gauder et al. 2022b)	81
Abbildung 5-11: Punktwolke (links) und Punktwiederholbarkeit (rechts) (Gauder et al. 2022b)	83
Abbildung 6-1: Aufbau und Achsen des Einflanken-Wälzprüfstands für Mikroverzahnungen (Gauder et al. 2022a)	87
Abbildung 6-2: Meisterzahnrad $z = 13$ (links) und Meisterzahnrad $z = 40$ (rechts)	89
Abbildung 6-3: Meisterfehlerkorrektur der Abtriebsseite	91
Abbildung 6-4: Montage des Lehrzahnrad auf der Abtriebsseite	91
Abbildung 6-5: Spanndornkompensation auf der Antriebsseite	93
Abbildung 6-6: Positionsmessung der Y-Achsen des Prüfstands mit Hilfe der Laserinterferometrie	94
Abbildung 6-7: Einfluss der Winkelgeschwindigkeit des Prüfzahnrad (Kopfwelle) auf den Wälzweg für $d = 3.640 \text{ mm}$ (Gauder et al. 2022a)	95
Abbildung 6-8: Analyse der Differenzspektren zwischen $30 \text{ }^\circ/\text{s}$ und $60 \text{ }^\circ/\text{s}$ für beide möglichen Subtraktionen, angegeben durch Vergleichsoperatoren in der Achsenbeschriftung (Gauder et al. 2022a)	97
Abbildung 6-9: Einflanken-Wälzabweichung F_i' mit zunehmender Anzahl an Umdrehungen (Gauder et al. 2022a)	98
Abbildung 6-10: Beispielhaftes, nicht kompensiertes Rohsignal, das einen Fehler während der Anlaufphase für $d = 3,640 \text{ mm}$ zeigt (Gauder et al. 2022a)	98
Abbildung 6-11: Ermittelte Positioniergenauigkeit der X-Achse mit fünf bidirektionalen Ansätzen (Gauder et al. 2022a)	99
Abbildung 6-12: Ishikawa Diagramm aller wichtigen Einflussparameter auf die Messunsicherheit der Einflanken-Wälzprüfung (Gauder et al. 2022a)	101
Abbildung 7-1: Allgemeines Vorgehen zum Vergleich von Prüfstand mit analytischer Drehweg-Simulation	110
Abbildung 7-2: Simulative Zahnkontaktanalyse mit Frenco Reany	111

Abbildung 7-3: Histogramm der experimentellen Einzelflanken-Wälzabweichung von 100 Zahnrädern auf dem Prüfstand	112
Abbildung 7-4: Methodik dieses Ansatzes (Gauder et al. 2022c)	114
Abbildung 7-5: Optimiertes Filter zur Extraktion der kurzwelligen Komponente des Übertragungsfehlers (Gauder et al. 2022c)	116
Abbildung 7-6: Untersuchung der Filtergenauigkeit (Gauder et al. 2022c)	117
Abbildung 7-7: Zeitreihensignal für Simulation (links) und Prüfstand (rechts) (Gauder et al. 2022c)	118
Abbildung 7-8: Kreuzkorrelation und spektrale Korrelationsanalyse (Gauder et al. 2022c)	119
Abbildung 7-9: Mittlere Differenz der spektralen Leistungsdichte (Gauder et al. 2022c)	120
Abbildung 7-10: Unterschied zwischen Simulation und Prüfstand (Gauder et al. 2022c)	123
Abbildung 8-1: Methode zur Bestimmung der spezifischen Simulationsunsicherheit (Gauder et al. 2023b)	125
Abbildung 8-2: ICP Fit der Punktwolke (grün) an das CAD Modell (schwarz)	127
Abbildung 8-3: Vorverarbeitung I der Messdaten für die weitere Analyse (Gauder et al. 2023b)	128
Abbildung 8-4: Cluster innerhalb einer Punktwolke im Flanken-Koordinatensystems	129
Abbildung 8-5: Auftretenswahrscheinlichkeit für die Datenpunkte aus 20 Messungen	133
Abbildung 8-6: Stufen des Realitätsgrades der Punktwolken (Gauder et al. 2023b)	134
Abbildung 8-7: Indirekte Berücksichtigung der Unsicherheiten des Teilungsabweichung (Gauder et al. 2023b)	136

Abbildung 8-8: Simulationsgenauigkeit der Skin Model Shapes für 20 Datensätze der Einflanken-Wälzabweichung der linken Flanken (Gauder et al. 2023b)	137
Abbildung 8-9: Simulationsgenauigkeit der Skin Model Shapes für 20 Datensätze der Einflanken-Wälzabweichung der rechten Flanken (Gauder et al. 2023b)	138
Abbildung 8-10: Änderung des Flankenwinkels	139
Abbildung 8-11: Vorverarbeitung II, in dem die erzeugten Zahnräder für die Simulation vorbereitet werden (Gauder et al. 2023b)	140
Abbildung 8-12: Modifizierter Ansatz zur Bestimmung der Standardunsicherheiten der Simulation auf der Grundlage von Messunsicherheiten gemäß GUM Supplement 1 (Gauder et al. 2023b; JCGM 101:2008)	140
Abbildung 8-13: Häufigkeitsverteilung mit angepasster Normalverteilung der Charge 2 (Gauder et al. 2023b)	142
Abbildung 8-14: Stabilitätsanalyse der untersuchten Funktionsparameter (Gauder et al. 2023b)	143
Abbildung 9-1: Darstellung des Qualitätsregelkreises	148
Abbildung 9-2: Auswirkung der Einflussgrößen auf das Zahnprofil (Gauder et al. 2023a)	151
Abbildung 9-3: Kritische Einflussgrößen beim Wälzfräsen nach (Klocke & Brecher 2016)	152
Abbildung 9-4: Visualisierung aller Kombinationen im Versuchsraum	154
Abbildung 9-5: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des Fräsdorntaumels	155
Abbildung 9-6: Definition am untersuchten Zahnrad	157
Abbildung 9-7: Vereinfachter Ablauf der Messdatenvorverarbeitung (A_Gölz 2022)	157
Abbildung 9-8: Referenzgitter für die analytische Zahnkontaktanalyse (Quelle: Frenco GmbH)	159

Abbildung 9-9: Sinusförmiger Fit des Drehwinkelabweichungssignal zur Ableitung weiterer Parameter (Gauder et al. 2023a)	160
Abbildung 9-10: Virtuelle Zahnweitenmessung mit integrierter Plausibilitätsprüfung (Gauder et al. 2023a)	161
Abbildung 9-11: Training der multiplen linearen Regression für die radiale Zustellung (Gauder et al. 2023a)	165
Abbildung 9-12: Verlustfunktion für die jeweilige Klassifikation (Gauder et al. 2023a)	168
Abbildung 9-13: Langzeituntersuchung der Profilwinkelabweichung für linke Flanken (Gauder et al. 2023a)	170
Abbildung 9-14: Korrelationsmatrix der Langzeituntersuchung des Werkzeugverschleißes (Gauder et al. 2023a)	171
Abbildung 9-15: Schnittstelle der "GearPanel"-Dashboard als ganzheitliches Informationssystem (A_Gölz 2022)	174
Abbildung 9-16: Validierung der radialen Zustellung von 20 produzierten Zahnrädern aus der Serienproduktion (Stichprobe) (Gauder et al. 2023a)	175
Abbildung 9-17: Konfusionsmatrix der ausgewählten SVM während der Validierung des Fräsdorntaumels (Gauder et al. 2023a)	176
Abbildung 0-1: Erweiterte Messunsicherheiten der Verzahnungskenngrößen für die Parameterkombinationen im Rahmen der Versuchsplanung zur Ermittlung eines Hauptzeitparallelen Messprogrammes unter geringer Messunsicherheit	XXVIII
Abbildung 0-2: Messaufbau des Interferometers X-Achse (links) und Achsfehler X Grafik (rechts)	XXII
Abbildung 0-3: Messaufbau des Interferometers Y-Achse (links) und Achsfehler Y Grafik (rechts)	XXII
Abbildung 0-4: Messaufbau des Interferometers C-Achse (links) und Winkelfehler C Grafik (rechts)	XXII
Abbildung 0-5: Ermittlung des Sensitivitätskoeffizient der C-Achse	XXIII
Abbildung 0-6: Ermittlung des Sensitivitätskoeffizient der Y-Achse	XXIV

Abbildung 0-7: Code des Einstellungsprozesses	XXVI
Abbildung 0-8: Art der Verteilung innerhalb der Cluster jedes Zahnes (linke Flanken links und rechte Flanken rechts) mit farblicher Kennzeichnung der Verteilung (rot = einfache Normalverteilung (NV) und von blau = Mischverteilung aus zwei NV bis grün = Mischverteilung aus fünf NV) sowie Skalierung der Punktgröße, abhängig von der negativen logarithmischen Likelihood	XXXVIII
Abbildung 0-9: Die relative Häufigkeit der Punkte eines Clusters entlang des Abwärtzwegs zeigt die Verbesserung der PDM im Vergleich zur Gaußschen Verteilung	XXXVIII
Abbildung 0-10: Auftretenswahrscheinlichkeit für die Punkte eines Zahns an der linken und rechten Flanke	XXXIX
Abbildung 0-11: Abweichungen von 20 optischen Messungen im Vergleich zur nominalen Profilform	XXXIX
Abbildung 0-12: Korrelationen der beobachteten Ausreißer zwischen den 13 Zähnen (Teeth)	XL
Abbildung 0-13: Korrelationen zwischen den beobachteten Ausreißern, in den Unterräumen entlang der Zahnflanke, der unterschiedlichen Cluster	XLI
Abbildung 0-14: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation der radialen Zustellung	XLIV
Abbildung 0-15: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation des Fräsdornraumels	XLIV
Abbildung 0-16: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation des axialen Vorschubs	XLV
Abbildung 0-17: Langzeituntersuchung der Profil-Formabweichung für linke Flanken	XLVI
Abbildung 0-18: Langzeituntersuchung der Profil-Winkelabweichung für rechte Flanken	XLVI
Abbildung 0-19: Korrelationsmatrix der Langzeituntersuchung des Fräserverschleißes	XLVII

Abbildung 0-20: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation der radialen Zustellung	XLVIII
Abbildung 0-21: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des Fräsdorntaumels	XLIX
Abbildung 0-22: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des axialen Vorschubs	XLIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Merkmale von Mikrogetrieben (VDI 2731)	11
Tabelle 2-2: Verzahnungsabweichungen (ISO 1328)	13
Tabelle 2-3: Extrapolierte Toleranzen nach DIN 3961 für $m = 0,28 \text{ mm}$	16
Tabelle 2-4: Parameter der Einflanken-Wälzprüfung (VDI 2608)	26
Tabelle 2-5: Übersicht möglicher Prüfstrategien (DIN 55350)	37
Tabelle 3-1: Übersicht der relevanten Forschungsarbeiten	60
Tabelle 4-1: Parameter der untersuchten Mikroverzahnung	65
Tabelle 4-2: Anforderungen an den Qualitätsregelkreis	66
Tabelle 5-1: Parameter der taktilen Kalibrierung des Zeiss F25	69
Tabelle 5-2: Variationsbereiche der Messparameter	73
Tabelle 5-3: Optimiertes Messprogramm	82
Tabelle 5-4: Erweiterte Messunsicherheiten ($k=2$) der einzelnen Verzahnungskenngrößen an der Alicona μCMM	83
Tabelle 5-5: Überprüfung der Prozesseignung des optimierten Messprogramms	85
Tabelle 6-1: Installierte Achsen und ihre Messauflösungen	87
Tabelle 6-2: Spezifikation der für den Einflanken-Wälzprüfung relevanten Komponenten	88
Tabelle 6-3: Abweichungen des Lehrzahnrad mit $z = 13$ und $d = 3.640 \text{ mm}$	89
Tabelle 6-4: Abweichungen des Lehrzahnrad bei $z = 40$ und $d = 11.200 \text{ mm}$	90
Tabelle 6-5: Eines von acht Unsicherheitsbudgets (Einzelflanken-Wälzabweichung Ft' in μm ; Uhrzeigersinn)	107
Tabelle 6-6: Evaluerte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor $k = 2$)	107
Tabelle 6-7: Untersuchung der Prozesseignung der bewerteten Unsicherheiten	108

