

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

Ali Bilen

**Datengetriebene Qualitätsregelung in
der Fertigung von Mikro-Kronenrädern**
Körperschallbasierte virtuelle Messung zur
Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale
mit Unsicherheitsquantifizierung

Band 312

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
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Ali Bilen

Datengetriebene Qualitätsregelung in der Fertigung von Mikro-Kronenrädern

Körperschallbasierte virtuelle Messung zur Vorhersage
geometrischer Qualitätsmerkmale mit Unsicherheitsquantifizierung

Band 312

**Datengetriebene Qualitätsregelung in der Fertigung von
Mikro-Kronenrädern**
Körperschallbasierte virtuelle Messung zur Vorhersage geometrischer
Qualitätsmerkmale mit Unsicherheitsquantifizierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Ali Bilen, M.Sc.

aus Mühlacker

Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2026

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

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., 2026

Copyright Shaker Verlag 2026

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

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0785-6
PDF-ISBN	978-3-8191-0822-8
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

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 der Herausgeber

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 wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. 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

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die engagierte Betreuung, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Möglichkeit, mich fachlich und persönlich weiterzuentwickeln.

Ebenso danke ich meinem ehemaligen Oberingenieur Prof. Dr.-Ing. Florian Stamer für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, den stets konstruktiven fachlichen Austausch und die kontinuierliche Unterstützung. Für die Übernahme des Korreferats und seinen wertvollen Input danke ich zudem Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt vielmals.

Der Projektgruppe von Dentsply Sirona, insbesondere Robert Schmitt, Jochen Wacker und Christoph Rettig, danke ich für die gemeinsame, lehrreiche Zusammenarbeit. Mein Dank gilt ebenso den Kollegen von Franco, insbesondere Edouard Gindin und Philip Jukl, deren Unterstützung die fachliche Qualität dieser Arbeit maßgeblich bereichert hat.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen am wbk bedanke ich mich für den außergewöhnlichen Zusammenhalt und das offene, kollegiale Miteinander. Besonders danken möchte ich meinem Mentor Jan Philipp Kaiser sowie Sebastian Behrendt und Jork Groenewold, die mich während der Entstehung dieser Arbeit fachlich wie persönlich begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt zudem meinen studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern, deren Engagement viele Teilaspekte dieser Arbeit ermöglicht hat: Max Decman, Stephan Carl Ernstberger, Aaron Neumann, Aaron Grommes, Dorian Gleß und Jeannine Klumpp.

Abschließend danke ich meinen Eltern Meryem und Bekirhan, meiner Schwester Dilsah sowie meinem Bruder Cihan und seiner Frau Merve für ihren beständigen Rückhalt. Ebenso gilt mein Dank meinen engsten Freunden, insbesondere meinem besten Freund Mehmet, deren Unterstützung und Vertrauen mir während der gesamten Promotionszeit Kraft gegeben haben.

Karlsruhe, 24.06.2026

Ali Bilen

Abstract

Micro crown gears are key functional components in high-speed dental instruments and require high geometric precision in the single-digit micrometer range at rotational speeds of up to 200,000 rpm. Conventional quality assurance relies on time-consuming offline metrology, which decouples quality feedback from the manufacturing process, leading to long control dead times and limited capability for process correction. These challenges are further aggravated by the absence of standardized assessment methods for crown gear geometry, in contrast to well-established norms for spur gears.

To address this deficit, this dissertation develops the methodological and metrological foundation for a data-driven, in-process quality assessment of micro crown gears produced by gear hobbing, based on structure-borne sound signals acquired during machining. A geometric evaluation framework is established, defining measurable quality metrics and a reproducible measurement strategy based on optical coordinate metrology, drawing on established spur gear standards such as VDI 2612. In addition, a kinematic simulation of the hobbing process is developed as an explanatory digital twin for the systematic analysis of cause–effect relationships between process parameter deviations and the resulting tooth geometry.

Building on these foundations, a Virtual Metrology pipeline is developed that transforms structure-borne sound signals, through feature engineering and supervised machine learning, into predictions of geometric quality metrics. Locally acting features—particularly angular deviations and tooth thickness—can be predicted with high accuracy, while globally aggregated metrics are more strongly affected by uncertainties in the reference data.

Explicit uncertainty quantification following GUM methodology reveals that model- and data-induced contributions dominate the total prediction uncertainty, currently precluding the full substitution of offline laboratory metrology. At the same time, the quantified uncertainty enables the controlled deployment of virtual quality models as a foundation for adaptive in-line process control.

The developed methodology is validated in an application-relevant context and is transferable to precision manufacturing processes with comparable challenges in in-line metrology and quality feedback.

Kurzfassung

Mikro-Kronenräder stellen funktionale Schlüsselkomponenten in hochdrehenden Dentalinstrumenten dar und erfordern bei Drehzahlen von bis zu 200.000 U/min eine sehr hohe geometrische Präzision im einstelligen Mikrometerbereich. Konventionelle Qualitätssicherungsmaßnahmen basieren auf zeitaufwändiger Offline-Messtechnik, die die Rückführung qualitätsrelevanter Informationen aus dem Fertigungsprozess entkoppelt und zu langen Regelungstotzeiten sowie begrenzten Möglichkeiten zur Prozesskorrektur führt. Diese Herausforderungen werden zusätzlich durch das Fehlen standardisierter Bewertungsmethoden für die Geometrie von Kronenrädern verstärkt.

Zur Adressierung dieser Defizite entwickelt diese Dissertation die methodische und messtechnische Grundlage für eine datengetriebene, prozessintegrierte Qualitätsbewertung von Mikro-Kronenrädern. Grundlage bilden im Wälzfräsprozess erfasste Körperschallsignale. Hierfür wird ein geometrisches Auswerteverfahren entwickelt, das messbare Qualitätsmerkmale sowie eine reproduzierbare Messstrategie auf Basis optischer Koordinatenmesstechnik definiert und an etablierte Stirnradnormen wie die VDI 2612 angelehnt ist. Ergänzend wird ein kinematisches Simulationsmodell als erklärender digitaler Zwilling entwickelt, das die Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Prozessparameterabweichungen und der resultierenden Zahngeometrie ermöglicht.

Darauf aufbauend wird eine Virtual-Metrology-Pipeline entwickelt, in der Körperschallsignale durch Merkmalsextraktion und überwachte Regressionsmodelle in Vorhersagen geometrischer Qualitätsmerkmale überführt werden. Lokal wirkende Merkmale – insbesondere Winkelabweichungen und die Zahndickenabweichung – können mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden, während global aggregierte Kennwerte stärker durch Unsicherheiten beeinflusst werden.

Eine explizite Unsicherheitsquantifizierung nach GUM zeigt, dass modell- und dateninduzierte Beiträge die Gesamtunsicherheit dominieren und derzeit eine vollständige Substitution der Labormesstechnik verhindern. Gleichzeitig ermöglicht die quantifizierte Unsicherheit den kontrollierten Einsatz virtueller Qualitätsmodelle für eine adaptive In-line-Qualitätsregelung.

Die entwickelte Methodik wird in einem anwendungsnahen Kontext validiert und ist auf Präzisionsfertigungsprozesse mit vergleichbaren Herausforderungen übertragbar.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Herausforderungen	1
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung	2
1.3 Forschungshypothesen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Verzahnungen	5
2.1.1 Grundbegriffe und grundlegende Verzahnungsgeometrien	6
2.1.2 Herstellung von Zahnrädern	9
2.1.3 Qualitätsmerkmale und Verzahnungsabweichungen	11
2.1.4 Mikroverzahnungen	13
2.1.5 Kronenräder	14
2.1.6 Zwischenfazit	16
2.2 Prozessüberwachung in der Zerspanung	17
2.2.1 Sensorik zur Prozessüberwachung in der Zerspanung	17
2.2.2 Körperschallerfassung zur Prozessüberwachung	17
2.2.3 Zwischenfazit	18
2.3 Qualitätsregelung und Messtechnik	18
2.3.1 Qualitätsregelkreise	19
2.3.2 Integrationsgrad der Messtechnik	20
2.3.3 Optische Koordinatenmesstechnik – Fokusvariation	21
2.3.4 Taktile Koordinatenmesstechnik	23
2.3.5 Grundlagen der Messunsicherheit nach GUM	24
2.3.6 Predictive Quality & Virtual Metrology	26
2.3.7 Zwischenfazit	26
2.4 Methoden der Datenverarbeitung	27
2.4.1 Data-Mining Framework nach Mikut	27
2.4.2 Merkmalsextraktion mittels Spektraltransformation	28
2.4.3 Merkmalsextraktion durch Hauptkomponentenanalyse (PCA)	29
2.4.4 Univariate Merkmalsselektion mittels Varianzzerlegung – F-Regression	30

2.4.5	Modellbildung und Validierung	30
2.4.6	Methoden der 3D-Objektverarbeitung	33
2.4.7	Zwischenfazit	37
3	Stand der Forschung	38
3.1	Anforderungen	38
3.2	Vergleich von Ansätzen zur geometrischen Qualitätsbewertung von Kronenrädern	39
3.2.1	Taktile Messverfahren	39
3.2.2	Optische 3D-Messtechnik	40
3.3	Vergleich von Ansätzen zur prozessnahen Qualitätsprädiktion mittels Körperschall	41
3.3.1	Vorhersage von Bauteilqualität	41
3.3.2	Merkmalsextraktion und Datenauswertung	42
3.3.3	Betrachtung von Unsicherheiten	43
3.4	Vergleich von Ansätzen zur Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung	44
3.4.1	Minimierung der Regelungstotzeit	44
3.4.2	Qualitätsregelung in der Herstellung von Kronenrädern	46
3.5	Identifiziertes Forschungsdefizit und Ableitung des Handlungsbedarfs	46
3.6	Abgeleitete Forschungsfragen	49
4	Lösungsansatz	50
4.1	Zielsetzung und Abgrenzung	50
4.2	Struktur des Lösungsansatzes	52
4.3	Betrachteter Anwendungsfall	53
4.4	Annahmen und Randbedingungen	55
5	Entwicklung einer Mess- und Auswertestrategie	56
5.1	Mathematisches Modell der Kronenradgeometrie	56
5.1.1	Koordinatensystem und geometrische Grundlagen	57
5.1.2	Mathematisches Modell zur Beschreibung der Zahnflanken	59
5.1.3	Bestimmung der Unterschnittsgrenze	60
5.2	Entwicklung einer normnahen Auswertestrategie zur Bewertung von Profil- und Flankenlinien sowie der Zahnteilung	61
5.2.1	Vorverarbeitung und Referenzierung	62
5.2.2	Rasterbasierte Abstandsberechnung	64
5.2.3	Definition der Abweichungskenngrößen	65

5.3	Entwicklung von Merkmalen zur Erkennung translatorischer Werkzeugfehler	68
5.3.1	Merkmal zur Bestimmung der tangentialen Werkzeugverschiebung	68
5.3.2	Merkmal zur Bestimmung der Abweichung der Werkzeugeindringtiefe	71
5.4	Taktile und optische Erfassung der Kronenradgeometrie	72
5.4.1	Erzeugung taktiler Referenzmessungen	72
5.4.2	Parametrierung der optischen Fokusvariation für Mikro-Kronenräder	74
5.5	Initiale Ergebnisse zur Qualitätsbewertung von Kronenrädern	76
5.5.1	Mathematische Definition der Sollgeometrie	76
5.5.2	Demonstration des Auswertalgorithmus und Plausibilität der Aussagen	77
5.5.3	Durchführung und Parametrierung der taktilen und optischen Messungen	78
5.6	Diskussion der Ergebnisse	82
6	Simulationsgestützte Ursache-Wirkungs-Analyse im Wälzfräsprozess	84
6.1	Anforderungen, Grenzen und Parametrierung des Modells	84
6.1.1	Anforderungen und Grenzen	85
6.1.2	Parametrierung des Modells	85
6.2	Geometrische Modellierung des Wälzfräswerkzeugs	85
6.2.1	Einordnung von Wälzfräswerkzeugen zur Herstellung von Kronenrädern nach Roth	86
6.2.2	Generierung der Werkzeuggeometrie	87
6.3	Aufbau der Fertigungssimulation	88
6.3.1	Modellierung der Abwälzbewegung	89
6.3.2	Modellierung von Fertigungsabweichungen	89
6.3.3	Korrektur des effektiven Steigungswinkels des Werkzeugs	91
6.4	Ergebnisse der simulativen Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen im Wälzfräsprozess	92
6.4.1	Einfluss translatorischer Versätze	92
6.4.2	Einfluss dynamischer Taumelfehler	96
6.5	Diskussion der Ergebnisse	97
6.6	Ableitung von Fehlerhypothesen	98
7	Körperschallbasierte Vorhersage geometrischer Fertigungsabweichungen	100
7.1	Vorgehen zur Validierung der Strategie zur Qualitätsbewertung	101
7.2	Integration der Sensorkette in die Wälzfräsmaschine	102
7.3	Signalerfassung und -vorverarbeitung	103
7.3.1	Signalerfassung	103
7.3.2	Datenvorverarbeitung	104

7.4	Merkmalsextraktion und -selektion	105
7.4.1	Merkmalsextraktion	105
7.4.2	Merkmalsselektion	107
7.5	Statistische Versuchsplanung zur Generierung von Trainings- und Testdaten	108
7.6	Modellentwicklung	109
7.7	Ergebnisse der körperschallbasierten Vorhersage	111
7.7.1	Validierung der Strategie zur Qualitätsbewertung	112
7.7.2	Rekonstruktion der Fertigungsparameter aus Körperschall	119
7.7.3	Vorhersage der geometrischen Merkmale aus Körperschall	122
7.8	Diskussion der Ergebnisse	125
8	Quantifizierung von Unsicherheiten in der Qualitätsvorhersage	127
8.1	Methodisches Vorgehen zur Unsicherheitsquantifizierung	127
8.1.1	Kritische Einordnung: Anwendbarkeit von GUM Supplement 1 auf datengetriebene Modelle	130
8.1.2	Formulierung des Unsicherheitsmodells (Formulation)	131
8.1.3	Fortpflanzung der Unsicherheiten (Propagation)	132
8.1.4	Zusammenfassung der Unsicherheit (Summarizing)	132
8.1.5	Empirische Validierung der Überdeckung	133
8.2	Bestimmung der Labelunsicherheit nach GUM	133
8.2.1	Ermittlung der Unsicherheitskomponenten	134
8.2.2	Kombinierte Messunsicherheit der optischen Messung	135
8.3	Bestimmung der Unsicherheit der Körperschallmesskette	135
8.4	Abschätzung der epistemischen Unsicherheit	136
8.5	Bestimmung der Gesamtunsicherheit	137
8.5.1	Parametrierung der Monte-Carlo-Simulation	138
8.5.2	Bauteilspezifische Auswertung und Bias-Berücksichtigung	138
8.5.3	Merkmalspezifische globale Unsicherheit	139
8.6	Ergebnisse der Messunsicherheitsquantifizierung	139
8.6.1	Messunsicherheit der optisch erfassten Labeldaten	139
8.6.2	Unsicherheit der Körperschallmesskette	141
8.6.3	Abschätzung der epistemischen Unsicherheit	143
8.6.4	Ermittlung merkmalspezifischer globaler Unsicherheiten auf Basis der Monte-Carlo-Analyse	144
8.6.5	Empirische Überdeckung auf dem Validierungsdatensatz	145
8.7	Diskussion der Ergebnisse	146

9 Entwicklung von Strategien zur Qualitätsregelung	148
9.1 Regelbasierter Qualitätsregler	148
9.1.1 Axialer Werkzeugversatz (Δz)	149
9.1.2 Tangentialer Werkzeugversatz (Δx)	149
9.1.3 Einordnung in den Qualitätsregelkreis	150
9.2 Datenbasierter Qualitätsregler	150
9.2.1 Datengrundlage	150
9.2.2 Datenbasierte Modellierung	151
9.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur regel- und datenbasierten Qualitätsregelung	152
9.3.1 Ergebnisse und Bewertung der regelbasierten Qualitätsregelung	152
9.3.2 Ergebnisse und Bewertung der datenbasierten Qualitätsregelung	154
9.4 Diskussion der Ergebnisse	157
10 Kritische Diskussion und Ausblick	159
10.1 Diskussion der Ergebnisse und kritische Würdigung	159
10.2 Ausblick auf weiterführende Forschungspotenziale	165
11 Zusammenfassung	167
Liste eigener Veröffentlichungen	169
Literaturverzeichnis	171
Normen	185
Erklärung zum Einsatz generativer künstlicher Intelligenz	187
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	195
Anhang	XV
A1 Anhang Qualitätsbewertung	XV
A1.1 Exemplarisches Verzahnungsprotokoll	XV
A1.2 Kalibrierschein Zeiss F25	XIX
A1.3 Zusammenhang Punkt-zu-Punkt Abweichung optisch vs. taktil	XXX
A2 Anhang Körperschallbasierte Vorhersage	XXXI
A2.1 Statistischer Versuchsplan	XXXI

A2.2 Qualitätsdaten der 225 Versuchsteile	XXXIV
A2.3 Ausführliche Modelldaten	XL
A2.3.1 Gesamttabelle Modelle	XL
A2.3.2 Beste Modelle	XLIV
A3 Anhang Unsicherheitsbewertung	XLV
A3.1 Unsicherheitsverteilung der Qualitätsmerkmale	XLV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AE	Acoustic Emission (Körperschall)
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
AP	Arbeitspaket
CAD	Computer-Aided Design
CT	Computertomographie
CWT	Kontinuierliche Wavelet-Transformation (Continuous Wavelet Transform)
DL	Deep Learning
DoE	Design of Experiments (Statistische Versuchsplanung)
DWT	Discrete Wavelet Transform (Diskrete Wavelet-Transformation)
F-reg	F-Regression (univariate Merkmalsselektion)
FF	Forschungsfrage
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ICP	Iterative Closest Point
KMG	Koordinatenmessgerät
LR	Lineare Regression
MAE	Mean Absolute Error (Mittlerer absoluter Fehler)
MANOVA	Multivariate Analysis of Variance (Multivariate Varianzanalyse)
μ CMM	Micro Coordinate Measuring Machine (Mikro-Koordinatenmessgerät)
ML	Machine Learning (Maschinelles Lernen)
MSE	Mean Squared Error (Mittlerer quadratischer Fehler)
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
NVH	Noise, Vibration and Harshness (Geräusch, Vibration und Rauigkeit)
OTE	Overall Transmission Error (Wälzabweichungsfehler)
PCA	Principal Component Analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PQ	Predictive Quality
RANSAC	Random Sample Consensus
RF	Random Forest
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Squared Error (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
STFT	Short Time Fourier Transform (Kurzzeit-Fourier-Transformation)
STL	Stereolithography
SVR	Support Vector Regression

Abkürzung	Bedeutung
VIM	International Vocabulary of Metrology (Internationales Wörterbuch der Metrologie)
VM	Virtual Metrology

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
b	Bias / Achsenabschnitt	wie Y
b_{label}	Systematische Abweichung der Labelmessung	wie Y
b_{Zahn}	Zahnbreite / Flankenbreite	mm
c	Kreismittelpunkt (Pferchkreis)	mm
C	Kovarianzmatrix (PCA)	-
d	Teilkreisdurchmesser	mm
d_2	Bezugsdurchmesser des Kronenrades	mm
d_b	Grundkreisdurchmesser	mm
D	Downsampling-Faktor	-
D_a	Kopfkreisdurchmesser Schneidrad	mm
D_S	Einbauabstand: Abstand zwischen Rotationsachse des Stirnrades und Zahnkopfebene des Kronenrades	mm
e_i	Lokaler Bias der Vorhersage für Bauteil i	wie Y
E	Unterschnittsgrenze (Kronenrad)	-
E_0	KMG-Längenmessabweichung (Zeiss F25)	μm
$E(P)$	Optimierungskriterium (Registrierung)	mm
E	Eigenvektormatrix der Kovarianzmatrix (PCA)	-
f	Frequenz	Hz
$f(\cdot)$	Messmodell	-
$f_{\text{fwd}}(\cdot)$	Vorwärtsmodell (Prozess $\rightarrow$ Qualität)	-
$f_{\text{inv}}(\cdot)$	Inversmodell (Qualität $\rightarrow$ Prozess)	-
$f_{\text{ML}}(\cdot)$	ML-Modellfunktion	-
f_f	Formabweichung	μm
$f_{f\alpha}$	Profil-Formabweichung	μm
$f_{f\beta}$	Flankenlinien-Formabweichung	μm
f_H	Winkelkomponente der Abweichung	μm
$f_{H\alpha}$	Profil-Winkelabweichung	μm
$f_{H\beta}$	Flankenlinien-Winkelabweichung	μm
f_n	Axialvorschub (Wälzfräsen)	mm/U
f_p	Teilungs-Einzelabweichung	μm
F	Gesamtabweichung	μm
F_α	Profil-Gesamtabweichung	μm
F_β	Flankenlinien-Gesamtabweichung	μm
F_p	Teilungs-Gesamtabweichung	μm

Formelzeichen	Größe	Einheit
F_{pi}	Teilungs-Summenabweichung am Zahn i	μm
$F_{\gamma x}(\tau, \omega)$	Kurzzeit-Fourier-Transformierte	abhängig
h_{aP}	Zahnkopfhöhe am Bezugsprofil	mm
h_P	Gesamtzahnhöhe am Bezugsprofil	mm
H	Höhenlage des Kronenrades	-
k	Erweiterungsfaktor	-
ℓ_i	Regressionsgerade der i -ten Zahnflanke	-
l_t	Taumeldistanz	mm
L	Bogenlänge einer Werkzeugwicklung	mm
$L_{\alpha m}$	Regressionsbereich der Profilauswertung	mm
L_{β}	Regressionsbereich der Flankenlinienauswertung	mm
m	Modul (Stirnmodul)	mm
m_n	Normalmodul	mm
M	Anzahl der Stichproben	-
MSE	Mittlerer quadratischer Fehler	wie Y^2
n_2	Drehzahl des Werkstücks (Wälzfräsen)	min^{-1}
n_{HO}	Stichprobengröße des Holdout-Datensatzes	-
n_{perseg}	Segmentlänge (STFT)	-
n_{val}	Stichprobengröße des Validierungsdatensatzes	-
N	Anzahl der Simulationsschritte	-
N_z	Anzahl der Höhenebenen (Zahndickenauswertung)	-
p	Teilung	mm
p	Irrtumswahrscheinlichkeit (Statistik)	-
p_t	Transversale Teilung	mm
$\hat{p}_{\text{cov}}$	Empirische Überdeckungsrate	-
$\mathbf{p}$	Prozessparametervektor	-
$\mathbf{q}$	Qualitätsmerkmalsvektor	-
r	Kleiner Torusradius (Fräser)	mm
r_{aP}	Kopfrundungsradius am Bezugsprofil	mm
r_e	Exzentrizitätsradius	μm
$r_{e,0}$	Sollwert des Exzentrizitätsradius	μm
r_i	Residuum der Vorhersage für Bauteil i	wie Y
r_i	Regressionsresiduum /Flankenlinienauswertung)	(Profil- μm)
$\bar{r}$	Mittelwert der Residuen	wie Y
r_{nominal}	Nominale Werkzeugposition	mm

Formelzeichen	Größe	Einheit
r_{real}	Tatsächliche Werkzeugposition	mm
$\mathbf{r}(\phi)$	Bahnkurve eines Werkzeugpunkts	mm
R	Großer Torusradius (Fräser)	mm
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
R_{CV}^2	Bestimmtheitsmaß (Kreuzvalidierung)	-
R_{Test}^2	Bestimmtheitsmaß (Testdaten)	-
$\mathbf{R}(\phi)$	Rotationsmatrix des Taumels	-
$\mathbf{R}_x(\phi)$	Rotationsmatrix um die x -Achse	-
$\mathbf{R}_y(\alpha)$	Rotationsmatrix um die y -Achse	-
s_{Roh}	Rohsignal	abhängig
t	Zeit	s
t_{nom}	Nominale Zahndicke	μm
t_{act}	Tatsächliche Zahndicke	μm
u	Übersetzungsverhältnis	-
u_{epi}	Epistemische Unsicherheitskomponente	wie Y
$\hat{u}_{\text{epi}}^2$	Geschätzte epistemische Varianz	wie Y^2
u_{ges}	Gesamtunsicherheit	wie Y
u_{label}	Labelunsicherheit (Referenzunsicherheit)	wie Y
$u_{p,\text{KS}}$	Wiederholunsicherheit Körperschall	%
v_c	Schnittgeschwindigkeit (Wälzfräsen)	m/min
W	Geometrieparameter der Kronenradflanke	-
$\mathcal{W}_x(b, a)$	Wavelet-Transformierte	abhängig
x	Abstand der bildenden Geraden vom Grundkreis	-
$x_{\text{left}}(z_i)$	Flankenordinate der linken Flanke auf Höhenebene z_i	μm
$x_{\text{right}}(z_i)$	Flankenordinate der rechten Flanke auf Höhenebene z_i	μm
$x(t)$	Zeitsignal	abhängig
$\mathbf{x}$	Punkt im Werkzeugkoordinatensystem	mm
$\mathbf{x}'$	Transformierter Punkt nach Taumelbewegung	mm
X	Merkmalsmatrix	-
X_i	Eingangsgröße des Messmodells	abhängig
X_p	x -Koordinate der Kronenradflanke	mm
y	Schätzwert der Ergebnisgröße	wie Y
$\hat{y}$	Vorhergesagter Wert	wie Y
$\tilde{y}_i$	Bauteilspezifische Vorhersage	wie Y

Formelzeichen	Größe	Einheit
Y	Ergebnisgröße	wie Messgröße
Y_{ML}	ML-Modellvorhersage	wie Y
Y_p	y -Koordinate der Kronenradflanke	mm
z	Zähnezahl	-
z	Höhenkoordinate	mm
z_1	Zähnezahl Stirnrad	-
z_2	Zähnezahl Kronenrad	-
z_{stirn}	Zähnezahl des erzeugenden Stirnrads (Werkzeugmodellierung)	-
α	(Nenn-)Eingriffswinkel	rad
α	Signifikanzniveau (Statistik)	-
α_2	Laufender Eingriffswinkel des Kronenrades (durchmesserabhängig)	rad
α_N	Effektiver Eingriffswinkel des Kronenrades (mittlerer Wert)	rad
α_n	Normaleingriffswinkel	rad
α_P	Profilwinkel am Bezugsprofil	rad
α_t	Taumelwinkel	rad
γ^*	Fensterfunktion der STFT	-
δ	Teilkegelwinkel des Kronenrades	rad
Δr	Translatorischer Abweichungsvektor	mm
Δt	Zahndickenabweichung	μm
$\overline{\Delta t}(z_i)$	Über alle Zähne gemittelte Zahndickenabweichung auf Höhenebene z_i	μm
Δt_z	Mittlere Zahndickenabweichung über alle Höhenebenen	μm
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Translatorische Abweichungskomponenten	mm
$\widehat{\Delta x}$	Geschätzte tangentielle Werkzeugverschiebung	mm
Δx_{korr}	Tangentiale Korrekturgröße	mm
Δy	Vorhersageabweichung (Modellierung)	wie Y
$\widehat{\Delta z}$	Geschätzter axialer Werkzeugversatz	mm
$\Delta \phi_{\text{tool}}$	Inkrement des Werkzeugrotationswinkels	rad
$\Delta \theta_{\text{crown}}$	Inkrement des Werkstückrotationswinkels	rad
ε	Toleranzparameter	wie Y
ε_{epi}	Epistemischer Abweichungsterm	wie Y
$\varepsilon_{\text{label}}$	Labelabweichungsterm	wie Y

Formelzeichen	Größe	Einheit
ζ	Mittlerer Steigungswinkel des Werkzeugs	rad
η_b	Halber Grundlückenwinkel	rad
θ	Wälzwinkel (Eigenrotation Stirnrad)	rad
θ_{align}	Rotationsverschiebung (Teilungseinzelabweichung)	rad
θ_{ideal}	Ideale Rotationslage des i -ten Zahns	rad
λ	Eigenwert (PCA)	-
μ_d	Mittlerer Punktabstand (Registrierung)	mm
μ_{epi}	Erwartungswert der epistemischen Abweichung	wie Y
$\hat{\sigma}_r^2$	Empirische Residuenvarianz	wie Y^2
σ_d	Standardabweichung der Punktabstände (Registrierung)	mm
τ	Zeitverschiebung	s
ϕ	Werkzeugrotationswinkel	rad
$\Phi(x)$	Laufender Drehwinkel des Kronenrades	rad
φ	Torus-Umlaufwinkel	rad
$\varphi(x)$	Evolventenwinkel	rad
$\varphi'(x)$	Ableitung des Evolventenwinkels	-
$\psi(t)$	Mutter-Wavelet	-
ω	Kreisfrequenz	rad/s
$\mathcal{D}_{\text{HO}}$	Holdout-Datensatz	-
$\mathcal{D}_{\text{val}}$	Validierungsdatensatz	-

1 Einleitung

1.1 Motivation und Herausforderungen

Schlüsselfunktionen in medizintechnischen Produkten erfordern Fertigungsprozesse mit höchsten Genauigkeitsanforderungen. Mikroverzahnungen sind hierbei ein zentrales Element moderner Antriebstechnik und finden breite Anwendung in Medizinprodukten, der Mikrorobotik und der Feinmechanik (Goch et al. 2023, S. 741). Hersteller bewegen sich dabei in einem steten Spannungsfeld zwischen steigenden Qualitätsanforderungen und wirtschaftlichem Druck (Schmitt et al. 2023), wodurch der Qualitätssicherung eine entscheidende Rolle zukommt (Spath et al. 2001; Imkamp et al. 2016; Durakbasa et al. 2017).

Eine wirtschaftliche Fertigung ist insbesondere aufgrund geometrischer Toleranzen im einstelligen Mikrometerbereich herausfordernd (Wedmann et al. 2014). In diesen Größenordnungen stoßen etablierte Fertigungstechnologien und die konventionelle Qualitätssicherung an physikalische sowie normative Grenzen (Razali et al. 2013; Härtig et al. 2009b). Zudem sind klassische Messketten bei diesen Dimensionen oft zeitverzögert und technisch limitiert, beispielsweise durch minimal realisierbare Tastkugeldurchmesser für taktile Koordinatenmessgeräte (KMGs) von unter 0,3 mm (Schmitt et al. 2023, S. 292).

Besonders deutlich treten diese Limitationen bei Mikro-Kronenrädern hervor, wie sie etwa in dentalen Antriebssystemen zum Einsatz kommen. Diese erfordern Antriebsstränge, die Drehzahlen bis zu 200.000 U/min bei konstantem Drehmoment übertragen (VDI 2731 2009, S. 9). Da Formabweichungen bereits im niedrigen Mikrometerbereich funktional kritisch sind (VDI 2731 2009, S. 48), gleichzeitig aber eine ausgeprägte Normen- und Messtechniklücke besteht (Tao et al. 2023), steht die Praxis vor großen Herausforderungen. Das Fehlen geeigneter Werkzeuge zur Prozessüberwachung führt in der Konsequenz zu langen Regelungstotzeiten, hohen Ausschussraten und ungenutzten Optimierungspotenzialen (Gauder 2024).

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, gewinnen Ansätze der Virtual Metrology (VM) an Bedeutung. Hierbei werden qualitätsrelevante Produktmerkmale nicht physisch gemessen, sondern softwareseitig direkt aus verfügbaren Prozessdaten prädiziert (Chen et al. 2005; Chang et al. 2006). Virtual Metrology stellt dabei eine spezifische methodische Ausprägung innerhalb des übergeordneten Konzepts der Predictive Quality (PQ) dar, deren Ziel es ist, die Bauteilqualität bereits während der Fertigung datenbasiert vorherzusagen und abzusichern (Nalbach et al. 2018; Tercan et al. 2022). Dadurch können Informationen, die sonst erst zeitverzögert im Messraum vorlägen, unmittelbar für die Prozessregelung genutzt werden. Dies ermöglicht eine taktzeitneutrale 100%-Prüfung und kann Ausschuss signifikant reduzieren (Schmitt et al. 2020).

In einer Vorarbeit am wbk Institut für Produktionstechnik von Schiller et al. (2023) konnte gezeigt werden, dass Körperschallsignale im Wälzfräsprozess von Mikro-Stirnrädern stark mit funktionalen Geometriemerkmale korrelieren und somit ein hohes prädiktives Potenzial besitzen. Damit wurde experimentell belegt, dass in der Mikrozahnradfertigung qualitätsbestimmende Informationen bereits während des Prozesses vorliegen und mittels Körperschallsensorik erfasst werden können. Predictive-Quality-Ansätze eröffnen somit die Möglichkeit, Regelungstotzeiten zu verkürzen, sofern die prädiktive Modellgüte eine hinreichend zuverlässige Qualitätsaussage erlaubt.

Für „virtuelle Qualitätsaussagen“ gilt jedoch wie für klassische Messprozesse, dass deren Unsicherheit ein integraler Bestandteil der Bewertung ist. Die Quantifizierung metrologischer Unsicherheit ist gemäß GUM/VIM normativ verankert und Voraussetzung für eine belastbare Entscheidungsfindung (BIPM et al. 2008a; BIPM et al. 2012). Für datengetriebene Vorhersagemodelle stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da neben Messunsicherheiten auch Modell- und Prognoseunsicherheiten berücksichtigt werden müssen (Klås et al. 2018).

Ausgehend von diesen Herausforderungen stellt sich die Frage, inwieweit Körperschallsignale zur Qualitätsvorhersage von Mikro-Kronenrädern genutzt werden können. Während für Mikro-Stirnräder bereits erste prädiktive Befunde, wie z.B. von Gauder (2024), sowie – durch etablierte Normen und standardisierte Auswerteverfahren – eine gefestigte Basis für die Qualitätsregelung existieren, mangelt es bei Mikro-Kronenrädern an grundlegenden Mess- und Auswertestrategien sowie einem Verständnis für Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Fertigungsprozess, was die Anwendung datengetriebener Modelle zusätzlich erschwert.

1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, eine datengetriebene, *in-process* Qualitätsbewertung von Mikro-Kronenrädern im Wälzfräsprozess zu schaffen – wobei *in-process* die sensorische Datenerfassung während der laufenden Zerspanung bezeichnet (vgl. Unterabschnitt 2.3.2) – und deren Potenziale hinsichtlich Qualitätsregelung zu untersuchen. Im Zentrum steht dabei die Frage, inwiefern Informationen aus prozessintegrierten Körperschallsensoren genutzt werden können, um unsicherheitsqualifizierte Aussagen über geometrische Abweichungen des gefertigten Produktes treffen zu können.

Hierzu werden zunächst geometrische Qualitätsmerkmale und Bewertungsverfahren für Mikro-Kronenräder definiert sowie Mess- und Auswertestrategien erarbeitet, um eine objektive metrologische Beurteilung der Bauteile, orientiert an etablierten Stirnrad-Normen, zu ermöglichen. Anschließend werden Zusammenhänge zwischen Prozessabweichungen und resultierenden Zahngeometrien analysiert und geeignete datengetriebene Modellierungsansätze für die Qualitätsprädiktion entwickelt. Neben der Vorhersagegenauigkeit wird auch die

Unsicherheit der Prädiktion bewertet, um das Einsatzpotenzial solcher Modelle im Kontext eines verkürzten Regelkreises einschätzen zu können.

Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur methodischen und messtechnischen Grundlage einer virtuellen Qualitätsmessung in der Fertigung von Mikro-Kronenrädern und untersucht Grenzen des Ansatzes, insbesondere hinsichtlich der Unsicherheit und Genauigkeit.

1.3 Forschungshypothesen

Auf Grundlage der zuvor formulierten Problemstellung sowie der Zielsetzung dieser Arbeit werden die der Arbeit zugrunde liegenden Forschungshypothesen definiert. Diese Hypothesen leiten das methodische Vorgehen dieser Arbeit und werden im Verlauf überprüft.