Tabelle 7-1: Mittlere Korrelationskoeffizienten für die Fourier-Spektren und die spektrale Leistungsdichte	120
Tabelle 7-2: Vergleich der Ergebnisse zwischen Simulation (SIM) und Einflanken-Wälzprüfstand (EWP) bezüglich der linken Flanken	122
Tabelle 7-3: Vergleich der Ergebnisse zwischen Simulation (SIM) und Einflanken-Wälzprüfstand (EWP) bezüglich der rechten Flanken	122
Tabelle 8-1: Variationsbereich der Unsicherheit der Zahnradparameter	138
Tabelle 8-2: Laufzeit der einzelnen Module innerhalb der Monte-Carlo-Simulation	141
Tabelle 8-3: Ergebnisse, Unsicherheiten und Stabilität der Chargen in μm	143
Tabelle 8-4: Unsicherheitsbeiträge und daraus resultierende Messunsicherheiten	145
Tabelle 8-5: Analyse der Prüfprozesseignung	146
Tabelle 9-1: Parameter des Wälzfräsprozesses	148
Tabelle 9-2: Parameter des verwendeten Fräasers	149
Tabelle 9-3: Variationsbereiche der eindimensionalen Versuchsreihen	150
Tabelle 9-4: Variationsbreite der mehrdimensionalen Versuchsreihen	153
Tabelle 9-5: Auszug aus dem Versuchsplan der mehrdimensionalen Parametervariation	153
Tabelle 9-6: Stark korrelierende Merkmale der radialen Zustellung a_e	162
Tabelle 9-7: Korrelierende Merkmale des Fräsdorns Taumel EW	163
Tabelle 9-8: Korrelierende Merkmale des axialen Vorschubs f_α	163
Tabelle 9-9: Korrelierende Merkmale des Werkzeugverschleißes	164
Tabelle 9-10: Spezifizierte Klassen für die Taumel-Erkennung	167
Tabelle 9-11: Parameter der untersuchten Methoden zur Taumelklassifizierung von Fräsdornen	168
Tabelle 9-12: Spezifische Grenzwerte für die Auslösung des Verschiebevorgangs	169

Tabelle 9-13: Variablen der DFQ-Textdatei zum Importieren der Korrekturwerte	172
Tabelle 0-1: Datenblatt des optischen μ CMM Messgerätes (Quelle: Alicona Imaging GmbH)	XIII
Tabelle 0-2: Spezifikation der verwendeten Objektive (Quelle: Alicona Imaging GmbH)	XIV
Tabelle 0-3: Genauigkeitsangaben zum μ CMM Messgerät (Quelle: Alicona Imaging GmbH)	XV
Tabelle 0-4: Erweiterte Messunsicherheit und die einzelnen Beiträge, in μm , für die Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen von Modul 0,2, des Mikroverzahnungsnormals der PTB, an der Zeiss F25	XVI
Tabelle 0-5: Mittlere Differenz, in μm , zwischen den Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen der Alicona μ CMM und den Wiederholungsmessungen an der Zeiss F25 des Mikroverzahnungsnormals der PTB für Modul $m=0,2$	XVII
Tabelle 0-6: Erweiterte Messunsicherheit des Mikroverzahnungsnormals der PTB, in μm , für die Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen der Alicona μ CMM	XVII
Tabelle 0-7: Erweiterte Messunsicherheit der Verzahnungskenngrößen für die resultierenden Parameterkombinationen aus der Versuchsplanung zur Ermittlung eines Hauptzeitparallelen Messprogrammes unter geringer Messunsicherheit	XIX
Tabelle 0-8: Prüfzertifikat des Lehrzahnrad $z = 13$	XX
Tabelle 0-9: Prüfzertifikat des Lehrzahnrad $z = 40$	XXI
Tabelle 0-10: Ermittelte Sensitivitätskoeffizienten (Steigung der linearen Regression) der C-Achse	XXIII
Tabelle 0-11: Ermittelte Sensitivitätskoeffizienten (Steigung der linearen Regression) der Y-Achse	XXIV
Tabelle 0-12: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzfehlers F_i' (Gegen Uhrzeigersinn)	XXV

Tabelle 0-13: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzsprungs f_i' (Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-14: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzsprungs f_i' (Gegen Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-15: Erweiterte Messunsicherheit des langwelligen Anteils f_l' (Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-16: Erweiterte Messunsicherheit des langwelligen Anteils f_l' (Gegen Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-17: Erweiterte Messunsicherheit des kurzwelligen Anteils f_k' (Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-18: Erweiterte Messunsicherheit des kurzwelligen Anteils f_k' (Gegen Uhrzeigersinn)	XXV
Tabelle 0-19: Vergleich Prüfstand vs. Reany Teil 1	XXVII
Tabelle 0-20: Vergleich Prüfstand vs. Reany Teil 2	XXVIII
Tabelle 0-21: Versuchsplan der mehrdimensional manipulierten Komponenten	XXIX
Tabelle 0-22: Messunsicherheitsbudget der virtuellen Zahnweitenprognose	XLII
Tabelle 0-23: Wertebereiche relevanter Abweichungen für jede Einflussgröße	XLIII

Anhang

A1 Angaben zur Alicona μ CMMTabelle 0-1: Datenblatt des optischen μ CMM Messgerätes (Quelle: Alicona Imaging GmbH)Technische
SpezifikationenSpezifikationen in blau
angegeben
spezifische Werte

ALLGEMEINE SPEZIFIKATIONEN

Messverfahren	berührungslos, optisch, dreidimensional, Technologie: Fokus-Variation mit Smart Flash 2.0, Vertical Focus Probing und Real3D
Anzahl der Messpunkte	Einzelmessung: X: 1.720, Y: 1.720, X x Y: 2,95 Mio. Mehrfachmessung: bis zu 500 Mio.
Messvolumen (X x Y x Z)	310 mm x 310 mm x 310 mm = 29.791.000 mm ³
Druckluft (*)	wartungsfrei bei Druckluft nach Spezifikation, 7 bar Verbrauch: 80 Nl/min (dauerhaft)
Verfahrgeschwindigkeit der Achsen	bis zu 100 mm/s
Koaxiale Beleuchtung	LED Farbkoaxiallicht, leistungsstark, elektronisch regulierbar
3D Daten	monochrom; Farbdaten optional verfügbar
Objektivwechsler	automatisches pneumatisches Objektivwechselsystem, 4-fach
Systemüberwachung	9 Temperatursensoren (Genauigkeit: $\pm 0,1$ K), interne Strom- und Spannungsüberwachung, inkl. Langzeit-Protokollierung, abrufbar
ControlServerSF	6 Kern, 32 GB DDR4, SSD 512 GB, Windows 10 IoT Enterprise 64bit, 2x 27" Full HD Monitor
IP-Schutzart	IP20
Lärmemission	≤ 70 dB(A) im Normalbetrieb

ABMESSUNGEN UND UMGEBUNGSBEDINGUNGEN

Abmessungen (B x T x H)	Messinstrument: 960 x 1109 x 1958 mm (bis zu 2288 mm); ControlServerSF: 180 x 440 x 500 mm
Masse	Messinstrument: 1.250 kg (inkl. Unterbau); ControlServerSF: <20 kg
Temperaturanforderungen	Solltemperaturbereich: 20 - 25 °C Erweiterter Solltemperaturbereich (auf Anfrage): 19 - 29 °C ControlServerSF (möglich): 0 - 30 °C
Umgebungstemperaturbereich A (hohegenaue Messung, VDI 2627 Güteklasse 2)	Zulässige Grenzabweichung der Solltemperatur: $\pm 0,8$ K Temperaturänderungsgeschwindigkeit: 0,8 K/d Zulässige lingenbezogene Temperaturdifferenz: 0,4 K/h 0,3 K/m
Umgebungstemperaturbereich B (VDI 2627 Güteklasse 3)	Zulässige Grenzabweichung der Solltemperatur: $\pm 1,2$ K Temperaturänderungsgeschwindigkeit: 2 K/d 1 K/h Zulässige lingenbezogene Temperaturdifferenz: 0,5 K/m
Umgebungstemperaturbereich C (reduzierte Genauigkeit, VDI 2627 Güteklasse 4) (mehr auf Anfrage möglich)	Zulässige Grenzabweichung der Solltemperatur: $\pm 1,5$ K Temperaturänderungsgeschwindigkeit: 3 K/d 2 K/h Zulässige lingenbezogene Temperaturdifferenz: 1 K/m
Zulässige relative Luftfeuchte	empfohlen: 45 % (± 5 %); möglich: 45 % (± 15 %)
Vibrationen	empfohlen: < 50 μ g (Effektivwerte / RMS des Spektrums zwischen 3 und 100 Hz)
Anschlussspannung, Stromart, elektrische Leistung	1000 W; 100 - 240 VAC; 50 - 60 Hz

(*) ISO 8573 Feinststaubbereich Wasser O ₂	Maximale Anzahl an Partikeln pro m ³	< 10.000, < 5 μ m	Klasse 4
	Maximaler Drucktaupunkt	+ 3 °C	Klasse 4
	Maximaler Gesamtenergie O ₂	5 mg/m ³	Klasse 4

Tabelle 0-2: Spezifikation der verwendeten Objektive (Quelle: Alicona Imaging GmbH)

Bruker alicon

That's metrology!


MESSOBJEKT									
Oberflächentextur	beliebige Oberflächen, inklusive polierter Metalle								
Max. Masse	30 kg, mehr auf Anfrage								
Max. Abmessungen	Breite: 680 mm Höhe: 375 mm								
Probenvorbereitung	keine								
OBJEKTIVSPEZIFISCHE MERKMALE									
Objektiv	3000 WD8	1900 WD30	1500 WD130	1500 WD23*	1500 WD70	800 WD17	800 WD37	400 WD19	150 WD11
Numerische Apertur	0,075	0,12	0,14	0,15	0,14	0,3	0,2	0,4	0,6
Arbeitsabstand	mm	8,8	30	130	23,5	69,4	17,5	37	19
Lateraler Messbereich (X, Y)	mm	5,26	3,23	2,63	2,63	2,63	1,32	1,32	0,66
	mm²	27,64	10,43	6,91	6,91	6,91	1,71	1,71	0,43
Messpunktabstand	µm	3,06	1,88	1,53	1,53	1,53	0,76	0,76	0,38
Rechnerische laterale optische Grenzauflösung	µm	4,28	2,68	2,28	2,14	2,14	1,07	1,6	0,80
Feinste laterale topographische Auflösung	µm	6,2	3,8	3,1	3,1	3,3	1,5	1,6	0,8
Messrauschen (**)	nm	500	30	180	80	100	4	25	2
Vertikale Auflösung (***)	nm	1400	85	510	230	500	30	71	20
Vertikaler Messbereich	mm	8	29	125	22,5	65	16,5	36	18
Vertikale Scangeschwindigkeit	µm/s	3000	3000	3000	3000	1000-3000	1000-3000	500-3000	200-2000
Messgeschwindigkeit	≤ 1,7 Mio. Messpunkte/Sekunde								
Einsichtswinkel	°	47	65	77	63	76	63	70	46

(***) Messrauschen N_{μ} -Auswertung konform zu ISO 25179:200 2019 (in Entwicklung befindlich) und dem Datenblatt VI 2 (***) Vertikale Auflösung in "Optical Measurement of Surface Topography" (ISBN 978-3-642-12072-1) und im Datenblatt VI 2 definiert als $\sqrt{8}$ (Quadratwurzel aus 8) x Messrauschen. Die vertikalen Auflösungsweite von Bruker Alicona sind jedoch nicht wesentlich konservativer.

AUFLÖSUNGS- UND APPLIKATIONSSPEZIFIKATIONEN										
Objektiv	3000 WD8	1900 WD30	1500 WD130	1500 WD23*	1500 WD70	800 WD17	800 WD37	400 WD19	150 WD11	
Min. messbare Höhe	µm	1,4	0,1	0,51	0,1	0,5	0,03	0,07	0,02	
Max. messbare Höhe	mm	8	29	125	22,5	65	16,5	36	18	
Min. messbare Rauheit (Ra)	µm	n.a.	n.a.	n.a.	1,2	n.a.	0,1	0,6	0,06	
Min. messbare Rauheit (Sa)	µm	n.a.	n.a.	n.a.	0,6	n.a.	0,05	0,3	0,03	
Min. messbarer Radius	µm	20	12	10	10	10	5	5	3	
Min. messbarer Keilwinkel	°					20				
Max. messbarer Flankenwinkel Standardmessung	°					87				
Max. messbarer Flankenwinkel Vertical Focus Probing	°					>90 (anwendungsabhängig)				

(*) Auslaufprodukt, Verfügbarkeit nicht garantiert


Tabelle 0-3: Genauigkeitsangaben zum μ CMM Messgerät (Quelle: Alicona Imaging GmbH)



Fair
Data
Sheet

Spezifikationen in Blau
zeigen ideale
spezifische Werte.

GENAUIGKEIT		
3D Genauigkeit 10360-8 (*)		
Umgebungstemperaturbereich A (VDI 2627 Güteklasse 2)	$E_{\text{DATY,ODSMPRE}} = (0.8 + L/600) \mu\text{m}$ (L in mm) (**)	$E_{\text{HAZ,SDSMPRE}} = (0.15 + L/50) \mu\text{m}$ (L in mm) (**)
Umgebungstemperaturbereich B (VDI 2627 Güteklasse 3)	$E_{\text{DATY,ODSMPRE}} = (0.8 + L/200) \mu\text{m}$ (L in mm) (**)	
Umgebungstemperaturbereich C (VDI 2627 Güteklasse 4)	$E_{\text{DATY,ODSMPRE}} = (0.8 + L/100) \mu\text{m}$ (L in mm) (**)	
() Die angeführten Werte orientieren sich an der ISO 10360-8 und VDI 2617. (*) Achsengenauigkeit, in Anlehnung an ISO 10360-8, Anhang B.4.3.4. (**) Gültig für Einzelmessungen, Höhenstufenmessung.		
Messparameter		
Ebenheitsabweichung	1.3 mm x 1.3 mm mit 800 WD17. U = 0.1 μm	
Profilrauheit	Ra = 0.1 μm	U = 0.012 μm , σ = 0.001 μm
	Ra = 0.5 μm	U = 0.02 μm , σ = 0.001 μm
Flächenrauheit	Sa = 0.1 μm	U = 0.01 μm , σ = 0.001 μm
	Sa = 0.5 μm	U = 0.015 μm , σ = 0.001 μm
Keilwinkel	$\beta = 70^\circ - 110^\circ$	U = 0.075', σ = 0.01'
Kantenradius	R = 5 μm - 20 μm	U = 1.5 μm , σ = 0.15 μm
	R > 20 μm	U = 2 μm , σ = 0.3 μm



88 /// V 01-09-0009 /// Produktinformation μ CMM

A2 Ermittlung der Messunsicherheit der Fokusvariation auf der Alicona μ CMM

Taktile Kalibriermessung

Die Ergebnisse der taktilen Kalibriermessungen wurden unter Verwendung des Zahnflankentools in Matlab analysiert. Die Erkenntnisse über die Verzahnungskenngrößen aus Kapitel 2.1.3 wurden ebenfalls mit Hilfe von implementierten Skripten ausgewertet, um so die Unsicherheitsbeiträge gemäß Formel 0-1 zu ermitteln. In Tabelle 0-4 sind die Ergebnisse der individuellen Beiträge sowie die erweiterte Messunsicherheit der Kalibriermessungen aufgeführt. Die beobachteten Resultate zeigen ähnliche Größenordnungen in den erweiterten Unsicherheiten für Form- und Winkelabweichungen sowohl in der Profil- als auch in der Flankenrichtung. Dies trifft gleichermaßen auf die Gesamtabweichungen zu. Dabei werden die erweiterten Unsicherheiten überwiegend von systematischen Abweichungen beeinflusst, wobei die Profilwinkelabweichung eine Ausnahme bildet. Hier erfolgt eine gleichmäßige Verteilung der Anteile aus zufälliger und systematischer Abweichung.

$$U_{Stufe1,cal} = 2 * \sqrt{u_p^2 + u_b^2} \quad \text{Formel 0-1}$$

Tabelle 0-4: Erweiterte Messunsicherheit und die einzelnen Beiträge, in μm , für die Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen von Modul 0,2, des Mikroverzahnungsnormals der PTB, an der Zeiss F25

	$u_{p,m=0,2}$	$u_{b,m=0,2}$	$U_{cal,m=0,2; k=2}$
F_α	0,083	0,353	0,725
$f_{H\alpha}$	0,148	0,188	0,477
$f_{f\alpha}$	0,070	0,287	0,591
F_β	0,055	0,393	0,793
$f_{H\beta}$	0,073	0,263	0,546
$f_{f\beta}$	0,047	0,252	0,513

Vergleich zwischen optischen und taktilen Messungen

Bei einem Vergleich der optischen Messdaten aus den Wiederholungsmessungen des Verzahnungsnormals der PTB mit den Messdaten der taktilen Referenzmessung werden klare Unterschiede zwischen Profil- und Flankenrichtung erkennbar. Die mittleren absoluten Differenzen der Verzahnungsabweichungen aus den beiden Verfahren werden in Tabelle 0-5 präsentiert. Hierbei zeigen sich lediglich unbedeutende Abweichungen zwischen den linken und rechten Flanken, jedoch signifikante Unterschiede zwischen der Profil- und Flankenrichtung.

Tabelle 0-5: Mittlere Differenz, in μm , zwischen den Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen der Alicona μCMM und den Wiederholungsmessungen an der Zeiss F25 des Mikroverzahnungsnormals der PTB für Modul $m=0,2$

	Mittlere Differenz in μm	
	links	rechts
F_α	0,760	0,801
$f_{H\alpha}$	0,349	0,171
$f_{f\alpha}$	0,723	0,851
F_β	1,533	1,400
$f_{H\beta}$	1,322	1,088
$f_{f\beta}$	1,306	1,206

Erweiterte Messunsicherheit

Die erweiterte Messunsicherheit des Alicona μCMM wurde abschließend anhand der Formel 0-2 für die drei taktil messbaren Module des Verzahnungsnormals der PTB berechnet. Tabelle 0-6 stellt diese Unsicherheiten für die analysierten Verzahnungsabweichungen dar (vgl. Kapitel 2.1.3). Dabei fällt besonders auf, dass die Unsicherheit für die Profilwinkelabweichung über die Module hinweg zunimmt. Im Gegensatz dazu zeigt sich ein entgegengesetzter Trend für die Flankenwinkelabweichung. Sowohl die Profilform- als auch die Profildesambabweichung sind bei allen drei untersuchten Modulen ähnlich, ebenso wie die Flankenformabweichung. Die Flankengesambabweichung folgt demselben Trend wie die Flankenwinkelabweichung.

$$U_{res} = U_{Stufe\ 2} = 2 * \sqrt{\left(\frac{U_{Stufe\ 1,cal}}{2}\right)^2 + u_p^2 + u_b^2} \quad \text{Formel 0-2}$$

Tabelle 0-6: Erweiterte Messunsicherheit des Mikroverzahnungsnormals der PTB, in μm , für die Verzahnungsabweichungen aus den Wiederholungsmessungen der Alicona μCMM

	$U_{Alicona;m=0,2;k=2}$	$U_{Alicona;m=0,5;k=2}$	$U_{Alicona;m=1,0;k=2}$
F_α	1,865	1,605	2,208
$f_{H\alpha}$	1,471	2,043	3,714
$f_{f\alpha}$	1,791	1,688	1,913
F_β	3,220	2,257	2,170
$f_{H\beta}$	3,503	2,214	1,939
$f_{f\beta}$	2,658	1,948	1,956

Hauptzeitparalleles Messprogramm

Um ein hauptzeitparalleles Messprogramm mit minimaler Messunsicherheit zu realisieren, wurden im Rahmen einer Versuchsplanung 26 verschiedene Parameterkombina-

tionen auf der Alicona μ CMM getestet. Die resultierenden Unsicherheiten der Verzahnungskenngrößen wurden automatisch ausgewertet. Das entstandene Messprogramm wird für die Integration in den angestrebten adaptiven Qualitätsregelkreis genutzt. In Abbildung 0-1 sind die kombinierten Gesamtunsicherheiten der sechs Verzahnungskenngrößen für die durchgeführten Experimente dargestellt. Deutlich ist die vielfältige Variation der Gesamtunsicherheiten erkennbar. Der Parametersatz 24 weist die geringste Gesamtunsicherheit auf und wird für sämtliche weiteren Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

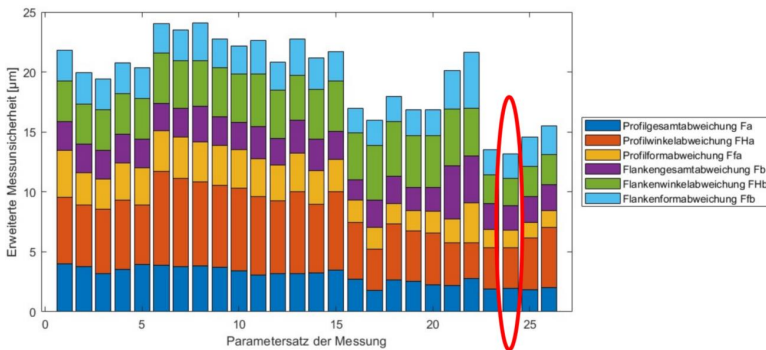


Abbildung 0-1: *Erweiterte Messunsicherheiten der Verzahnungskenngrößen für die Parameterkombinationen im Rahmen der Versuchsplanung zur Ermittlung eines Hauptzeitparallelen Messprogrammes unter geringer Messunsicherheit*

Die Verteilung der Gesamtunsicherheit auf die verschiedenen Verzahnungskenngrößen wird in Tabelle 0-7 veranschaulicht. Die erzielten Messunsicherheiten für die Profilgesamtabweichung und die Profilwinkelabweichung bewegen sich innerhalb des Bereichs der Messunsicherheit für das vergleichbare Modul $m = 0,2$ mm des Verzahnungsnormals. Die Unsicherheit der Winkelabweichung liegt jedoch mehr als doppelt so hoch. In Bezug auf die Flankenrichtung zeigt sich bei allen Werten eine Verbesserung.