H1 – Bewertungs- und Regelungsfähigkeit von geometrischen Abweichungen

Es lässt sich ein Bewertungsverfahren ableiten, das geometrische Qualitätsabweichungen von Mikro-Kronenrädern entsprechend etablierten Stirnradmetriken quantifiziert und damit den Aufbau eines maschinennahen Qualitätsregelkreises ermöglicht.

H2 – Vorhersagbarkeit von geometrischen Abweichungen aus Körperschall

Mikro-Kronenräder weisen im Körperschallsignal des Wälzfräsprozesses systematische Signaturen der entstehenden geometrischen Abweichungen auf, sodass ausgewählte geometrische Qualitätsmerkmale mittels überwachten Lernens zuverlässig vorhergesagt werden können und die Grenzen der Vorhersagbarkeit merkmalsabhängig identifizierbar sind.

H3 – Unsicherheitsqualifizierte Substitution von Labormesstechnik

Die Vorhersagequalität der geometrischen Abweichungen kann unter Berücksichtigung daten- und modellinduzierter Unsicherheitsbeiträge so quantifiziert werden, dass zumindest für ausgewählte Merkmale die Labormesstechnik zeitweise substituiert werden kann.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach einer einführenden Einordnung werden zunächst die notwendigen theoretischen und methodischen Grundlagen erläutert, bevor darauf aufbauend Analyse-, Modellierungs- und Regelungsaspekte systematisch zusammengeführt werden.

Kapitel 2 vermittelt die grundlegenden theoretischen Konzepte zu Verzahnungen, sensorischer Prozessüberwachung, dimensionaler Messtechnik sowie Methoden der Datenverarbeitung, die im Kontext von VM eingesetzt werden. In Kapitel 3 wird der Stand der Forschung

analysiert. Dabei werden bestehende Arbeiten zur geometrischen Bewertung von Kronenrädern, Ansätze zur körperschallbasierten Prozessüberwachung in der Zerspanung sowie Arbeiten zur geschlossenen Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung systematisch eingeordnet und das bestehende Forschungsdefizit hergeleitet. Aufbauend darauf wird in Kapitel 4 der eigene Lösungsansatz vorgestellt, der die Integration von Sensorik, Signalverarbeitung, datengetriebener Modellierung und Regelungstechnik zu einem ganzheitlichen Qualitätsregelungskonzept beschreibt.

Kapitel 5 widmet sich der Qualitätsbewertung von Mikro-Kronenrädern. Hier werden die entwickelten Methoden zur geometrischen Analyse und zur objektiven Bewertung der Verzahnungsqualität vorgestellt. In Kapitel 6 folgt eine simulationsgestützte Analyse des Fertigungsprozesses, welche zum Aufbau eines Verständnisses für Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Fertigungsprozess genutzt wird.

Die Datenverarbeitung und Modellentwicklung stehen im Fokus von Kapitel 7. Hier wird beschrieben, wie aus den prozessparallel bzw. *in-process* (Lanza et al. 2019) erfassten Sensordaten geeignete Merkmale extrahiert und Modelle zur Qualitätsprädiktion trainiert und validiert werden. Kapitel 8 behandelt die Unsicherheitsanalyse und adressiert sowohl die Messunsicherheit nach dem internationalen *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) als auch die Unsicherheit der datengetriebenen Vorhersagemodelle, um die Aussagekraft der Prädiktionen quantitativ bewerten zu können. In Kapitel 9 wird schließlich der Qualitätsregelkreis geschlossen, indem die Vorhersageergebnisse in eine adaptive Prozessregelung überführt werden.

Kapitel 10 diskutiert die erzielten Ergebnisse kritisch im Kontext des aktuellen Stands der Forschung und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten. Kapitel 11 schließt die Arbeit mit einer zusammenfassenden Darstellung der zentralen Ergebnisse ab.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel fasst die für die vorliegende Arbeit relevanten theoretischen und methodischen Grundlagen zusammen. Ziel ist die Einordnung der Konzepte, die der modellgestützten Qualitätsbewertung und -regelung von Mikro-Kronenrädern zugrunde liegen. In Abschnitt 2.1 werden grundlegende Aspekte der Verzahnungstechnik behandelt, mit Fokus auf die geometrische Beschreibung und Fertigung von Stirn- und Kronenrädern. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die physikalischen Grundlagen der prozessnahen Sensorik in der zerspanenden Fertigung erläutert, die die Datenbasis für die Qualitätsvorhersage bilden. Ergänzend werden in Abschnitt 2.3 messtechnische Grundlagen der Qualitätsbewertung vorgestellt. Der Abschnitt umfasst Qualitätsregelkreise, den Integrationsgrad der Messtechnik, optische und taktile Koordinatenmesstechnik sowie eine Einführung in *Predictive Quality*, *Virtual Metrology* und die Messunsicherheitsbewertung nach GUM. Abschließend werden in Abschnitt 2.4 grundlegende Methoden der Datenverarbeitung behandelt, insbesondere Zeitreihenanalyse, überwacht maschinelles Lernen und die Verarbeitung dreidimensionaler Geometriedaten.

2.1 Verzahnungen

Zahnradgetriebe sind zentrale Komponenten zur Übertragung von Leistung und Bewegung in einer Vielzahl technischer Systeme (Klocke et al. 2017, S. 10). Die Anforderungen an diese Getriebe hinsichtlich Leistungsdichte, Lebensdauer und Geräuschemission steigen stetig (Klocke et al. 2017, S. 282). Um einen ruhigen Lauf, eine winkelgetreue Übertragung der Drehbewegung und die geforderte Belastbarkeit sicherzustellen, müssen die geometrischen Bestimmungsgrößen der Verzahnungen präzise definiert und innerhalb enger Toleranzen gefertigt werden (Klocke et al. 2017, S. 282). Dieser Abschnitt legt daher das Fundament für das Verständnis der Verzahnungsgeometrie. Er führt die grundlegenden, normierten Begriffe und Parameter ein, erläutert die mathematischen Grundlagen der Zahnflankengeometrie und klassifiziert die grundlegenden Verzahnungstypen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Kronenräder betrachtet, die zur Gruppe der konischen Zahnräder zählen (Roth 2013, S. 305), die in einer gepaarten Konfiguration mit geradzahnten Stirnrädern eingesetzt werden. Entsprechend werden zunächst die geometrischen Grundlagen und wesentlichen Herstellungsverfahren evolventischer Stirnräder präsentiert. Diese bilden die Referenz, auf deren Basis das zugehörige, gepaarte Kronenrad im weiteren Verlauf der Arbeit geometrisch definiert und hinsichtlich seiner fertigungstechnischen Besonderheiten analysiert wird.

2.1.1 Grundbegriffe und grundlegende Verzahnungsgeometrien

Ein Zahnrad ist gemäß DIN 868 (1976, S. 3–4) ein um eine Achse drehbares Maschinenelement, das aus dem Radkörper und den aus diesem vorstehenden Zähnen besteht; die Gesamtheit der Zähne wird als Verzahnung bezeichnet. Diese Definition betont die funktionale Gestalt der Zähne als Träger für Kraft- und Bewegungsübertragung im Kontakt mit den Zähnen eines Gegenrades. In der Antriebstechnik realisieren Zahnräder durch wechselseitigen, formschlüssigen Eingriff eine gleichförmige Drehmomentübertragung (vgl. Linke et al. 2022). Die Zahnücken sind dabei jene Zwischenräume, in die die Zähne des Gegenrades beim Drehen eintauchen (DIN 868 1976, S. 3–4).

In der Profilansicht lassen sich zwei grundlegende Verzahnungsarten unterscheiden: die Zykloidenverzahnung und die Evolventenverzahnung. Während Zykloidenprofile historisch bedeutsam sind, hat sich die Evolventenverzahnung im industriellen Einsatz nahezu vollständig durchgesetzt (DIN 868 1976, S. 15). Ausschlaggebend hierfür sind insbesondere die einfache und präzise Herstellbarkeit mit einfachen, trapezförmigen Werkzeuggeometrien (DIN 868 1976), die geradlinige Eingriffslinie mit konstanter Zahnkrafttrichtung sowie die kinematische Unempfindlichkeit gegenüber Achsabstandsänderungen (vgl. Klocke et al. 2017, S. 17; DIN 868 1976, S. 15).

Die Bewegung evolventischer Verzahnungen wird über die Arbeitsflanken übertragen, während die gegenüberliegenden Rückflanken im jeweiligen Moment nicht lasttragend sind (DIN 868 1976, S. 13). Für Stirnradpaarungen mit parallelen Achsen (klassische Zylinderräder) ist die Bezugsfläche ein Kreiszylinder; Zahnstangen bilden den Grenzfall mit ebener Bezugsfläche (vgl. DIN 868 1976, S. 11).

Geometrie der Stirnradverzahnung Eine erste Gruppe zentraler, geometrischer Definitionen betrifft die Zahnflanke als jene Fläche zwischen Kopf- und Fußmantel (DIN 868 1976, S. 13). Ihre Schnitte mit Bezugs- oder Teilflächen bilden die Bezugsflanken- bzw. Teilflankenlinien, welche die Orientierung der Flanken im Raum festlegen (DIN 868 1976, S. 13). Schneidet man die Verzahnung mit einer nichtkoaxialen Ebene, entsteht das Verzahnungsprofil, das im Stirnschnitt als Stirnprofil und im Normalschnitt als Normalprofil bezeichnet wird (DIN 868 1976, S. 13). Abbildung 2.1 visualisiert diese Verhältnisse.

Ergänzend dazu definiert die DIN 3960 (1987) grundlegende Begriffe wie Teilung und Modul. Die Teilung ist der Bogen auf der Bezugsfläche zwischen gleichnamigen Flanken zweier benachbarter Zähne, während der Modul als Basisgröße der Verzahnungsabmessungen dient (DIN 868 1976, S. 3–4). Darüber hinaus werden charakteristische Durchmesser und

Bezugskreise wie Teilkreis d , Kopfkreis d_a oder Grundkreis d_b zur Beschreibung der Zahnradgeometrie herangezogen, die in der einschlägigen Literatur detailliert erläutert sind (Bender et al. 2020; Höhn 2020).

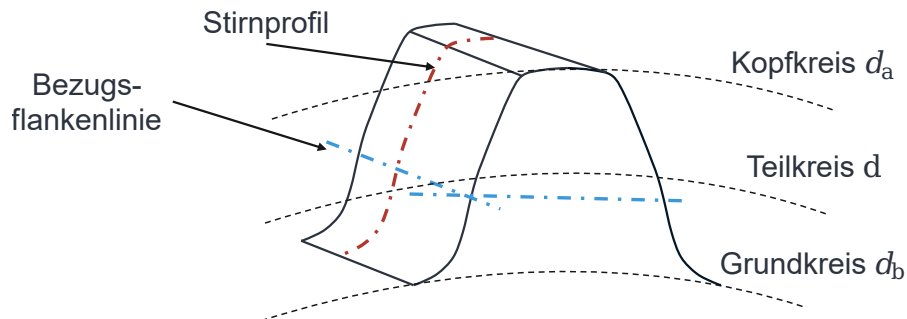


Abbildung 2.1: Visualisierung der grundlegenden Verzahnungsgrößen in Anlehnung an (DIN 868 1976, S. 14).

Auf dieser Profilbeschreibung bauen die zentralen Längenmaße auf. Die Zähnezahl z beschreibt die Anzahl der Zähne über dem gesamten Umfang; sie ist bei Außenrädern positiv und bei Innenrädern negativ definiert (Wittel et al. 2017, S. 710). Über Umfang und Teilung ergibt sich schließlich die klassische Beziehung zwischen Teilkreisdurchmesser d , Zähnezahl z und Modul m (DIN 3960 1987):

$$d = z m . \quad 2.1$$

Der Grundkreisdurchmesser d_b hängt über den (Nenn-)Eingriffswinkel α mit dem Teilkreis d zusammen (DIN 3960 1987):

$$d_b = d \cos \alpha = z m \cos \alpha . \quad 2.2$$

Der Modul m fungiert als Basisgröße für Längenmaße der Verzahnung; Zahnradpaare müssen gleichen Modul und gleiche Teilung besitzen, um korrekt abwälzen zu können (DIN 868 1976, S. 3–4). In der gängigen Darstellung ist der Modul als teilungsabhängige Größe definiert; er steht mit der Teilung p über die Kreiszahl π in Beziehung (DIN 3960 1987):

$$p = \pi m . \quad 2.3$$

Damit dienen m , p , z und die abgeleiteten Kreise (Kopf-, Teil-, Grundkreis) als zentrale Maß- und Bezugsgrößen (DIN 868 1976, S. 3–4).

Die Evolventenverzahnung Bei der Evolventenverzahnung entsteht das Stirnprofil als Kreisevolvente des Grundkreises (DIN 868 1976, S. 15). Die Profilverschiebung vereinfacht die Anpassung von Zähnezahlen, Zahnformen und Achsabständen bei gleichem Werkzeug (Höhn 2020), was die breite Anwendung der Evolvente im Maschinenbau erklärt.

Das Bezugsprofil ist normativ definiert (DIN 867 1986) und bildet die Grundlage für Stirnräder mit identischem Modul und Eingriffswinkel. Wichtige Bezugsmaße des Bezugsprofils sind Profilwinkel α_P , Teilung p bzw. Modul m , Zahnkopfhöhe h_{aP} und Gesamtzahnhöhe h_P . Für die Werkzeuggeometrie relevant ist insbesondere der Kopfrundungsradius r_{aP} (Klocke et al. 2017, S. 23). Normen wie DIN 3972 spezifizieren Bezugsprofile für Verzahnwerkzeuge und bieten Richtwerte für Höhen- und Spielmaße.

Zur Parametrierung der aus dem Bezugsprofil resultierenden, evolventischen Stirnradverzahnung sind folgende Größen zentral:

Tabelle 2.1: Zentrale Parameter zur Parametrierung einer evolventischen Stirnradverzahnung.

Parameter	Beschreibung
Zähnezahl z	Ganzzahliger Umfangszähler; bestimmt die Verzahnungsfineinheit und das Übersetzungsverhältnis (Wittel et al. 2017, S. 710).
Teilung p	Flankenbogenabstand der Evolventenflanken auf dem Teilkreis; normativ definiert als $p = \pi m$ (DIN 868 1976, S. 3–4).
Modul m	Basislängenmaß der Verzahnung; verknüpft mit Teilkreis- und Grundkreisgrößen gemäß 2.1–2.2 (Wittel et al. 2017, S. 710).
Profilwinkel α_P	Geometrischer Winkel des normierten Bezugsprofils, der die Flankenneigung der Evolvente im Zahnstangen- bzw. Werkzeugprofil beschreibt; normativ festgelegt und Grundlage für die Profilform bei Stirnrädern mit identischem Modul und Eingriffswinkel (DIN 867 1986).
Eingriffswinkel α	Winkel zwischen Eingriffslinie und Tangente am Teilkreis; beschreibt den tatsächlichen Kontakt- und Kraftübertragungswinkel im Zahneingriff und bestimmt die Lage des Grundkreises (DIN 868 1976, S. 15).

Fortsetzung von Tabelle 2.1

Parameter	Beschreibung
Profilverschiebung	Systematische Verschiebung der Profilbezugslinie zur Anpassung von Tragfähigkeit, Kontaktverhältnissen und Laufverhalten; erlaubt die Vermeidung von Unterschnitt und wird konstruktiv in Geometrie- und Werkzeugdefinition berücksichtigt (Klocke et al. 2017, S. 23,17).

Ergänzend sind normierte Beziehungen für Grundkreis-, Eingriffs- und Teilgrößen sowie – für die Berechnung der Zahndicken in beliebigen Schnitten – die tabellierte Evolventenfunktion $\text{inv } \alpha$ etabliert (Höhn 2020; Bender et al. 2020).

Zusammenfassend stellt die Evolventenverzahnung aufgrund ihrer linearen Eingriffslinie, der normativ klar definierten, einfachen Bezugsprofile nach DIN 867/868 sowie der robusten Maßketten (m, p, z, d, d_b) den industriellen Standard dar (DIN 868 1976; Klocke et al. 2017).

2.1.2 Herstellung von Zahnrädern

Die Herstellung von Verzahnungen umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsverfahren, deren Auswahl maßgeblich von Werkstoff, geforderter Genauigkeit, Stückzahl und Verzahnungsart abhängt (Klocke et al. 2017, S. 161). Für die spanende Verzahnungsfertigung ist insbesondere die Unterscheidung zwischen Profilverfahren, bei denen die Zahnücke direkt durch das Werkzeug abgebildet wird, und Wälzverfahren, bei denen die Zahnform durch eine gekoppelte Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück generiert wird, von Bedeutung (Klocke et al. 2017, S. 161).

Für Leistungsverzahnungen hat sich eine weitgehend standardisierte Prozesskette etabliert, beginnend mit der Rohteilherstellung (z. B. Stangenmaterial oder Schmiederohlinge), gefolgt vom Drehen und der Weichbearbeitung der Verzahnung. Zur Erzielung der erforderlichen Tragfähigkeit schließt sich in der Regel eine Wärmebehandlung an, die aufgrund von Härteverzug eine abschließende Hartfeinbearbeitung notwendig macht, um die geforderte geometrische Genauigkeit sicherzustellen (Klocke et al. 2017, S. 160).

In der Weichbearbeitung kommen verschiedene spanende Verfahren zum Einsatz, darunter Profilfräsen, Wälzfräsen, Wälzstoßen, Räumen und Wälzschälen, die jeweils spezifische Einsatzgrenzen hinsichtlich Flexibilität, Produktivität und Geometriezugänglichkeit aufweisen

(Klocke et al. 2017, S. 205,211). Für Leistungsverzahnungen zählt jedoch das Wälzfräsen zu den produktivsten industriellen Fertigungsverfahren (Klocke et al. 2017, S. 161).

Abbildung 2.2 zeigt schematisch die Eingriffsverhältnisse und die relevanten kinematischen Größen des Wälzfräsprozesses.

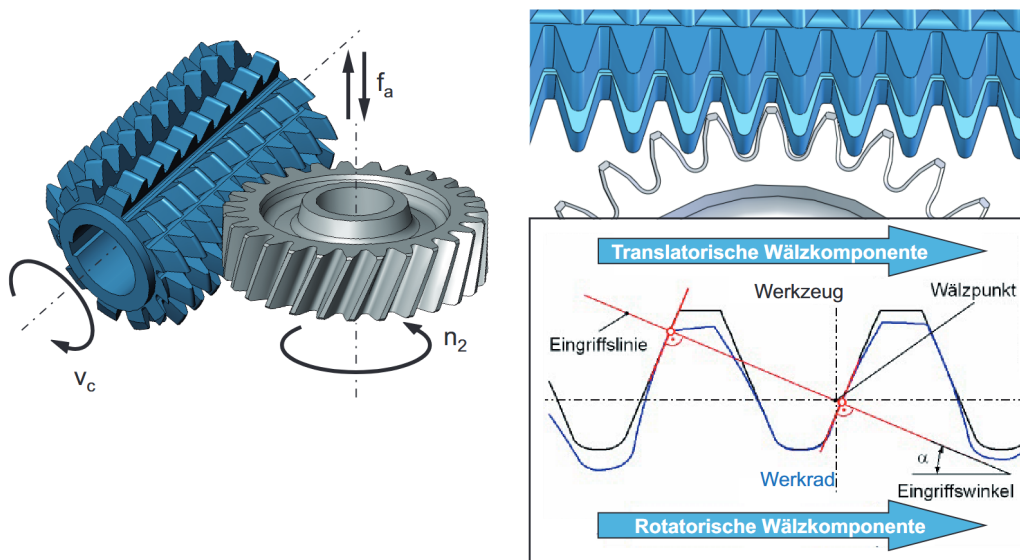


Abbildung 2.2: Prinzipdarstellung des Wälzfräsens mit den relevanten kinematischen Größen nach Klocke et al. (2017, S. 187).

Das Wälzfräsen zeichnet sich durch eine hohe Produktivität, große geometrische Flexibilität und eine kontinuierliche Spanbildung aus und ist daher das Standardverfahren für die Vorverzahnung von außenverzahnten Stirnrädern (Klocke et al. 2017, S. 185). Das Verfahrensprinzip basiert auf einem kontinuierlichen Wälzprozess, bei dem Werkzeug und Werkstück ein kinematisches Getriebe bilden, das einer Schnecke und einem Schneckenrad entspricht. Die Rotationsbewegung des Wälzfräses mit der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie die Drehbewegung des Werkstücks mit der Drehzahl n_2 sind dabei über das Zähnezahlverhältnis synchronisiert (Klocke et al. 2017, S. 159).

Die evolventische Zahnflanke entsteht beim Wälzfräsen durch einen Hüllschnitt, wobei das Bezugsprofil des Werkzeugs einer Zahnstange entspricht, die sich mit der Vorschubbewegung f_n translatorisch relativ zum rotierenden Werkstück bewegt (siehe Abbildung 2.2) (Klocke et al. 2017, S. 186). Ein zentraler Einstellparameter ist der Schwenkwinkel des Wälzfräses, der sich aus dem Schrägungswinkel des Werkstücks und dem Steigungswinkel des Werkzeugs ergibt (Klocke et al. 2017, S. 187).

Auch im Mikrobereich, wie er insbesondere für Dentalinstrumente relevant ist, stellt das Wälzfräsen ein etabliertes und leistungsfähiges Fertigungsverfahren dar. Module bis zu 50 μm

können realisiert werden, wobei die hohe Teilungsgenauigkeit maßgeblich durch die präzise Wälzkopplung zwischen Werkzeug- und Werkstückrotation bestimmt wird (VDI 2731 2009, S. 26). Die hohe Flexibilität hinsichtlich Zähnezahl, Schrägungswinkel und Profilverschiebung macht das Wälzfräsen auch für kleine und mittlere Serien im Mikrobereich zum bevorzugten Vorverzahnungsverfahren.

2.1.3 Qualitätsmerkmale und Verzahnungsabweichungen

Die Qualitätssicherung in der Verzahnungsfertigung ist entscheidend, um die Leistungsfähigkeit von Getrieben sicherzustellen, da geometrische Abweichungen einen wesentlichen Einfluss auf Lebensdauer, Geräuschverhalten und Wirkungsgrad haben (Klocke et al. 2017, S. 282). In der Verzahnungsmesstechnik wird grundsätzlich zwischen der *geometrieorientierten Prüfung* (Einzelfehlermessung) und der *funktionsorientierten Prüfung* (Sammelfehlermessung) unterschieden (VDI/VDE 2612 Blatt 1 2024, S. 3). Erstere zielt auf die analytische Erfassung individueller geometrischer Abweichungen ab, während letztere das Zusammenwirken der Verzahnung mit einem Gegenrad beurteilt (Klocke et al. 2017, S. 298).

Geometrieorientierte Merkmale Zu den relevanten geometrischen Einzelabweichungen zählen insbesondere Profillinienabweichungen, Flankenlinienabweichungen sowie Teilungs- und Rundlaufabweichungen (Klocke et al. 2017, S. 283). Diese vier Abweichungsdimensionen sind maßgeblich für das Übertragungsverhalten und bilden traditionell den Kern eines Verzahnungsprüfprotokolls (VDI/VDE 2612 Blatt 1 2024, S. 11). Abbildung 2.3 visualisiert diese Abweichungen exemplarisch für eine Stirnradverzahnung.

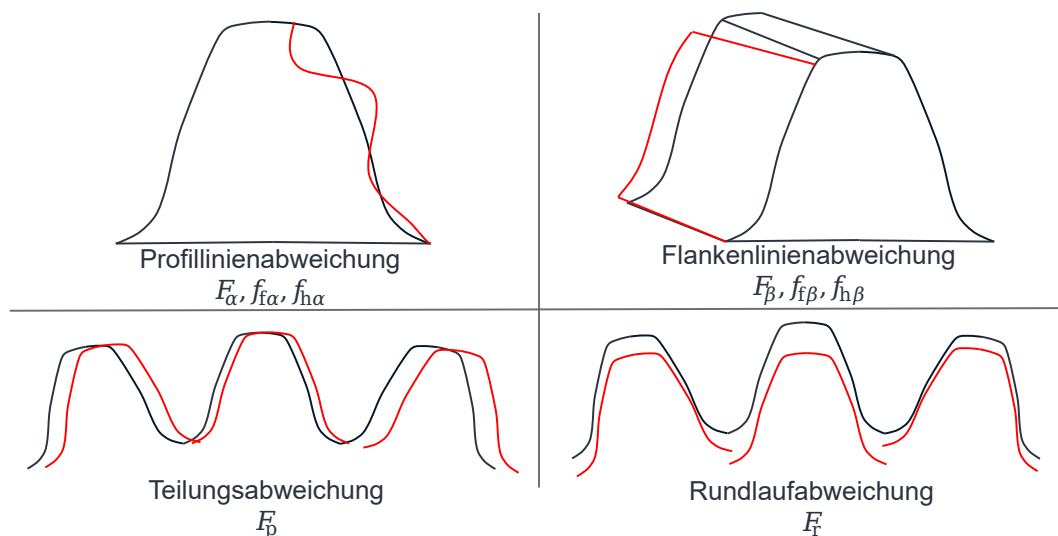


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Profil-, Flankenlinien-, Teilungs- und Rundlaufabweichungen bei Stirnradverzahnungen in Anlehnung an (Klocke et al. 2017) und (WENZEL Präzision GmbH 2024).

Teilungs- und Rundlaufmessungen ergänzen die Varianten des Soll-Ist-Vergleichs, um insbesondere langwellige Fehler infolge Werkstückaufspannung oder Maschinenkinematik zu erfassen (Klocke et al. 2017, S. 288). Die Tolerierung erfolgt klassisch über Qualitätsstufen (DIN 3961/3962), wobei die schlechteste Einzelqualität die Gesamtqualität der Verzahnung bestimmt (Bender et al. 2020). Im Mikrobereich steigen die relativen Messunsicherheiten erheblich an, da geeignete Normale fehlen und taktile Abtastsysteme an ihre Grenzen stoßen (Härtig et al. 2009b, S. 13).

Normative Auswertung nach VDI 2612 und DIN ISO 1328 Für die analytische Prüfung hat sich die normative Zerlegung der Abweichungen in die drei Fehlerarten *Profil*, *Flankenlinie* und *Teilung* etabliert. Grundlage ist jeweils ein rechnerischer Soll-Ist-Abgleich mit der idealen Evolvente (Schmitt et al. 2023, S. 292).

Nach VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024) werden Profil- und Flankenlinienfehler in *Gesamtabweichung* F , *Winkelkomponente* f_H und *Formkomponente* f_f zerlegt. Für die Profilabweichung erfolgt die Bestimmung der Winkelkomponente $f_{H\alpha}$ über eine lineare Regression im Regressionsbereich $L_{\alpha m}$; die Gesamtabweichung F_α entspricht dem maximalen Abstand zur angepassten Soll-Evolvente, während $f_{f\alpha}$ die residuale Welligkeit beschreibt. Analog wird die Flankenlinie über die Zahnbreite b_{Zahn} im Regressionsbereich L_β ausgewertet; F_β , $f_{H\beta}$ und $f_{f\beta}$ kennzeichnen hierbei systematische Schrägungsfehler und Formfehler der Flanke.

Teilungsabweichungen werden nach DIN ISO 1328-1 beschrieben. Die Einzelabweichung f_p adressiert lokale Fehler der Zahnverteilung, wohingegen die Gesamtabweichung F_p systematische Umfangsfehler über das gesamte Rad charakterisiert.

Funktionsorientierte Merkmale Im Gegensatz zur isolierten Bewertung einzelner geometrischer Abweichungen aggregiert die funktionsorientierte Prüfung sämtliche Einzelfehler zu einem resultierenden Summenfehler, der eine direkte Beurteilung des funktionalen Laufverhaltens ermöglicht. Typische funktionsorientierte Kenngrößen sind dabei beispielsweise Geräusch-, Schwingungs- oder Drehwinkelfehler (Klocke et al. 2017, S. 298).

Dieses Vorgehen ist insbesondere für geräuschsensible Anwendungen mit hohen Komfortanforderungen relevant, die unter dem Begriff *Noise, Vibration and Harshness* (NVH) zusammengefasst werden. NVH beschreibt die Gesamtheit hörbarer, fühlbarer und spürbarer Schwingungserscheinungen eines technischen Systems und umfasst sowohl luftschallbasierte Geräusche als auch körperschallinduzierte Vibrationen sowie deren taktile Wahrnehmung. Neben den physikalischen Schwingungsgrößen berücksichtigt das NVH-Konzept zudem

deren subjektive Bewertung durch den Menschen, beispielsweise im Hinblick auf Komfort, Störwirkung oder emotionale Wahrnehmung (Tschöke et al. 2019, S. 304,305).

2.1.4 Mikroverzahnungen

Im Folgenden wird der Begriff der Mikroverzahnung definiert und in den Kontext der aktuellen Normung eingeordnet. Zudem werden die spezifischen Herausforderungen für Fertigung und Qualitätssicherung betrachtet, die sich infolge der Miniaturisierung deutlich von denen der Makroverzahnung unterscheiden. Mikroverzahnungen sind insbesondere in der Medizin- und Feinwerktechnik sowie Robotik unverzichtbar, da sie bei steigender Funktionalität eine Reduktion von Volumen und Gewicht ermöglichen (Härtig et al. 2009b, S. 1).

In Literatur und Normung existieren unterschiedliche Abgrenzungen. Härtig et al. (2009b, S. 1) definieren Mikroverzahnungen primär über den Modulbereich und ordnen Verzahnungen mit Stirnmodulen zwischen $1\text{ }\mu\text{m}$ und 1 mm diesem Bereich zu. Die Richtlinie VDI 2731 verfolgt einen weitergehenden Ansatz und definiert Mikroverzahnungen über das gleichzeitige Vorliegen von mindestens zwei der folgenden Merkmale:

- charakteristisches Außenmaß (z. B. Durchmesser oder Kantenlänge) $< 20\text{ mm}$,
- Modul $< 200\text{ }\mu\text{m}$,
- Strukturdetails $< 100\text{ }\mu\text{m}$ (VDI 2731 2009, S. 6).

Diese Definition verdeutlicht, dass neben der Bauteilgröße insbesondere die Feinheit der geometrischen Strukturen maßgebend ist.

Die Fertigung von Mikroverzahnungen ist durch eine enge Kopplung von Konstruktion, Verfahren und Werkstoffwahl gekennzeichnet (VDI 2731 2009, S. 13). Eine lineare Skalierung etablierter Toleranzkonzepte ist nicht möglich, da empirische Konstanten klassischer Normen bei Modulen unterhalb von $m = 0,1\text{ mm}$ zu technisch nicht sinnvollen Abweichungen führen würden (VDI 2731 2009, S. 13). Zusätzlich erschweren Handhabung, Aufspannung und Reinigung der filigranen Bauteile den Fertigungsprozess. Aufgrund funktionsrelevanter Strukturen im Bereich von Staubpartikelgrößen sind Fertigung und Montage häufig an Reinraumbedingungen gebunden (VDI 2731 2009, S. 12).

Besonders herausfordernd ist die Qualitätssicherung. Wie Härtig et al. (2009b, S. 1) zeigen, besteht ein grundlegendes Spannungsfeld zwischen hohen Präzisionsanforderungen und der fehlenden Verfügbarkeit rückführbarer Messnormale in diesem Größenbereich. Taktile Mikro-Koordinatenmessgeräte gelten zwar als Referenz für evolventische Profile, stoßen jedoch an physikalische Grenzen:

- Konventionelle Zahnradmesszentren erfassen Profile meist erst ab $m \geq 0,2 \text{ mm}$.
- Kleinere Module erfordern spezielle Fasertaster mit Tastkugeldurchmessern von etwa $25 \mu\text{m}$ (VDI 2731 2009, S. 48).
- Die präzise Ausrichtung ist aufgrund fehlender Drehtische für Mikrosysteme häufig problematisch (Härtig et al. 2009b, S. 55).

Optische Messsysteme und die Computertomographie bieten zwar Vorteile hinsichtlich Messpunktdichte und der Erfassung komplexer Geometrien, es fehlen jedoch validierte Auswerteverfahren und belastbare Referenzdaten zur Vergleichbarkeit mit taktilen Messungen (Härtig et al. 2009b, S. 55). In der industriellen Praxis werden Qualitätskriterien daher häufig anwendungsspezifisch festgelegt, etwa durch den Vergleich mit Soll-Konturen im Profilprojektor, anstatt auf allgemein gültige Normen zurückzugreifen (VDI 2731 2009, S. 13).

2.1.5 Kronenräder

Das Kronenrad, in früherer Literatur auch als Planrad bezeichnet, kann geometrisch als ein Kegelrad mit einem Teilkegelwinkel von $\delta = 90^\circ$ definiert werden (Roth 2013, S. 317). Es steht somit am Übergang von der konischen Außenverzahnung zur konischen Innenverzahnung und nimmt eine geometrische Sonderstellung ein, die von klassischen Kegelradnormen nicht berücksichtigt wird. In der modernen Getriebelehre werden Kronenräder auch als Extremfall von Beveloidverzahnungen betrachtet, bei denen die Verzahnungsgeometrie für gekreuzte oder sich schneidende Achsen ausgelegt ist (Roth 2013, S. 305).

Ein wesentliches kinematisches Merkmal der Kronenradpaarung ist, dass das kämmende Ritzel üblicherweise als zylindrisches Stirnrad (gerad- oder schrägverzahnt) ausgeführt ist. Dies resultiert in einem entscheidenden konstruktiven Vorteil: Das Ritzel besitzt eine axiale Freiheit. Änderungen der axialen Position des Ritzels haben keinen Einfluss auf die theoretische Übersetzung oder den Eingriff, solange eine ausreichende Überdeckung gewährleistet ist (Roth 2013, S. 317). Dies eliminiert die Notwendigkeit einer präzisen Einstellung des Tragbildes bei der Montage, wie sie bei Kegelradsätzen zwingend erforderlich ist, und macht das System robuster gegenüber Gehäusedeformationen (Kissling et al. 2012, S. 1).

Die Geometrie der Zahnflanke eines Kronenrades ist komplexer als die einer Evolventenverzahnung am Stirnrad. Während das Ritzel eine konstante Profilform über die Breite aufweist, ändert sich der Eingriffswinkel α_2 am Kronenrad kontinuierlich über den laufenden Durchmesser d_2 . Für ein geradverzahntes Kronenrad gilt nach Kissling et al. (2012, S. 2) der Zusammenhang $d \cdot \cos \alpha = \text{const.}$. Genauer gilt:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d_2}{m_n \cdot z_2 \cdot \cos(\alpha_n)} \right) \quad 2.4$$

Dabei bezeichnen:

- d_2 den Bezugsdurchmesser des Kronenrades,
- m_n den Normalmodul des korrespondierenden Stirnrades,
- z_2 die Zähnezahl des Kronenrades,
- α_n den Normaleingriffswinkel des Stirnrades.

Der resultierende Winkel α_2 beschreibt den laufenden Eingriffswinkel des Kronenradprofils am Durchmesser d_2 .

Die Gleichung zeigt, dass sich der lokale Eingriffswinkel α_2 aus dem Verhältnis des aktuellen Wirkdurchmessers d_2 zur geometrischen Grundgröße $m_n \cdot z_2 \cdot \cos(\alpha_n)$ ergibt. Mit abnehmendem Wirkdurchmesser d_2 in Richtung Zahnfuß nimmt folglich der Eingriffswinkel α_2 kontinuierlich ab (Kissling et al. 2012, S. 2).