Tabelle 0-7: Erweiterte Messunsicherheit der Verzahnungskenngrößen für die resultierenden Parameterkombinationen aus der Versuchsplanung zur Ermittlung eines Hauptzeitparallelen Messprogrammes unter geringer Messunsicherheit

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Betrachteter Zahnradparameter								
	Fa	fHa	ffa	Ca	Fb	fHb	ffb	Cb	
Unsicherheitsbeitrag	u_{cbl}	0,3252	0,2200	0,2650	0,3300	0,3550	0,2350	0,2300	0,0300
	u_p	0,4974	0,6265	0,4367	0,6906	0,4918	0,3891	0,4902	0,3209
	u_w	0	0	0	0	0	0	0	0
	u_b	0,7018	1,5410	0,5378	0,9055	0,8500	1,0395	0,8488	0,4145
Ermittelte Messunsicherheit je Parameter (k=2)	U_Fa 1,96	U_fHa 3,36	U_ffa 1,47	U_Ca 2,22	U_Fb 2,09	U_fHb 2,26	U_ffb 2,01	U_Cb 1,05	

Prüfzertifikat Neuzustand

Name	MSE	Unterpunkt	Datum	Kunde
Aut.-Nummer/	2020/000	U.S.C.T.	21.07.2021	KT
Ident.-Nummer	249674	Prüfplatz ID	Zustimmungs-	Zustimmungs-
			249674	Zahl 74969 07 01 02
				Lfd. Teilnummer
				02-03
Profil	Lehrzahnrad m0,28 - z20 ^h - z40 - B - DIN53970			
*) Die Beschriftung am Lehrzahnrad entspricht dem Neuzustand.				
Kopfkreis-Durchmesser	Istmaß [mm]		Sollmaß [mm]	
Messkreis	11.550 ±0,018		11.540	
Maß über Messkreis	11.6849 ±0,0140		0,5000	
Fusskreis-Durchmesser	10.250 ±0,100		11.669	
			10.193	

Bezugsges.: Achse der Bohrung	Zul. Abweichung [µm]	Messergebnis [µm]	
		linke Flanke	rechte Flanke
Profil-Gesamtabweichung	Fa	4,0	1,6
Flankensüßers-Gesamtabweichung	Fβ	3,5	0,5
Rundlauf-	Fr	5,0	-
Teilungs-Gesamtabweichung	Fp	5,0	3,1
Teilungs-Einzelabweichung	fp	2,5	1,0
			0,8

Gesamtbewertung

Alle Messergebnisse liegen innerhalb der um die Messunsicherheit erweiterten Toleranzen.

FRENCO

Download unter www.frenco.de

Bezeichnungen	
Sinnrad	Schnecke
F _a	F _a
F _β	F _β
F _γ	F _γ
F _δ	F _δ
F _ε	F _ε
F _ζ	F _ζ
F _η	F _η
F _θ	F _θ
F _ι	F _ι
F _κ	F _κ
F _λ	F _λ
F _μ	F _μ
F _ν	F _ν
F _ξ	F _ξ
F _ο	F _ο
F _π	F _π
F _ρ	F _ρ
F _σ	F _σ
F _τ	F _τ
F _υ	F _υ
F _φ	F _φ
F _χ	F _χ
F _ψ	F _ψ
F _ω	F _ω
F _Ω	F _Ω

Größe	Bezugsnormal	Ident.-Nr.	Kalibrierschein	Rückführung auf
Länge	Parallelmaßsatz	01-0019	79566 DAKS 2016-02	DAKMS kalibrierte Bezugsnormale
Zahnädicke	Messrolle	00-001	11637 DAKS 2017-02	Bezugsnormale
Durchmesser	Evolvertenormal	09-012	50678 PTB 20	nationale
Evolute	Flankenliniennormal	09-021	54021 PTB 18	Normale der PTB
Flankenlinie	Flankenliniennormal	09-012	50678 PTB 20	Normale der PTB
Teilung	Flankenliniennormal	09-001	54021 PTB 18	Normale der PTB
	Teilungsnormal	09-022	56974 PTB 19	Normale der PTB

Rückführung

Die im Kalibrierlaborium eingesetzten Messgeräte werden periodisch mit Normalen überprüft, die metrologisch rückgeführt sind auf nationale Normale.

Messunsicherheit

Die Messungen werden bei einer Temperatur von 20 ± 0,5 °C und bei einer Luftfeuchtigkeit von 50% ± 10% durchgeführt. Die Ermittlung von Isotermalen und Einzelmaßabweichungen ist mit den untenstehenden Messunsicherheiten behaftet (OPF 10). Die Messunsicherheit wurde nach EA-402 mit der zweifachen Standardabweichung ermittelt. Die Messverfahren sind beschrieben in Prüfling OPF 10.

Messunsicherheiten	0 bis 50 mm	>50 bis 150 mm	>150 bis 400 mm
Kopfkreisdurchmesser	± 0,002	± 0,0025	± 0,003
Maß über zweiseitigen Hüllen	± 0,002	± 0,0025	± 0,003
Einzelmaßabweichungen	± 0,002	± 0,003	± 0,003

Messergebnisse außerhalb der zulässigen, jedoch innerhalb der um die Messunsicherheit erweiterten Toleranzen werden nicht zurückgewiesen und als in Ordnung beurteilt.

(OPF 10, DIN EN ISO 14253)

GW System im Kalibrierlaborium 1/2
Verzahnungsmessregeln nach
DIN EN ISO/IEC 17025 : 2018

FRENCO

Tabelle 0-9: Prüfzertifikat des Lehrzahnrad z = 40

A4 Messaufbau des Interferometers zur Achsvermessung des Einflanken-Wälzprüfstands

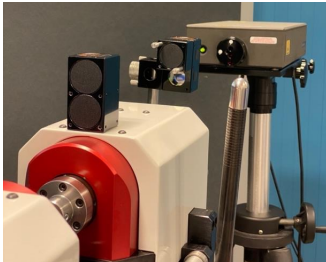


Abbildung 0-2: Messaufbau des Interferometers X-Achse (links) und Achsfehler X Grafik (rechts)

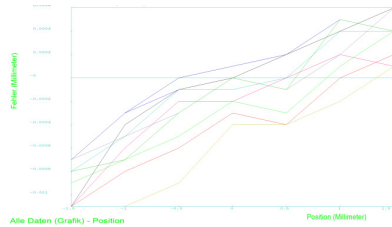


Abbildung 0-3: Messaufbau des Interferometers Y-Achse (links) und Achsfehler Y Grafik (rechts)

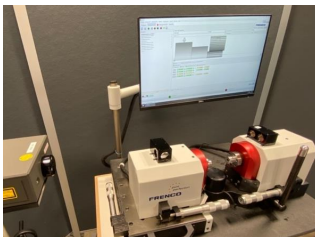
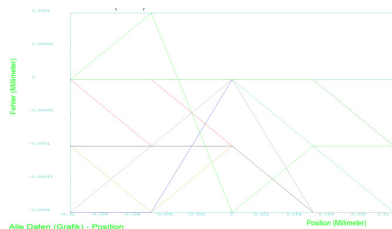
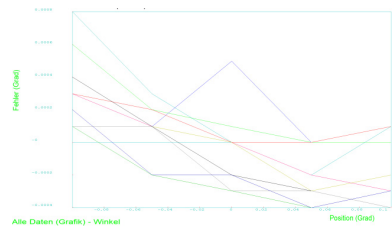


Abbildung 0-4: Messaufbau des Interferometers C-Achse (links) und Winkelfehler C Grafik (rechts)



A5 Sensitivitätskoeffizienten des Messunsicherheitsbudget von dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand

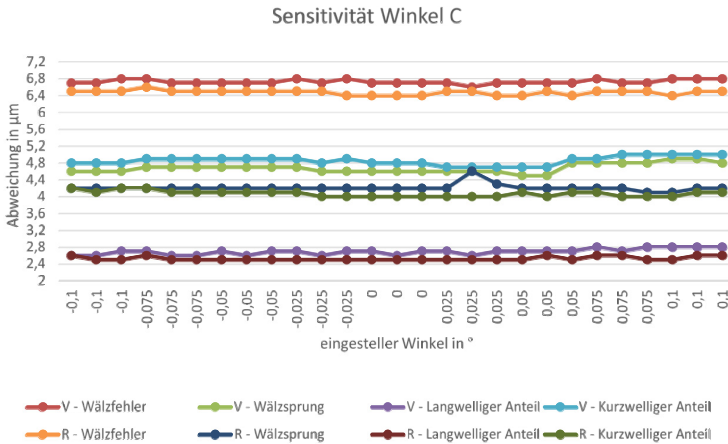


Abbildung 0-5: Ermittlung des Sensitivitätskoeffizient der C-Achse

Tabelle 0-10: Ermittelte Sensitivitätskoeffizienten (Steigung der linearen Regression) der C-Achse

Kenngröße	Sensitivitätskoeffizient C-Achse
V - Wälzfehler	$c_{C_{V.F'_i}} = 0,1111$
V - Wälzsprung	$c_{C_{V.f'_i}} = 0,7556$
V - Langwelliger Anteil	$c_{C_{V.f'_i}} = 0,7556$
V- Kurzwelliger Anteil	$c_{C_{V.f'_k}} = 0,3778$
R - Wälzfehler	$c_{C_{R.F'_i}} = -0,2444$
R - Wälzsprung	$c_{C_{R.f'_i}} = -0,0444$
R - Langwelliger Anteil	$c_{C_{R.f'_i}} = 0,2000$
R - Kurzwelliger Anteil	$c_{C_{R.f'_k}} = -0,5333$

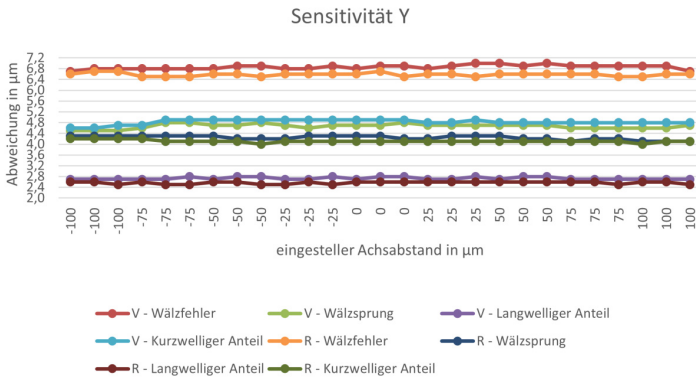


Abbildung 0-6: Ermittlung des Sensitivitätskoeffizient der Y-Achse

Tabelle 0-11: Ermittelte Sensitivitätskoeffizienten (Steigung der linearen Regression) der Y-Achse

Kenngröße	Sensitivitätskoeffizient der Y-Achse
V - Wälzfehler	$c_{Y_{V,F'_i}} = 0,0006$
V - Wälzsprung	$c_{Y_{V,f'_i}} = 0,0001$
V - Langwelliger Anteil	$c_{Y_{V,f'_l}} = -0,0001$
V - Kurzwelliger Anteil	$c_{Y_{V,f'_k}} = 0,0002$
R - Wälzfehler	$c_{Y_{R,f'_i}} = -0,0001$
R - Wälzsprung	$c_{Y_{R,f'_i}} = -0,0008$
R - Langwelliger Anteil	$c_{Y_{R,f'_l}} = 0,0002$
R - Kurzwelliger Anteil	$c_{Y_{R,f'_k}} = -0,0004$

A6 Auflistung der ermittelten Messunsicherheiten aller funktionalen Parameter der Einflanken-Wälzprüfung auf dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstands

Tabelle 0-12: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzfehlers F'_i (Gegen Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		F'_i	10,45	μm	\pm	1,14	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Rechts		Kenngröße:	F'_i		Freiheitsgrad	37	

Tabelle 0-13: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzsprungs f'_i (Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_i	0,36	μm	\pm	0,51	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Links		Kenngröße:	f'_i		Freiheitsgrad	215	

Tabelle 0-14: Erweiterte Messunsicherheit des Wälzsprungs f'_i (Gegen Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_i	3,81	μm	\pm	0,54	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Rechts		Kenngröße:	f'_i		Freiheitsgrad	72	

Tabelle 0-15: Erweiterte Messunsicherheit des langwelligen Anteils f'_l (Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_l	7,66	μm	\pm	1,09	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Links		Kenngröße:	f'_l		Freiheitsgrad	37	

Tabelle 0-16: Erweiterte Messunsicherheit des langwelligen Anteils f'_l (Gegen Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_l	6,19	μm	\pm	1,10	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Rechts		Kenngröße:	f'_l		Freiheitsgrad	31	

Tabelle 0-17: Erweiterte Messunsicherheit des kurzwelligen Anteils f'_k (Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_k	7,60	μm	\pm	0,35	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Links		Kenngröße:	f'_k		Freiheitsgrad	154	

Tabelle 0-18: Erweiterte Messunsicherheit des kurzwelligen Anteils f'_k (Gegen Uhrzeigersinn)

Vollständiges Messergebnis:		f'_k	2,89	μm	\pm	0,46	μm	Erweiterungsfaktor	2
Flanke:		Rechts		Kenngröße:	f'_k		Freiheitsgrad	227	

A7 Code des Generierungsprozesses

```

Wiederholung für Charge n = 1, ..., N (Chargen)
Permutieren des Latin Hypercube Designs
Erstellen einer Spezifikationsmatrix mit Produktionsabweichungen
Matrix der Lastanforderungen
Wiederholen Sie den Vorgang für m = 1, ..., M (Stichproben)
Wiederholen Sie dies für z = 1, ..., Z (Zähne)
Wiederholen Sie den Vorgang für die linke/rechte Flanke.
Wiederholen bis  $cluster_j == cluster_{max}$ 
Berechnung der Wahrscheinlichkeit aus dem Verhältnis
Wiederholen Sie dies für alle Punkte  $z_j$ 
Zufallsauslosung nach der Wahrscheinlichkeit
Null Einträge löschen
Zeichnen Sie den Wälzwinkel aus der Verteilung für die Punkte  $z_j$ 
Berechnen Sie die Koordinaten  $x_j$  und  $y_j$ 
Wiederholen Sie dies für alle Punkte  $z_j$ 
Berechnung des Normalenvektors  $n_{ij}$ 
Position rechte Flanke
Wiederholen Sie den Vorgang für die linke/rechte Flanke.
Berechnung des Wälzweges  $w_j$ 
Stützpunktraaster erstellen
Flankenstruktur definieren
Oberfläche mit kubischen Splines interpolieren
An Punktpositionen auswerten [ $z_{ij}$   $w_{ij}$ ]
Verschiebung anwenden mit  $n_{ij}$  auf [ $x_{ij}$   $y_{ij}$   $z_{ij}$ ]
Wiederholen Sie den Vorgang für die linke/rechte Flanke.
Änderungen am Getriebe hinzufügen
Wiederholen Sie den Vorgang für die linke/rechte Flanke.
Raster von Stützpunkten erstellen
Ausreißer einzeichnen und positionieren
Oberfläche mit kubischen Splines interpolieren
An Punktpositionen auswerten [ $z_{ij}$   $w_{ij}$ ]
Verschiebung anwenden mit  $n_{ij}$  auf [ $x_{ij}$   $y_{ij}$   $z_{ij}$ ]
Zahn um den Drehwinkel drehen  $\varphi = 360 - (z - 1) * (\frac{360}{z})$ 
Skin-Model-Shape exportieren

```

Abbildung 0-7: Code des Einstellungsprozesses

Tabelle 0-20: Vergleich Prüfstand vs. Reany Teil 2

ID	Prüfstand						Reany								
	F _{1,PM}		F _{2,PM}		F _{3,PM}		F _{4,PM}		F _{5,PM}		F _{6,PM}				
	Vorwärts	Rückwärts	Vorwärts	Rückwärts	Vorwärts	Rückwärts	Vorwärts	Rückwärts	Vorwärts	Rückwärts	Vorwärts	Rückwärts			
051	12,5	12,9	9,9	3,5	6,2	9,5	7,4	14,8	13,9	10,3	9	6,7	5,9	10,3	8,9
052	10,7	12,4	7	8,4	4,6	4,9	6,9	7,7	7,8	11,4	5,5	9,7	2,9	2,7	5,6
053	10,5	10,5	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
054	10,5	10,6	4,9	6,1	7,1	5,6	3,7	5,4	8,7	13,7	3,3	7,1	6,6	3,4	7,3
055	9,3	12,3	4,4	5,8	6,1	3,7	3,7	6,4	9,8	3,8	7	3,9	2,9	3,3	7
057	10,7	8	8,1	4,7	3	4,1	7,8	4,1	12,9	9,1	9,2	4,5	4,4	4,9	9,4
058	8,1	10,9	4,3	5,9	4,6	5,4	3,9	5,7	7,6	12,6	4,2	7,4	4,8	5,1	3,5
059	11,3	11,3	5,5	6,6	6,6	5,6	5,1	6,3	8,6	11,4	4,8	7,7	4	3,7	4,9
060	12,6	7,8	10	6,1	2,9	2,5	10,5	5,8	14,1	10	10	5,9	4,2	3,8	10,1
061	12,6	7,8	10	6,1	2,9	2,5	10,5	5,8	14,1	10	10	5,9	4,2	3,8	10,1
062	12,6	7,8	10	6,1	2,9	2,5	10,5	5,8	14,1	10	10	5,9	4,2	3,8	10,1
063	12,6	7,8	10	6,1	2,9	2,5	10,5	5,8	14,1	10	10	5,9	4,2	3,8	10,1
064	14,4	14,5	10,3	8,5	4,9	3,4	10,1	7,5	11,9	13	10	7,9	4,7	5,5	9,9
065	11,4	10,2	8	5,9	4,7	6,1	7,5	4,8	12,6	10,4	8,3	4,8	5,5	6,3	8,4
066	9,3	6,4	6,3	4,7	3,4	2,2	6,2	4,5	11,2	9,1	7,4	6,6	4,5	3,9	7,9
067	11,4	9,6	8,4	4,6	4	5,1	8,2	4,6	13,6	6,9	9,3	4,2	4,8	3,5	9,3
068	6	7,9	4,3	5,1	2,5	3,4	3,7	5,1	8,8	10,4	7,7	6,6	3,5	3,8	8,2
069	7,6	7,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
070	8,6	11,2	4,4	6,3	4,8	6,2	4,3	5,7	7,2	10,3	4,3	6,9	3,5	4,7	6,4
072	6,4	5,8	5,5	5,9	1,6	1,3	5,4	5,7	7,8	8,9	4,2	6,8	3,9	3	4,8
073	12,4	7	7,3	3,6	5,8	4,4	6,9	3	9,8	5,3	7,3	3,5	3	3	7,5
074	11,3	10,1	6,7	5,4	5,4	5,3	6,3	5,1	9,4	8,3	7,4	5,8	2,1	2,7	7,6
075	11,5	7	9,4	4,2	2,5	3,5	9,2	3,9	12,4	5,7	10,1	3,1	3,3	2,9	9,8
077	9,6	11,4	4,5	5,7	6,2	6,9	3,9	4,9	7,6	10,9	4	6,3	5	5	3,6
078	11,8	8,3	8,9	6,1	3,6	2,7	8,8	6,5	12,1	10,3	8,9	7,7	4,5	3,7	8,2
080	11,8	8,3	8,9	6,1	3,6	2,7	8,8	6,5	12,1	10,3	8,9	7,7	4,5	3,7	8,2
081	15,9	12,4	10,5	6,3	6,6	7,7	9,6	5,4	16,6	11,5	11,2	6,3	6,7	6,1	10,8
083	12,1	8,1	9,9	7,3	2,5	1,3	10	7,3	12,6	11,3	9,5	7,9	3,4	4,7	9,8
084	13,6	11,8	10,5	9,8	3,3	2,1	10,3	9,8	13,3	14,7	11,3	10,6	4,9	4,1	11,3
085	15,5	12,9	10	6,3	6,6	7,5	9,3	5,7	16,5	11,3	11	7	6	6,2	11,1
086	10,3	10,4	6,9	5,9	4	4,8	6,6	5,8	8,2	8,5	5,5	6,7	2,7	2,5	5,7
087	15,5	12,9	10	6,3	6,6	7,5	9,3	5,7	16,5	11,3	11	7	6	6,2	11,1
088	16,7	15,8	9,7	7,4	7,5	8,9	9,4	7	14	13,7	8,8	8,1	5,6	6	8,7
089	12,5	9,3	8,2	4,5	5,4	5,6	7,6	4,1	11,7	6,1	8,6	4,2	3,7	2,6	9,2
091	13,5	9,6	10,2	5,5	4,8	4,7	9,6	5,4	14,8	10,5	11,7	5,8	5,2	5,9	12,2
092	12,8	10,2	10,1	7,7	3,8	3,1	9,4	7,4	14,2	12,4	10,3	7,9	4,4	5	10,5
093	8,7	10,7	5	6	4	5,4	5,1	5,6	9,3	12,6	4,8	7,2	5,9	5,6	4,3
094	13,6	11,5	8,2	6,7	6,3	5,9	8,1	6	12,8	12,3	10,8	7,2	6	5,5	11,4
095	14,2	9,8	10,6	7,8	7,5	7,5	7,5	7,5	14,2	12,3	10,8	7,2	6	5,5	11,4
099	14,2	9	8	3,1	7,5	7,2	7,1	2,3	11,3	6,3	7,5	3,6	3,3	3,8	7,6
100	11,2	7,6	9,3	5,4	2,2	2,4	9,4	5,4	14,1	10,1	10	7,1	4,5	5	10,1

A9 Kompletter Versuchsplan der DOE

Tabelle 0-21: Versuchsplan der mehrdimensional manipulierten Komponenten

ID	Taumeln des Fräsdorns E_W [μm]	Radiale Zustellung α_e [mm]	Axialer Vorschub f_a [mm]
DOE - 001	4	2,2039	0,0361
DOE - 002	20	2,1765	0,0387
DOE - 003	10	2,1787	0,0557
DOE - 004	18	2,1896	0,0486
DOE - 005	2	2,2025	0,0485
DOE - 006	12	2,1926	0,0635
DOE - 007	3	2,1735	0,0579
DOE - 008	0	2,2049	0,0396
DOE - 009	12	2,1986	0,0513
DOE - 010	5	2,2062	0,0563
DOE - 011	7	2,1756	0,0631
DOE - 012	2	2,1906	0,0382
DOE - 013	7	2,1913	0,0583
DOE - 014	2	2,1743	0,0373
DOE - 015	4	2,1726	0,0452
DOE - 016	15	2,1939	0,0366
DOE - 017	8	2,1893	0,0549
DOE - 018	6	2,1744	0,0508
DOE - 019	1	2,2045	0,0488
DOE - 020	18	2,1808	0,044

DOE - 021	12	2,1889	0,0562
DOE - 022	1	2,1908	0,0642
DOE - 023	4	2,1928	0,0369
DOE - 024	11	2,1709	0,058
DOE - 025	2	2,1859	0,0459
DOE - 026	9	2,1861	0,0359
DOE - 027	13	2,1723	0,0379
DOE - 028	9	2,1954	0,04
DOE - 029	12	2,1879	0,0491
DOE - 030	5	2,1692	0,0582
DOE - 031	16	2,1974	0,0551
DOE - 032	19	2,1882	0,0402
DOE - 033	14	2,1981	0,062
DOE - 034	17	2,1791	0,0569
DOE - 035	18	2,1715	0,0407
DOE - 036	4	2,199	0,047
DOE - 037	19	2,168	0,0606
DOE - 038	8	2,2062	0,0568
DOE - 039	8	2,1977	0,0364
DOE - 040	11	2,1846	0,0517
DOE - 041	7	2,1818	0,0417
DOE - 042	2	2,2058	0,0543
DOE - 043	3	2,1948	0,0421