Daraus folgt, dass der Eingriffswinkel von außen nach innen abnimmt. Dies führt zu geometrischen Restriktionen, die die nutzbare Zahnbreite begrenzen (siehe Abbildung 2.4 links). Dabei treten drei wesentliche Begrenzungen auf:

1. **Unterschnittsgrenze (Innen):** Am inneren Radius wird der Eingriffswinkel sehr klein, was zu steilen Flanken und schließlich zu Unterschnitt führt, der die Zahnwurzel schwächt (Kissling et al. 2012, S. 2).
2. **Zuspitzungsgrenze (Außen):** Mit zunehmendem Radius wächst der Eingriffswinkel, wodurch die Kopfdicke des Zahnes abnimmt, bis der Zahn „zugespitzt“ ist (auch bezeichnet als Tooth Pointing) (Roth 2013, S. 332).
3. **Interferenzgrenze:** Es kann zu einer Kollision zwischen dem Kopfbereich des Ritzels und dem Fußbereich des Kronenrades kommen, wenn die geometrischen Verhältnisse (z. B. Zähnezahlverhältnis) ungünstig gewählt sind (Roth 2013, S. 334).

Die Herstellung von Kronenrädern erfolgt klassisch durch Wälzstoßen oder Wälzfräsen, wobei das Schneidwerkzeug die Hüllkontur des späteren Gegenrades abbildet (siehe Abbildung 2.4 links) (Höhn 2020, S. 418).

Der Prozess ähnelt dabei der theoretischen Erzeugung der Kronenradgeometrie: Das Schneidrad wälzt auf dem Werkstück ab, wie es später das Ritzel im Getriebe tut (Roth 2013, S. 318).

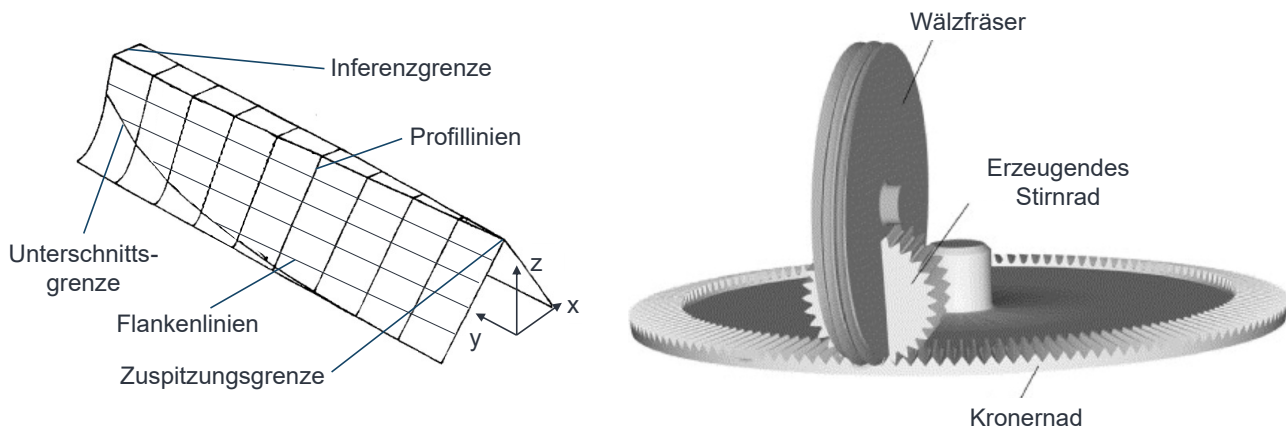


Abbildung 2.4: links: Geometrie des resultierenden Zahnes mit den beschriebenen geometrischen Grenzen, Darstellung basierend auf (Litvin et al. 1992), rechts: Fertigung von Kronenrädern mittels Wälzfräsen (Litvin et al. 2002).

In der modernen Fertigung, insbesondere bei gehärteten Hochleistungsgetrieben, kommen auch Wälzschleifverfahren zum Einsatz, wobei die komplexe Geometrie hohe Anforderungen an die Maschinenkinematik stellt (Kissling et al. 2012, S. 1). Hinsichtlich der Qualitätsbewertung existiert für Kronenräder – im Gegensatz zu zylindrischen Rädern – keine umfassende Normierung analog zur DIN 3962 oder ISO 1328.

2.1.6 Zwischenfazit

Dieser Abschnitt hat die geometrischen und messtechnischen Grundlagen der Verzahnungstechnik mit Bezug auf Mikrozahl- und Kronenräder dargestellt und damit die wesentlichen Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit definiert. Dabei wurde deutlich, dass sich die Herausforderungen für Mikroverzahnungen und Kronenräder nochmals voneinander unterscheiden: Mikro-Zahnräder stoßen an die mechanischen und optischen Grenzen etablierter Messverfahren, insbesondere bei Modulen $m < 0,2$ mm, während bei Kronenrädern zusätzlich die fehlende normative Grundlage – insbesondere im Vergleich zur DIN 3962 für Stirnräder – zu erheblichen Unsicherheiten in der Qualitätsbewertung führt.

Für Mikro-Kronenräder kumulieren diese beiden Problemfelder: Einerseits sind die geometrischen Strukturen so klein, dass sowohl die Fertigung als auch die Messtechnik an physikalische und systemtechnische Grenzen geraten; andererseits existieren keine etablierten, funktionsorientierten Qualitätsmerkmale, die für diese Sonderverzahnung hinreichend definiert wären. Diese doppelte Herausforderung – Mikrostruktur und Sondergeometrie – markiert den zentralen Ausgangspunkt der weiteren Arbeit.

2.2 Prozessüberwachung in der Zerspanung

Im Folgenden werden die Grundlagen der Prozessüberwachung in der Zerspanung erläutert, um die Relevanz der sensorischen Datenerfassung für die Qualitätsvorhersage einzuordnen. Dabei liegt der Fokus auf der Notwendigkeit der Überwachung, den verfügbaren Messgrößen und insbesondere der Eignung von Schallemissionen für die Überwachung von hochpräzisen Fertigungsprozessen.

2.2.1 Sensorik zur Prozessüberwachung in der Zerspanung

Steigende Qualitätsanforderungen sowie ein hoher Zeit- und Kostendruck erfordern in der modernen Fertigung eine zunehmende Prozesssicherheit (Klocke 2018). Wie Klocke (2018, S. 422) darlegt, wird dies durch die wachsende Komplexität von Bauteilen und Prozessen erschwert. Trotz technologischer Optimierungen lassen sich in der Serienfertigung fehlerhafte Teile aufgrund periodischer und stochastischer Störgrößen – wie etwa Schwankungen im Werkstückaufmaß oder variierende Schleifscheibeneigenschaften – nicht vollständig vermeiden. Da nachträgliche, stichprobenartige Überprüfungen des Arbeitsergebnisses zeitaufwendig und nur bedingt zuverlässig sind, besteht ein Bedarf an Sensoren und Überwachungssystemen, die eine präventive Qualitätssicherung ermöglichen. (Klocke 2018, S. 422)

Zur Überwachung des Zerspanprozesses können verschiedene physikalische Größen, wie bspw. Kräfte, Ströme, Bewegungen oder akustische Emission genutzt werden (Klocke 2018, S. 422). Ein gängiger Ansatz ist die Messung der Zerspankraft oder der Stromaufnahme des Spindelantriebs. Während piezoelektrische Kraftsensoren zwar präzise, aber teuer und schwer in den Kraftfluss integrierbar sind (Klocke 2018, S. 423), reagieren Stromsensoren (Wirkleistungsmessung) aufgrund der Trägheitsmomente von Spindel und Antrieb oft nicht sensitiv genug auf kleine Prozessveränderungen wie den Beginn von Schleifscheibenverschleiß (Klocke 2018, S. 425).

2.2.2 Körperschallerfassung zur Prozessüberwachung

Eine leistungsfähige Alternative stellt die Erfassung und Auswertung von Schwingungen und Schallemissionen (Acoustic Emission, AE) dar. Akustisch wird grundsätzlich zwischen Luftschall (Ausbreitung in Gasen) und Körperschall (Ausbreitung in Festkörpern) unterschieden (Hanselka et al. 2020, S. 879). In der Zerspanung ist insbesondere die Körperschallanregung relevant, die durch lokale Kraftspitzen beim Eingriff der Schneiden entsteht (Sinambari 2017, S. 102). Klocke (2018, S. 422) hebt hervor, dass die Messung des AE-Signals im Gegensatz zur Kraftmessung keinem Temperaturdrift unterliegt und extrem sensibel auf Prozessänderungen

reagiert. Die Erfassung erfolgt üblicherweise über piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer, die eine elektrische Ladung proportional zur Schwingbeschleunigung erzeugen (Sinambari 2017, S. 122).

Da das rohe AE-Signal hochfrequent und stochastisch ist, muss es für die Prozessüberwachung konditioniert werden. Hierzu wird häufig eine Amplitudendemodulation durchgeführt, beispielsweise durch die Bildung des Effektivwertes (U_{RMS}) in einem definierten Frequenzband, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern (Klocke 2018, S. 427). Diese Signalverarbeitung ermöglicht nach Klocke (2018, S. 432) vielfältige Anwendungen:

- **Kollisionsüberwachung:** Detektion rapider Signalanstiege bei ungewolltem Kontakt.
- **Abrichtüberwachung:** Kontrolle der realen Zustellung und Identifikation von Abrichtfehlern.
- **Standzeitüberwachung:** Korrelation des AE-Effektivwertes mit dem Werkzeugverschleiß und der resultierenden Werkstückrauheit.

2.2.3 Zwischenfazit

Die Prozessüberwachung in der Zerspanung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine präventive und prozessnahe Qualitätssicherung. Insbesondere Körperschallsignale eignen sich aufgrund ihrer hohen Sensitivität zur Abbildung dynamischer Vorgänge in der Eingriffszone und ermöglichen die frühzeitige Detektion von Prozessabweichungen. Erst durch eine gezielte Signalanalyse und Merkmalsextraktion lassen sich aus den hochfrequenten Rohsignalen robuste Prozesskennwerte ableiten, die als Grundlage für datengetriebene Zustands- und Qualitätsvorhersagen dienen.

2.3 Qualitätsregelung und Messtechnik

Dieser Abschnitt erläutert die fachlichen Grundlagen zur Qualitätsregelung und der dazu erforderlichen Messtechnik im Kontext moderner datenbasierter Qualitätssicherung. Neben klassischen Qualitätsregelkreisen werden dabei insbesondere Konzepte der Predictive Quality und der Virtual Metrology als Enabler prozessnaher, prädiktiver Qualitätsregelung berücksichtigt.

Zunächst wird der Qualitätsregelkreis als Ordnungsrahmen eingeführt und die Rolle der Messtechnik als sensorischer Bestandteil sowohl für konventionelle als auch für prädiktive Regelstrategien erläutert. Im Anschluss wird der Integrationsgrad der Messtechnik in der Fertigung diskutiert sowie die für diese Arbeit relevanten Messsysteme – optische und

taktile Koordinatenmesstechnik – dargestellt. Abschließend werden Grundlagen der Messunsicherheit nach GUM behandelt, die für die Bewertung der Messsysteme und die spätere Modellierung der Unsicherheitsfortpflanzung in datengetriebenen Qualitätsmodellen von zentraler Bedeutung sind.

2.3.1 Qualitätsregelkreise

Die Qualitätssicherung stellt ein essentielles Element moderner Produktionssysteme dar, um eine zuverlässige und effiziente Fertigung zu gewährleisten. Ihre Aufgabe beschränkt sich dabei nicht auf die reine Qualitätsprüfung und Dokumentation, sondern umfasst maßgeblich die Rückführung von Informationen an die Produktionssteuerung (Imkamp et al. 2012; Schmitt et al. 2008). Methodisch wird dieser Rückkopplungsmechanismus durch Qualitätsregelkreise realisiert.

Nach Lanza et al. (2019) setzen sich Qualitätsregelkreise (vgl. Abbildung 2.5) im Wesentlichen aus zwei Funktionsbereichen zusammen: der Messtechnik sowie qualitätsmanagementspezifischen Maßnahmen.

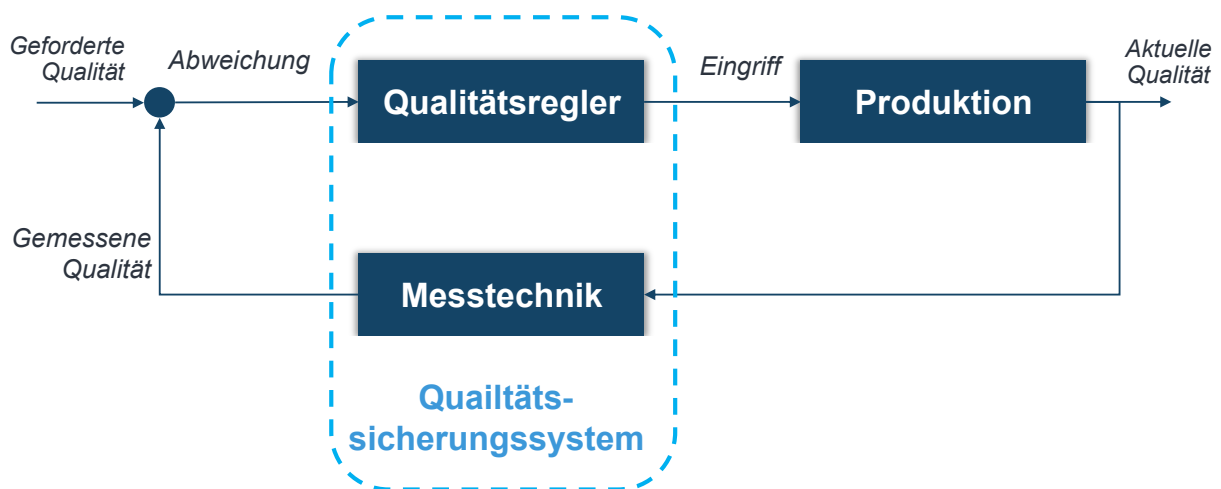


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Qualitätsregelkreises mit seinen zentralen Funktionsbereichen (Messtechnik, Qualitätsregler und Fertigung) (Lanza et al. 2019, S. 400).

Die Messtechnik dient der Erfassung der aktuellen Fertigungsqualität, indem sie mittels Sensorik und softwarebasierter Analysen Abweichungen zwischen Soll-Vorgaben und Ist-Qualität detektiert. Die daraus resultierenden Qualitätsabweichungen bilden die Eingangsgröße für die anschließende Bewertung im Qualitätsmanagement. Ziel ist es, daraus Handlungsanweisungen zur Prozessverbesserung abzuleiten und diese in die Produktion zurückzuführen. Erst durch diese prozessnahe Rückkopplung schließt sich der Regelkreis und stellt eine konsistente Produktqualität sicher (Lanza et al. 2019; Schmitt et al. 2023).

Ein zentraler Erfolgsfaktor ist hierbei der Informationsfluss (schematisch visualisiert in Abbildung 2.5). Ein kontinuierlicher Austausch über Abweichungen, welche mittels Mess- und Auswertetechniken ermittelt werden, ermöglicht es dem Qualitätsmanagement bzw. einem technischen Qualitätsregler, zeitnah Feedback und Instruktionen an die Produktion zu übermitteln. Dies führt unmittelbar zur Frage nach der zeitlichen und räumlichen Einbindung der Messtechnik in den Produktionsprozess – ein Aspekt, der in Abschnitt 2.3.2 vertieft wird.

2.3.2 Integrationsgrad der Messtechnik

Der Integrationsgrad der Messtechnik beschreibt im Kontext der Qualitätsregelung die räumliche und zeitliche Einbettung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in den Fertigungsprozess und beeinflusst Reaktionsgeschwindigkeit und Regelgüte maßgeblich (Schmitt et al. 2008). Steigende Qualitätsanforderungen sowie Zeit- und Kostendruck führen zunehmend weg von stichprobenartigen Ex-post-Prüfungen hin zu präventiven, prozessnahen Qualitätssicherungsstrategien (Klocke 2018, S. 422).

Systematisch lässt sich Messtechnik, wie bereits zuvor erwähnt, nach dem Integrationsgrad in Off-Shopfloor- und On-Shopfloor-Konzepte einteilen; innerhalb der fertigungsnahen Messtechnik wird weiter zwischen off-line (separate Messstation im Shopfloor) und in-line (in die Produktionslinie integriert) unterschieden (Lanza et al. 2019, S. 402). Für die prozessnahe Qualitätsregelung von Mikro-Kronenrädern ist insbesondere die On-Machine-Messtechnik relevant, da sie direkt im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine stattfindet.

Wie in Abbildung 2.6 dargestellt, wird On-Machine-Messtechnik häufig in Off-process- und In-process-Strategien gegliedert, die den zeitlichen Bezug zum Zerspanungsprozess definieren (Lanza et al. 2019, S. 402).

1. **Off-process-Messung:** Die Messung findet innerhalb der Maschine, jedoch zeitlich getrennt vom Eingriff statt (z. B. zwischen zwei Bearbeitungsschritten), während das Werkstück weiterhin aufgespannt bleibt (Lanza et al. 2019, S. 404). Dies reduziert umspannbedingte Einflüsse und erlaubt automatisierte Korrekturschleifen, etwa zur Kompensation von Werkzeugverschleiß oder thermischer Drift (Schmitt et al. 2023, S. 650).
2. **In-process-Messung:** Die Datenerfassung erfolgt während der Bearbeitung, typischerweise über Prozessgrößen wie Zerspankräfte, Motorströme oder Körperschall (Klocke 2018, S. 422). Dadurch wird eine unmittelbare Anpassung von Prozessparametern noch während des Eingriffs ermöglicht (Lanza et al. 2019, S. 404).

Mit steigendem Integrationsgrad verschärft sich der Zielkonflikt zwischen Messgeschwindigkeit, Robustheit und Signalqualität: beispielsweise In-process-Sensorik im Arbeitsraum muss gegenüber Temperatur, Kühlschmierstoff und abrasiven Einflüssen widerstandsfähig sein (Klocke 2018, S. 426). Zusätzlich überlagern maschinenseitige Störgrößen häufig das Nutzsignal, was die Signaltrennung erschwert und in der Praxis zu Fehlalarmen führen kann (Klocke 2018, S. 427). Zentrale Herausforderung in der Entwicklung geschlossener Qualitätsregelkreise ist die Findung eines Optimums zwischen Integrationsgrad und Datenqualität (Lanza et al. 2019, S. 426).

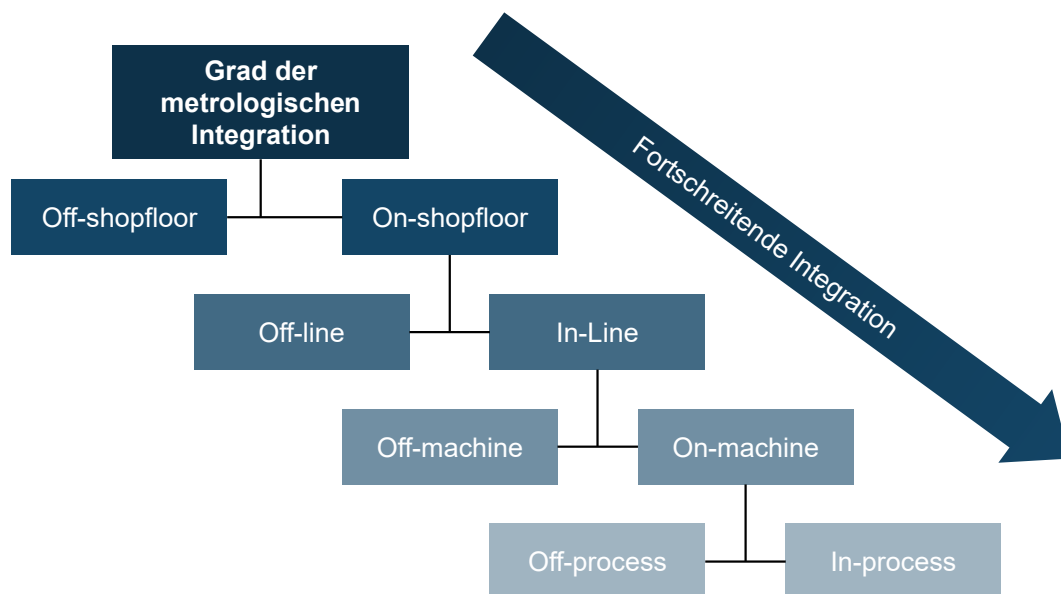


Abbildung 2.6: Klassifizierung der Messstrategien nach Integrationsgrad in Anlehnung an Lanza et al. (2019, S. 402).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird *in-process* als Bezeichnung für die Datenerfassung *während* der Bearbeitung verwendet. Der Begriff *prozessnah* wird als übergeordneter Begriff definiert und umfasst sämtliche fertigungsintegrierten Qualitätssicherungsstrategien, einschließlich In-process- und In-line-Messtechnik. Prozessnah beschreibt dabei Verfahren, die eine zeitlich und räumlich enge Kopplung an den Fertigungsprozess aufweisen und somit eine unmittelbare Bewertung der Bauteilqualität im Prozesskontext ermöglichen.

2.3.3 Optische Koordinatenmesstechnik – Fokusvariation

Die fortschreitende Miniaturisierung funktionaler Bauteile führt bei konventioneller Messtechnik zunehmend zu physikalischen Grenzen (Goch et al. 2023, S. 741). Insbesondere bei Verzahnungen mit Modulen unter 1 mm sind taktile Koordinatenmessgeräte häufig nicht mehr prozesssicher einsetzbar, da erforderliche Tastkugeldurchmesser unter 0,3 mm sowie Antastkräfte unter 1 mN technisch nur eingeschränkt realisierbar sind (Schmitt et al. 2023, S. 292). In diesem Anwendungsbereich gewinnt die Fokusvariation an Bedeutung, die als Kombination

aus Oberflächen- und Koordinatenmesstechnik sowohl Form- als auch Rauheitsmessungen ermöglicht (Schuth et al. 2017, S. 353).

Das Funktionsprinzip basiert auf der geringen Schärfentiefe einer Präzisionsoptik: Während des Messvorgangs wird das Objekt entlang der optischen Achse verfahren, um für jeden Messpunkt die z-Position des maximalen Kontrasts zu identifizieren (siehe Abbildung 2.7) (Schuth et al. 2017, S. 353).

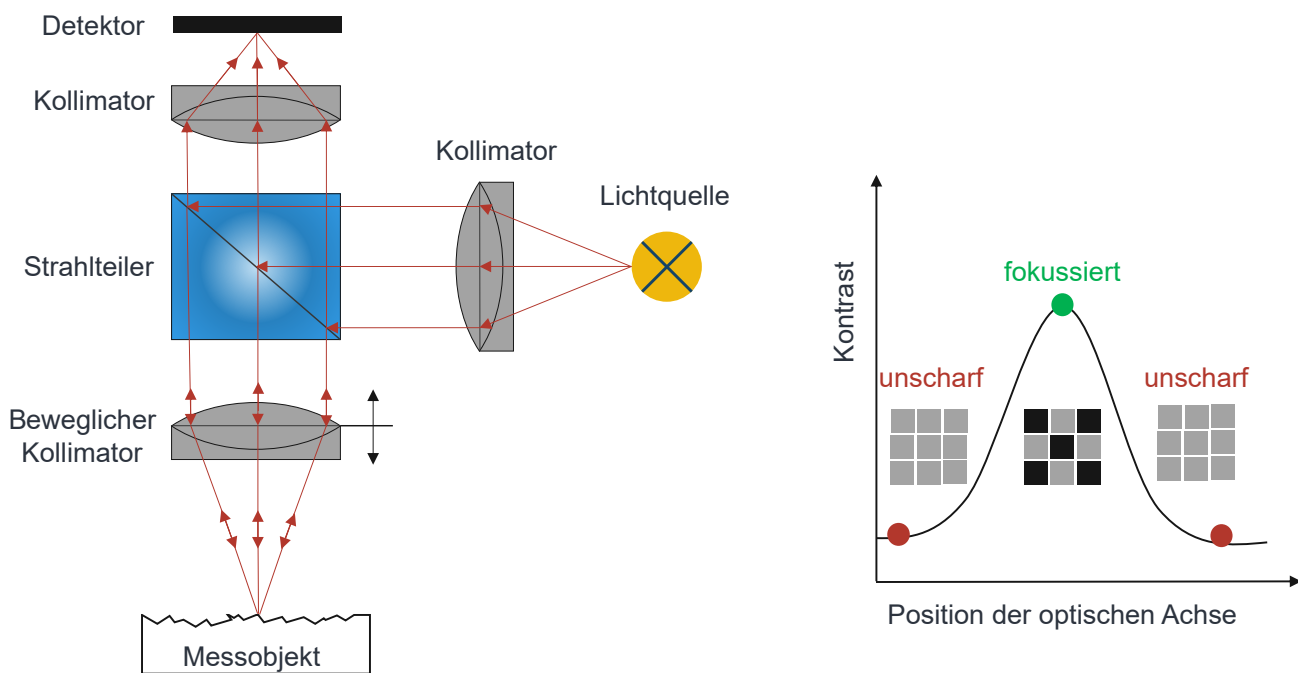


Abbildung 2.7: links: Aufbau der Fokusvariation, Darstellung in Anlehnung an Schuth et al. (2017), rechts: Kontrastauswertung, Darstellung in Anlehnung an Weckenmann (2012).

Gegenüber der taktilen Messtechnik bietet dieses Verfahren deutliche Vorteile durch eine flächenhafte, berührungslose Erfassung mit hoher Punktdichte und Messgeschwindigkeit (Schuth et al. 2017, S. 2). Da mechanische Tastereinflüsse entfallen, wird das Risiko von Bauteilbeschädigungen vermieden und eine Tasterradiuskompensation erübrigt sich (Schmitt et al. 2023, S. 187). Zudem ermöglicht die simultane Erfassung von Farb- und Intensitätsinformationen erweiterte Analysemöglichkeiten (Schmitt et al. 2023, S. 288). Einschränkungen ergeben sich jedoch aus der Abhängigkeit von optischen Oberflächeneigenschaften; starke Reflexionen oder Abschattungseffekte an steilen Flanken können die Messqualität beeinträchtigen (Schmitt et al. 2023, S. 292). Trotz dieser Leistungsfähigkeit bleibt die taktilen Messtechnik die etablierte Referenz zur Sicherstellung der Rückführung und Validierung optischer Messergebnisse (Schmitt et al. 2023, S. 291).

2.3.4 Taktile Koordinatenmesstechnik

Die taktile Koordinatenmesstechnik bildet aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und etablierten Rückführbarkeit weiterhin das Rückgrat der industriellen Qualitätssicherung. Sie dient insbesondere als Referenzverfahren für die Kalibrierung neuerer Messsysteme (Schmitt et al. 2023). Das Funktionsprinzip beruht auf der physischen Antastung der Werkstückoberfläche, wobei zwischen schaltenden Systemen zur punktwisen Positionsbestimmung und messenden Systemen für das kontinuierliche Scanning unterschieden wird (Schmitt et al. 2023). Ein zentraler Aspekt der Auswertung ist die mathematische Tasterradiuskompensation, um aus den Koordinaten des Tastkugelmittelpunkts die tatsächliche Werkstückgeometrie zu rekonstruieren (Schmitt et al. 2023).

Für die Mikroverzahnungsmessung ist die taktile Messtechnik trotz ihrer geringen Messgeschwindigkeit von besonderer Bedeutung, da sie im Vergleich zu optischen Verfahren weitgehend unabhängig von Reflexions- und Materialeffekten arbeitet. Gerade bei kleinen Zahngeometrien und funktional relevanten Flankenbereichen ermöglicht sie eine robuste und rückführbare Erfassung der Geometrie (Schmitt et al. 2023; Goch et al. 2023). Mit abnehmendem Modul treten jedoch die geometrischen und mechanischen Grenzen taktiler Systeme deutlich hervor.

Besonders bei Mikrozahnradern stoßen konventionelle taktile Systeme an ihre Grenzen. Verzahnungsmessgeräte und Koordinatenmessgeräte arbeiten standardmäßig mit Tastkugeldurchmessern von mindestens 300 μm (Härtig et al. 2009b; Goch et al. 2023). Dies schränkt ihre Anwendbarkeit für Mikrozahnräder mit Modulen unter 0,5 mm erheblich ein, da insbesondere Zahnfußbereiche und enge Zahnücken nicht mehr vollständig zugänglich sind (Goch et al. 2023). Zusätzlich können geringe Strukturgrößen und hohe Antastkräfte zu Verformungen führen, während bei sehr kleinen Antastelementen Adhäsions- und Sticking-Effekte weitere Messfehler verursachen können (Härtig et al. 2009b).

Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden spezielle Mikrotastersysteme für die Mikroverzahnungsmessung entwickelt (Kniel et al. 2015). Piezoresistive 3D-Mikrotaster auf Silizium-Basis ermöglichen Tastkugeldurchmesser bis 50 μm bei sehr geringen Antastkräften (Kniel et al. 2015; Goch et al. 2023). Dadurch können auch Verzahnungen mit Stirnmodulen bis etwa 0,1 mm taktil erfasst werden (Kniel et al. 2015). Eine weitere Alternative stellen taktil-optische Fasertaster mit Tastkugeldurchmessern von 20 μm bis 40 μm dar, die jedoch aufgrund geringerer Steifigkeit und möglicher Sticking-Effekte ebenfalls prozesskritisch sind (Härtig et al. 2009b; Goch et al. 2023).

Der Einsatz dieser filigranen Taster erfordert angepasste Messstrategien. Um Tasterbruch und unzulässige Auslenkungen zu vermeiden, müssen Mess- und Positioniergeschwindigkeiten

reduziert sowie Einfahr- und Positionerroutinen speziell auf die Mikrogeometrie abgestimmt werden (Kniel et al. 2015). Die taktile Mikroverzahnungsmessung ist damit nicht nur eine Frage der Sensorminiaturisierung, sondern erfordert ein abgestimmtes Zusammenspiel aus Tasterdesign, Maschinenintegration und Messstrategie.

2.3.5 Grundlagen der Messunsicherheit nach GUM

Ein vollständiges Messergebnis besteht stets aus dem Messwert und der zugehörigen Messunsicherheit, welche die Streuung der Werte beschreibt, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden können (BIPM et al. 2012, S. 25). Die Messunsicherheit quantifiziert die Güte des Messprozesses und beeinflusst unmittelbar Konformitätsentscheidungen, da sie gemäß DIN EN ISO 14253-1 (2018) den nutzbaren Toleranzbereich reduziert.

GUM-Rahmenwerk Der international anerkannte Standard zur Bestimmung der Messunsicherheit ist der *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (ISO/IEC Guide 98-3, JCGM 100:2008). Der Messprozess wird durch ein Modell beschrieben, bei dem die Ergebnisgröße Y als Funktion von N Eingangsgrößen X dargestellt wird (BIPM et al. 2008a, S. 6):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad 2.5$$

Die Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden entweder statistisch aus Wiederholungsmessungen ermittelt (Typ A) oder auf Basis externer Informationsquellen wie Kalibrierscheinen, Herstellerangaben oder Erfahrungswerten abgeleitet (Typ B) (BIPM et al. 2008a). Im klassischen GUM-Rahmenwerk werden die Unsicherheiten mittels Linearisierung des Modells (Taylor-Entwicklung erster Ordnung) propagiert, woraus sich die kombinierte Standardunsicherheit ergibt.

GUM Supplement 1 und Monte-Carlo-Methode Das klassische GUM-Verfahren setzt näherungsweise lineare Modelle und eine annähernd normalverteilte Ergebnisgröße voraus. Diese Annahmen sind bei komplexen, nichtlinearen Modellen oder asymmetrischen Eingangsverteilungen – wie sie insbesondere bei optischen Messsystemen und in der Mikrofertigung auftreten – häufig nicht erfüllt (BIPM et al. 2008a). Zur Behandlung solcher Fälle wurde das GUM um Supplement 1 (BIPM et al. 2008b) erweitert, das die Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels Monte-Carlo-Methode beschreibt.

Das Vorgehen nach GUM Supplement 1 umfasst im Wesentlichen folgende Schritte (BIPM et al. 2008a, S. 13):

1. Zuweisung geeigneter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zu allen Eingangsgrößen X_i .
2. Durchführung von M Monte-Carlo-Simulationen, wobei in jedem Durchlauf Zufallswerte aus den PDFs der Eingangsgrößen gezogen werden.
3. Berechnung der entsprechenden Funktionswerte der Ergebnisgröße Y über das Messmodell.
4. Ableitung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisgröße sowie von Schätzwert, Standardunsicherheit und Überdeckungsintervallen.

Die Monte-Carlo-Methode erfordert keine Linearisierung des Modells und keine Normalverteilungsannahme und liefert daher robuste Unsicherheitsabschätzungen auch für stark nichtlineare Modelle und asymmetrische Verteilungen (BIPM et al. 2008a).

Überdeckungsintervalle Ein zentrales Ergebnis der Messunsicherheitsbewertung ist das Überdeckungsintervall $[Y_L, Y_U]$, das die wahre Messgröße Y mit einer vorgegebenen Überdeckungswahrscheinlichkeit p enthält (BIPM et al. 2008a, S. 24):

$$\Pr(Y_L \leq Y \leq Y_U) = p.$$

Im klassischen GUM-Rahmenwerk wird das Überdeckungsintervall häufig durch Multiplikation der kombinierten Standardunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor k bestimmt (BIPM et al. 2008a). Bei näherungsweise normalverteilter Ergebnisgröße gilt dabei typischerweise

$$k \approx 2 \quad \text{für } p \approx 95 \%, \quad k \approx 3 \quad \text{für } p \approx 99 \%.$$

Im Rahmen von GUM Supplement 1 wird das Überdeckungsintervall hingegen direkt aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisgröße bestimmt, die durch die Monte-Carlo-Simulation gewonnen wird. Hierzu werden geeignete Quantile der simulierten Stichprobe verwendet, sodass Überdeckungsintervalle für $p = 95 \%$ oder $p = 99 \%$ ohne Annahme einer Normalverteilung konsistent bestimmt werden können. Dieses Vorgehen erlaubt insbesondere die Berücksichtigung asymmetrischer oder nicht-gaußförmiger Verteilungen der Ergebnisgröße.

2.3.6 Predictive Quality & Virtual Metrology

Predictive Quality (PQ) markiert den Übergang von der reaktiven zur proaktiven Qualitätssicherung. Statt Abweichungen erst nach der Fertigung physisch festzustellen, prognostizieren datengetriebene Modelle qualitätsrelevante Merkmale bereits während der Entstehung (Schmitt et al. 2023, S. 773). Dieser Ansatz bewältigt die hohe Komplexität moderner Produktionsdaten, bei denen klassische statistische Prozessregelungen an ihre Grenzen stoßen (Schmitt et al. 2023, S. 776). Technologische Basis sind ML- und DL-Verfahren, die nichtlineare Zusammenhänge zwischen Prozesszuständen und Produktgüte abbilden (Schmitt et al. 2023, S. 779).

Begriffliche Einordnung In der Forschung dient PQ als Sammelbegriff für ML-basierte Qualitätsschätzungen (Tercan et al. 2022). Ziel ist die Schätzung produktbezogener Größen aus Prozessdaten, um fundierte Entscheidungen abzuleiten. PQ umfasst sowohl Regressionsaufgaben (kontinuierliche Werte) als auch Klassifikationen (Fehlerarten) und grenzt sich als überwachtetes Lernverfahren klar von der reinen Anomaliedetektion ab (Tercan et al. 2022; Schmitt et al. 2023).

Virtual Metrology (VM) ist ein spezialisierter, produktzentrierter Teilbereich der PQ. Ziel ist die Echtzeit-Schätzung von Qualitätsmerkmalen anhand von Anlagenparametern, ohne jedes Bauteil physisch zu prüfen (Dreyfus et al. 2022). Dieser ursprünglich aus der Halbleiterindustrie stammende Ansatz ermöglicht eine lückenlose Qualitätsbewertung bei hoher Prozesseffizienz (Cheng et al. 2011). Im Gegensatz zum allgemeinen PQ-Rahmen erschließt VM die Prozessqualität konsequent über das geschätzte Produktergebnis und nutzt Mechanismen wie Drift-Erkennung zur Modellpflege (Dreyfus et al. 2022).

2.3.7 Zwischenfazit

Die Messtechnik stellt einen zentralen Enabler für die prozessnahe Qualitätsregelung von Mikro-Kronenrädern dar. Hohe Integrationsgrade ermöglichen kurze Reaktionszeiten, gehen jedoch mit erhöhten Umwelteinflüssen und steigenden Anforderungen an die Datenauswertung einher. Optische Fokusvariationsmessungen eignen sich aufgrund ihrer flächenhaften und schnellen Erfassung für seriennahe Anwendungen, während die taktile Koordinatenmesstechnik als hochgenaue Referenz zur Absicherung der Messkette unverzichtbar bleibt. Eine konsequente Berücksichtigung der Messunsicherheit nach GUM ist dabei essenziell, da im Mikrobereich Messunsicherheit und Toleranz häufig vergleichbare Größenordnungen annehmen und unmittelbar die Regelgüte beeinflussen.

2.4 Methoden der Datenverarbeitung

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Methoden vorgestellt, die für die datengetriebene Analyse und Modellierung im Rahmen dieser Arbeit erforderlich sind. Die Darstellung folgt dabei einer zweistufigen Struktur: Zunächst wird der gesamte datenanalytische Prozess anhand des Data-Mining-Frameworks nach Mikut (2008) eingeordnet. Für jeden Prozessschritt werden die in dieser Arbeit eingesetzten Verfahren beschrieben – von der Merkmalsextraktion über die Merkmalsselektion und -transformation bis hin zum Modelltraining und der Validierung. Im zweiten Teil des Abschnittes werden die Grundlagen der 3D-Datenverarbeitung erläutert, die notwendig sind, um aus den später erfassten 3D-Messdaten geometrische Qualitätsmerkmale abzuleiten. Diese Methoden bilden später die Basis für den eigenen Ansatz zur Auswertung der geometrischen Abweichungen von Mikro-Kronenrädern.

2.4.1 Data-Mining Framework nach Mikut

Das Data Mining Framework nach Mikut (2008) (schematisch visualisiert in Abbildung 2.8) bildet das methodische Framework der Datenverarbeitung für die vorliegende Arbeit. Ziel ist es, aus den verfügbaren Rohdaten (Sensorsignale, Maschinenparameter) valide, neuartige und nützliche Muster zu extrahieren, um das Systemverhalten präzise vorherzusagen (Mikut 2008, S. 27). Das Framework betrachtet den Analyseprozess als ein System, das durch eine Hüllfläche von seiner Umgebung abgegrenzt ist und über gerichtete Verbindungen mit dieser interagiert (Mikut 2008, S. 33). Der Kernprozess gliedert sich dabei in die Schritte der Merkmalsaufbereitung (Extraktion, Transformation, Selektion) und der eigentlichen Modellbildung (z. B. Regression), unterstützt durch Validierungstechniken.

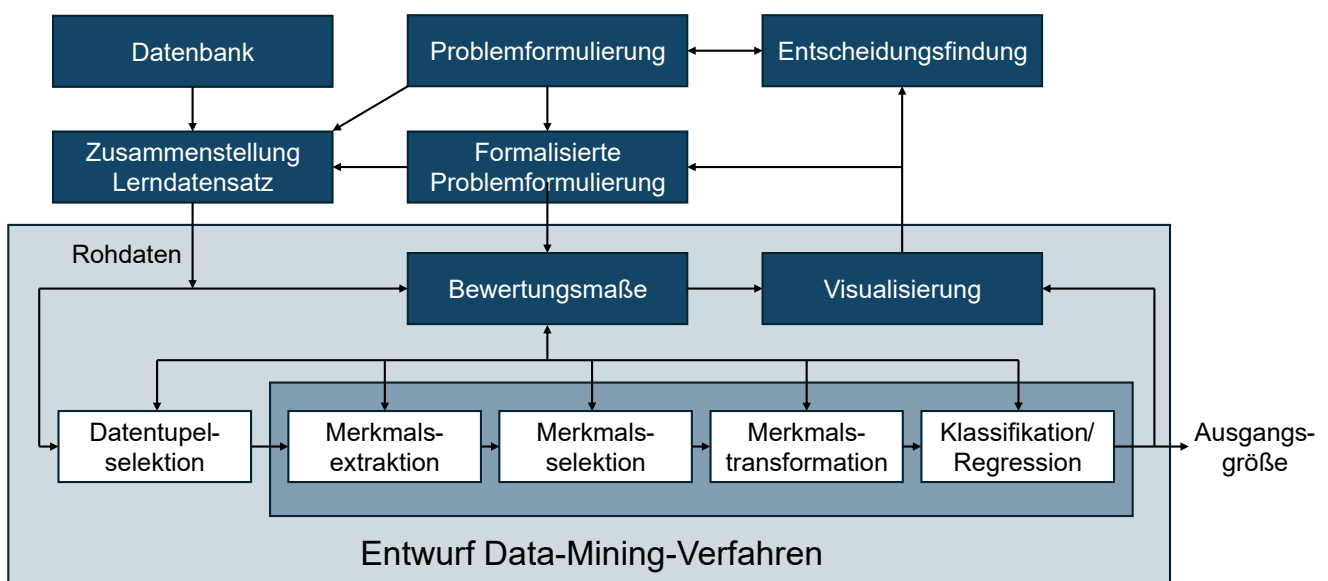


Abbildung 2.8: Data Mining Vorgehen nach Mikut (2008, S. 74).

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes werden die einzelnen Phasen des Data-Mining-Frameworks nicht isoliert oder abstrakt behandelt, sondern jeweils direkt im Kontext der vorliegenden Arbeit mit den konkret eingesetzten Methoden verknüpft. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Merkmalsextraktion, der Merkmalsselektion und -transformation sowie der anschließenden Modellbildung und -bewertung beziehungsweise Validierung im Sinne des Frameworks nach Mikut (2008).

2.4.2 Merkmalsextraktion mittels Spektraltransformation

Der erste entscheidende Schritt des Data Mining Frameworks nach Mikut (2008) ist die Merkmalsextraktion. Da Rohdaten in der Fertigung oft als hochdimensionale Zeitreihen vorliegen (vgl. s_{Roh} in Mikut (2008, S. 41)), ist eine direkte Analyse oft nicht zielführend. Die Extraktion generiert aus diesen Rohdaten einen niederdimensionalen Merkmalsraum, indem beispielsweise aus Zeitabschnitten spezifische Kennwerte abgeleitet werden (vgl. Mikut 2008, S. 88).

Für die Analyse periodischer und transients Vorgänge in der Zerspanung ist die Spektralanalyse zentral (Hanselka et al. 2020, S. 881). Da die klassische Fourier-Transformation keine zeitliche Lokalisierung erlaubt, werden zur Prozessüberwachung Verfahren der Zeit-Frequenz-Analyse wie die Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. short time fourier transformation, STFT) oder die kontinuierliche Wavelet-Transformation (engl. continuous wavelet transformation, CWT) eingesetzt (Mertins 2020, S. 311) (Meyer 2021, S. 200).

Die STFT unterteilt das Signal $x(t)$ mittels einer verschiebbaren Fensterfunktion γ^* in zeitliche Segmente, die anschließend transformiert werden (Mertins 2020, S. 295):

$$F_{\gamma x}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \gamma^*(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad 2.6$$

Das resultierende Spektrogramm (siehe exemplarisch Abbildung 2.9) liefert lokale Spektralinformationen, unterliegt jedoch einer festen Zeit-Frequenz-Auflösung. Ein kurzes Fenster verbessert zwar die zeitliche Lokalisierung, mindert jedoch zwangsläufig die Frequenzauflösung und umgekehrt (Mertins 2020, S. 313).

Diesen systematischen Nachteil überwindet die CWT durch eine Zeit-Skalen-Analyse. Anstelle fester Fenster werden skalierte (Parameter a) und verschobene (Parameter b) Versionen eines Mutter-Wavelets $\psi(t)$ als Basisfunktionen verwendet (Mertins 2020, S. 311):

$$\mathcal{W}_x(b, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t - b}{a}\right) dt \quad 2.7$$

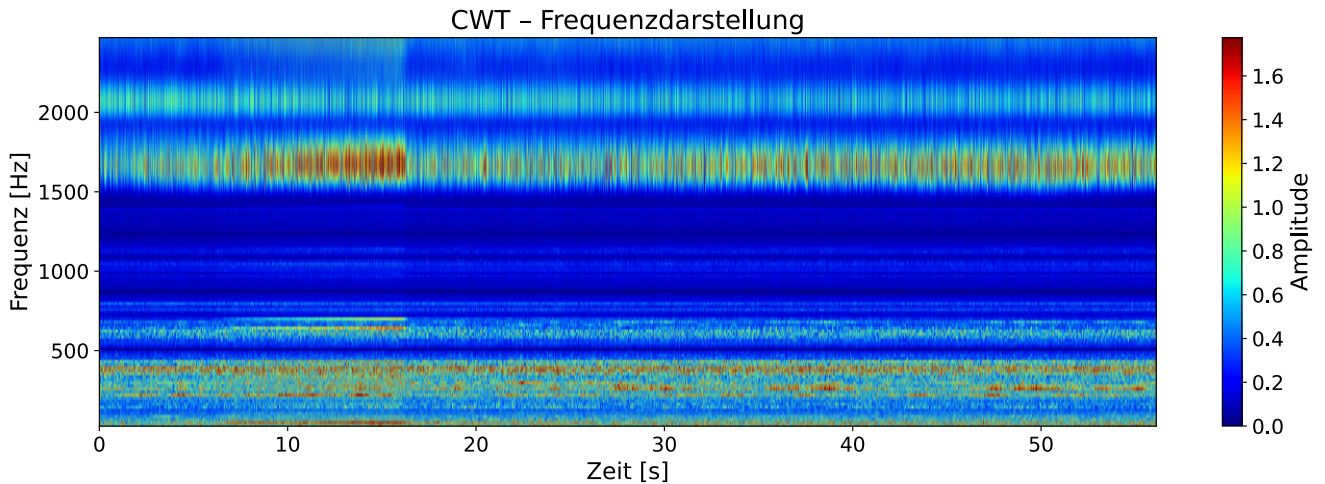


Abbildung 2.9: CWT-Spektrogramm: Zeit-Frequenz-Verteilung während eines spannenden Fertigungsprozesses (Bilen et al. 2026b).

Der entscheidende Vorteil ist die adaptive Auflösung (Constant-Q-Eigenschaft): Bei hohen Frequenzen bietet die CWT eine exzellente Zeitauflösung, während sie bei niedrigen Frequenzen eine hohe Frequenzauflösung ermöglicht (Mertins 2020, S. 312). Während die CWT aufgrund ihrer Redundanz ideal für die detaillierte Merkmalsextraktion ist, findet die diskrete Wavelet-Transformation (DWT) wegen ihrer Recheneffizienz primär in der Datenkompression Anwendung (Mertins 2020, S. 311).

2.4.3 Merkmalsextraktion durch Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Optional kann die Datenstruktur durch Merkmalsextraktion verdichtet werden. Ein prominenter Ansatz ist die Hauptkomponentenanalyse (engl. principal component analysis, PCA), bei der der ursprüngliche Merkmalsraum durch eine lineare Transformation in ein neues, orthogonales Koordinatensystem überführt wird. Die neuen Achsen (Hauptkomponenten) sind dabei so gewählt, dass sie sukzessive die maximale Varianz der Daten erklären (vgl. Runkler 2015, S. 39–43).

Die Transformation eines Datensatzes X in den Raum der Hauptkomponenten Y erfolgt nach

$$Y = (X - \bar{X})E, \quad 2.8$$

wobei E die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(x_k - \bar{x})^T \quad 2.9$$

enthält. Die Eigenwerte der Kovarianzmatrix entsprechen dabei den durch die jeweiligen Hauptkomponenten erklärten Varianzanteilen (vgl. Runkler 2015, S. 40–41).

Durch die Beschränkung auf $m < p$ Hauptkomponenten kann die Dimensionalität des Merkmalsraums reduziert werden, während ein Großteil der Gesamtvarianz erhalten bleibt. Häufig wird die Anzahl der Komponenten so gewählt, dass ein vorgegebener Varianzanteil, beispielsweise 95 %, abgedeckt wird (vgl. Runkler 2015, S. 41).

Im Kontext der vorliegenden Arbeit dient die PCA insbesondere dazu, die durch die spektrale Merkmalsextraktion erzeugten hochdimensionalen und teilweise korrelierten Merkmale weiter zu verdichten und redundante Informationsanteile zu reduzieren.

2.4.4 Univariate Merkmalsselektion mittels Varianzzerlegung – F-Regression

Ein Ansatz zur Reduktion der Eingangsdimension ist die univariate Bewertung der statistischen Relevanz einzelner Merkmale. Wie von Runkler (2015, S. 81) hervorgehoben, erhöht die Einbeziehung irrelevanter oder redundanter Merkmale die Modellkomplexität und begünstigt Overfitting.

In dieser Arbeit wird hierfür ein Varianzzerlegungsansatz eingesetzt, bei dem für jedes Merkmal x_i geprüft wird, welcher Anteil der Zielvariabilität $\text{Var}(y)$ durch eine lineare Anpassung erklärt werden kann. Das Verhältnis von erklärter zu nicht erklärter Varianz entspricht dabei der F-Statistik der linearen Regression (Guyon et al. 2003, S. 1160). Guyon et al. (2003) beschreiben diesen Ansatz als univariaten Filter und verweisen auf die Verbindung zur ANOVA.

Durch diese Vorgehensweise bleiben die physikalischen Prozessmerkmale interpretierbar, da die Originalvariablen unverändert betrachtet werden. Besonders im messtechnischen Screening bietet dies Vorteile, da die Kausalität zwischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen analysierbar bleibt. Ein wesentlicher Nachteil univariater Selektion besteht jedoch darin, dass mögliche Wechselwirkungen zwischen Variablen verborgen bleiben (Guyon et al. 2003, S. 1162).

2.4.5 Modellbildung und Validierung

Nach der Aufbereitung, Selektion und Transformation der Merkmale werden diese im Rahmen des überwachten Lernens (engl. Supervised Learning) mit den bekannten Zielgrößen (engl. Labels) verknüpft. Im Gegensatz zum unüberwachten Lernen (engl. unsupervised learning), bei dem Strukturen in Daten ohne bekannte Ausgangsgrößen gesucht werden, oder dem Reinforcement Learning, zielt das überwachte Lernen darauf ab, ein Modell zu trainieren, das

den Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und einer Zielgröße erlernt (Zhou 2021, S. 32).

Das primäre Ziel des Modelltrainings ist die Generalisierung: Das Modell soll nicht nur die Trainingsdaten reproduzieren, sondern allgemeingültige Regeln extrahieren, um präzise Vorhersagen für unbekannte Datensätze – im vorliegenden Fall die Qualität neu gefertigter Mikro-Kronenräder – zu treffen. Hierbei muss das Risiko des Overfitting vermieden werden, bei dem das Modell auch das Rauschen der Trainingsdaten lernt und somit auf neuen Daten geringe Vorhersagegenauigkeit liefert (Zhou 2021, S. 26).

Die in Abbildung 2.10 gezeigte Entwicklung lässt sich im Kontext des Bias-Varianz-Dilemmas präzisieren (Geman et al. 1992). Bias beschreibt die Differenz zwischen erwarteter Modellvorhersage und wahrem Label und charakterisiert damit die Anpassungsfähigkeit des Lernalgorithmus. Varianz hingegen misst, wie stark sich das Lernverhalten bei Störungen bzw. Änderungen gleich großer Trainingsdatenmengen verändert. Zusätzlich existiert ein irreduzibler Anteil (Noise), der die inhärente Schwierigkeit des Lernproblems widerspiegelt (Zhou 2021, S. 51).

Mit zunehmender Trainingsintensität sinkt typischerweise der Bias, während die Varianz steigt, sodass die Generalisierungsleistung gemeinsam durch die Fähigkeit des Lernalgorithmus, die Datenverfügbarkeit und die Aufgabenkomplexität bestimmt wird. Infolge dieses Zielkonflikts kann es nach einer Phase optimaler Anpassung zum Overfitting kommen (Zhou 2021, S. 51).

Grundsätzlich wird zwischen zwei Hauptarten von Modellen unterschieden (Mikut 2008, S. 39):

1. Klassifikation für wertediskrete Ausgangsgrößen (z. B. „Gutteil/Ausschuss“) und
2. Regression für wertekontinuierliche Zielgrößen.

Da die Qualitätsmerkmale der Zahnräder in dieser Studie als kontinuierliche Messwerte vorliegen, liegt der Fokus auf Regressionsverfahren.

Lineare Regression Ein grundlegender Ansatz ist die lineare Regression, die versucht, den funktionalen Zusammenhang zwischen den Merkmalen und der Zielgröße durch eine lineare Funktion

$$f(x) = wx + b$$

abzubilden. Die Parameter w und b werden so bestimmt, dass eine Fehlerfunktion minimiert wird, üblicherweise der quadratische Regressionsfehler (Least-Squares-Methode) (Zhou 2021,

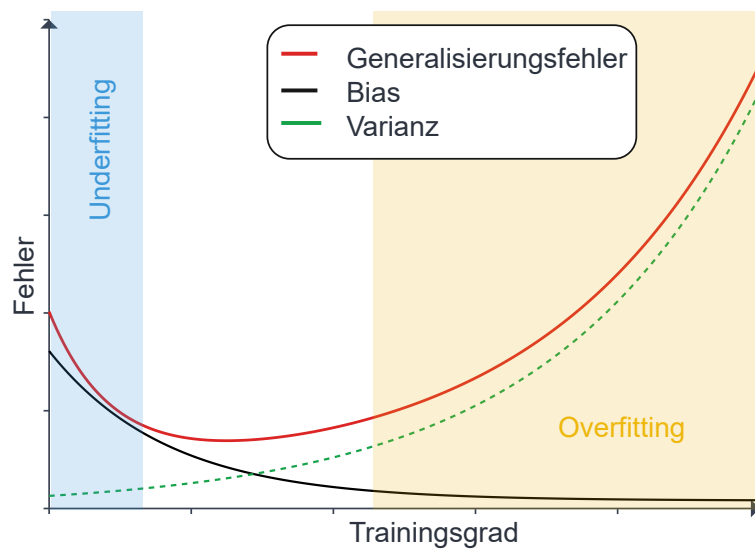


Abbildung 2.10: Veranschaulichung von Underfitting (linker Bereich), optimaler Anpassung und Overfitting (rechter Bereich) im Modelltraining nach (Zhou 2021, S. 51).

S. 57). Wie Runkler (2015, S. 66) erläutert, liefert dieses Verfahren interpretierbare Aussagen darüber, wie Prozessparameter gesetzt werden müssen, um eine bestimmte Zielqualität zu erreichen.

Support Vector Regression (SVR) Die Support Vector Regression (SVR) erweitert die klassische Regression um eine ε -Toleranzzone, innerhalb derer Abweichungen zwischen Modellvorhersage $f(x)$ und Zielgröße y nicht penalisiert werden. Erst Überschreitungen dieser Zone führen zu einem ε -insensitiven Verlust. (Drucker et al. 1996)

Formal wird die SVR als Regularisierungsproblem formuliert, das einerseits die Modellkomplexität über die Norm $\|w\|^2$ minimiert und andererseits die Überschreitung der ε -Zone mittels Slack-Variablen $\xi_i, \hat{\xi}_i$ begrenzt (Zhou 2021, S. 143). Der Regularisierungsparameter C steuert dabei den Kompromiss zwischen Anpassungs- und Generalisierungsfähigkeit.

Geometrisch betrachtet beeinflussen nur Trainingspunkte außerhalb der ε -Zone – die sogenannten Support Vectors – die Modelllösung. Dies führt zu einer sparsamen Repräsentation und erhöht die Robustheit gegenüber Ausreißern, was insbesondere bei sensorbasierten Qualitätsmerkmalen vorteilhaft ist. (Zhou 2021, S. 142)

Random Forest (RF) Ein weiterer in der Praxis häufig eingesetzter Ansatz ist der Random Forest (RF) nach Breiman (2001), der als Erweiterung des Bagging-Verfahrens verstanden

werden kann (Zhou 2021, S. 191). Während beim Bagging mehrere Entscheidungsbäume trainiert und anschließend aggregiert werden, erweitert RF dieses Prinzip um eine zufällige Merkmalsselektion auf Knotenebene. Anstatt aus allen verfügbaren Merkmalen das optimale Split-Kriterium zu bestimmen, wird pro Knoten nur eine zufällig ausgewählte Teilmenge der verfügbaren Merkmale betrachtet, deren Größe typischerweise logarithmisch mit der Gesamtzahl der Merkmale skaliert (vgl. Zhou 2021, S. 191).

Durch diese Kombination aus Stichproben- und Merkmalsmanipulation wird eine höhere Diversität der Entscheidungsbäume erzeugt, was die Varianz des Ensemblemodells reduziert und die Generalisierungsfähigkeit verbessert. Zwar führen die zufälligen Merkmalsauswahlen dazu, dass einzelne Entscheidungsbäume tendenziell schlechtere Vorhersagen liefern als deterministische Bäume, jedoch sinkt der Gesamtfehler des Ensembles mit zunehmender Anzahl an Bäumen typischerweise unter das Niveau des Bagging-Verfahrens (Zhou 2021, S. 192). RF zeigt damit trotz geringer Trainingskosten eine hohe Robustheit und gilt als repräsentative Methode moderner Ensemble-Lernansätze, die sich in zahlreichen industriellen Anwendungen bewährt hat (Zhou 2021, S. 192).

Bewertung der Modellgüte Um die Güte der trainierten Modelle objektiv zu bewerten, werden regressionsorientierte Metriken herangezogen. Zentral ist der mittlere quadratische Fehler (MSE) bzw. dessen Wurzel (RMSE), welche die Abweichung zwischen vorhergesagtem Wert $\hat{y}$ und tatsächlichem Wert y quantifizieren (Zhou 2021, S. 32).

Ergänzend wird das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet. Wie Mikut (2008, S. 58) darlegt, beschreibt R^2 die Verbesserung der Vorhersage im Vergleich zu einem Trivialmodell (Mittelwert der Zielgröße), wobei Werte nahe 1 einen starken deterministischen Zusammenhang anzeigen.

Zur validen Schätzung dieser Metriken und der Generalisierungsfähigkeit wird eine Kreuzvalidierung durchgeführt, bei der der Datensatz wiederholt und stochastisch in disjunkte Trainings- und Validierungsmengen aufgeteilt wird. Für jede Aufteilung wird ein separates Modell trainiert und evaluiert, sodass die resultierenden Leistungskennzahlen über mehrere Datenpartitionen gemittelt werden können (Runkler 2015, S. 77).

2.4.6 Methoden der 3D-Objektverarbeitung

Für messtechnische Anwendungen werden heute dreidimensionale Messdaten erfasst. Zur Analyse dieser Daten existieren etablierte Methoden der 3D-Objektverarbeitung, die von der Wahl geeigneter Datentypen über Vorverarbeitungsschritte wie Downsampling, Remeshing und Normalenschätzung bis hin zur Registrierung und geometrischen Auswertung reichen.

Die Erfassung und Analyse von 3D-Geometriedaten ist ein wesentlicher Bestandteil der prozessnahen Qualitätsregelung, da 3D-Modelle im Gegensatz zu 2D-Bildern explizite Tiefeninformationen enthalten und damit eine präzisere digitale Repräsentation physischer Objekte erlauben (Liu et al. 2021; Yu et al. 2011, S. 3, 11).

Arten von 3D-Daten In der industriellen Koordinatenmesstechnik treten 3D-Daten typischerweise in drei grundlegenden Repräsentationsformen auf: punktbasierte Oberflächenrepräsentationen (Punktwolken), flächenbasierte Polygonnetze sowie volumenbasierte Voxeldaten (Schmitt et al. 2023, S. 194-195).

Eine Punktwolke (vgl. Abbildung 2.11 links) ist definiert als eine Menge von Punkten im dreidimensionalen Raum, wobei jeder Punkt durch seine Koordinaten (x,y,z) relativ zu einem orthogonalen Achsensystem identifiziert wird (Liu et al. 2021, S. 2). Diese Datenform ist das direkte Resultat vieler Scanverfahren, wie etwa dem Laserscanning oder der optischen Triangulation (Yu et al. 2011, S. 14). Ein wesentliches Merkmal von Punktwolken ist ihre ungeordnete Natur; es existiert keine inhärente Gitterstruktur wie bei 2D-Bildern, was die Anwendung klassischer Faltungsoperationen (Convolution) erschwert (Liu et al. 2021, S. 3).

Zur Weiterverarbeitung und Visualisierung werden Punktwolken häufig in Polygonnetze (Meshes) überführt (vgl. Abbildung 2.11 rechts). Ein Polygonnetz besteht aus einer Sammlung von Eckpunkten (Vertices), Kanten und Flächen (Faces), die die Oberfläche eines Objekts definieren (Yu et al. 2011, S. 20).

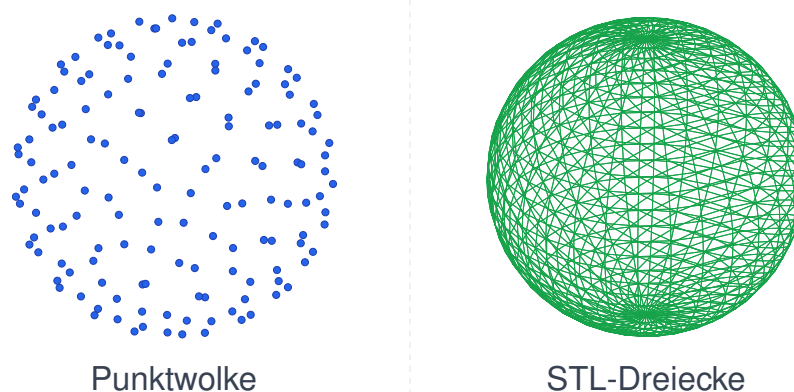


Abbildung 2.11: Vergleich einer unstrukturierten Punktwolke (links) und eines daraus generierten Polygonnetzes (rechts).

In der Regel handelt es sich dabei um Dreiecksnetze, da diese darstellungstechnisch effizient sind. Bekannte Dateiformate für den Austausch solcher Daten sind STL (Stereolithography), OBJ und DXF, wobei STL in der Fertigungstechnik dominierend ist (Yu et al. 2011, S. 22). Man

unterscheidet hierbei zwischen Volumenmodellen (Solid Models), die das Volumen definieren, und Schalenmodellen (Shell/Boundary Models), die lediglich die begrenzende Oberfläche repräsentieren (Yu et al. 2011, S. 12).

Vorverarbeitung Die Vorverarbeitung ist entscheidend, da Rohdaten oft Messrauschen, Ausreißer und eine extrem hohe Punktdichte enthalten, die die Rechenkapazitäten überfordern würde. Zudem sind Rohdaten oft unstrukturiert. Ziel ist es, die Datenmenge zu reduzieren und die Qualität für nachfolgende Analysen zu steigern, ohne relevante geometrische Details zu verlieren (Yu et al. 2011, S. 31). Fehlerhafte Daten, wie Ausreißer (Outlier), müssen hierbei durch statistische Verfahren oder distanzbasierte Filterung bereinigt werden (Liu et al. 2021, S. 17).

Downsampling Das Downsampling dient der Reduktion der Datenpunkte (schematisch visualisiert in Abbildung 2.12). Da Punktwolken oft Millionen von Punkten umfassen, ist eine Ausdünnung für effiziente Berechnungen notwendig. Ein gängiges Verfahren ist das *Voxel Grid Downsampling*. Hierbei wird ein 3D-Voxelgitter über die Punktwolke gelegt und alle Punkte innerhalb eines Voxels durch ihren Schwerpunkt (Centroid) approximiert (Liu et al. 2021, S. 16). Alternativ existiert das *Farthest Point Sampling* (FPS), welches iterativ Punkte auswählt, die maximal weit von den bereits gewählten Punkten entfernt sind, um eine gleichmäßige Abdeckung zu gewährleisten (Liu et al. 2021, S. 16).

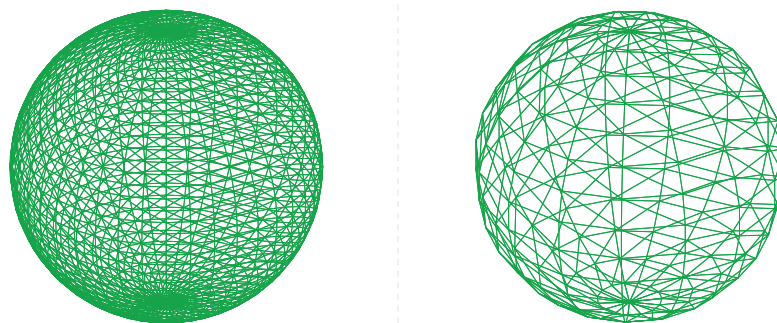


Abbildung 2.12: Vergleich einer STL mit 3200 Dreiecken (links) und einer STL mit 450 Dreiecken (rechts).

Registrierung Die 3D-Registrierung ist ein zentraler Prozessschritt der computergestützten Qualitätsprüfung und dient der Bestimmung einer räumlichen Transformation, welche

die gemessenen Ist-Daten, beispielsweise eines Mikro-Kronenrads, mit dem idealen CAD-Referenzmodell in Deckung bringt (Liu et al. 2021, S. 4). Da Messdaten und Konstruktionsmodell typischerweise in unterschiedlichen Koordinatensystemen vorliegen, bildet die Registrierung die notwendige Grundlage für jede nachfolgende geometrische Abweichungsanalyse. Ziel ist die Ermittlung einer optimalen starren Transformation bestehend aus Rotation und Translation, welche die Überlappung beider Datensätze maximiert (Yu et al. 2011, S. 162).

In der Praxis erfolgt die Registrierung häufig zweistufig (Liu et al. 2021). Zunächst wird eine **Grobregistrierung** durchgeführt, um eine initiale Ausrichtung der Datensätze auch bei Vorhandensein von Ausreißern oder Fehlkorrespondenzen zu gewährleisten. Hierfür wird häufig das Random Sample Consensus (RANSAC)-Verfahren eingesetzt, das auf einer zufälligen Stichprobenauswahl minimaler Punktmengen basiert, aus denen wiederholt Kandidatentransformationen geschätzt werden. Durch Bewertung der resultierenden Konsensmengen wird eine Transformation bestimmt, die von einem möglichst großen Anteil der Daten unterstützt wird und somit gegenüber Ausreißern robust ist (Fischler et al. 1981).

Aufbauend auf dieser initialen Pose erfolgt anschließend eine **Feinregistrierung**, typischerweise mittels des Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus. Dieser verfeinert die Ausrichtung iterativ durch die Minimierung euklidischer Abstände zwischen korrespondierenden Punkten der beiden Datensätze und setzt eine hinreichend gute Initialisierung voraus, um Konvergenz zu einem lokalen Minimum sicherzustellen (Liu et al. 2021, S. 46).

Geometrische Operationen an STLs Die Analyse der 3D-Messdaten erfordert spezifische geometrische Operationen, um aus den hochdimensionalen Rohdaten aussagekräftige Qualitätsmerkmale abzuleiten.

Eine zentrale Rolle spielen dabei Schnitt- und boolesche Operationen auf den Polygonnetzen (vgl. Abbildung 2.13). Die zugrunde liegende boolesche Algebra beschreibt die Struktur von Mengen mittels *Vereinigung* ($\cup$), *Schnitt* ($\cap$) und *Komplement* ($U \setminus A$) (vgl. Givant 2009, S. 8–9). In der dreidimensionalen Geometrieverarbeitung entsprechen diesen Operationen die *Vereinigung*, der *Schnitt* sowie die *Differenz* von Volumenkörpern. Diese Operationen bilden die Grundlage für die Definition lokaler Schnittebenen sowie für materialabtragende Schritte im Simulationsmodell der Kronenradfertigung.

Einpassung geometrischer Referenzelemente Ergänzend dazu werden zur Robustifizierung der Merkmalsextraktion primitive Geometrieelemente in die oft verrauschten Punktwolken der Meshes eingepasst (Liu et al. 2021, S. 28). Anstelle der direkten Verwendung

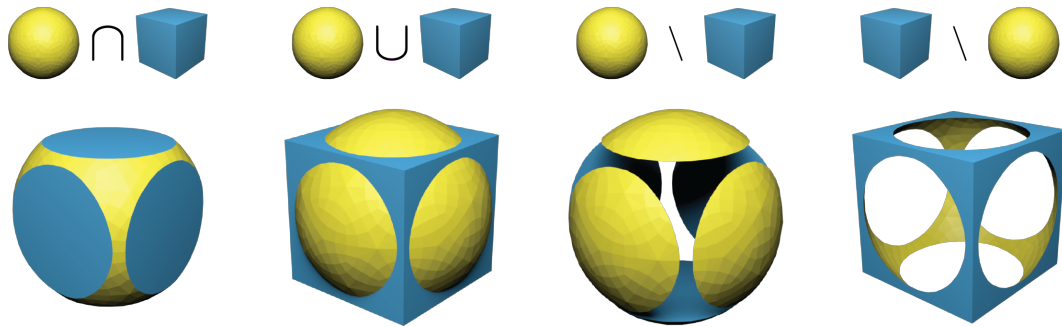


Abbildung 2.13: Darstellung von booleschen Operationen in 3D (Zhou 2018).

einzelner Vertices werden idealisierte Referenzgeometrien, etwa Zylinder zur Beschreibung einer Bohrung oder Ebenen zur Approximation einer Fläche mittels geometrischem Fitting bestimmt.

2.4.7 Zwischenfazit

Der Abschnitt hat die methodischen Grundlagen eingeführt, die den datenanalytischen Teil der Arbeit strukturieren. Das Data-Mining-Framework nach Mikut (2008) dient dabei als Ordnungsrahmen für die Schritte der Merkmalsaufbereitung, Modellbildung und Validierung sowie zur Einbettung der eingesetzten Zeitreihen- und Regressionsverfahren. Ergänzend wurden im zweiten Teil die grundlegenden Methoden der 3D-Objektverarbeitung beschrieben, die für die Ableitung geometrischer Qualitätsmerkmale aus den Messdaten der Mikro-Kronenräder erforderlich sind. Die dargestellten Methoden – bestehend aus Datentypen, Vorverarbeitung, Registrierung sowie geometrischen Operationen und der Einpassung von Referenzelementen – schaffen damit die methodische Basis für die spätere Analyse der experimentell erhobenen 3D-Messdaten und deren Verknüpfung mit datengetriebenen Vorhersagemodellen.

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung im Kontext der Qualitätsregelung von Kronenrädern systematisch aufgearbeitet. Hierzu werden zunächst aus der beschriebenen Problemstellung, der Zielsetzung sowie den formulierten Forschungshypothesen Anforderungen abgeleitet, welche die Bewertung der Literatur entlang unterschiedlicher Dimensionen ermöglichen. Im Anschluss erfolgt eine Sichtung der vorhandenen Arbeiten in drei Kategorien: (1) Geometrische Qualitätsbewertung von Kronenrädern (Abschnitt 3.2), (2) Prozessnahe Qualitätsprädiktion mittels Körperschall (Abschnitt 3.3) sowie (3) Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung (Abschnitt 3.4). Im Anschluss wird der Forschungsbedarf herausgearbeitet. Abschließend werden Forschungsfragen zur weiterführenden Strukturierung der Arbeit eingeführt.

3.1 Anforderungen

Die Anforderungen zur Bewertung des Stands der Forschung werden in folgende drei Kategorien aufgeteilt:

(1) Geometrische Qualitätsbewertung von Kronenrädern. Für die Analyse bestehender Forschungsansätze wird untersucht, inwieweit die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Berücksichtigung von Mikroverzahnungen
- Berücksichtigung von Kronenrädern
- Ganzheitliche Geometrieauswertung
- Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen für Abweichungen

Diese Kategorie bewertet somit, ob und wie geometrische Qualitätsinformationen gewonnen und für Ursachenanalysen nutzbar gemacht werden. Im Fokus steht dabei die inhaltliche und messtechnische Qualität der geometrischen Bewertung – unabhängig vom Integrationsgrad im Produktionssystem, der in Kategorie 3 adressiert wird.