DOE - 044	7	2,1783	0,0498
DOE - 045	12	2,1866	0,0644
DOE - 046	15	2,1849	0,0446
DOE - 047	14	2,2029	0,0609
DOE - 048	7	2,2077	0,0533
DOE - 049	6	2,2003	0,0526
DOE - 050	15	2,169	0,0506
DOE - 051	14	2,1885	0,0566
DOE - 052	8	2,1695	0,056
DOE - 053	5	2,1929	0,0537
DOE - 054	15	2,1793	0,036
DOE - 055	3	2,1762	0,0465
DOE - 056	3	2,1785	0,0426
DOE - 057	17	2,2038	0,0535
DOE - 058	3	2,1811	0,051
DOE - 059	7	2,2011	0,043
DOE - 060	16	2,1762	0,0623
DOE - 061	9	2,2072	0,059
DOE - 062	17	2,1998	0,0403
DOE - 063	0	2,1919	0,0391
DOE - 064	19	2,1986	0,0377
DOE - 065	17	2,2014	0,0512
DOE - 066	9	2,1869	0,0601

DOE - 067	17	2,1748	0,0378
DOE - 068	1	2,2022	0,0474
DOE - 069	7	2,1718	0,0411
DOE - 070	3	2,178	0,0504
DOE - 071	7	2,1898	0,0542
DOE - 072	7	2,2008	0,0515
DOE - 073	11	2,1726	0,0523
DOE - 074	9	2,1775	0,0584
DOE - 075	15	2,175	0,0406
DOE - 076	2	2,1696	0,0604
DOE - 077	1	2,2068	0,047
DOE - 078	11	2,1873	0,0625
DOE - 079	20	2,1888	0,0635
DOE - 080	13	2,1958	0,0617
DOE - 081	16	2,1842	0,0429
DOE - 082	1	2,1972	0,0608
DOE - 083	19	2,1964	0,0596
DOE - 084	18	2,2065	0,0351
DOE - 085	16	2,1684	0,0641
DOE - 086	8	2,2018	0,0649
DOE - 087	8	2,2023	0,0363
DOE - 088	13	2,1778	0,0575
DOE - 089	17	2,2014	0,0419

DOE - 090	5	2,2072	0,0393
DOE - 091	16	2,1754	0,0449
DOE - 092	19	2,1747	0,0546
DOE - 093	4	2,197	0,0574
DOE - 094	10	2,2034	0,0613
DOE - 095	19	2,1803	0,0521
DOE - 096	18	2,1903	0,0554
DOE - 097	4	2,1702	0,0637
DOE - 098	13	2,182	0,0433
DOE - 099	11	2,1855	0,0573
DOE - 100	16	2,183	0,0639
DOE - 101	16	2,1979	0,0354
DOE - 102	11	2,1837	0,0628
DOE - 103	10	2,1947	0,0644
DOE - 104	8	2,1798	0,0621
DOE - 105	12	2,1795	0,0544
DOE - 106	11	2,1732	0,0614
DOE - 107	8	2,1895	0,0629
DOE - 108	15	2,1998	0,0496
DOE - 109	15	2,1801	0,0591
DOE - 110	9	2,1835	0,0414
DOE - 111	17	2,203	0,0389
DOE - 112	20	2,1864	0,0443

DOE - 113	1	2,1994	0,0394
DOE - 114	14	2,1922	0,0566
DOE - 115	13	2,1941	0,06
DOE - 116	5	2,185	0,0572
DOE - 117	8	2,1825	0,0622
DOE - 118	20	2,1742	0,0648
DOE - 119	6	2,191	0,0616
DOE - 120	2	2,1687	0,054
DOE - 121	13	2,1883	0,0611
DOE - 122	13	2,1932	0,0555
DOE - 123	8	2,1945	0,0519
DOE - 124	10	2,2074	0,0357
DOE - 125	12	2,1807	0,0491
DOE - 126	12	2,1721	0,0593
DOE - 127	14	2,2041	0,0556
DOE - 128	16	2,1819	0,0456
DOE - 129	0	2,2027	0,0473
DOE - 130	3	2,1838	0,0464
DOE - 131	19	2,1728	0,0409
DOE - 132	4	2,1904	0,0476
DOE - 133	14	2,195	0,0533
DOE - 134	6	2,1797	0,0457
DOE - 135	13	2,1854	0,0551

DOE - 136	18	2,1789	0,0413
DOE - 137	7	2,1935	0,0515
DOE - 138	11	2,1683	0,0483
DOE - 139	19	2,1716	0,0462
DOE - 140	6	2,207	0,0448
DOE - 141	5	2,1901	0,0418
DOE - 142	17	2,183	0,0381
DOE - 143	18	2,1865	0,0495
DOE - 144	15	2,1704	0,0599
DOE - 145	15	2,2056	0,0466
DOE - 146	13	2,2046	0,0499
DOE - 147	13	2,1918	0,037
DOE - 148	6	2,1815	0,0386
DOE - 149	6	2,2051	0,0481
DOE - 150	1	2,1768	0,0505
DOE - 151	0	2,1933	0,0405
DOE - 152	11	2,1732	0,0488
DOE - 153	9	2,1826	0,0493
DOE - 154	14	2,1814	0,0521
DOE - 155	14	2,201	0,048
DOE - 156	5	2,1921	0,0355
DOE - 157	10	2,1871	0,0415
DOE - 158	3	2,1759	0,0371

DOE - 159	19	2,1752	0,0468
DOE - 160	3	2,1968	0,0398
DOE - 161	3	2,1768	0,0501
DOE - 162	5	2,1712	0,0627
DOE - 163	14	2,177	0,0476
DOE - 164	20	2,2079	0,0375
DOE - 165	10	2,199	0,0577
DOE - 166	18	2,1983	0,0593
DOE - 167	9	2,1844	0,0384
DOE - 168	1	2,1857	0,0424
DOE - 169	5	2,1834	0,0525
DOE - 170	2	2,2043	0,0437
DOE - 171	19	2,1701	0,0633
DOE - 172	15	2,1916	0,0559
DOE - 173	5	2,2057	0,0388
DOE - 174	6	2,1822	0,0435
DOE - 175	18	2,1961	0,0432
DOE - 176	10	2,1738	0,0428
DOE - 177	18	2,197	0,0539
DOE - 178	9	2,1962	0,0603
DOE - 179	6	2,2053	0,0502
DOE - 180	2	2,2	0,0531
DOE - 181	4	2,2035	0,0547

DOE - 182	9	2,1707	0,0586
DOE - 183	0	2,1955	0,061
DOE - 184	17	2,1781	0,044
DOE - 185	16	2,1693	0,0647
DOE - 186	10	2,1937	0,0436
DOE - 187	1	2,1737	0,0353
DOE - 188	4	2,1993	0,0422
DOE - 189	10	2,1711	0,0596
DOE - 190	17	2,2005	0,0443
DOE - 191	16	2,1773	0,0399
DOE - 192	1	2,1877	0,0528
DOE - 193	2	2,2017	0,0454
DOE - 194	10	2,1698	0,0529
DOE - 195	14	2,1805	0,0446
DOE - 196	4	2,1891	0,0478
DOE - 197	12	2,1847	0,046
DOE - 198	6	2,1876	0,0451
DOE - 199	12	2,1957	0,0588
DOE - 200	11	2,1943	0,0368

A10 Analyse der optischen Messdaten

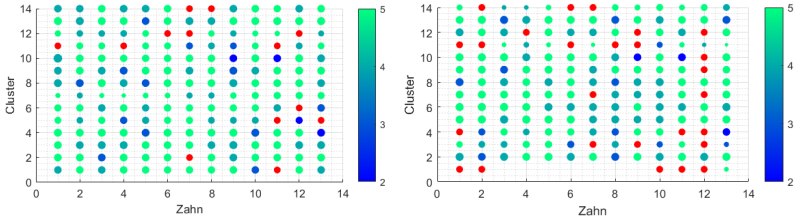


Abbildung 0-8: Art der Verteilung innerhalb der Cluster jedes Zahnes (linke Flanken links und rechte Flanken rechts) mit farblicher Kennzeichnung der Verteilung (rot = einfache Normalverteilung (NV) und von blau = Mischverteilung aus zwei NV bis grün = Mischverteilung aus fünf NV) sowie Skalierung der Punktgröße, abhängig von der negativen logarithmischen Likelihood

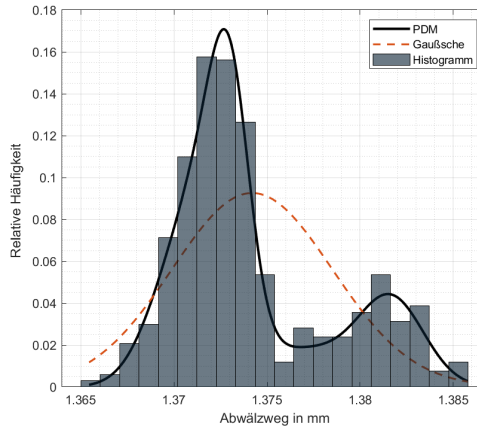


Abbildung 0-9: Die relative Häufigkeit der Punkte eines Clusters entlang des Abwärtswegs zeigt die Verbesserung der PDM im Vergleich zur Gaußschen Verteilung

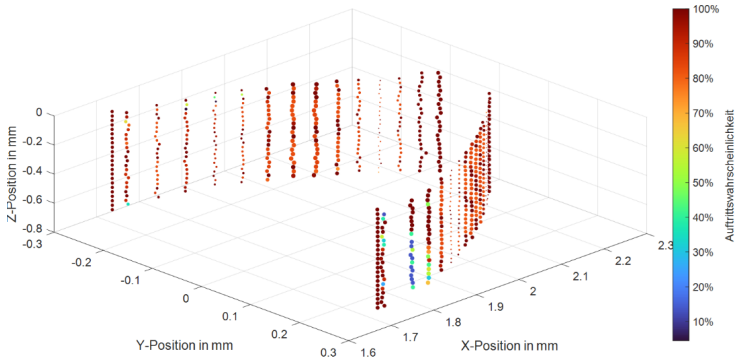


Abbildung 0-10: Auftretenswahrscheinlichkeit für die Punkte eines Zahns an der linken und rechten Flanke

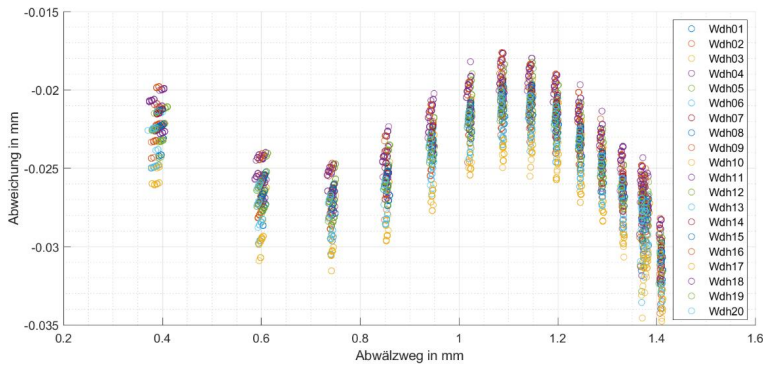
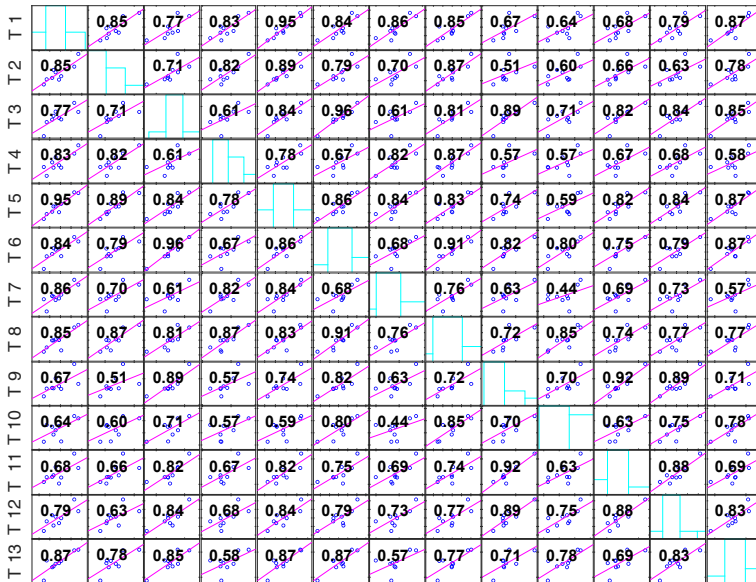