(2) Prozessnahe Qualitätsprädiktion mittels Körperschall. Die zweite Kategorie untersucht, in welchem Umfang Körperschallsignale zur Vorhersage geometrischer Abweichungen genutzt werden:

- Maschinennahe Sensorintegration

- Ganzheitliche Merkmalsextraktion
- Geometrische Qualitätsvorhersage
- Quantifizierung von Prädiktionsunsicherheiten

Diese Kategorie dient der Bewertung des Reifegrades datengetriebener Prozessüberwachungsansätze mittels Körperschall.

(3) Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung. Die dritte Kategorie bewertet, ob und in welcher Form Qualitätsinformationen zur Prozessanpassung genutzt werden:

- Prozessnahe Qualitätsbewertung
- Maschinennahe Qualitätsregelung

Diese Kategorie bewertet, mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit Qualitätsinformationen zur Prozessanpassung genutzt werden und welchen Integrationsgrad der jeweilige Regelkreis aufweist.

3.2 Vergleich von Ansätzen zur geometrischen Qualitätsbewertung von Kronenrädern

Die geometrische Qualitätsbewertung von Kronenrädern stellt aufgrund der komplexen, räumlich gekrümmten und sich über die Zahnbreite kontinuierlich verändernden Flanken-topologie eine signifikante messtechnische Herausforderung dar. Da für diese spezifische Verzahnungsart bisher weitgehend standardisierte Messnormen fehlen, weisen aktuelle Forschungsarbeiten unterschiedliche methodische Ansätze auf, um die reale Bauteilgeometrie zu erfassen, mathematisch zu modellieren und hinsichtlich ihrer Abweichungen zu interpretieren. Der Fokus liegt dabei auf der Trennung von tatsächlichen geometrischen Fertigungsabweichungen und ausrichtungsbedingten Messfehlern sowie auf der möglichst ganzheitlichen Erfassung der Zahnflächen.

3.2.1 Taktile Messverfahren

Ein wesentlicher Schwerpunkt der aktuellen Forschung liegt auf der taktilen Erfassung von Makro-Kronenrädern mittels Koordinatenmessgeräten (KMG). Wang et al. (2022) zeigen, dass die geometrische Auswertung von Kronenrädern hochsensitiv auf Winkel- und Lagefehler im Messkoordinatensystem reagiert. Durch eine Sensitivitätsanalyse und eine anschließende B-Spline-Rekonstruktion auf Basis diskreter Messpunkte ermöglichen sie eine bereinigte Bestimmung lokaler Flankenabweichungen. Darauf aufbauend verdeutlichen Tao et al. (2023)

sowie Lu et al. (2024), dass für eine fundierte Qualitätsbewertung eine erweiterte, merkmalsübergreifende Betrachtung erforderlich ist. Letztere integrieren neben Flankenabweichungen auch Teilungs- und Zahndickenabweichungen in ein Multi-Objective-Optimierungsmodell. Trotz dieser erweiterten Parametrisierung basieren die Ansätze weiterhin auf diskreten Messgittern mit begrenzter Punktdichte, sodass eine flächenhafte Beschreibung der Geometrie lediglich über Interpolationsmodelle angenähert wird. Einen stärker lokalisierten Ansatz verfolgen Lin et al. (2016), die sich auf die Analyse von Teilungsabweichungen entlang der Wälzkurve konzentrieren und die vollständige Flankentopologie nur eingeschränkt berücksichtigen.

Hinsichtlich der Interpretierbarkeit der definierten geometrischen Merkmale zeigen die taktilen Ansätze, dass Sensitivitätsanalysen primär zur Entkopplung von Messfehlern und realer Geometrie eingesetzt werden. Die resultierenden Merkmale ermöglichen zwar eine konsistente Beschreibung von Abweichungen, erlauben jedoch überwiegend nur qualitative Rückschlüsse auf mögliche prozessbedingte Einflussgrößen und sind nicht explizit darauf ausgelegt, eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu kinematischen Maschinenparametern herzustellen.

3.2.2 Optische 3D-Messtechnik

Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.3.3 dargestellten grundlegenden Eigenschaften optischer Messverfahren rücken diese zunehmend in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten, da sie eine flächenhafte Erfassung komplexer Zahnflanken geometrien ermöglichen und damit die Limitierungen diskreter Antaststrategien überwinden können (Goch et al. 2023; Härtig et al. 2009b).

Lu et al. (2022) zeigen für Makro-Kronenräder, dass durch vollflächige optische Scans und eine anschließende Flächenrückführung auf Basis nichtuniformer rationaler B-Splines (NURBS) (Piegl et al. 2012) eine detaillierte topologische Beschreibung der Zahnflanken möglich ist. Die resultierenden Abweichungskarten erlauben eine deutlich ganzheitlichere Analyse der Geometrie im Vergleich zu klassischen profilbasierten Auswertungen. Bilen et al. (2025b) übertragen diesen Ansatz auf Mikroverzahnungen und nutzen ein optisches Fokus-Variationsverfahren zur Erfassung der 3D-Geometrie. Die Auswertung erfolgt jedoch weiterhin auf Basis einer Transformation in eine äquivalente Stirnradgeometrie, wodurch die Analyse auf profilbasierte Schnitte reduziert wird und die direkte Interpretation der ursprünglichen Kronenradtopologie eingeschränkt bleibt.

Insgesamt ermöglichen optische Verfahren zwar eine flächenhafte Beschreibung der Geometrie, die Auswertung erfolgt jedoch überwiegend deskriptiv und häufig weiterhin in reduzierter Form entlang einzelner Profile. Eine durchgängige, analytisch fundierte Verknüpfung zwischen

der erfassten 3D-Topologie und zugrundeliegenden Prozessabweichungen ist bislang nicht etabliert. Insbesondere für Mikro-Kronenräder ist der Stand der Forschung noch begrenzt. Zwar stehen geeignete optische Messverfahren zur hochaufgelösten Geometrieerfassung zur Verfügung, es fehlen jedoch konsistente Ansätze zur strukturierten Auswertung der resultierenden, hochdimensionalen Punktwolken.

3.3 Vergleich von Ansätzen zur prozessnahen Qualitätsprädiktion mittels Körperschall

Die Analyse der Forschungslandschaft zur Nutzung von Körperschall in der Fertigungsüberwachung offenbart eine signifikante Evolution der Zielgrößen und methodischen Ansätze. Während die historische Entwicklung des Forschungsfeldes primär durch die Überwachung von Werkzeugverschleiß und Prozessstabilität geprägt war, adressieren jüngere Arbeiten zunehmend die direkte Vorhersage bauteilbezogener Qualitätsmerkmale und geometrischer Toleranzen. Dieser Paradigmenwechsel wird durch die zunehmende Leistungsfähigkeit signalanalytischer Methoden und maschineller Lernverfahren getrieben, wobei die Ansätze hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit, der Tiefe und Ganzheitlichkeit der Merkmalsextraktion sowie der Unsicherheitsquantifizierung stark variieren.

Die verwendeten Körperschallsignale werden dabei typischerweise maschinennah und prozessintegriert erfasst, da sie während der Bearbeitung direkt an der Werkzeugmaschine aufgenommen werden und somit eine kontinuierliche, in-process Überwachung des Fertigungsprozesses ermöglichen.

3.3.1 Vorhersage von Bauteilqualität

Hinsichtlich der Vorhersage von Bauteilqualität und geometrischen Abweichungen lässt sich eine klare Differenzierung zwischen indirekten Indikatoren und expliziten geometrischen Qualitätsmerkmalen feststellen. Etablierte Ansätze fokussieren häufig auf die Korrelation von Signaleigenschaften mit Oberflächenparametern wie der Rauheit (R_a) und adressieren damit nur eingeschränkt die geometrische Bauteilqualität. So untersuchten Beggan et al. (1999) die Abweichung gemessener AE-Signale von theoretischen Modellen, um Rückschlüsse auf die Oberflächengüte beim Drehen zu ziehen. Ähnlich dazu etablierten Albers et al. (2017) AE-Indikatoren, die nicht nur Werkzeugbrüche detektieren, sondern auch Korrelationen zum Bauteildurchmesser und zur Oberflächenrauheit in der Serienproduktion aufweisen.

Eine deutlich höhere Relevanz im Kontext der geometrischen Qualitätsbewertung weisen neuere Arbeiten auf, die explizite geometrische Abweichungen als Zielgrößen modellieren. Schiller et al. (2023) demonstrierten beim Wälzfräsen von Mikro-Zahnradern die Möglichkeit, mittels überwachten Lernens konkrete Qualitätsklassen für die Gesamtprofilabweichung

(F_α) und den Wälzabweichungsfehler (Overall Transmission Error, OTE) vorherzusagen. Parallel dazu zeigten Han et al. (2022) einen physikalisch motivierten Ansatz, bei dem Vibrationssignale durch Frequenzbereichsintegration in Wegsignale überführt werden, um explizite geometrische Fehler wie Profil- (F_α), Teilungs- (F_p) und Flankenlinienabweichungen (F_β) zu quantifizieren.

Abseits kontinuierlicher geometrischer Größen befasst sich ein Teil der Forschung mit der Detektion diskreter Defekte, wie etwa der Identifikation von Poren in Gussteilen während der zerspanenden Bearbeitung (Gauder et al. 2022a). Im Kontrast dazu verharren andere Ansätze auf der Ebene der reinen Werkzeugzustandsüberwachung (Liu et al. 2019) oder der Detektion von Getriebefehlern wie Pitting und Zahnbruch (Erkaya et al. 2016), ohne eine direkte geometrische Qualitätsvorhersage zu ermöglichen.

3.3.2 Merkmalsextraktion und Datenauswertung

Die Tiefe und Ganzheitlichkeit der Merkmalsextraktion stellt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der untersuchten Arbeiten dar und spiegelt den technologischen Fortschritt der Signalverarbeitung wider. Frühe Ansätze stützten sich häufig auf isolierte Zeitbereichsmerkmale oder einfache Frequenzanalysen und bilden damit nur einen begrenzten Ausschnitt der Prozessdynamik ab. Beggan et al. (1999) führten beispielsweise den Parameter AE_{RMS20} ein – den Wert, unterhalb dessen 20 % der RMS-Datenpunkte liegen –, um den stochastischen Einfluss von Spänebrüchen zu filtern und das kontinuierliche Schneidsignal zu isolieren. Auch Galczyński (1984) und König et al. (1992) nutzten frequenzselektive Analysen, etwa in Terzbandbreiten oder durch Gleichrichtung gefilterter Signale, um verschleißkorrelierte Frequenzbänder zu identifizieren.

Mit der Zunahme an Rechenleistung verschob sich der Fokus hin zu komplexeren Zeit-Frequenz-Transformationen, die eine umfassendere Beschreibung instationärer Zerspanungsprozesse ermöglichen. Liu et al. (2019) nutzten die Wavelet Packet Decomposition, um statistische Merkmale aus spezifischen Frequenzbändern zu extrahieren, die anschließend mittels Varianzinflationsfaktor (VIF) und schrittweiser Regression selektiert wurden.

Eine besonders umfangreiche Merkmalsextraktion zeigen Schiller et al. (2023), die Merkmale aus dem Rohsignal, der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) sowie der diskreten und kontinuierlichen Wavelet-Transformation (DWT/CWT) kombinieren und mittels *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA) bewerten. Die zugehörige Datenpipeline ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Dabei werden Körperschallsignale, Prozessparameter und geometrische Messdaten der gefertigten Zahnräder integriert verarbeitet. Die extrahierten Merkmale werden statistisch bewertet und selektiert, bevor sie als Eingangsgrößen für überwachte Lernverfahren zur Klassifikation der Bauteilqualität dienen.

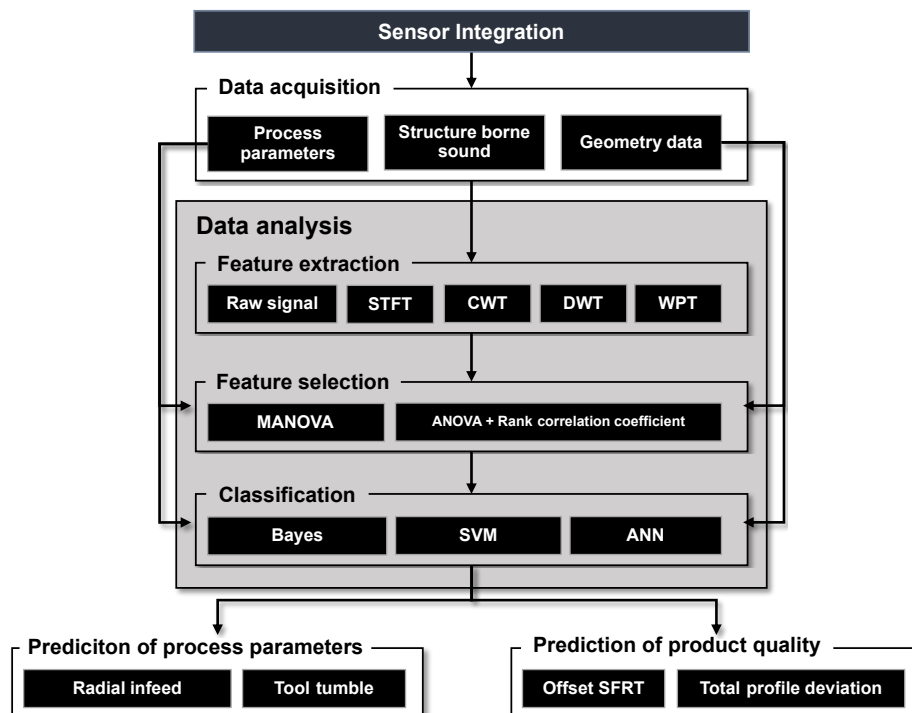


Abbildung 3.1: Ansatz Schiller et al. (2023).

Den derzeitigen Stand der Forschung in Bezug auf die Merkmalsabstraktion markieren Deep-Learning-Ansätze, wie sie von Gauder et al. (2022a) vorgestellt wurden: Hierbei werden AE-Signale in Spektrogramme (Zeit-Frequenz-Bilder) überführt und durch Convolutional Neural Networks (CNNs) verarbeitet, wodurch eine automatisierte und hochdimensionale Merkmalsextraktion erfolgt, die klassische Feature-Engineering-Ansätze ergänzt oder ersetzt.

3.3.3 Betrachtung von Unsicherheiten

Die Quantifizierung von Prädiktionsunsicherheiten wird im aktuellen Stand der Forschung nur punktuell adressiert. Die meisten Arbeiten beschränken sich auf deterministische Vorhersagen und bewerten deren Güte über statistische Kennzahlen wie Konfusionsmatrizen (Schiller et al. 2023) oder Varianzanalysen (ANOVA) (Albers et al. 2017). Diese liefern Aussagen zur Modellleistung, erfassen jedoch keine Unsicherheit im metrologischen Sinne.

Eine systematische Differenzierung und Verknüpfung relevanter Unsicherheitsquellen entlang der Verarbeitungskette – von der Sensorik über die Signalverarbeitung bis hin zum datengetriebenen Modell – wird dabei nicht vorgenommen. Entsprechend bleibt auch eine konsistente Fortpflanzung dieser Einflüsse in das Prädiktionsergebnis, wie sie etwa im Rahmen des GUM vorgesehen ist, weitgehend unberücksichtigt.

Einzelne Arbeiten greifen Teilaspekte auf: Han et al. (2022) validieren ihre Modelle experimentell, verzichten jedoch auf probabilistische Unsicherheitsmaße. Gauder et al. (2022a) nutzen Monte-Carlo-Dropout zur Abschätzung modellseitiger Unsicherheiten, ohne diese mit weiteren Unsicherheitsquellen zu verknüpfen.

Damit fehlt eine integrierte Betrachtung, die sensorische und modellbedingte Einflüsse gemeinsam erfasst und in eine durchgängige Unsicherheitsaussage überführt – eine Voraussetzung für den Einsatz in regelungsnahen und sicherheitskritischen Anwendungen.

3.4 Vergleich von Ansätzen zur Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung

Die Entwicklung von Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung hat sich historisch von offline-basierten Korrekturmethode hin zu zunehmend prozessintegrierten Ansätzen entwickelt. Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal der betrachteten Arbeiten liegt dabei in der zeitlichen Verfügbarkeit von Qualitätsinformationen sowie in der Frage, in welchem Umfang diese Informationen zur Anpassung des Fertigungsprozesses genutzt werden.

Frühe grundlegende Arbeiten, wie die von Fan et al. (2008), adressierten die Notwendigkeit, Fertigungsabweichungen bei Spiralkegel- und Hypoidrädern durch eine Rückführung von Messdaten zu korrigieren. Der dort vorgestellte Ansatz basiert auf der „Universal Motion Concept“-Theorie und nutzt eine Sensitivitätsmatrix, um Zusammenhänge zwischen Maschinenbewegungen höherer Ordnung und Zahnflankenfehlern analytisch zu beschreiben (Fan et al. 2008). Obwohl dieser Ansatz als „Closed-Loop Correction Process“ bezeichnet wird, erfolgt die Qualitätsbewertung auf Basis von Koordinatenmessungen außerhalb des Fertigungsprozesses. Die Qualitätsinformationen stehen somit erst zeitverzögert zur Verfügung, was zu einer chargenübergreifenden Regelung mit signifikanter Regelungstotzeit führt.

Ein ähnliches Verständnis zeigt Gravel (2013), bei dem ein Qualitätsregelkreis aus Fertigung, Messung und Korrektur definiert wird, die Qualitätsbewertung jedoch primär auf offline durchgeführten topografischen Messungen basiert. Auch hier stehen die Qualitätsinformationen nicht unmittelbar im Prozess zur Verfügung, wodurch die Nutzung für eine zeitnahe Prozessanpassung eingeschränkt ist.

3.4.1 Minimierung der Regelungstotzeit

Einen ersten Schritt in Richtung einer Reduktion der Regelungstotzeit stellen Ansätze dar, die die Qualitätsbewertung näher an den Fertigungsprozess verlagern. So schlagen Wang et al. (2015) für das Profilschleifen von schrägverzahnten Stirnrädern eine On-machine-Messung vor, bei der topografische Fehler direkt auf der Maschine erfasst werden. Dadurch können

Qualitätsinformationen deutlich früher bereitgestellt werden als bei externen Messsystemen. Die Messung erfolgt jedoch nicht vollständig prozessintegriert während der Bearbeitung, sondern in diskreten Schritten. Die Regelungstotzeit wird dadurch reduziert, jedoch nicht vollständig eliminiert. Die abgeleiteten Korrekturgrößen werden auf Basis analytischer Modelle berechnet und zur Anpassung der Maschinenbewegungen genutzt (Wang et al. 2015).

Auch neuere Arbeiten zur Fehlerkorrektur bei Hypoidrädern (Li et al. 2025) fokussieren primär auf die präzise Bestimmung von Korrekturgrößen durch fortgeschrittene Optimierungsverfahren. Die zeitliche Verfügbarkeit der zugrunde liegenden Qualitätsinformationen wird dabei jedoch nicht explizit adressiert, sodass die Einbindung in einen zeitnahen Regelkreis offen bleibt.

Den derzeit höchsten Integrationsgrad hinsichtlich der zeitlichen Verfügbarkeit von Qualitätsinformationen beschreibt Gauder (2024) für die Mikro-Verzahnungsfertigung. Hier wird ein In-line-Qualitätsregelkreis realisiert, der eine 100 %-Prüfung innerhalb der Taktzeit (unter 5 min) ermöglicht. Die Qualitätsinformationen stehen somit unmittelbar während beziehungsweise direkt nach dem Fertigungsprozess zur Verfügung und können zeitnah zur Prozessanpassung genutzt werden (Gauder 2024). Der zugrunde liegende Aufbau des Regelkreises ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

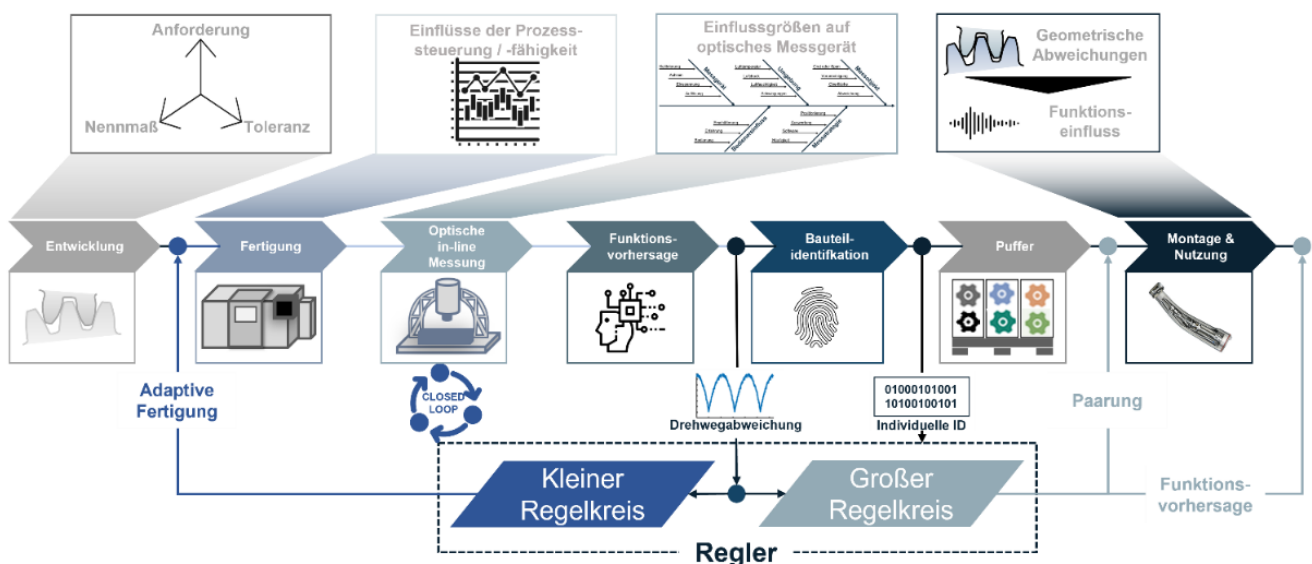


Abbildung 3.2: Ansatz nach Gauder (2024). Es wird zwischen einem „kleinen“ Regelkreis zur fertigungstechnischen Regelung auf Basis von Funktionsvorhersagen und einem „großen“ Regelkreis zur Qualitätsregelung durch organisatorische Maßnahmen, wie etwa die Bauteilpaarung, unterschieden.

Die gewonnenen Qualitätsinformationen werden zur Anpassung von Prozessparametern genutzt, wodurch eine enge Kopplung zwischen Qualitätsbewertung und Fertigungsprozess

erreicht wird. Die Regelung erfolgt innerhalb eines einzelnen Fertigungszyklus beziehungsweise zwischen unmittelbar aufeinanderfolgenden Zyklen, wodurch die Regelungstotzeit deutlich reduziert wird.

Im Vergleich zu den zuvor betrachteten Ansätzen wird damit eine signifikant verbesserte zeitliche Integration der Qualitätsbewertung in den Fertigungsprozess erreicht. Gleichzeitig basiert die Qualitätsbewertung weiterhin auf einem separaten Messschritt, sodass die Informationsgewinnung nicht vollständig aus prozessintegrierten Sensorsignalen erfolgt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass moderne Ansätze zur Qualitätsregelung eine zunehmende Integration der Qualitätsbewertung in den Fertigungsprozess anstreben, um die Regelungstotzeit zu minimieren oder vollständig zu eliminieren. Diese Entwicklung ist jedoch bislang primär für Stirn- und Kegelräder adressiert worden. Für die Fertigung von Kronenrädern stellt sich die Situation deutlich anders dar.

3.4.2 Qualitätsregelung in der Herstellung von Kronenrädern

Spezifisch für die Fertigung von Kronenrädern stellen Guo et al. (2022) und Yan et al. (2024) Ansätze vor, die zwar die Grundlage für eine gezielte Prozessanpassung bilden, jedoch primär auf die analytische Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen fokussieren.

Yan et al. (2024) entwickeln eine „Approximate Grinding Method“, mit der geometrische Abweichungen durch Anpassung von Maschinenparametern reduziert werden können. Ähnlich leiten Guo et al. (2022) ein Sensitivitätsmodell ab, das Maschinenparameter mit resultierenden Zahnflankenfehlern verknüpft. Beide Arbeiten ermöglichen somit prinzipiell eine Regelung auf Basis geometrischer Qualitätsinformationen.

Die zugrunde liegenden Qualitätsinformationen werden jedoch nicht prozessintegriert bereitgestellt, sodass deren Nutzung zur Prozessanpassung typischerweise mit zeitlicher Verzögerung erfolgt. Eine explizite Minimierung der Regelungstotzeit oder eine Integration in prozessnahe beziehungsweise In-line-Regelkreise wird nicht adressiert.

3.5 Identifiziertes Forschungsdefizit und Ableitung des Handlungsbedarfs

Die vorangegangene Analyse des Stands der Technik verdeutlicht, dass die Fertigung von Mikro-Kronenrädern an einer Schnittstelle zwischen hoher geometrischer Komplexität und extremen messtechnischen Anforderungen steht. Während für Makro-Verzahnungen und Standard-Stirnradgeometrien bereits fortgeschrittene Lösungen existieren, lassen sich für die Qualitätssicherung von Mikro-Kronenrädern drei zentrale Forschungslücken identifizieren, die sich aus einer systematischen Gegenüberstellung in Abbildung 3.3 ergeben.

1. **Mangelnde Standardisierung und geometrische Merkmalsfragmentierung** Für Kronenräder existiert kein einheitliches Beschreibungsmodell, das analog zur VDI 2612 (VDI/VDE 2612 Blatt 1 2024) eine Brücke zwischen globalen Flankenabweichungen und prozessspezifischen Fehlerursachen schlägt. Die Literatur zeigt eine Dichotomie: Entweder werden hochgenaue, aber isolierte Teilungsmessungen durchgeführt (Lin et al. 2016), oder es erfolgt eine rein mathematische Flächenrekonstruktion ohne technologische Rückführung (Lu et al. 2024). Es fehlt eine systematische Merkmalsextraktion, die die komplexen topologischen Abweichungen der Kronenradflanke in korrigierbare Maschinenparameter übersetzt.
2. **Fehlende Unsicherheitsquantifizierung in der Prognosekette** Ein kritisches Defizit zeigt sich im Umgang mit stochastischen Einflüssen. Während taktile Verfahren mit deterministischen Ausrichtemodellen arbeiten (Tao et al. 2023), verbleiben die meisten Ansätze der körperschallbasierten Überwachung bei reinen Punktvorhersagen (Schiller et al. 2023). Da Mikro-Verzahnungen aufgrund ihrer geringen Modulgrößen besonders sensitiv auf kleinste Prozessschwankungen reagieren, stellt die fehlende GUM-konforme Unsicherheitsbetrachtung ein wesentliches Hindernis für den industriellen Einsatz dar. Ohne ein Maß für die Vorhersagekonfidenz bleibt die Integration datengetriebener Modelle in geschlossene Regelkreise risikobehaftet.
3. **Technologische Lücke bei hauptzeitparallelen In-line-Regelkreisen** Die zeitliche Entkopplung von Fertigung und Prüfung stellt bei Mikro-Bauteilen das größte Hemmnis für eine Null-Fehler-Produktion dar. Analytische Modelle für Kronenräder sind bislang primär auf Offline-Korrekturen ausgelegt (Yan et al. 2024). Optische In-line-Ansätze für Mikro-Verzahnungen erreichen zwar eine hohe Präzision, stoßen jedoch mit Messzeiten von mehreren Minuten pro Bauteil an wirtschaftliche Grenzen (Gauder 2024). Es existiert bislang kein Ansatz, der die hohe Dynamik von Körperschallsignalen nutzt, um die spezifische Flankengeometrie von Mikro-Kronenrädern während des Prozesses zu bewerten und diese Informationen für eine echte In-line-Regelung nutzbar zu machen.

Aus den skizzierten Defiziten ergibt sich, dass eine durchgängige Methodik fehlt, welche die geometrische Qualitätsbeschreibung mikroverzahnter Bauteile systematisiert, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge quantifizierbar macht und eine prozessnahe Prognose sowie Kompensation von Qualitätsabweichungen erlaubt. Die daraus resultierenden Herausforderungen werden im Rahmen dieser Arbeit in Form konkreter Forschungsfragen operationalisiert, anhand derer der methodische Lösungsansatz strukturiert wird.

○ nicht erfüllt ◐ wenig erfüllt ◑ teilweise erfüllt ● erfüllt	Bewertungskriterien	[1]				[2]				[3]	
		Berücksichtigung von Mikroverzahnungen	Berücksichtigung von Kronenrädern	Ganzheitliche Geometrieauswertung	Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen für Abweichungen	Maschinennahe Sensorintegration	Ganzheitliche Merkmalsextraktion	Geometrische Qualitätsvorsorge	Quantifizierung von Prädiktionsunsicherheiten	Prozessnahe Qualitätsbewertung	Maschinennahe Qualitätsregelung
Autoren											
[1] Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Kronenrädern											
Lu et al. (2024)		○	●	◐	●	○	○	◐	●	◐	○
Bilen et al. (2024)		●	●	●	◐	○	○	◐	◐	◐	○
Tao et al.(2023)		○	●	◐	◐	○	○	◐	◐	◐	○
Wang et al. (2022a)		○	●	◐	◐	○	○	◐	○	◐	○
Lu et al. (2022)		○	●	●	◐	○	○	◐	○	◐	○
Lin et al. (2016)		○	●	◐	◐	○	○	○	◐	◐	○
[2] Ansätze zur körperschallbasierten Prozessüberwachung											
Schiller et al. (2023)		●	○	○	○	●	●	◐	○	◐	◐
Han et al. (2022)		○	○	●	◐	◐	◐	●	○	●	◐
Gauder et al. (2022)		○	○	○	◐	●	◐	○	◐	○	○
Liu et al. (2019a)		○	○	○	◐	◐	●	○	○	◐	○
Albers et al. (2017)		○	○	○	◐	●	◐	◐	○	○	○
Erkaya et al. (2016)		○	○	○	○	◐	◐	○	○	○	○
Beggan et al. (1999)		○	○	○	◐	◐	◐	◐	○	◐	○
König et al. (1992)		○	○	○	○	●	◐	○	○	○	○
Galczynsky (1984)		○	○	○	○	◐	◐	○	◐	○	○
[3] Ansätze zur Qualitätsregelung in der Verzahnungsfertigung											
Li et al. (2025)		○	◐	◐	●	○	○	◐	◐	○	◐
Yan et al. (2024)		○	●	◐	◐	○	○	◐	○	○	◐
Gauder (2024)		●	○	◐	●	◐	◐	●	◐	●	●
Guo et al. (2022)		○	●	◐	◐	○	○	◐	○	◐	◐
Wang et al. (2015)		○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	●
Gravel (2013)		○	○	◐	◐	○	○	●	○	◐	●
Fan et al. (2008)		○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	◐

Abbildung 3.3: Harvey Balls Matrix zur Bewertung der betrachteten Ansätze.

3.6 Abgeleitete Forschungsfragen

Ausgehend vom abgeleiteten Forschungsdefizit werden folgende konkrete Forschungsfragen formuliert, die eine Strukturierung der Arbeitspakete sowie eine Operationalisierung der Forschungshypothesen aus Abschnitt 1.3 ermöglichen:

FF1: Geometrische Qualitätsbeschreibung Wie lassen sich geometrische Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern so definieren und auswerten, dass relevante Abweichungen robust erfasst und für eine prozessnahe Bewertung nutzbar gemacht werden können?

FF2: Ursache-Wirkungs-Analyse Wie können Zusammenhänge zwischen Prozessabweichungen, Stellgrößen und geometrischen Qualitätsmerkmalen von Mikro-Kronenrädern systematisch analysiert und quantifiziert werden?

FF3: Datengetriebene Qualitätsvorhersage In welchem Umfang lassen sich geometrische Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern auf Basis prozessintegrierter Körperschallsignale durch datengetriebene Modelle vorhersagen?

FF4: Unsicherheit und Ersatzfähigkeit Welche Unsicherheiten sind mit den modellbasierten Qualitätsvorhersagen verbunden und sind diese hinreichend gering, um klassische Labormessungen in prozessbegleitenden Anwendungen zu substituieren?

FF5: Qualitätsregelung Wie kann auf Basis der vorhergesagten Qualitätsgrößen eine Regelungsstrategie entwickelt werden, die Prozessabweichungen kompensiert und die geometrische Bauteilqualität gezielt verbessert?

4 Lösungsansatz

Ausgehend von den in Abschnitt 3.5 identifizierten drei zentralen Forschungslücken sowie den daraus abgeleiteten Forschungsfragen (Abschnitt 3.6) wird im Folgenden ein methodischer Lösungsansatz zur prozessnahen, datengetriebenen Qualitätsbewertung und -regelung von Mikro-Kronenrädern im Wälzfräsprozess entwickelt. Ziel ist die Erarbeitung und experimentelle Fundierung der methodischen Grundlagen eines Virtual-Metrology-basierten Qualitätsregelkreises, der geometrische Qualitätskennwerte aus prozessintegrierten Körperschallsignalen prädiziert, deren Vorhersageunsicherheit quantifiziert und auf dieser Basis regelungsrelevante Entscheidungen ermöglicht.

Zur Strukturierung des Lösungsansatzes werden im Folgenden zunächst Zielsetzung und Abgrenzung des entwickelten Ansatzes erläutert (Abschnitt 4.1). Anschließend wird die methodische Struktur der Arbeitspakete sowie deren Informationsflüsse beschrieben (Abschnitt 4.2). Darauf aufbauend wird der betrachtete industrielle Anwendungsfall eingeführt (Abschnitt 4.3), bevor abschließend die zugrunde liegenden Annahmen und Randbedingungen der Arbeit dargelegt werden (Abschnitt 4.4).

4.1 Zielsetzung und Abgrenzung

Der Ansatz adressiert insbesondere die bislang fehlende prozessnahe Bewertbarkeit der Verzahnungsgeometrie, die hohe Regelungstotzeit infolge zeitlich entkoppelter Offline-Messungen sowie die in bestehenden Arbeiten häufig unzureichend berücksichtigte Unsicherheit datengetriebener Qualitätsprognosen. Anstelle zeitintensiver hochgenauer Labormesstechnik wird die geometrische Qualität aus Körperschalldaten abgeleitet und für eine adaptive Prozessführung herangezogen. Damit geht der Ansatz über eine reine Prozessüberwachung hinaus und zielt explizit auf eine regelungsrelevante Rückführung von Qualitätsinformationen ab.

Kernidee ist die Nutzung von Körperschallsignalen als prozessintegrierter Informationsträger, die während der Zerspanung erfasst werden. Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt, zeichnet sich Körperschall durch eine hohe zeitliche Auflösung, eine ausgeprägte Sensitivität gegenüber mikrogeometrischen Eingriffsvorgängen sowie eine nicht-invasive Integration in bestehende Maschinenstrukturen aus (Schiller et al. 2023). Die erfassten Signale werden signalverarbeitet, in Merkmalsgrößen transformiert und mittels datengetriebener Modelle des maschinellen Lernens in geometrische Qualitätskennwerte überführt. Dieser Ansatz wird im Kontext dieser Arbeit als „Virtual Metrology“ verstanden, d. h. als modellbasierte, sensorgetriebene Schätzung geometrischer Qualitätsmerkmale ohne direkte physische Vermessung des Werkstücks (Dreyfus et al. 2022).

Ein zentrales Gestaltungsprinzip des vorgestellten Lösungsansatzes ist die explizite Quantifizierung von Unsicherheiten entlang der gesamten Vorhersagepipeline. Messunsicherheiten der prozessintegrierten Sensorsignale, Unsicherheiten der referenzierenden Messverfahren sowie modell- und datenbedingte Unsicherheiten werden nicht als nachgelagerte Effekte behandelt, sondern systematisch quantifiziert und in die Bewertung der prädiktiven Qualitätsaussagen integriert. Ziel ist die Ableitung vertrauenswürdiger Prognosen, die als belastbare Grundlage für regelungsrelevante Entscheidungen dienen können.

Abbildung 4.1 zeigt das Zielbild des entwickelten Ansatzes. Im Zentrum steht ein maschinen-naher Qualitätsregelkreis, in dem prozessintegriert erfasste Körperschallsignale zu Merkmalsgrößen transformiert, mittels datengetriebener Modelle in geometrische Qualitätskennwerte überführt (AP3) und unter expliziter Berücksichtigung von Unsicherheiten (AP4) zur adaptiven Prozessführung (AP5) genutzt werden. Grundlage hierfür bilden die Quantifizierung und Bewertung geometrischer Abweichungen von Kronenrädern (AP1) sowie grundlegende Untersuchungen des Wälzfräsprozesses hinsichtlich Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen (AP2).

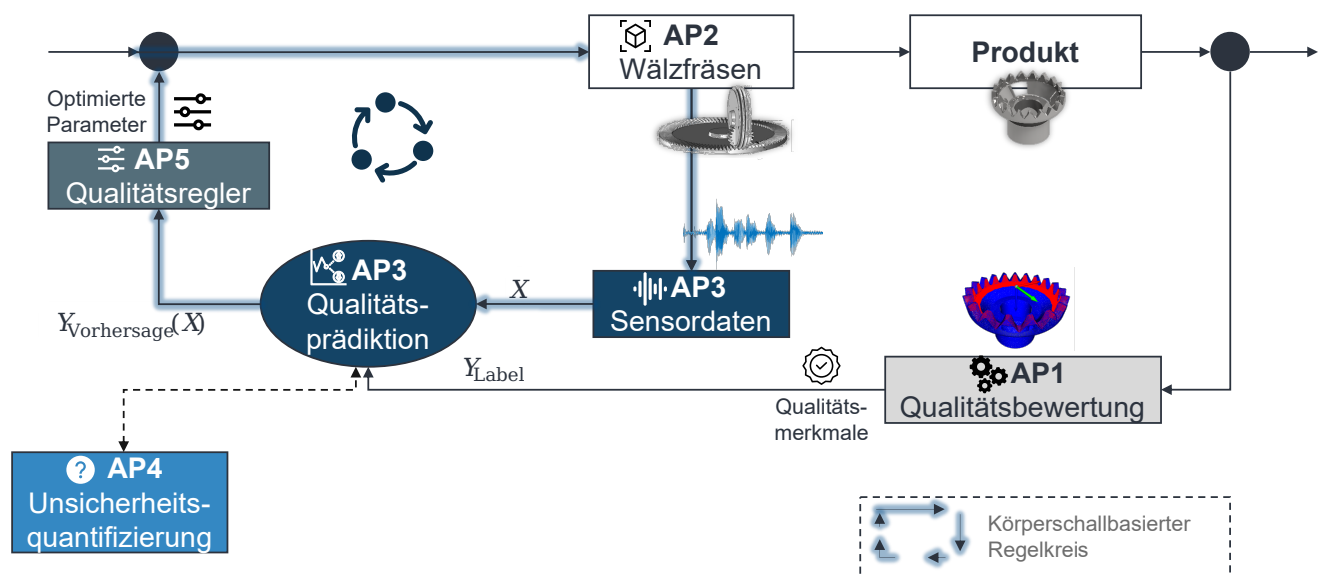


Abbildung 4.1: Zielbild des VM-basierten Qualitätsregelkreises für Mikro-Kronenräder. Darstellung Wälzfräsen entnommen aus Litvin et al. (2002).

Das in Abbildung 4.1 dargestellte Zielbild beschreibt das konzeptionelle Endziel des vorgestellten Ansatzes. Im Rahmen dieser Arbeit werden die hierfür notwendigen methodischen Grundlagen – Geometriebeschreibung, Prozessverständnis, prädiktive Modellbildung und Unsicherheitsquantifizierung – erarbeitet und experimentell fundiert. Die vollständige experimentelle Demonstration der geschlossenen Regelkette, von der körperschallbasierten Vorhersage bis zur automatisierten Stellgrößenanpassung am realen Prozess, ist ausdrücklich nicht Gegenstand dieser Arbeit und bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten.

4.2 Struktur des Lösungsansatzes

Während Abbildung 4.1 das konzeptionelle Zielbild des VM-basierten Qualitätsregelkreises visualisiert, legt der folgende Abschnitt nicht nur die methodische Struktur der Arbeitspakete und ihre Informationsflüsse dar, sondern beschreibt zugleich die spezifischen Zielsetzungen der einzelnen Kapitel im Kontext des Gesamtansatzes.

Jedes Arbeitspaket adressiert dabei eine klar abgegrenzte Teilfragestellung (vgl. Abschnitt 3.6) und liefert einen notwendigen methodischen Baustein für die Realisierung des übergeordneten Ziels eines virtual-metrology-basierten Qualitätsregelkreises. Die Kapitel sind somit nicht isoliert zu verstehen, sondern bauen systematisch aufeinander auf und sind über gerichtete Informationsflüsse miteinander verknüpft.

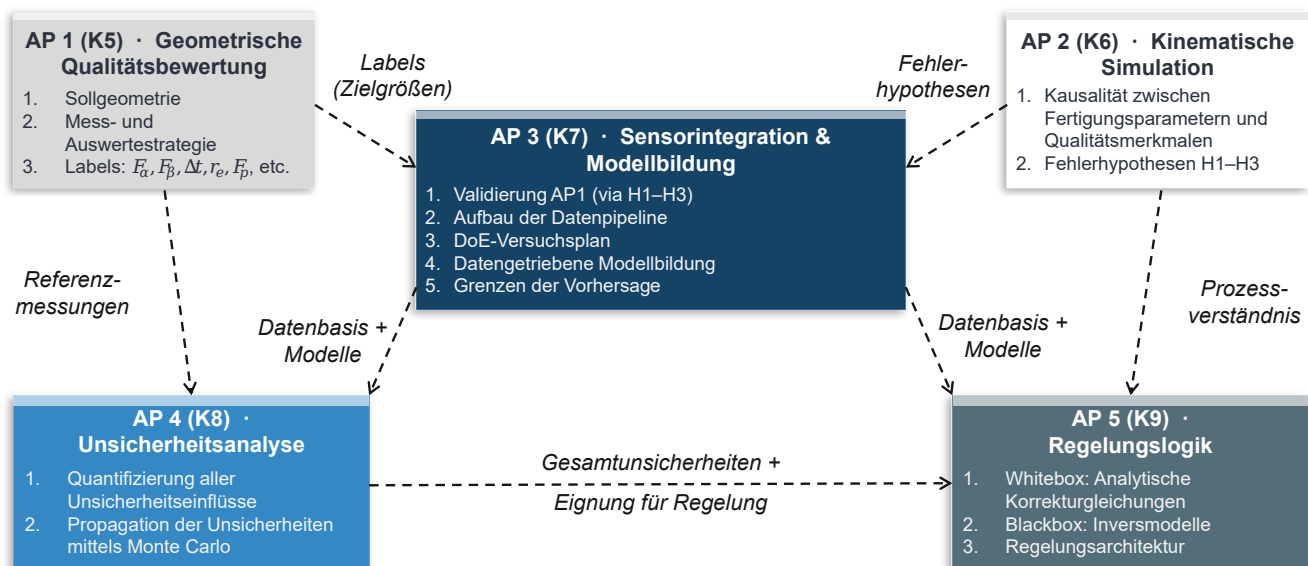


Abbildung 4.2: Abhängigkeitsstruktur und Informationsflüsse zwischen den fünf Arbeitspaketen. Pfeile kennzeichnen gerichtete Informationsflüsse; Beschriftungen benennen den konkreten Inhalt (Labels, Fehlerhypothesen, Modelle, Unsicherheiten).

Arbeitspaket 1 (Kapitel 5, FF 1): Ausgangspunkt ist eine mathematisch exakte Sollgeometrie, gegen die die reale Bauteiloberfläche registriert wird. Neben in Anlehnung an die Stirnradnorm übertragenen Kennwerten werden neue, kronenradspezifische Merkmale eingeführt, die eine eindeutige Abbildung zentraler Fertigungsabweichungen auf messbare Größen ermöglichen.

Arbeitspaket 2 (Kapitel 6, FF 2): Da eine experimentelle Isolation einzelner Fehlerparameter bei Mikrobauteilen nur eingeschränkt möglich ist, werden die Fehlerhypothesen simulativ erarbeitet und beschreiben die charakteristischen geometrischen Signaturen der drei dominanten Prozessabweichungen Δz , Δx und Taumel.

Arbeitspaket 3 (Kapitel 7, FF 3, H2): Zunächst werden die in AP1 definierten Qualitätsmerkmale anhand der Fehlerhypothesen aus AP2 empirisch validiert. Anschließend wird eine statistisch geplante Versuchsreihe unter systematischer Variation von Δz , Δx und Taumel durchgeführt. Die Vorhersagepipeline – von Sensorintegration über Merkmalsextraktion bis zur Modellbildung – liefert Vorhersagemodelle (Qualitätsmerkmale aus Körperschall) sowie Inversmodelle (Prozessparameter aus Qualitätsmerkmalen).

Arbeitspaket 4 (Kapitel 8, FF 4, H3): Die Unsicherheitsanalyse nach GUM Supplement 1 berücksichtigt Labelunsicherheit (aus AP1), aleatorische Signalunsicherheit sowie epistemische Modellunsicherheit (aus AP3) und propagiert alle Beiträge per Monte-Carlo-Simulation zur merkmalspezifischen Gesamtunsicherheit.

Arbeitspaket 5 (Kapitel 9, FF 5): Der regelbasierte Ansatz leitet analytische Korrekturgleichungen aus den Kausalzusammenhängen aus AP2 ab; der datenbasierte Ansatz nutzt die Inversmodelle aus AP3. Die Unsicherheitsniveaus aus AP4 steuern, ob eine VM-Prädiktion direkt als Regeleingang genutzt werden kann oder durch einen Dämpfungsfaktor abgesichert wird.

4.3 Betrachteter Anwendungsfall

Als durchgängiger Anwendungsfall wird in dieser Arbeit die Fertigung von Mikro-Kronenrädern für Hochdrehzahl-Dentalinstrumente der Firma Dentsply Sirona betrachtet (Abbildung 4.3). Während der geschlossene Qualitätsregelkreis für das im selben Instrument verbaute Stirnrad bereits in Gauder (2024) adressiert wurde, steht in der vorliegenden Arbeit das Mikro-Kronenrad im Fokus. Die grundlegenden Anforderungen des Anwendungsfalls – Drehzahlen bis 200.000 U/min und funktionskritische Geometrieabweichungen im einstelligen Mikrometerbereich – wurden in Kapitel 1 eingeführt und werden hier nicht wiederholt.

Das Mikro-Kronenrad unterliegt aufgrund der hohen Drehzahlen besonders strengen Anforderungen an geometrische Qualität, Laufverhalten und Geräuschemission (VDI 2731 2009). Minimale geometrische Abweichungen wirken sich bei Mikroverzahnungen im Verhältnis zur Bauteilgröße deutlich stärker auf das Laufverhalten aus als bei Makroverzahnungen (Gorgels et al. 2007). Ein gestörtes Laufverhalten führt zu dominanten Frequenzanteilen und erhöhten Schwingungen, die vom Menschen als unangenehm wahrgenommen werden (Sampaio Fernandes et al. 2006).

Mechanische Schwingungen können dabei direkt in wahrnehmbare Belastungen übergehen (DIN EN ISO 5349-1 2001). Diese wirken sich sowohl auf Patienten als auch auf Bediener aus und können die Behandlungsbereitschaft negativ beeinflussen (McGrath et al. 2004; Toal 2008).

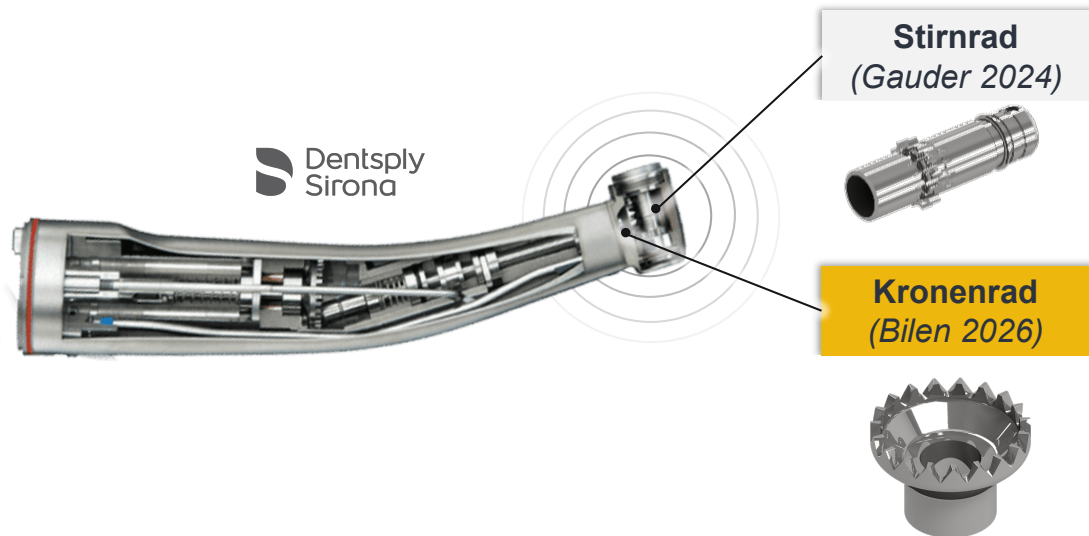


Abbildung 4.3: Modernes Dentalinstrument der Firma Dentsply Sirona im Schnitt. Das Instrument besteht im sogenannten Kopftrieb aus einer Kronenrad-Stirnrad-Paarung. (Quelle: Dentsply Sirona).

Die geometrischen Kenndaten der betrachteten Kronenrad–Stirnrad-Paarung sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Geometrische Kenndaten der im Anwendungsfall betrachteten Mikro-Kronenrad–Stirnrad-Paarung.

Parameter	Wert
Zähnezahl Stirnrad z_1	15
Zähnezahl Kronenrad z_2	19
Normalmodul m_n	0,25 mm
Normaleingriffswinkel α_n	20°
Halblückenwinkel Schneidrad η_b	4,785°
Kopfkreisdurchmesser Schneidrad D_a	4,424 mm
Fertigungsverfahren	Wälzfräsen

Die geometrische Qualitätsprüfung des Kronenrades erfolgt derzeit zeitlich entkoppelt vom Fertigungsprozess und überwiegend mittels hochauflösender, jedoch zeit- und ressourcenintensiver Computertomographie. Die Auswertung basiert sowohl auf individuell definierten geometrischen Merkmalen als auch auf globalen Abweichungsdarstellungen in Form von Falschfarbenbildern. Diese ermöglichen zwar eine qualitative Beurteilung, sind jedoch nur eingeschränkt für eine systematische Prozessbewertung oder eine geschlossene Qualitätsregelung geeignet. Die langen Mess- und Auswertezeiten verhindern eine zeitnahe Reaktion auf auftretende Abweichungen und erschweren eine adaptive, qualitätsorientierte Prozess-

führung. Diese Rahmenbedingungen motivieren den Einsatz des entwickelten VM-basierten Ansatzes.

4.4 Annahmen und Randbedingungen

Die Arbeit unterliegt vier methodischen Randbedingungen, die für die Interpretation aller nachfolgenden Ergebnisse grundlegend sind.

Fehlende Toleranzgrenzen: Für die in dieser Arbeit neu definierten geometrischen Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern existieren derzeit keine festgelegten industriellen Toleranzwerte. Dies ist eine direkte Konsequenz der in Abschnitt 3.5 identifizierten Normierungslücke: Weder standardisierte Bewertungsmodelle noch belastbare industrielle Erfahrungswerte liegen für diesen Bauteiltyp vor. Die Bewertung von Vorhersagegüten und Unsicherheiten erfolgt daher relativ, bezogen auf typische Größenordnungen geometrischer Abweichungen in der Mikrozerspanung im einstelligen Mikrometerbereich.

Fokussierung auf dominante Fehlerparameter: Die experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich auf drei Maschinenparameter – axialer Versatz Δz , tangentialer Versatz Δx und Taumel – die auf Basis von Prozessexpertise des Industriepartners als dominierende Fehlerquellen im betrachteten Wälzfräsprozess identifiziert wurden. Weitere potenzielle Einflussgrößen wie Werkzeugverschleiß oder thermische Drift werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Rein kinematische Prozessmodellierung: Das in AP2 entwickelte Simulationsmodell des Wälzfräsprozesses ist als rein kinematisch-geometrisches Modell ausgelegt. Physikalische Effekte wie Schnittkräfte, thermische Einflüsse sowie Material- und Verschleißphänomene werden bewusst nicht berücksichtigt. Die abgeleiteten Fehlerhypothesen und Korrekturgleichungen besitzen daher ausschließlich kinematische Gültigkeit; Prozesseinflüsse jenseits der geometrischen Kinematik bleiben unberücksichtigt.

Zeitlich begrenzter Untersuchungshorizont: Alle experimentellen Daten wurden innerhalb eines zeitlich begrenzten Untersuchungsfensters unter stabilen Prozessbedingungen erhoben. Während der Datenerfassung konnten keine systematischen Veränderungen beobachtet werden, sodass von stationären Verhältnissen ausgegangen wird. Langzeitphänomene wie Konzeptdrift, beispielsweise infolge von Werkzeugverschleiß oder Maschinenalterung (Gama et al. 2014), werden daher nicht berücksichtigt. Strategien zum Umgang mit Drift wurden in Bilen et al. (2025a) behandelt. Eine kontinuierliche Modellaktualisierung im Produktionseinsatz bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten.

5 Entwicklung einer Mess- und Auswertestrategie

Die vorangegangene Forschungs- und Literaturanalyse zeigt, dass für Mikro-Kronenräder nur fragmentierte Ansätze zur Qualitätsbewertung existieren. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Kapitel eine Mess- und Auswertestrategie zur Qualitätsbewertung von Mikro-Kronenrädern entwickelt. Ziel ist es, ausgehend von einer formalen mathematischen Beschreibung der Sollgeometrie (Abschnitt 5.1) geeignete Qualitätsmerkmale abzuleiten (Abschnitt 5.2 & Abschnitt 5.3), diese messtechnisch zu erfassen (Abschnitt 5.4) und in Form von Referenzdaten für die nachfolgende datengetriebene Qualitätsprädiktion bereitzustellen. Wesentliche Teile der in diesem Kapitel vorgestellten Auswertestrategie und Qualitätsmerkmale wurden vorab in Bilen et al. (2026c) veröffentlicht; die mathematische Beschreibung der Sollgeometrie basiert auf Gindin et al. (2025).

5.1 Mathematisches Modell der Kronenradgeometrie

Eine präzise Definition der Sollgeometrie ist Voraussetzung für einen reproduzierbaren Soll-Ist-Vergleich in der Qualitätssicherung von Verzahnungen. Für Mikro-Kronenräder existieren bislang jedoch nur begrenzt aussagekräftige analytische Beschreibungsmodelle.

Etablierte Ansätze, etwa nach Roth (2013) oder Litvin et al. (2000), weisen ein wesentliches Defizit auf: Geometrische Randbedingungen – insbesondere die Unterschnittsgrenze als Abgrenzung des funktional nutzbaren Flankenbereichs – werden nicht intrinsisch berücksichtigt (Gindin et al. 2025). Stattdessen erfordern diese Modelle zusätzliche, teils komplexe Erweiterungen zur Abbildung geometrischer Grenzen.

Für die messtechnische Auswertung ist dies kritisch, da Messpunkte aus unterschrittenen Bereichen zu systematischen Verzerrungen der Qualitätskennwerte führen und daher auszuschließen sind. Erweiterte Modelle, wie nach Hochrein et al. (2022), berücksichtigen diese Effekte, gehen jedoch mit erhöhter Modellkomplexität einher und basieren weiterhin auf vereinfachenden Annahmen, wie der „Ersatzzahnstangenannahme“, bei der die Profillinien näherungsweise als Geraden beschrieben werden (Gindin et al. 2025; Roth 2013).

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit das in Zusammenarbeit mit der Frenco GmbH entwickelte Geometriemodell nach Gindin et al. (2025) verwendet. Dieses leitet die Kronenradflanken direkt aus der realen Eingriffs kinematik eines evolventischen Schneidrades ab und ermöglicht ohne vereinfachende Annahmen eine Beschreibung des exakten Flankenverlaufs sowie der geometrischen Grenzen, einschließlich der Unterschnittsgrenze.

5.1.1 Koordinatensystem und geometrische Grundlagen

Zur Beschreibung der Eingriffsverhältnisse wird nach Gindin et al. (2025) ein werkstückfestes kartesisches Koordinatensystem eingeführt (vgl. Abbildung 5.1). Die X -Achse liegt auf der gemeinsamen Achse von Stirn- und Kronenrad, die Y -Achse entspricht der Zahnachse des Kronenrades und die Z -Achse beschreibt die Höhenrichtung.

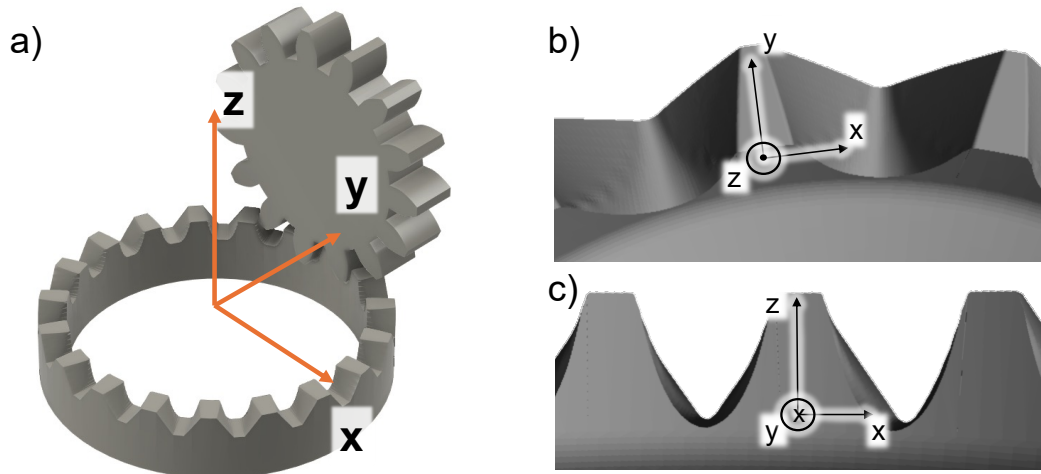


Abbildung 5.1: Geometrische Verhältnisse am Kronenrad nach Gindin et al. 2025.

Die Herleitung der Kronenradgeometrie erfolgt im Stirnschnitt des Kronenrades (XY -Ebene), da die Flankenlinien eines geradverzahnten Schneidrads dort als Geraden erscheinen.

Zunächst wird jedoch die Evolventengeometrie des Schneidrads im Stirnschnitt des Schneidrads (XZ -Ebene) betrachtet. Die in Abbildung 5.2 dargestellte Geometrie beschreibt die lokale Evolventenform des Schneidrads. Jeder Punkt P der Evolvente wird dabei durch den Parameter x , der dem Abstand der zugehörigen bildenden Geraden vom Grundkreis entspricht, eindeutig beschrieben. Der zugehörige Evolventenwinkel $\varphi(x)$ charakterisiert die Orientierung dieser Geraden im Raum.

Zusätzlich wird die Höhenkoordinate H eingeführt, welche die Lage der betrachteten Höhenebene im Stirnschnitt des Kronenrades (XY -Ebene) in Bezug auf die Mitte des Schneidrads beschreibt.

Weiterhin wird die Hilfsgröße W definiert, die sich aus der geometrischen Beziehung zwischen dem Grundkreis und der jeweiligen Höhenebene ergibt. Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, entspricht W dem Abstand des betrachteten Punktes P zum Grundkreis der Evolvente:

$$W = \sqrt{x^2 + H^2 - 1}.$$

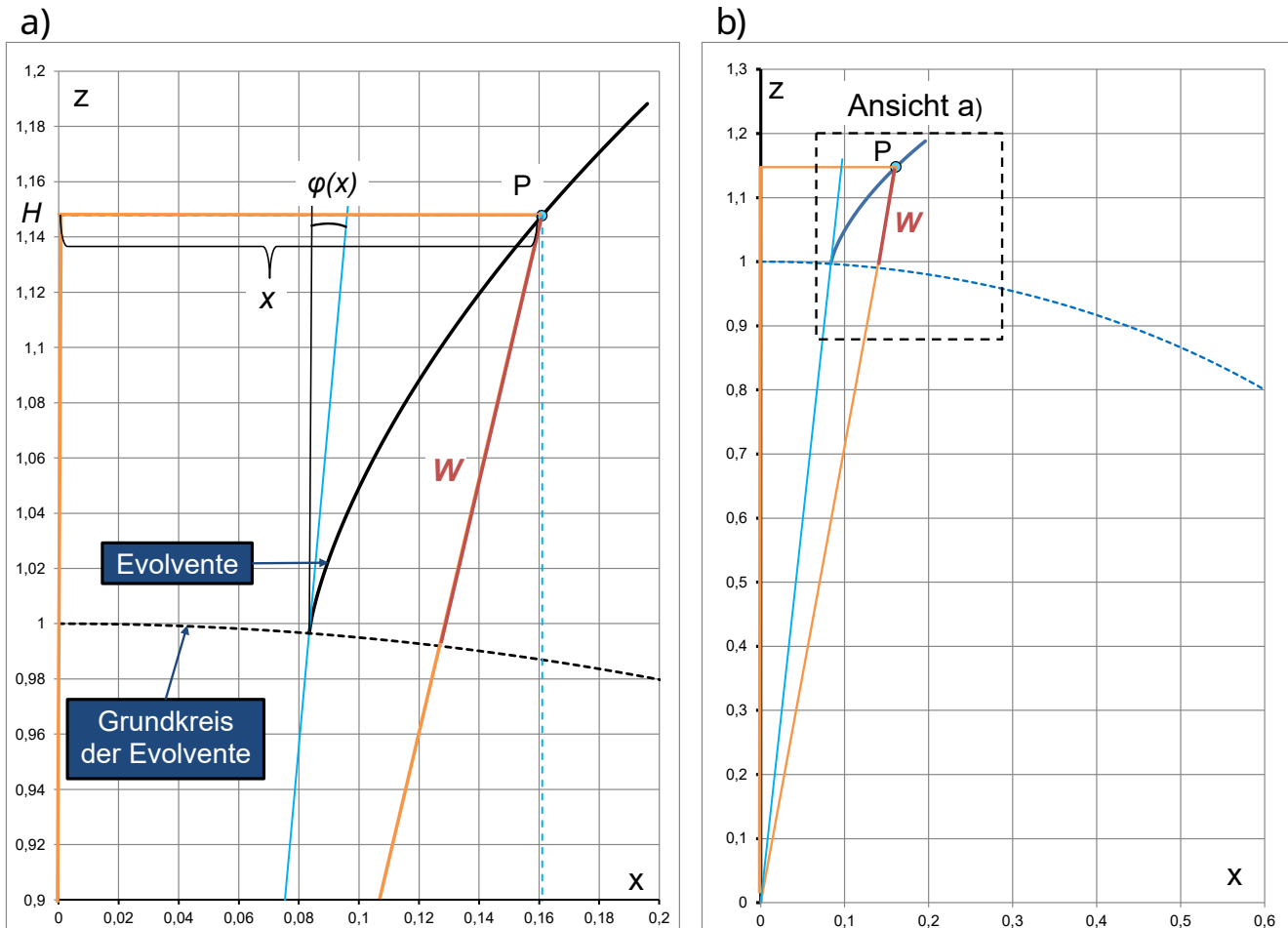


Abbildung 5.2: a) Schnittdarstellung des evolventischen Schneidrades in der XZ-Ebene. Abgebildet sind die eingeführten Beschreibungsgrößen x , H sowie der Drehwinkel der Evolvente ϕ und die Hilfsgröße W . b) Geometrische Herleitung der Hilfsgröße W (Gindin et al. 2025).

Die dargestellte Evolvente beschreibt somit die lokale Geometrie des Schneidrades. Die Kronenradflanke ergibt sich im nächsten Schritt durch die Berücksichtigung der relativen Bewegung zwischen Schneidrad und Werkstück im Abwälzprozess.

5.1.2 Mathematisches Modell zur Beschreibung der Zahnflanken

Die resultierende Kronenradflanke ergibt sich als Einhüllende der bildenden Flankenlinien des Schneidrades und lässt sich formal als Hüllkurve (Pferchkurve) einer Schar von Schneidradflanken beschreiben (vgl. Abbildung 5.3).

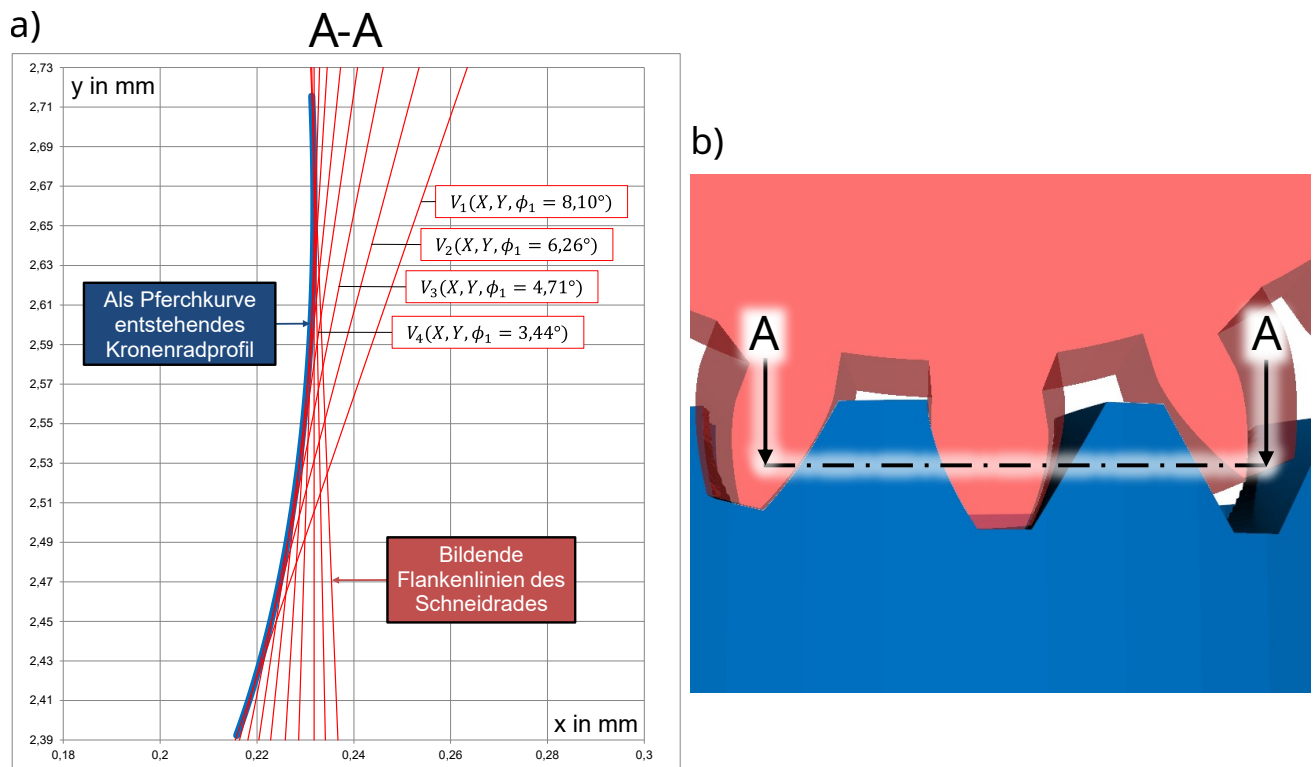


Abbildung 5.3: Links: Entstehung der Kronenradflanke im A-A-Schnitt durch die Pferchkurve der bildenden Flankenlinien des Stirnrades, rechts: Visualisierung des A-A-Schnitts in der XY-Ebene (Gindin et al. 2025).

Für ein geradzahntes Kronenrad ohne Achsversatz werden die bildenden Flankenlinien des Ritzels durch den Evolventenwinkel $\varphi(x)$ beschrieben, der vom Abstand x abhängt. Für die Kinematik des Schneidrades gilt:

$$\varphi(x) = \arctan\left(\frac{x}{H}\right) - W + \arctan(W).$$

Die Transformation in das Koordinatensystem des Kronenrades erfolgt unter Berücksichtigung der Übersetzung u . Der resultierende Drehwinkel $\Phi(x)$ des Kronenrades ergibt sich zu:

$$\Phi(x) = u \cdot (\varphi(x) - \eta_b), \quad 5.3$$

wobei η_b den halben Grundlückenwinkel des Schneidrades bezeichnet.

Durch Anwendung der Hüllbedingung $V(X, Y, \Phi) = 0$ und Lösung des resultierenden Gleichungssystems lassen sich die Koordinaten (X_p, Y_p) der Kronenradflanke parametrisch bestimmen (Gindin et al. 2025):

$$X_p = x \cdot \cos(\Phi(x)) - \frac{1}{u \cdot \varphi'(x)} \cdot \sin(\Phi(x)), \quad 5.4$$

$$Y_p = x \cdot \sin(\Phi(x)) + \frac{1}{u \cdot \varphi'(x)} \cdot \cos(\Phi(x)). \quad 5.5$$

Die Ableitung $\varphi'(x)$ beschreibt die Änderungsrate des Evolventenwinkels und bestimmt die lokale Krümmung der Flanke. Im Gegensatz zu vereinfachten Näherungsmodellen liefert dieses generierende Modell den exakten Verlauf der Normalenvektoren, was insbesondere für die Ausrichtung bei taktilen und optischen Messverfahren relevant ist.

5.1.3 Bestimmung der Unterschnittsgrenze

Mathematisch ergibt sich die Unterschnittsgrenze nach Gindin et al. (2025) aus einer Singularität des Gleichungssystems 5.4 und 5.5, an der der Übergang vom realen Flankenbereich zu einem rein formalen, geometrisch durchdrungenen Bereich erfolgt.

Die Lösung des Gleichungssystems liefert dabei nicht ausschließlich physikalisch realisierbare Punkte, sondern beschreibt eine vollständige Flankenlinie, die sich aus einem realen Abschnitt sowie einem imaginären Abschnitt zusammensetzt. Der Übergang zwischen beiden Bereichen wird durch den Punkt C gekennzeichnet. Während der Bereich bis C kinematisch erzeugbar ist, liegt der anschließende Abschnitt bereits innerhalb des Materialvolumens des benachbarten Zahns und besitzt somit keine physikalische Entsprechung.

Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, markiert der Punkt E das tatsächlich nutzbare Ende des Zahnprofils. Dieser Punkt entsteht nicht direkt aus der ursprünglichen Flankenbeschreibung, sondern resultiert aus der kinematischen Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück: Die erzeugenden Evolventenlinien des Schneidrades schneiden den zuvor gebildeten Flankenbereich und tragen diesen sukzessive ab. Dieser Prozess führt zur Ausbildung des

sogenannten Unterschnitts, bei dem Teile der ursprünglich berechneten Flanke entfernt werden.

Die Unterschnittsgrenze kann somit als Schnittbedingung zwischen der erzeugten Flankenlinie und den eingreifenden Werkzeugtrajektorien interpretiert werden. Ihre Bestimmung erfordert die konsistente Lösung des erweiterten Gleichungssystems unter Berücksichtigung der Auslaufbedingung des Werkzeugs. Der Punkt *E* definiert dabei die Grenze zwischen funktional nutzbarem und kinematisch zerstörtem Flankenbereich.