Abbildung 0-11: Abweichungen von 20 optischen Messungen im Vergleich zur nominalen Profilform



T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10 T11 T12 T13
 Abbildung 0-12: Korrelationen der beobachteten Ausreißer zwischen den 13 Zähnen (Teeth)

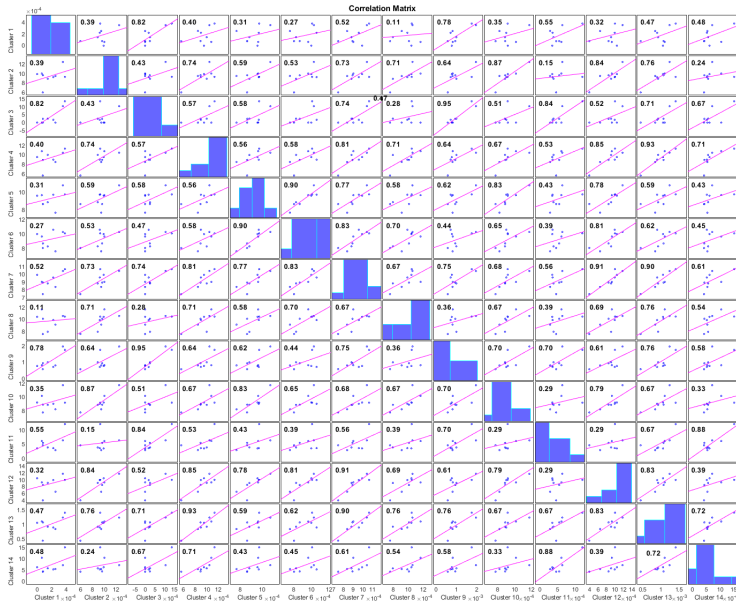


Abbildung 0-13: Korrelationen zwischen den beobachteten Ausreißern, in den Unterräumen entlang der Zahnflanke, der unterschiedlichen Cluster

A11 Messunsicherheitsbudget der virtuellen Zahnweitenprognose

Die Messunsicherheit der virtuellen Zahnweitenmessung wird experimentell durch taktile Vergleichsmessungen an der Zeiss F25 ermittelt. Dafür wird das Referenzzahnrad 20-mal taktile vermessen und die Zahnweiten in „Zeiss Gear Pro“ evaluiert. Das Zahnrad wird daraufhin 20-mal optisch in der Produktionsumgebung vermessen und die Zahnweiten jedes Zahns mittels virtueller Messung in „MATLAB“ ermittelt. Als Unsicherheitsbeiträge werden die taktilen Kalibrierunsicherheiten auf Basis von Messungen am Mikroverzahnungsnorm der PTB für den Modul 0,2 mm sowie die Standardabweichungen der Mediane über die 13 Zähne beider Messreihen aus jeweils 20 Messungen verwendet. Die systematische Abweichung (Bias) zwischen den beiden Messreihen kann, aufgrund der taktilen Kalibriermessungen des Referenzbauteils, kompensiert werden. Somit orientiert sich die Regression an dem taktilen Referenzverfahren. Dies ermöglicht eine bestmögliche Prognose für die Regelung. Die erweiterte Unsicherheit der Zahnweitenmessung wurde mit der Formel 2-20 berechnet und beträgt dabei 0,78 μm ($k = 2$). Das vollständige Budget ist in Tabelle 0-22 zu finden. Somit kann eine geringe Unsicherheit der Zahnweitenprognose nachgewiesen werden.

Tabelle 0-22: Messunsicherheitsbudget der virtuellen Zahnweitenprognose

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unsicherheitseinfluss	Methode nach GUM	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Gewichtung	Standardunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Freiheitsgrad	Unsicherheitsbeitrag
δ	T	x	$u(x)$	-	\sqrt{G}	u	c	ν	$u(y)$
X Messwert (optisch)	A	2192,85	-	-	-	-	-	-	-
B Kompensierte systematische Abweichung	A	0,37	-	-	-	-	-	-	-
δ Kalibrierunsicherheit (taktile)	B	-	0,40	Rechteck	0,58	0,23	1	999999	0,23
δ Zufällige Abweichung (taktile)	A	-	0,23	Normal	1,00	0,23	1	19	0,23
δ Zufällige Abweichung (optisch)	A	-	0,21	Normal	1,00	0,21	1	19	0,21
Vollständiges Messergebnis:	W_s	2193,23	μm	\pm	0,78	μm	Erweiterungsfaktor $k=2$	2	

A12 Ergebnisse der Analyse des Wälzfräsprozesses

Die Resultate der Versuchsreihen sind in diesem Abschnitt zusammengefasst. Hierbei wird zwischen der eindimensionalen und mehrdimensionalen Variation der Einflussgrößen unterschieden. Zudem werden die Ergebnisse der Langzeitverschleißuntersuchung präsentiert.

Eindimensionale Variation

Die Resultate der eindimensionalen Einflussgrößenvariation sind in Abbildung 9-2 dargestellt. Dabei zeigen sich starke Sensitivitäten bei der radialen Zustellung sowie dem Fräsdorntaumel. Die Einflüsse des axialen Vorschubs und der Winkelstellung des Fräfers fallen äußerst gering aus.

Neben dieser qualitativen Analyse werden im Folgenden die Wertebereiche relevanter Abweichungen für die jeweilige Einflussgröße in Mikrometern quantifiziert. Hierbei werden in Tabelle 0-23 die ausgeprägten Intervalle für die radiale Zustellung sowie den Taumel des Fräsdorns deutlich.

Tabelle 0-23: Wertebereiche relevanter Abweichungen für jede Einflussgröße

Einflussgröße	Intervall 1 in μm	Intervall 2 in μm	Intervall 3 in μm
Radiale Zustellung	$TG_{RE} = [-10,8; 20,0]$	$TG_{LI} = [-11,3; 19,1]$	$F'_{i,RE} = [12,0; 23,9]$
Taumel Fräsdorn	$f_{H\alpha LI} = [0,4; 17,4]$	$f_{f\alpha LI} = [3,2; 18,7]$	$TG_{LI} = [-7,3; -0,2]$
Axialer Vorschub	$f_{f\beta RE} = [1,4; 4,5]$	$f_{H\beta RE} = [-2,1; 0,7]$	$f_{H\beta LI} = [-0,7; 1,3]$
Winkelstellung Fräser	$f_{f\beta RE} = [1,4; 3,2]$	$f_{H\beta LI} = [-0,9; 1,3]$	$f_{H\beta RE} = [-0,5; 1,4]$
Frässtrategie	$f_{H\alpha LI} = [0,4; 3,6]$	$f_{H\beta LI} = [-0,6; 1,3]$	$f_{f\alpha LI} = [2,8; 3,2]$

Die Korrelationsmatrizen für die radiale Zustellung, den Fräsdorntaumel und den axialen Vorschub sind in den nächsten Abbildungen dargestellt. Dabei zeigen sich starke Korrelationen bei der radialen Zustellung (Abbildung 0-14) und dem Fräsdorntaumel (Abbildung 0-15). Für den axialen Vorschub (Abbildung 0-16) sind schwächere lineare Korrelationen nachweisbar.

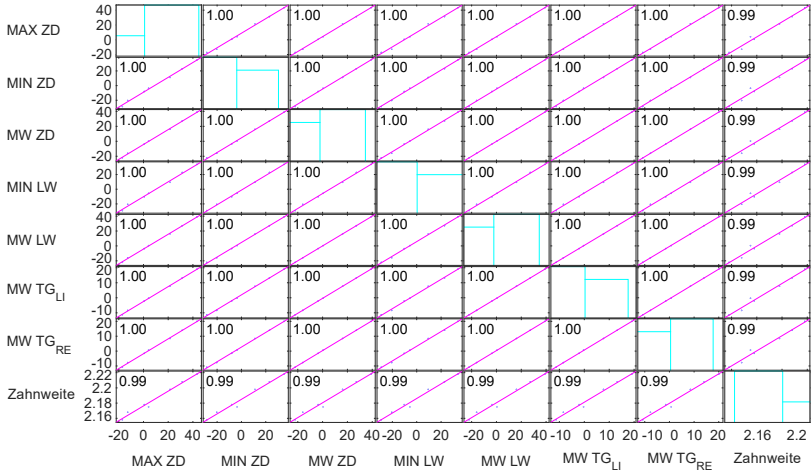


Abbildung 0-14: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation der radialen Zustellung

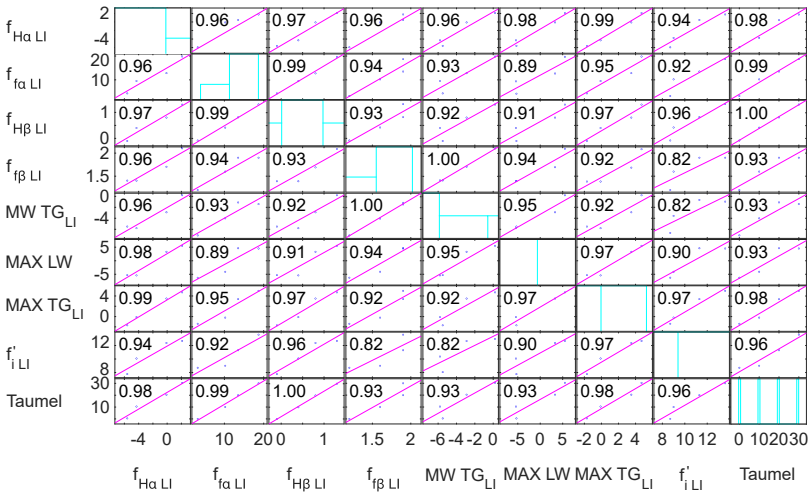


Abbildung 0-15: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation des Fräsdormtaumels

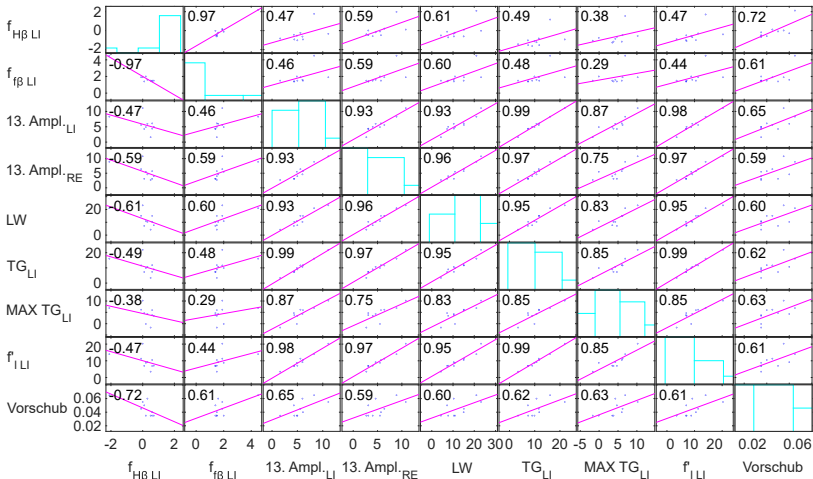


Abbildung 0-16: Korrelationsmatrix der eindimensionalen Variation des axialen Vorschubs

Somit sind die radiale Zustellung, der Fräsdorntaumel sowie der axiale Vorschub die am stärksten korrelierenden Einflussgrößen der eindimensionalen Variation. Diese dienen als Eingaben für die mehrdimensionale Variation, bei welcher alle drei Größen gleichzeitig manipuliert werden.