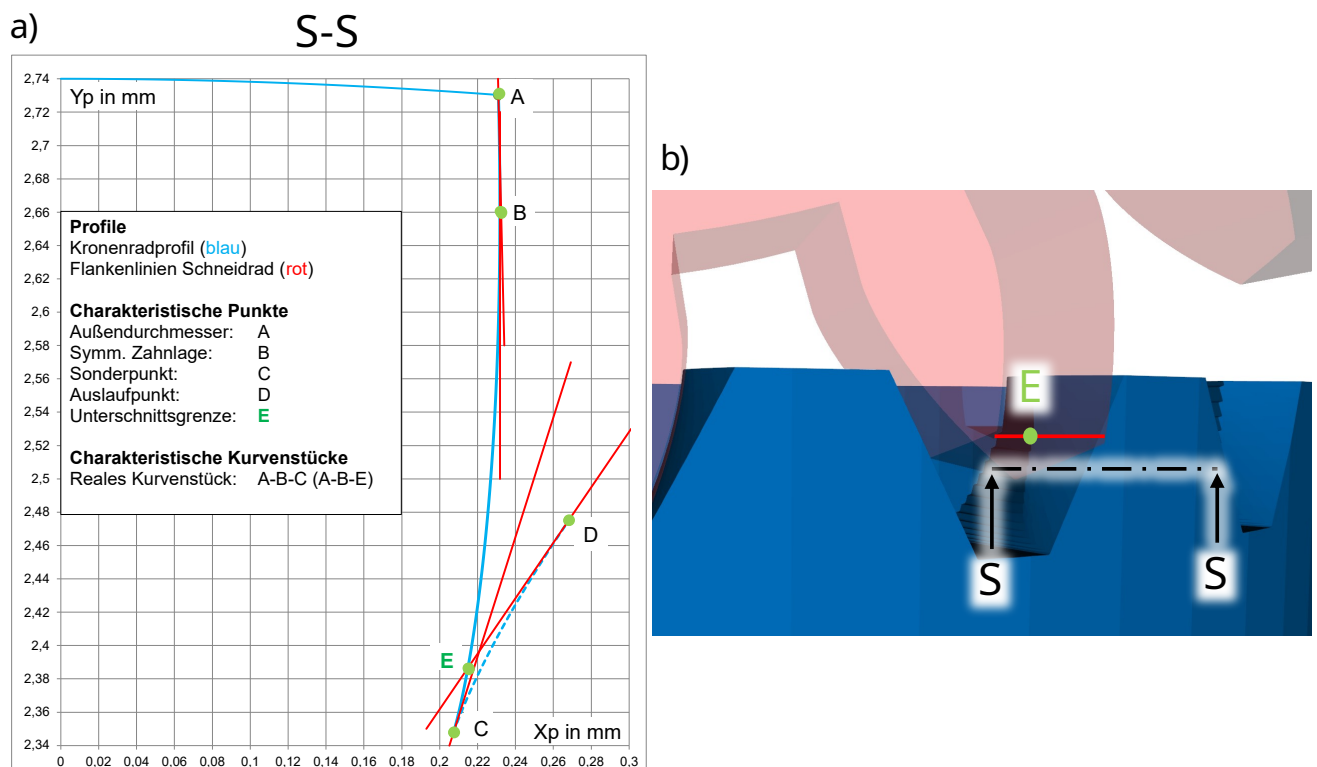


Abbildung 5.4: Visualisierung der Unterschnittsgrenze: (a) Schnittansicht in der XY-Ebene, (b) 3D-Darstellung des Unterschnitts am Innendurchmesser (Gindin et al. 2025).

5.2 Entwicklung einer normnahen Auswertestrategie zur Bewertung von Profil- und Flankenlinien sowie der Zahnteilung

Zur Beschreibung von Profil- und Flankenlinienabweichungen orientiert sich diese Arbeit an der VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024). Ziel ist es, die dort definierten Kenngrößen auf die Geometrie von Mikro-Kronenrädern zu übertragen und für eine prozessnahe Qualitätsbewertung nutzbar zu machen. Die dargestellte Auswertestrategie wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in Bilen et al. (2026c) publiziert.

Der Abschnitt gliedert sich wie folgt: Zunächst wird die Vorverarbeitung und Referenzierung der optisch erfassten 3D-Messdaten beschrieben. Anschließend erfolgt die rasterbasierte Berechnung der Soll-Ist-Abweichungen. Darauf aufbauend werden die normnahen Abweichungskenngrößen für Profil- und Flankenlinien sowie die Teilungsabweichung abgeleitet.

5.2.1 Vorverarbeitung und Referenzierung

Die Basis der Auswertung bilden optische Scans im STL-Format, die eine ganzheitliche Beschreibung der komplexen Topografie ermöglichen. Da diese Daten zunächst in beliebiger räumlicher Orientierung vorliegen, erfolgt eine Registrierung der Messdaten anhand der Sollgeometrie aus Abschnitt 5.1. Die Details zur optischen Erfassung der Geometrie werden in Unterabschnitt 5.4.2 beschrieben.

5.2.1.1 Registrierungsstrategie

Zunächst ist die Überführung der Messdaten in ein gemeinsames Bezugssystem erforderlich. Die Registrierung bildet damit die Grundlage für eine konsistente Auswertung. Diese erfolgt über einen hybriden Ansatz, der eine Initialregistrierung (siehe Abbildung 5.5) mit einer funktionsorientierten geometrischen Referenzierung (siehe Abbildung 5.6) kombiniert.

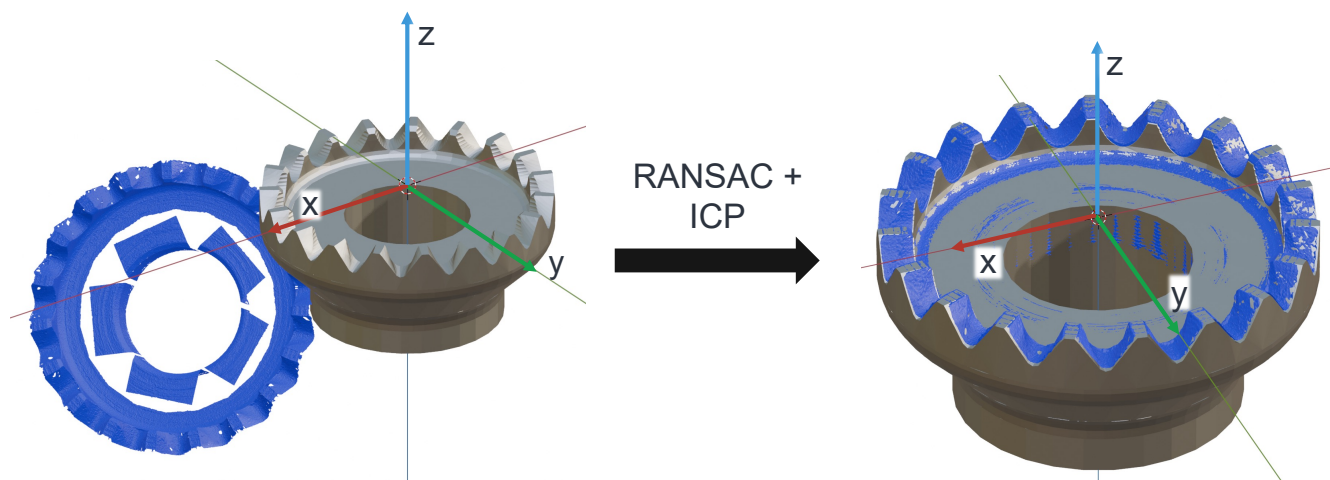


Abbildung 5.5: Grobausrichtung mittels RANSAC und anschließende Feinausrichtung über ICP (Bilen et al. 2026c).

Zunächst wird eine Grobausrichtung mittels eines Random Sample Consensus basierten Verfahrens (RANSAC, siehe Absatz 2.4.6) durchgeführt, um eine erste Lagebestimmung relativ zur Soll-Geometrie zu erhalten. Diese wird anschließend durch eine Iterative-Closest-Point-Registrierung (ICP, siehe Absatz 2.4.6) verfeinert.

Eine globale Registrierung ist jedoch nicht ausreichend, um eine funktional konsistente Registrierung sicherzustellen. Bei optischen Messungen können variierende Punktdichten

oder partielle Abschattungen dazu führen, dass sich die Transformation an der lokalen Punktverteilung statt an der tatsächlichen Geometrie orientiert, was zu nicht-funktionalen Lageabweichungen zwischen identischen Bauteilen führt.

Für die Registrierung dient deshalb im nächsten Schritt der Innenzylinder des Kronenrades als funktionaler Rotationsbezug zur Ermittlung der Hauptachse z . Die planare Zahnkopfoberfläche definiert den sekundären Bezug und bildet durch den Schnitt mit der Hauptachse den Nullpunkt (siehe Abbildung 5.6). Eine global rotatorische Ausrichtung ist nicht notwendig, da alle Zähne im nächsten Schritt einzeln ausgerichtet werden.

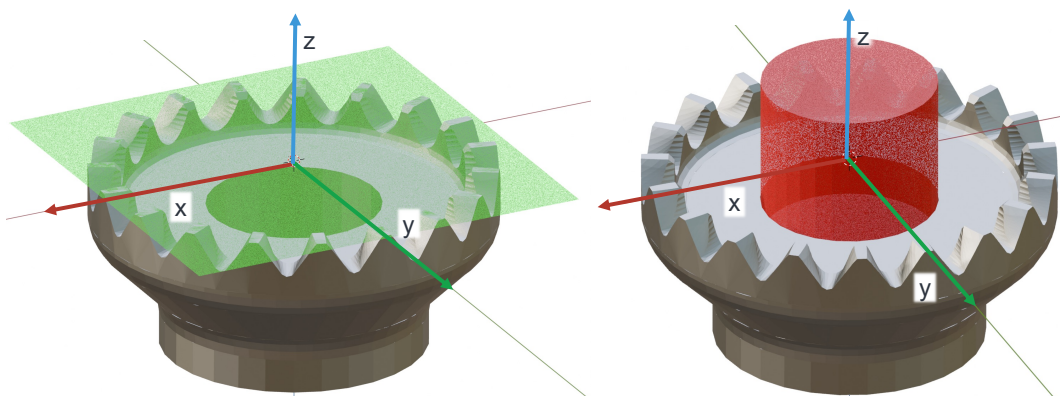


Abbildung 5.6: Registrierung auf Basis der Zahnkopfebene und des Innenzylinders (Bilen et al. 2026c).

5.2.1.2 Segmentierung und Einzelzahnreferenzierung

Zur unabhängigen Bewertung von Profil- und Flankenlinienabweichungen wird das Kronenrad in einzelne Zahnsegmente zerlegt. Dies erfolgt durch Analyse eines Zylinderschnitts im Bereich des Innenradius. Minima im Höhenverlauf dieses Schnittes definieren die Zahnzwischenräume und erlauben die Extraktion isolierter Zahn-Meshes (siehe Abbildung 5.7).

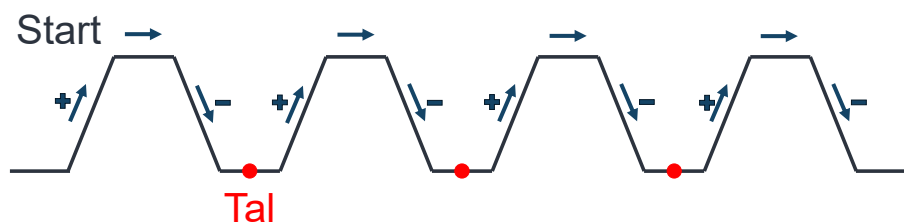


Abbildung 5.7: Segmentierung der Zähne durch Peak-Valley-Erkennung (Bilen et al. 2026c).

Nach der Segmentierung erfolgt eine Feinausrichtung auf Einzelzahnebene (siehe Abbildung 5.8). Dieser Schritt ist erforderlich, da andernfalls Teilungsfehler in die Auswertung der Profil- und Flankenlinienabweichungen eingehen würden. Um Teilungsfehler zu korrigieren,

wird jeder Zahn um die Rotationsachse so transformiert, dass er bestmöglich mit der idealen Sollzahngeometrie zur Deckung gebracht wird.

Als Optimierungskriterium wird eine modifizierte Distanzmetrik $E(P)$ minimiert, die sowohl den mittleren Punkt-zu-Flächen-Abstand als auch dessen Streuung berücksichtigt. Für einen Punktesatz $P = \{p_j\}_{j=1}^N$ mit Abständen d_j zur Sollgeometrie ergibt sich

$$E(P) = \mu_d + \lambda \sigma_d, \quad \mu_d = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j, \quad 5.6$$

wobei σ_d die Standardabweichung der Abstände und $\lambda > 0$ ein Gewichtungsfaktor ist. Dadurch werden asymmetrische Anpassungen vermieden und zentrierte Lösungen bevorzugt. Gleichzeitig ergibt sich der Teilungsfehler jedes Zahns direkt aus der ermittelten Rotationsausrichtung. Die hierbei ermittelte Rotationsverschiebung $\theta_{\text{align}}(i)$ des i -ten Zahns stellt die Teilungseinzelabweichung dar.

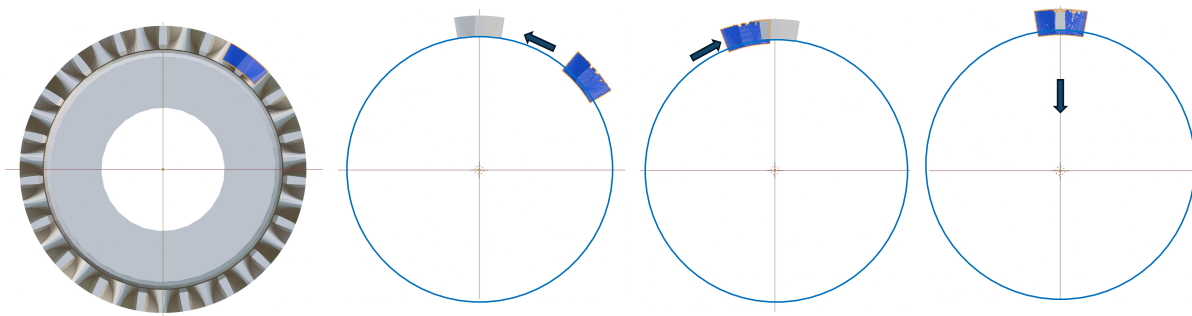


Abbildung 5.8: Einzelzahnausrichtung nach Bilen et al. (2026c).

5.2.2 Rasterbasierte Abstandsberechnung

Zur Bestimmung der Soll-Ist-Abweichungen wird auf der Soll-Geometrie ein äquidistantes Raster in y - und z -Richtung innerhalb der Zahnmittelebene definiert (vgl. Abbildung 5.9 links).

Der funktionale Auswertebereich wird als rechteckige Fläche definiert, um eine konsistente Vergleichbarkeit von Profil- und Flankenlinien sicherzustellen, da die komplexe Unterschnittsgrenze andernfalls zu unterschiedlich langen Auswertepfaden führen würde. Die Abmessungen des Rechtecks werden so optimiert, dass eine maximal große, zusammenhängende Flankenfläche erfasst wird. Grundlage hierfür bilden die Flankengleichungen (Gleichungen 5.4 und 5.5) (vgl. Abbildung 5.9 mitte).

Für jeden Rasterpunkt wird in positiver und negativer x -Richtung eine strahlbasierte Intersektion mit der Soll-Geometrie berechnet. Die lokalen Dreiecksnormalen definieren die

Richtung für die Abstandsberechnung zur zuvor registrierten Ist-Geometrie. Hierdurch wird für jeden Rasterpunkt ein vorzeichenbehafteter Normalabstand bestimmt, der Materialüberschuss (+) bzw. Materialdefizit (–) quantifiziert und somit die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie beschreibt (vgl. Abbildung 5.9 rechts).

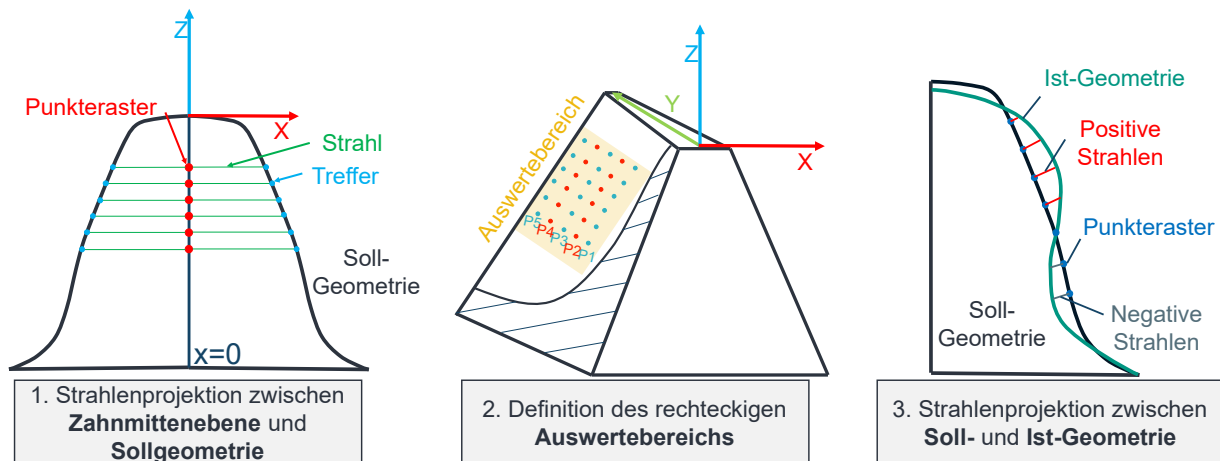


Abbildung 5.9: Rasterbasierte Abstandsberechnung: Strahlenprojektion zur Soll-Geometrie (links), Auswertepunkte (mitte) und Normalabstand zur Ist-Geometrie (rechts) (Bilen et al. 2026c).

Durch dieses Vorgehen wird die unstrukturierte Messung in geordnete Profil- und Flankenlinien überführt, die einer taktilen Verzahnungsmessung entsprechen und eine normnahe Auswertung ermöglichen.

5.2.3 Definition der Abweichungskenngrößen

Ausgehend von den berechneten Normalabweichungen zwischen Soll- und Istgeometrie werden Abweichungskenngrößen zur geometrischen Qualitätsbewertung abgeleitet, die sich in ihrer Definition und Interpretation an der VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024) orientieren. Ziel ist dabei keine direkte Übertragung der normativen Messführung, sondern eine methodisch konsistente Überführung der etablierten Auswertelogik auf die Geometrie von Mikro-Kronenrädern unter Berücksichtigung ihrer spezifischen kinematischen Randbedingungen.

5.2.3.1 Profil- und Flankenlinienabweichung

Gemäß VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024) werden Profil- und Flankenlinienabweichungen bei Stirnrädern entlang des Wälzweges ausgewertet, welcher die kinematische Abwälzbewegung zwischen Prüfkörper und Referenz beschreibt. Diese Parametrierung ist für Kronenräder jedoch nicht direkt übertragbar, da der Wälzweg hier keine ebene Kurve, sondern eine komplexe räumliche Trajektorie darstellt (Roth 2013, S. 341). Eine normkonforme Abbildung des Wälzweges ist daher für die vorliegende Geometrie nicht praktikabel.

Vor diesem Hintergrund erfolgt die Auswertung der Abweichungen nicht entlang des Wälzweges, sondern für Profillinien entlang der z-Koordinate der ausgewerteten Punkte, während für Flankenlinien die y-Koordinate als Auswerteparameter dient.

Abbildung 5.10 verdeutlicht dieses Vorgehen. In Abbildung 5.10 sind die Normalabweichungen zwischen Soll- und Istgeometrie entlang der jeweiligen Auswertekoordinate y/z dargestellt. In Analogie zur VDI/VDE 2612 wird innerhalb eines definierten Auswertebereichs eine lineare Regression

$$\hat{y}_i = a \cdot z_i + b \quad 5.7$$

durchgeführt, welche die mittlere Neigung der Abweichungen beschreibt und als rechnerisches Ausgleichselement dient.

Die **Gesamtabweichung** F wird als Differenz zwischen maximaler und minimaler Normalabweichung innerhalb des Auswertebereichs bestimmt,

$$F = \max(y_i) - \min(y_i), \quad 5.8$$

und entspricht funktional der in der VDI/VDE 2612 beschriebenen Einhüllenden des Prüfbildes durch zwei Soll-Linien von Material- und Umgebungsseite (Abbildung 5.10b).

Die **Winkelabweichung** f_H wird durch die Steigung a der Regressionsgeraden beschrieben. Sie repräsentiert die systematische Neigung der Profil- bzw. Flankenlinie gegenüber der Sollgeometrie und entspricht konzeptionell der normativen Bestimmung der Winkelabweichung an den Grenzen des Auswertebereichs (Abbildung 5.10d).

Die **Formabweichung** f_f beschreibt die verbleibenden Abweichungen nach Entfernung des linearen Trends und wird durch

$$f_f = \max(r_i) - \min(r_i), \quad r_i = y_i - (a \cdot z_i + b) \quad 5.9$$

ermittelt. Sie entspricht der normativen Definition der Formabweichung als Abstand zweier zur Ausgleichsgeraden paralleler Begrenzungslinien (Abbildung 5.10c).

Durch dieses Vorgehen wird die Auswertelogik der VDI/VDE 2612 – insbesondere die Trennung von Gesamt-, Winkel- und Formabweichung – auf Mikro-Kronenräder übertragen, während die Parametrierung entlang des Wälzweges bewusst durch eine geometrisch geeignete Koordinatendarstellung ersetzt wird.

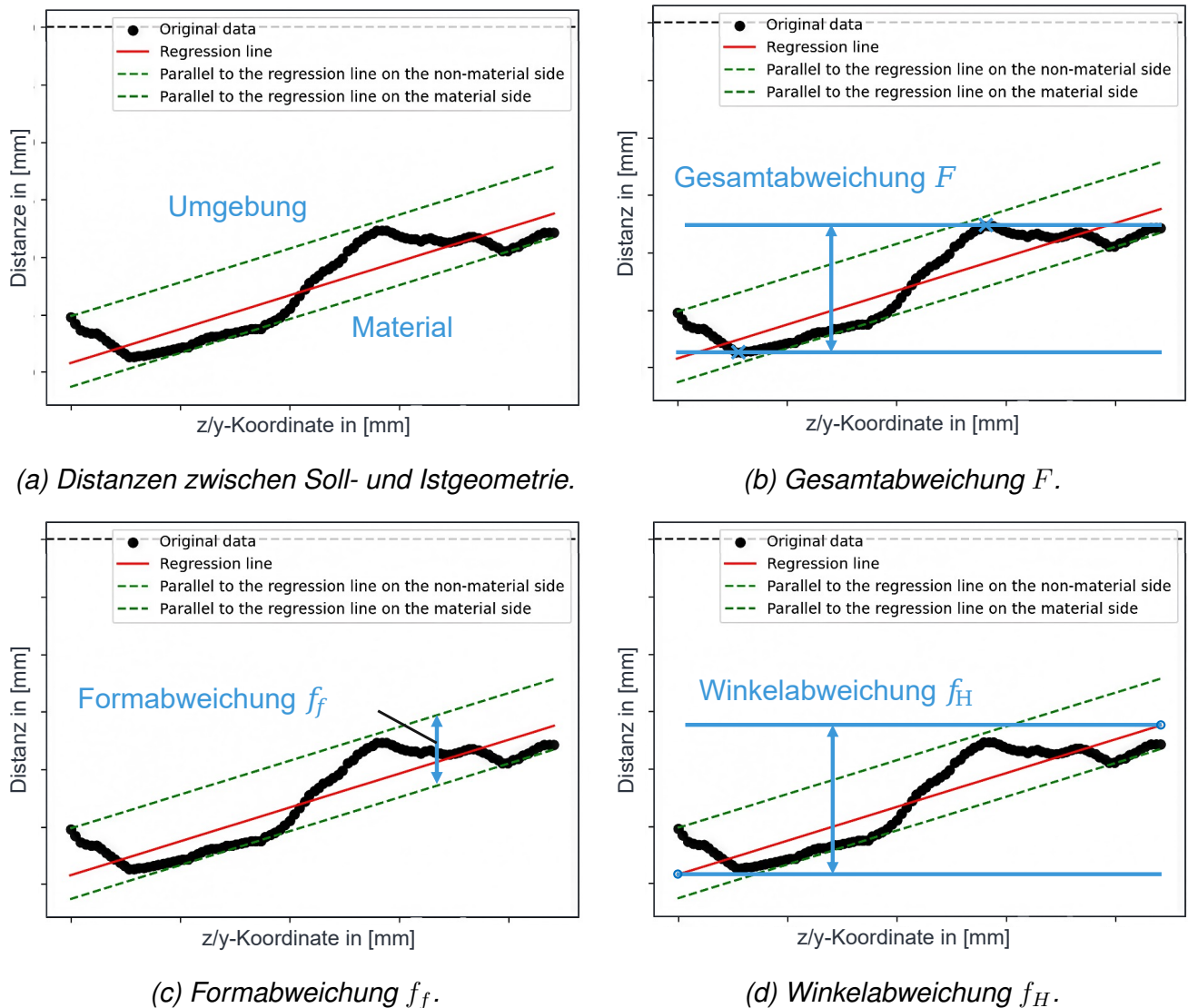


Abbildung 5.10: Auswertung der Profil- und Flankenlinienabweichungen auf Basis linearer Regression (Bilen et al. 2026c).

5.2.3.2 Teilungsabweichung

Die Teilungsabweichung wird aus den Rotationswinkeln der Einzelzahn Ausrichtung bestimmt (siehe Unterunterabschnitt 5.2.1.2). Da jeder Zahn einzeln auf seine Sollposition ausgerichtet wird, ergibt sich unmittelbar die Teilungs-Summenabweichung F_{pi} des i -ten Zahns gemäß DIN ISO 1328-1 (2018) als algebraische Differenz zwischen der tatsächlichen und der theoretischen Lage des Zahns bezogen auf eine gemeinsame Bezugsflanke:

$$F_{pi} = \theta_{\text{align}}(i) - \theta_{\text{ideal}}(i), \quad 5.10$$

mit dem idealen Teilungswinkel

$$\theta_{\text{ideal}}(i) = (i - 1) \cdot \frac{360^\circ}{z_2}. \quad 5.11$$

Die **Teilungs-Gesamtabweichung** F_p ergibt sich normkonform als größte algebraische Differenz zwischen den Einzelwerten der Teilungs-Summenabweichung über alle Zähne (VDI/VDE 2612 Blatt 1 2024):

$$F_p = \max_i F_{pi} - \min_i F_{pi}. \quad 5.12$$

5.2.3.3 Ableitung globaler Kenngrößen durch zahnweise Mittelung

Für jeden Zahn werden mehrere Profil- und Flankenschnitte entlang der Zahnachse ausgewertet und die resultierenden Kenngrößen (F_α , $f_{f\alpha}$, $f_{H\alpha}$ usw.) zunächst zahnweise gemittelt. Die anschließende Mittelung der Kenngrößen über alle Zähne des Zahnrads dient der gezielten Erfassung systematischer Einflüsse, die sich konsistent in der Teilung und Geometrie des gesamten Bauteils äußern.

5.3 Entwicklung von Merkmalen zur Erkennung translatorischer Werkzeugfehler

Im Gegensatz zu evolventischen Stirnrädern reagieren Kronenräder sensitiv auf Änderungen des Achsabstands. Insbesondere translatorische Werkzeugverschiebungen in x - und z -Richtung führen zu systematischen geometrischen Veränderungen, die durch klassische Linienmerkmale nach VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024) nicht eindeutig auf ihre Ursache zurückgeführt werden können. Daher werden im Folgenden nach den Ergebnissen von Bilen et al. (2026c) zusätzliche Kenngrößen eingeführt, die eine ursachenbezogene Beschreibung der Abweichungen ermöglichen.

5.3.1 Merkmal zur Bestimmung der tangentialen Werkzeugverschiebung

Wird das Wälzfräswerkzeug in x -Richtung verschoben, so schneiden sich die Hauptrichtungen der Zähne in der XY -Ebene (siehe Abbildung 5.11), welche sich aus der Symmetrielinie zweier Flankenlinien ergeben, nicht mehr in einem gemeinsamen Ursprung, sondern bilden eine kreisförmige Hüllkurve um das Koordinatenzentrum des Werkstücks (Bilen et al. 2026c).

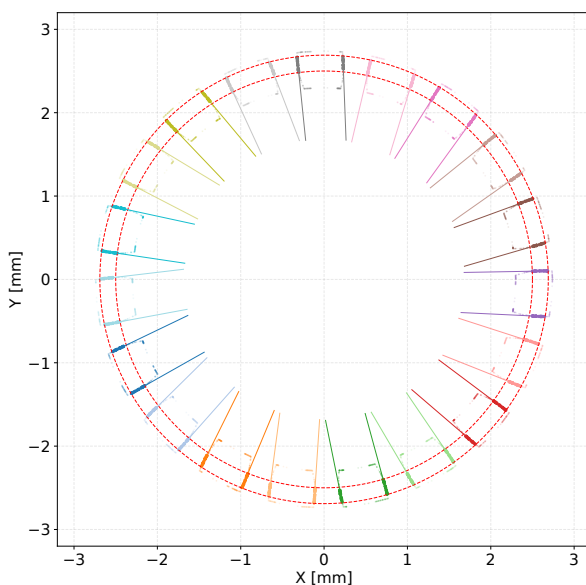
Der Radius dieser Hüllkurve wird als Exzentrizitätsradius r_e bezeichnet und wächst proportional mit der Werkzeug- x -Verschiebung Δx . Zur Bestimmung der Hauptrichtungen werden im Folgenden zwei alternative Bestimmungswege vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die vorliegende Auswertepipeline bewertet.

5.3.1.1 Vorverarbeitung und Segmentierung

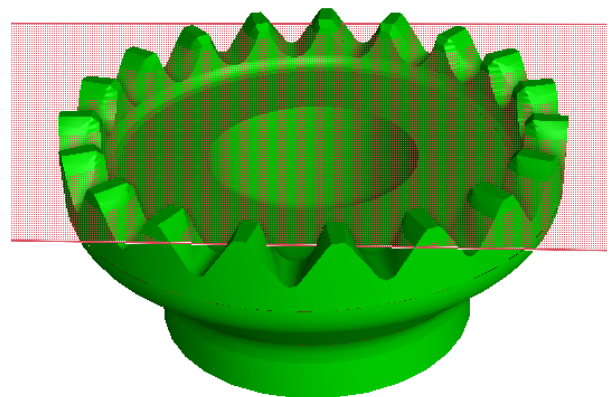
Die Bestimmung der Zahnhauptrichtungen baut direkt auf den strukturierten Auswertepunkten auf, die im Rahmen der rasterbasierten Abstandsberechnung in Unterabschnitt 5.2.2 erzeugt werden. Diese Punkte liegen bereits auf definierten Höhenebenen innerhalb des funktionalen Flankenbereichs und sind pro Zahn segmentiert. Der Ausschluss nicht-funktionaler Bereiche ist durch die Rechteckdefinition des Auswertebereichs bereits sichergestellt (vgl. Unterabschnitt 5.2.2). Die pro Zahn vorliegenden beidseitigen Flankenpunkte dienen unmittelbar als Basis für die nachfolgende Richtungsbestimmung.

5.3.1.2 Methode A: Hauptrichtungen über Flanken-Regression

Auf beide Flanken eines Zahns wird eine lineare Regression angewandt. Der Mittelwert der Richtungsvektoren definiert die Hauptrichtung des Zahns (Abb. 5.11).



(a) Flankenregressionen.

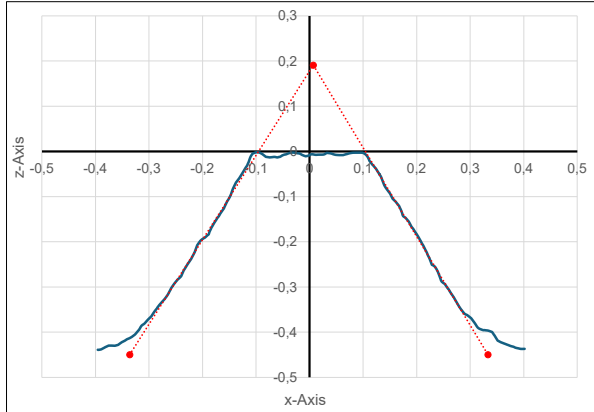


(b) Schnitt in der XY-Ebene.

Abbildung 5.11: Methode A: Bestimmung der Hauptrichtung über Flankenregressionen (Bilen et al. 2026c).

5.3.1.3 Methode B: Ersatzzahnmodell über Profil-Extrapolation

Alternativ werden die Profillinien eines Zahns extrapoliert, bis sich linke und rechte Profillinie schneiden (Abb. 5.12). Die entstehenden Spitzenpunkte definieren ebenfalls eine Hauptrichtung:



(a) Profilquerschnitt mit Regressionsgeraden.



(b) Virtuelles Ersatzmodell.

Abbildung 5.12: Methode B: Profilbasierte Referenzkonstruktion (Bilen et al. 2026c).

Methodenwahl Für die nachfolgenden Auswertungen wird Methode A eingesetzt. Diese ist synergetisch mit der in Abschnitt 5.2 entwickelten Auswertepipeline, da pro Zahn bereits beidseitige Flankenauswertepunkte auf definierten Höhenebenen vorliegen und sich die Flankenregressionen unmittelbar aus diesen Daten berechnen lassen.

5.3.1.4 Ermittlung des Exzentrizitätsradius r_e

Unabhängig von der Herleitung der Hauptrichtungen wird anschließend eine Kreisapproximation zur Ermittlung des Exzentrizitätsradius r_e durchgeführt (siehe Abbildung 5.13).

Der Exzentrizitätsradius wird als Radius des größten in der XY -Ebene einbeschriebenen Kreises (auch genannt Pferchkreis) bestimmt. Dabei beschreibt ℓ_i die Regressionsgerade der i -ten Zahnflanke, $\mathbf{c}$ einen beliebigen Kreismittelpunkt in der XY -Ebene und $d(\mathbf{c}, \ell_i)$ den orthogonalen Abstand zwischen $\mathbf{c}$ und ℓ_i . Für einen gegebenen Punkt $\mathbf{c}$ ist der zulässige Radius durch den kleinsten Abstand zu allen Flankengeraden begrenzt. Der gesuchte Exzentrizitätsradius ergibt sich somit als

$$r_e(\mathbf{c}) = \min_i d(\mathbf{c}, \ell_i), \quad r_e = \max_{\mathbf{c}} r_e(\mathbf{c}). \quad 5.13$$

Mehrere Höhenebenen ermöglichen zusätzlich eine Aussage zur globalen Achsflucht bzw. Verkipfung des Werkstückkoordinatensystems.

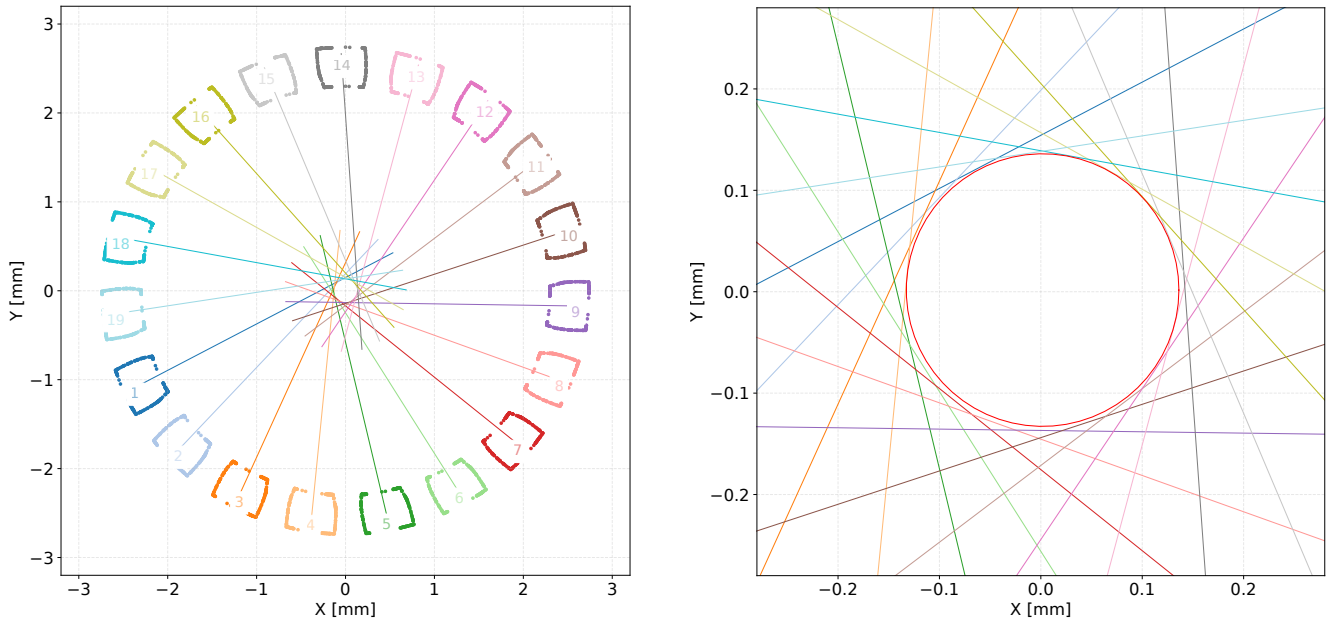


Abbildung 5.13: Exzenterkreis mit dem Radius r_e in der XY -Ebene (Bilen et al. 2026c).

5.3.2 Merkmal zur Bestimmung der Abweichung der Werkzeugeindringtiefe

Eine systematische Werkzeug- z -Verschiebung verändert die resultierende Zahngeometrie und führt insbesondere zu einer Änderung der Zahndicke (Bilen et al. 2026c). Geometrisch wirkt eine solche Verschiebung äquivalent zu einer Abweichung des Einbauabstands D_S , der den Abstand zwischen der Rotationsachse des Stirnrads und der Zahnkopfebene des Kronenrads beschreibt. Laut Roth (2013, S. 305) ist die Kronenradverzahnung grundsätzlich robust gegenüber Abweichungen dieses Abstands, wobei sich jedoch Flankenspiel und Tragbild ändern.

In hochdynamischen Anwendungen mit Drehzahlen bis 200 000 U/min wirken sich bereits geringe geometrische Abweichungen auf die Kontaktverhältnisse aus (VDI 2731 2009, S. 9). Da der Einbauabstand D_S eine Eigenschaft der Radpaarung ist und am gefertigten Einzelteil nicht direkt bestimmt werden kann, wird die Zahndicke als indirektes Merkmal zur Erkennung von Werkzeug- z -Verschiebungen herangezogen.

Die Bestimmung erfolgt auf Basis des in Unterabschnitt 5.2.2 definierten Rasters. Für jede Höhenebene z_i ergibt sich die Zahndicke eines Zahns als Differenz der Flankenkoordinaten:

$$t_{\text{act}}(z_i) = x_{\text{right}}(z_i) - x_{\text{left}}(z_i). \quad 5.14$$

Die Zahndickenabweichung eines einzelnen Zahns auf einer Höhengenebene ergibt sich zu

$$\Delta t(z_i) = t_{\text{act}}(z_i) - t_{\text{nom}}(z_i). \quad 5.15$$

Zur Robustheit wird zunächst über alle z_2 Zähne des Kronenrades gemittelt:

$$\overline{\Delta t}(z_i) = \frac{1}{z_2} \sum_{j=1}^{z_2} \Delta t_j(z_i), \quad 5.16$$

und anschließend über die N_z Höhengenebenen:

$$\Delta t_z = \frac{1}{N_z} \sum_{i=1}^{N_z} \overline{\Delta t}(z_i). \quad 5.17$$

5.4 Taktile und optische Erfassung der Kronenradgeometrie

Das untersuchte Kronenrad wird mittels zweier komplementärer Messverfahren digitalisiert. Die optische Fokusvariation ermöglicht eine prozessnahe, effiziente Erfassung dreidimensionaler Messdaten und dient als primäre Grundlage der geometrischen Auswertung sowie der Labelgenerierung für überwachte Lernverfahren. Zur Absicherung dieser Messdaten werden taktile Referenzmessungen eingesetzt, die sowohl der Parametrierung als auch der Unsicherheitsbewertung der optischen Messung dienen.

5.4.1 Erzeugung taktiler Referenzmessungen

Zur Qualifizierung der optischen Messungen sowie zur späteren Unsicherheitsbewertung wird eine taktile Referenzmessung mit dem hochpräzisen Koordinatenmessgerät *Zeiss F25* durchgeführt. Das KMG ist mit einem maximal zulässigen Fehler von

$$E_0 = \left(0,25 + \frac{L}{666} \right) \mu\text{m} \quad 5.18$$

für eine Nennlänge L in mm Stand der Technik im Hinblick auf taktile Hochpräzisionsmessungen (Jantzen et al. 2018). Das zugehörige Kalibrierzertifikat kann im Anhang (vgl. Abschnitt A1.2) eingesehen werden. Diese Referenzmessung bildet die metrologische Grundlage zur Parametrierung und Unsicherheitsbewertung der optischen Messung. Im Folgenden ist der Antastprozess der Kronenradgeometrie visualisiert (vgl. Abbildung 5.14).

Die taktile Messung erfolgt auf Grund von Genauigkeitsanforderungen und lokalen Geometrieabweichungen mittels Punktantastung anstelle eines Scanning-Verfahrens (Marxer et al.

2021, S. 77). Die anzutastenden Punkte (visualisiert in Abbildung 5.15) werden aus der rasterbasierten Sollpunktermittlung aus Unterabschnitt 5.2.2 übernommen, wodurch optische und taktile Messung auf identischen Auswertepunkten basieren. Dies gewährleistet eine punktgenaue und metrologisch konsistente Vergleichbarkeit der beiden Messsysteme. Die Messung wird mit einer Tastkugel mit einem Durchmesser von $120\text{ }\mu\text{m}$ und einem Schaftdurchmesser von $80\text{ }\mu\text{m}$ durchgeführt.

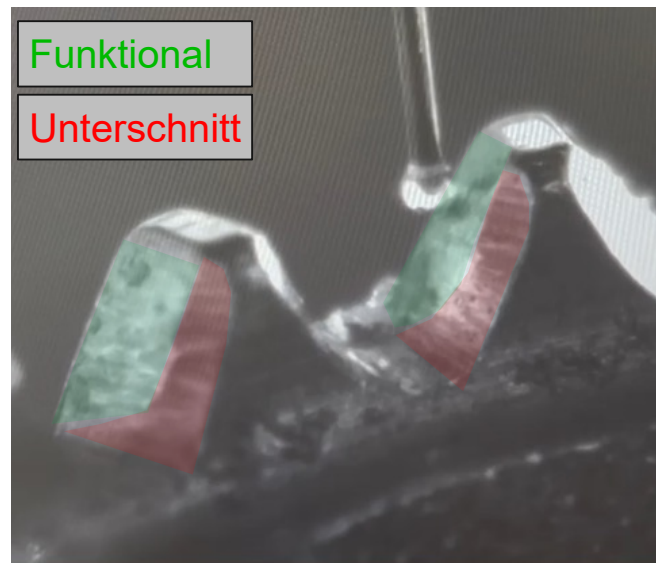


Abbildung 5.14: Mikroskopische Aufnahme des Antastprozesses der Kronenradgeometrie.

Besondere Bedeutung kommt der Einspannung und Positionierung des Kronenrades im Bezug zum taktilen Messkopf zu. Auf Grund des geringen Tastkugel-Schaftdurchmesser-Verhältnisses ist das Risiko einer Schaftantastung gegeben (Marxer et al. 2021, S. 83). Hierfür ist eine präzise und spannungsfreie Ausrichtung des Werkstücks erforderlich, um die Zahnflanken ohne Verkipfung vermessen zu können.

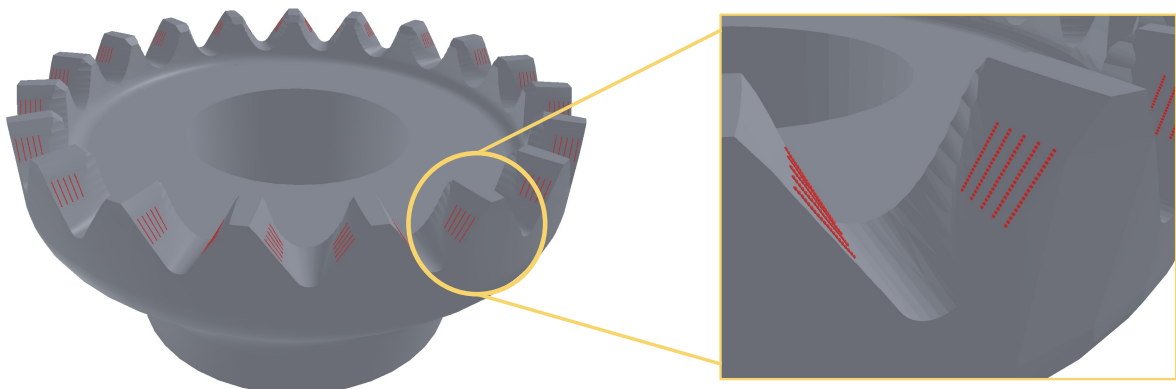


Abbildung 5.15: Messpunkte der taktilen Referenzmessung mit dem Zeiss-F25 KMG.

Definition des Start- und Basiskoordinatensystems Die Definition des Koordinatensystems erfolgt in zwei Stufen, bestehend aus einem initialen Startsystem und einem anschließend automatisiert verfeinerten Basissystem. Das Startsystem wird über geometrisch robuste Referenzelemente definiert: Die Hauptachse wird durch den Rotationsbezug des Kronenrades, den Innenzylinder, definiert. Die Zahnköpfe dienen der Ermittlung eines Nullpunktes, der sich aus dem Schnitt mit der Hauptachse ergibt. Zur rotatorischen Ausrichtung des Koordinatensystems musste ein Referenzbauteil durch eine gezielt in Bezug auf eine Zahnücke eingebrachte Nut präpariert werden.

Auf Basis dieses Startsystems wird innerhalb einer automatisierten Messschleife in der Zeiss Messsoftware *Calypso* das finale Basiskoordinatensystem erzeugt. Nach der Nutorientierung tastet die Messanlage zwei benachbarte Zahnflanken an, um die Lage der ersten Zahnücke präzise zu bestimmen. Anschließend wird das Koordinatensystem um den Winkel

$$\frac{360^\circ}{2 \cdot z_2} \quad 5.19$$

mit der Zähnezahl $z_2 = 19$ weitergedreht, sodass die y -Achse des Basissystems exakt in Richtung des ersten Zahns zeigt.

5.4.2 Parametrierung der optischen Fokusvariation für Mikro-Kronenräder

Bei der optischen Erfassung mikroverzahnter Bauteile werden die Messzeit und Messunsicherheit maßgeblich durch die gewählten Messparameter beeinflusst – insbesondere durch Objektivvergrößerung, laterale und vertikale Auflösung sowie den Downsampling-Faktor (Gauder et al. 2021; Schuth et al. 2017). Ziel der Parametrierung ist eine möglichst vollständige und geometrisch aussagekräftige dreidimensionale Erfassung der Mikro-Kronenradgeometrie bei gleichzeitig begrenzter Messdauer. Die resultierenden Punktwolken bilden die Grundlage für die nachfolgende geometrische Auswertung sowie für die spätere prozessnahe Qualitätsregelung.

Da für Mikro-Kronenräder keine normativen Toleranzgrenzen existieren, werden funktionale Zielkriterien zur Bewertung der Messungen definiert. Im Fokus stehen die Messdauer sowie die geometrische Genauigkeit der Messdaten. Die Messdauer wird im Hinblick auf die Durchführung einer umfangreichen Versuchsreihe auf maximal ≈ 10 min begrenzt. Als weiteres Gütekriterium dient die Punkt-zu-Punkt-Abweichung zwischen optischer Messung und taktiler Referenzmessung. In Anlehnung an Gauder et al. (2021) und Gauder (2024) wird eine maximale Standardabweichung von $\sigma \leq 1,5 \mu\text{m}$ angestrebt. Dieser Wert dient als anwendungsbezogener Orientierungswert. Er basiert auf der Größenordnung der relevanten geometrischen Abweichungen von Mikro-Kronenrädern, die typischerweise im Bereich

weniger Mikrometer liegen (Gauder 2024). Um diese zuverlässig differenzieren zu können, muss die Messunsicherheit deutlich darunter liegen. Der gewählte Wert stellt somit einen praxisgerechten Kompromiss zwischen ausreichender Auflösung mikrogeometrischer Effekte und wirtschaftlich vertretbarer Messdauer dar.

Ergänzend hierzu fließen qualitative Kriterien wie die Vollständigkeit der Flankenerfassung, das Auftreten von Messlücken sowie die Detailtreue der abgebildeten Verzahnungsstruktur in die Bewertung ein.

Für geometrisch vergleichbare Mikro-Stirnräder aus demselben Material liegt mit der Arbeit von Gauder et al. (2022b) bereits ein optimierter Parametersatz für die Fokusvariation vor (vgl. Tabelle 5.1). Dieser dient als Referenz und Ausgangspunkt für die vorliegende Untersuchung. Eine direkte Übertragung auf den hier betrachteten Anwendungsfall ist jedoch nicht uneingeschränkt möglich. Während in Gauder et al. (2022b) die Parametrierung primär im Kontext einer simulationsbasierten Auswertung erfolgte, bei der insbesondere die Robustheit gegenüber Ausreißern im Vordergrund stand, zielt die vorliegende Arbeit auf eine geometriefokussierte Bewertung der realen Flankenform ab. Der dort eingesetzte hohe Downsampling-Faktor von 16 führt zu einer starken Glättung der Punktwolke und reduziert damit zwar die Sensitivität gegenüber Ausreißern, unterdrückt jedoch gleichzeitig relevante lokale Formabweichungen. Voruntersuchungen zeigen, dass diese Glättung für die hier angestrebte geometrische Analyse nicht geeignet ist, da insbesondere mikrogeometrische Abweichungen nahezu vollständig nivelliert werden (A_Ernstberger 2025).

Tabelle 5.1: Messparameter der Fokusvariation nach Gauder et al. (2022b).

Messparameter	Wert	Messparameter	Wert
Objektivvergrößerung	800A (10×)	Kippwinkel	25°
Belichtungszeit	1,81 ms	Kontrast	0,60
Vertikale Auflösung	0,03 µm	Laterale Auflösung	3,914 µm
Downsampling-Faktor	16	Messbreite	1,312 mm
Polarisationsfilter	Aktiv	Überlappungsanteil	19 %
Ausreißerfilter	0,93	Mittlere Messdauer	3,48 min

Ausgehend von diesem Referenzparametersatz wird ausschließlich der Downsampling-Faktor variiert, während alle übrigen Parameter konstant bleiben. Ziel ist die systematische Untersuchung des Einflusses der Datenreduktion auf Messdauer und geometrische Abbildungsgenauigkeit. Hierzu werden Faktoren von $D = 2, 4$ und 8 betrachtet, um den Zielkonflikt zwischen Messzeit und Detailerhalt zu analysieren. Belichtungszeit und Kontrast bleiben unverändert, da ihr Einfluss als untergeordnet bewertet wird (Gauder et al. 2022b).

Der messtechnische Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Das Kronenrad wird in einem Spannfutter fixiert, das eine gezielte Korrektur von Exzentrizitäten ermöglicht.

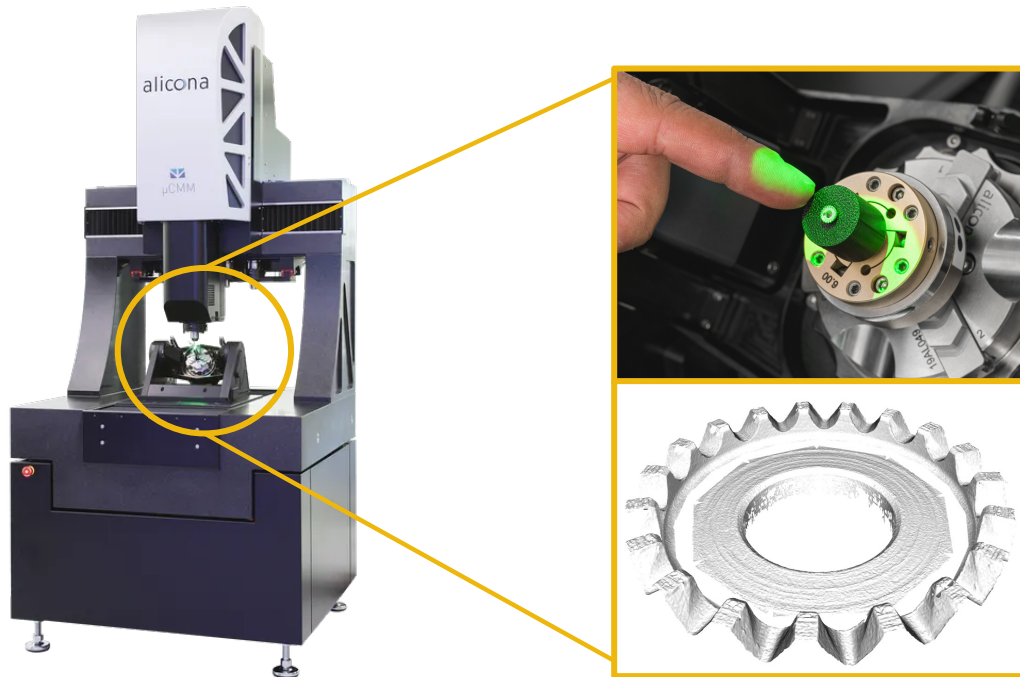


Abbildung 5.16: Messtechnischer Aufbau auf der Alicona µCMM (Bilen et al. 2026c)¹.

5.5 Initiale Ergebnisse zur Qualitätsbewertung von Kronenrädern

In diesem Abschnitt wird die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik anhand erster Ergebnisse zur Qualitätsbewertung von Kronenrädern demonstriert. Die Untersuchung umfasst zunächst die Verifikation der mathematischen Sollgeometrie durch einen Abgleich mit der industriellen CAD-Referenz von Dentsply Sirona, gefolgt vom Funktionsnachweis der automatisierten Auswertepipeline. Darauf aufbauend erfolgt eine vergleichende Analyse taktiler und optischer Messdaten, wobei insbesondere die Parametrierung der optischen Messstrategie evaluiert wird. Während hier die methodische Funktionsfähigkeit im Vordergrund steht, erfolgt die tiefergehende Validierung der Merkmalsaussagen auf Basis der simulativen Untersuchungen aus Kapitel 6 in Abschnitt 7.1.

5.5.1 Mathematische Definition der Sollgeometrie

Als Ergebnis der mathematischen Sollgeometriedefinition wurde eine Software zur parametrischen Generierung von 3D-Kronenradgeometrien entwickelt. Der Vergleich mit der von Dentsply Sirona simulativ erzeugten Sollgeometrie zeigt lediglich Abweichungen im Bereich des Zahnkopfes. Diese sind auf gezielte Werkzeugmodifikationen zurückzuführen, die bei

¹Quelle Darstellung links: <https://www.alicon.com/de/produkte/optisches-koordinatenmessgeraet>, zuletzt geprüft am 02.04.2026

Dentsply Sirona zur Realisierung einer Kopfrücknahme (Klocke et al. 2017, S. 286) eingesetzt werden.

Im funktional relevanten Bereich der Verzahnung liegen die lokalen Abweichungen im Bereich weniger Mikrometer. Das mathematische Modell erweist sich dabei als präziser als das simulativ erzeugte Kronenrad, da die verbleibenden punktuellen Abweichungen auf die begrenzte STL-Auflösung der simulativ erzeugten Geometrie von Dentsply Sirona zurückzuführen sind. Der geometrische Vergleich ist in Abbildung 5.17 qualitativ dargestellt.

Die hohe Auflösung der mathematisch definierten Sollgeometrie ist insbesondere für die zuverlässige Bestimmung der Normalenvektoren von zentraler Bedeutung. Durch die feine Flächendiskretisierung werden geometrische Übergänge deutlich glatter abgebildet als bei der simulativ erzeugten STL-Geometrie, wodurch numerische Artefakte und diskretisierungsbedingte Richtungsfehler der Normalen reduziert werden.

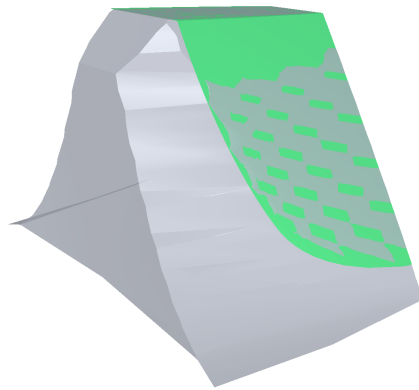


Abbildung 5.17: Vergleich der Sollgeometrien nach Gindin et al. 2025 (grün) und Dentsply Sirona (grau) (Bilen et al. 2026c).

5.5.2 Demonstration des Auswertalgorithmus und Plausibilität der Aussagen

Auf Basis der in den Abschnitten 5.2 und 5.3 entwickelten Methodik wird der deterministische Auswertalgorithmus auf optische Messdaten angewendet. Dieser verarbeitet nicht ausgerichtete STL-Daten bzw. Punktwolken reproduzierbar und extrahiert daraus geometrische Qualitätsmerkmale.

Die in Abbildung 5.18 dargestellten Visualisierungen zeigen exemplarisch die ermittelten Auswertepunkte sowie die lokalen Abweichungen zwischen Soll- und Istgeometrie. Die Ergebnisse bestätigen die stabile Punktfindung mittels Raycasting, die zuverlässige Zentrierung im Rahmen der Teilungsfehlerkorrektur sowie die konsistente Berechnung der Abstände.

Die beobachteten Abweichungen liegen in einer Größenordnung von etwa 10–30 μm und stimmen mit Erfahrungswerten aus der industriellen Praxis sowie CT-basierten Falschfarben-ana-

lysen überein. Damit wird die grundsätzliche Plausibilität der berechneten Qualitätsmerkmale gezeigt, ohne bereits eine vollständige Validierung der Aussagekraft der Merkmale hinsichtlich Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge vorzunehmen, die Gegenstand von Abschnitt 7.1 ist.

Im Anhang ist unter Abschnitt A1.1 ein exemplarisches Verzahnungsprotokoll mit allen globalen Kenngrößen sowie Profil- und Flankenlinienauswertungen dargestellt.

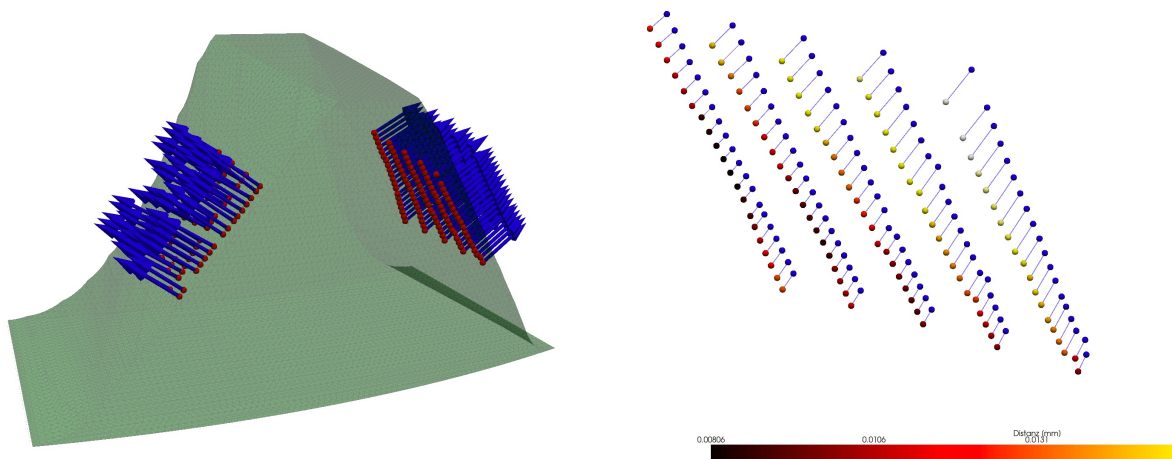


Abbildung 5.18: Links: Visualisierung der mittels Raycasting ermittelten Auswertepunkte; rechts: lokale Distanzen zwischen Soll- (blau) und Istpunkten (schwarz-gelbe Farbcodierung in Abhängigkeit der Abweichung).

5.5.3 Durchführung und Parametrierung der taktilen und optischen Messungen

Taktile Messungen Zunächst wurden im Rahmen der Untersuchungen taktile Messungen durchgeführt, welche als Referenz für die Optimierung der optischen Messungen dienen. Pro Zahnflanke wurden fünf Profillinien mit jeweils zwanzig Antastpunkten gemessen, sodass sich pro Zahnflanke 100 Messpunkte ergeben. Für das gesamte Kronenrad resultiert daraus ein Datensatz mit insgesamt 3800 taktil erfassten Punkten. Für jeden Antastpunkt wurden sowohl die kartesische Punktposition $\vec{x}$ als auch der zugehörige Antastrichtungsvektor $\vec{n}$ erfasst.

Trotz mehrfacher Wiederholung weisen die resultierenden Messpunktewolken konstant zur eigentlichen Zahnflanke verschobene Messartefakte auf (siehe Abbildung 5.19), die im weiteren Verlauf eine Filterung notwendig machen.

Dennoch zeigt sich, dass die restlichen Messpunkte auf den Flanken der Sollgeometrie liegen und zwischen den drei durchgeführten Wiederholmessungen nur geringfügige Abweichungen im Bereich von $\sigma = 0,15 \mu\text{m}$ aufweisen.

Die identifizierten Artefakte lassen sich zudem mit einem einfachen Distanz-Schwellwertfilter zuverlässig entfernen, da sie systematisch von der Sollgeometrie abweichen und somit klar

separierbar sind. Die gültigen Messpunkte können dadurch ohne aufwendige Verfahren direkt extrahiert werden.

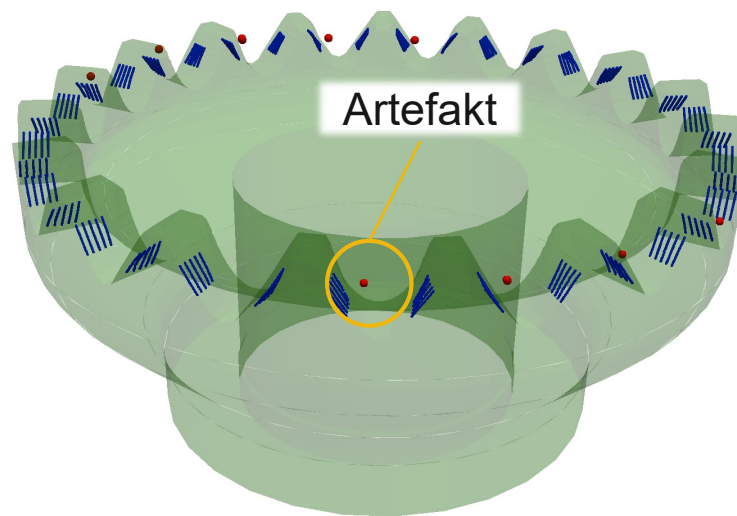


Abbildung 5.19: Taktile erfasste Messpunkte. Korrekt erfasste Messpunkte sind in blau dargestellt, Artefakte in rot.

Die Auswertung des Referenzbauteils nach den in diesem Abschnitt definierten Merkmalen ergibt folgende Werte:

Tabelle 5.2: Auswertung der F25-Referenzmessung (Mittelwerte).

Bezeichnung	Merkmal	Messwert
Profil-Gesamtabweichung	F_α [μm]	8,06
Profil-Formabweichung	$f_{f\alpha}$ [μm]	6,05
Profil-Winkelabweichung	$f_{H\alpha}$ [μm]	-1,01
Flankenlinien-Gesamtabweichung	F_β [μm]	3,21
Flankenlinien-Formabweichung	$f_{f\beta}$ [μm]	0,34
Flankenlinien-Winkelabweichung	$f_{H\beta}$ [μm]	-0,20
Zahndickenabweichung	Δt [μm]	23,68
Teilungs-Gesamtabweichung	F_p [$^\circ$]	0,0164
Exzentrizitätsradius	r_e [μm]	145,23

Optische Messungen Die optischen Messungen wurden so ausgelegt, dass alle für die spätere Registrierung und Auswertung relevanten Geometrieelemente vollständig erfasst sind. Hierzu zählen der Innenzylinder des Kronenrads, die planare Zahnkopfoberfläche sowie die Zahnflanken. Die Parametrierung der optischen Messstrategie wurde im Rahmen einer

vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Masterarbeit systematisch untersucht und festgelegt (A_Ernstberger 2025). Im Folgenden sind in Abbildung 5.20 zwei Messungen visualisiert, welche mit zwei unterschiedlichen Eindringtiefen Δz gefertigt wurden. Die geometrischen Implikationen, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit intensiv eingegangen wird, gehen klar aus der Messung hervor, was zumindest qualitativ die Eignung der definierten Parameter aufzeigt.

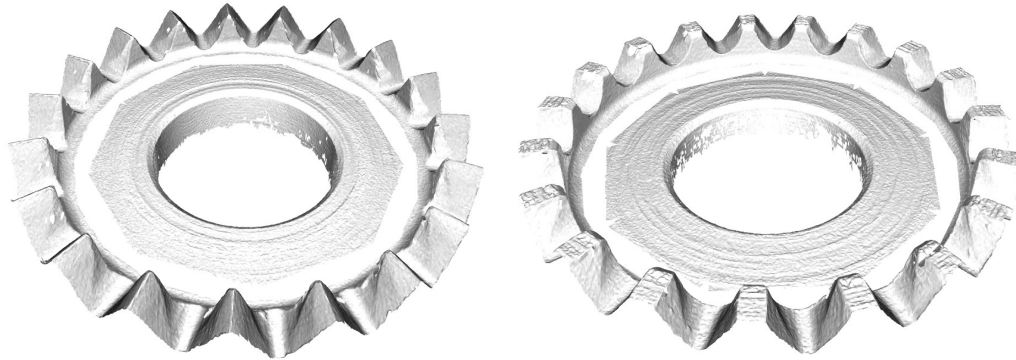


Abbildung 5.20: Beispielhafte optische Messungen zweier mit der Alicona μ CMM gemessener Kronenräder bei unterschiedlicher Eindringtiefe Δz .

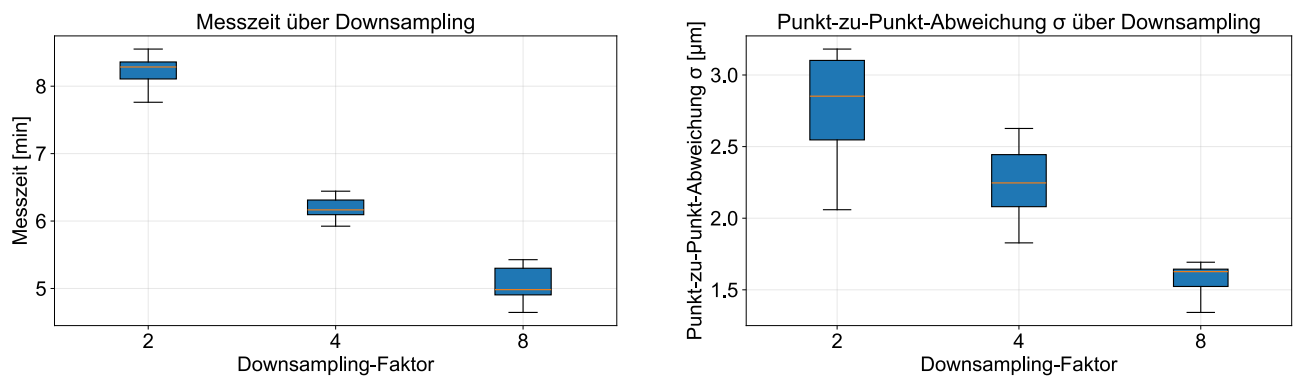
Zur quantitativen Bewertung des Einflusses der Messparametrierung wurde dasselbe Bauteil unter wiederholter Einspannung und Auswertung insgesamt 21-mal optisch vermessen. Dabei wurden drei Downsampling-Stufen betrachtet, wobei jede Stufe sieben Wiederholmessungen umfasst ($n = 7$ je Downsampling-Faktor). Konkret wurden die Messungen mit den Faktoren $D = 2, 4$ und 8 durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen konsistent, dass mit steigendem Downsampling-Faktor sowohl die Messzeit als auch die Punkt-zu-Punkt-Abweichung zwischen der optischen Alicona-Messung und der taktilen Referenzmessung mit der Zeiss F25 abnimmt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.21a sowie Abbildung 5.21b dargestellt.

Während die Reduktion der Punktdichte zu einer signifikanten Verkürzung der Messdauer führt, bewirkt sie gleichzeitig eine angemessene Glättung der Messdaten, wodurch hochfrequentes Messrauschen reduziert wird und sich die Übereinstimmung mit der Referenzmessung verbessert.

Eine detaillierte tabellarische Aufstellung der einzelnen Messungen, einschließlich Messdauer und Punkt-zu-Punkt-Abweichungen, ist im Anhang in Abschnitt A1.3 aufgeführt.

Die in dieser Arbeit eingesetzten Messparameter (vgl. Tabelle 5.3) stellen einen als optimal identifizierten Kompromiss zwischen Messdauer, geometrischer Auflösung und Übereinstimmung mit der taktilen Referenzmessung dar. Die Parametrierung erfolgte auf Basis eines



(a) Messzeit in Abhängigkeit vom Downsampling-Faktor. (b) Punkt-zu-Punkt-Abweichung in Abhängigkeit vom Downsampling-Faktor.

Abbildung 5.21: Einfluss des Downsampling-Faktors auf Messzeit und Punkt-zu-Punkt-Abweichung (A_Ernstberger 2025).

systematischen Abgleichs zwischen optischer Messung mit der Alicona μCMM und taktiler Referenzmessung mit der Zeiss F25. Als zentrales Bewertungskriterium dienten die Punkt-zu-Punkt-Abstände zwischen den jeweils registrierten Datensätzen, um sowohl lokale als auch globale Abweichungen quantifizierbar zu erfassen.

Tabelle 5.3: Verwendete Messparameter für die Alicona- μCMM -Messungen.

Parameter	Einstellung	Parameter	Einstellung
Objektiv	800A	Downsampling	8
Belichtungszeit	600 ms	Vertikale Auflösung	50 nm
Laterale Auflösung	< 12.2 μm	Kontrast	0.4
Beleuchtung	Ringlicht aktiviert	Polarisation	aktiviert
Kippwinkel	65°	Überlappungsanteil	40 %
Mittlere Messdauer		5,21 min	

Für den optimierten Parametersatz ist in Abbildung 5.22 exemplarisch das Histogramm der Punkt-zu-Punkt-Abweichungen dargestellt. Dieses basiert auf einer einzelnen Messung, bei der für jeden taktil erfassten F25-Messpunkt die lokale Distanz zur registrierten optischen Alicona-STL-Geometrie berechnet wurde.

Die Auswertung zeigt eine Standardabweichung der Punkt-zu-Punkt-Abstände von etwa 1,3 μm . Dieser Wert ist für einen direkten punkweisen Vergleich zwischen optischer und taktiler Messung als sehr gering zu bewerten und verdeutlicht die hohe Übereinstimmung der beiden Messsysteme bei geeigneter Parametrierung. Das verbleibende Messrauschen wirkt sich auf die nachfolgende Merkmalsextraktion nur in begrenztem Maße aus, da die relevanten

Qualitätsmerkmale auf aggregierten Größen beruhen und sich zufällige Abweichungen im weiteren Auswerteprozess weitgehend herausmitteln.