Langzeituntersuchung des Fräserverschleißes

Bei der Korrelationsanalyse des Fräserverschleißes ergeben sich, im Rahmen der Langzeituntersuchung, erhöhte Übereinstimmungen mit den Medianen der linken Profil-Winkelabweichung (Abbildung 9-13), der linken Profil-Formabweichung (Abbildung 0-17) sowie der rechten Profil-Winkelabweichung (Abbildung 0-18). Diese bilden die Grenzwerte für die Auslösung des Shiftprozesses.

Dabei zeigt sich ein ähnliches Verhalten zwischen allen drei Verläufen. Zudem weisen alle Merkmale eine negative Korrelation auf. Der hohe Zeit- und Kostenaufwand durch die Herstellung von 3500 Bauteilen erschwert weitere Untersuchungen. Diese sind jedoch im Anschluss an dieses Projekt angedacht. Der Median verringert dabei die Ausreißer der streuenden Einflussgrößen.

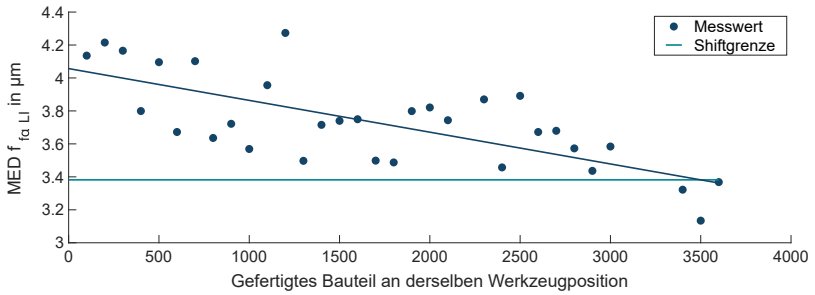


Abbildung 0-17: Langzeituntersuchung der Profil-Formabweichung für linke Flanken

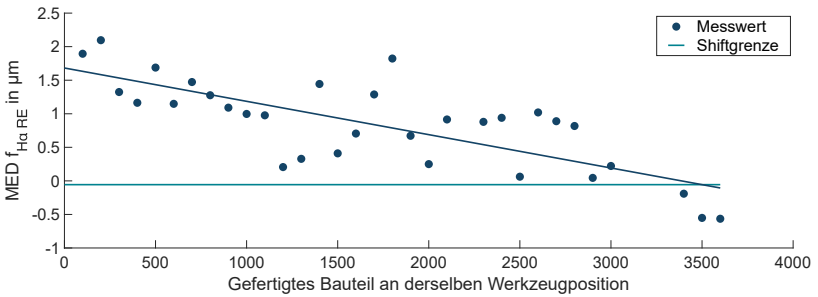


Abbildung 0-18: Langzeituntersuchung der Profil-Winkelabweichung für rechte Flanken

Die daraus resultierende Korrelationsmatrix ist für die Langzeituntersuchung in Abbildung 0-19 dargestellt. Hierbei zeigen sich hohe negative Korrelationen, welche sich für eine Korrektur eignen.

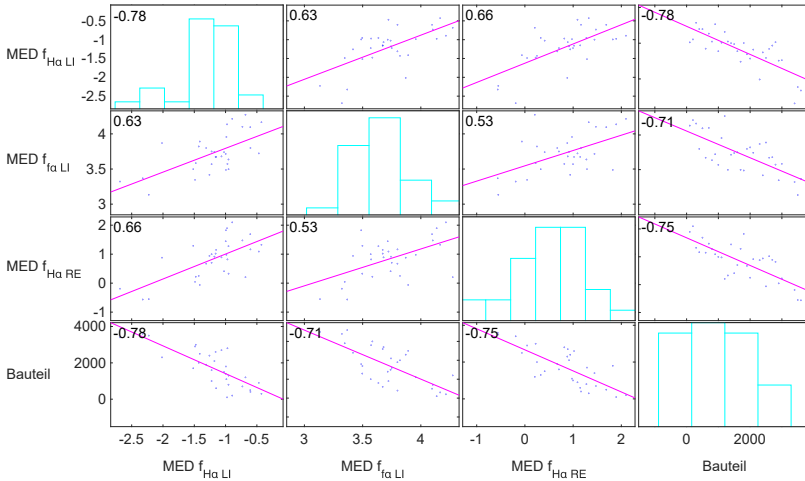


Abbildung 0-19: Korrelationsmatrix der Langzeituntersuchung des Fräserverschleißes

Somit wurden die eindimensionale Variation und die Langzeituntersuchung betrachtet. Im nächsten Abschnitt folgt die mehrdimensionale Variation der Einflussgrößen, um eine Überlagerung der auftretenden Effekte mit reduzierten Streubereichen praxisnah abzubilden.

Mehrdimensionale Variation

In diesem Schritt werden die drei selektierten Einflussgrößen gleichzeitig variiert. Die durch Korrelationsanalysen ermittelten Zusammenhänge bilden die Datengrundlage des Regelungsalgorithmus. Im Vergleich zu den eindimensionalen Variationen sind die Wertebereiche auf praxisnahe Dimensionen reduziert worden. Dabei zeigen sich starke Korrelationen bei der radialen Zustellung (Abbildung 0-20) und dem Fräsdorntaumel (Abbildung 0-21). Der Einfluss des axialen Vorschubs (Abbildung 0-22) fällt im Gegensatz dazu deutlich geringer aus. Die teilweise vorhandenen Korrelationen von 100 % sind durch Rundung entstanden. Somit eignen sich die radiale Zustellung sowie der Taumel des Fräsdorns zur Modellierung innerhalb des Qualitätsregelkreises. Der Offset des Sinus-Fits der simulierten Einflanken-Wälzprüfung stellt sich als geeignetes Merkmal zur Detektion des Zahnweitenmaßes zur Regelung der radialen Zustellung heraus.

Der Fräsdrontaumel spiegelt sich ebenfalls in einer Vielzahl von Merkmalen wider. Jedoch sind die auftretenden Korrelationen etwas geringer. Zudem wird der Taumel des Dorns, im Gegensatz zur radialen Zustellung, nicht durch spezifische Kenngrößen detektiert. Dies erschwert die Erfassung und Modellierung. Jedoch bieten die hohen linearen Korrelationen bei einem Stichprobenumfang von 200 eine gute Ausgangslage für die Entwicklung des Regelungsalgorithmus.

Die Korrelationen der mehrdimensionalen Variation erweisen sich zudem als linear. Nichtlineare Zusammenhänge können dabei ausgeschlossen werden. Dies ist in den drei vorliegenden Korrelationsmatrizen zu erkennen. Zudem kann eine Superposition von Einflussgrößen ausgeschlossen werden. In diesem Kontext ist es von Vorteil, dass sich die individuellen Einflussgrößen in verschiedenen Merkmalen ausprägen. Somit können die Modelle individuell erstellt und alle Merkmale einzeln, durch voneinander unabhängige Korrekturwerte, angepasst werden.

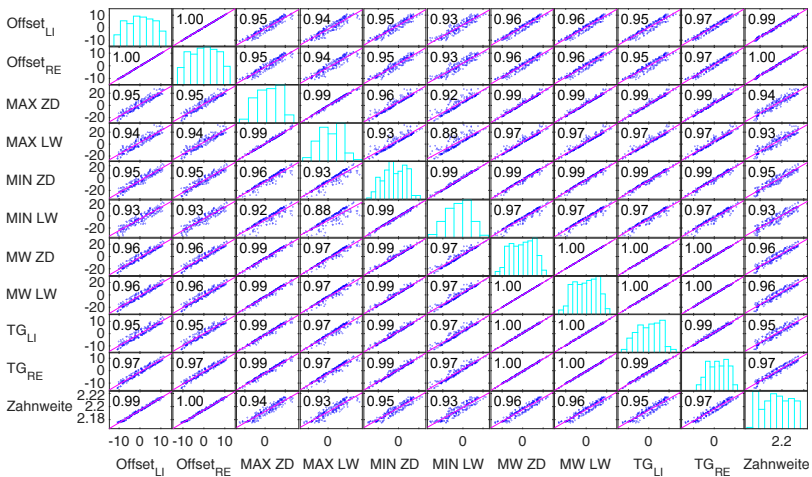


Abbildung 0-20: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation der radialen Zustellung

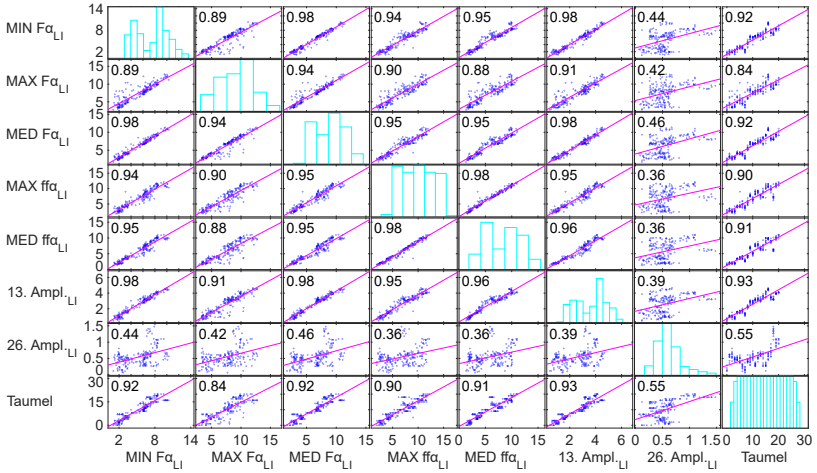


Abbildung 0-21: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des Fräsdorttaumels

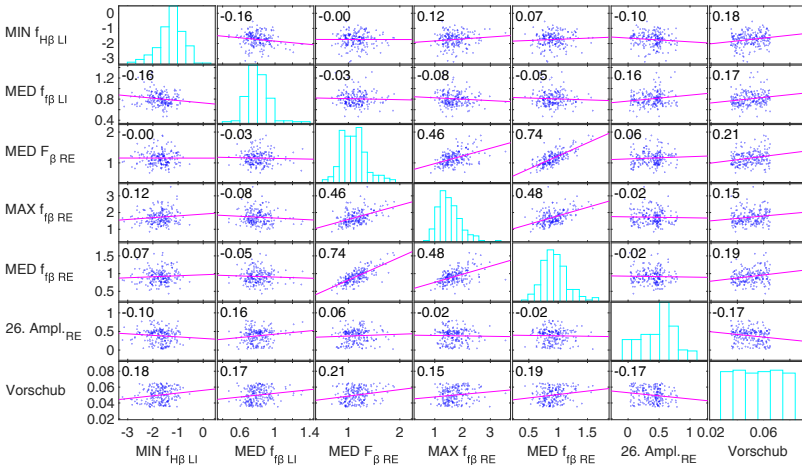


Abbildung 0-22: Korrelationsmatrix der mehrdimensionalen Variation des axialen Vorschubs

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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung
und Konfigurierung**

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten
Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme
durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel
automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue
rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozessessteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsignen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der
Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik
und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators
für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse.
Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch
Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die
Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindtrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauerteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen
von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

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

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilerstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schadigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspannbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebs-elementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindtrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschalen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion
Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhaut

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung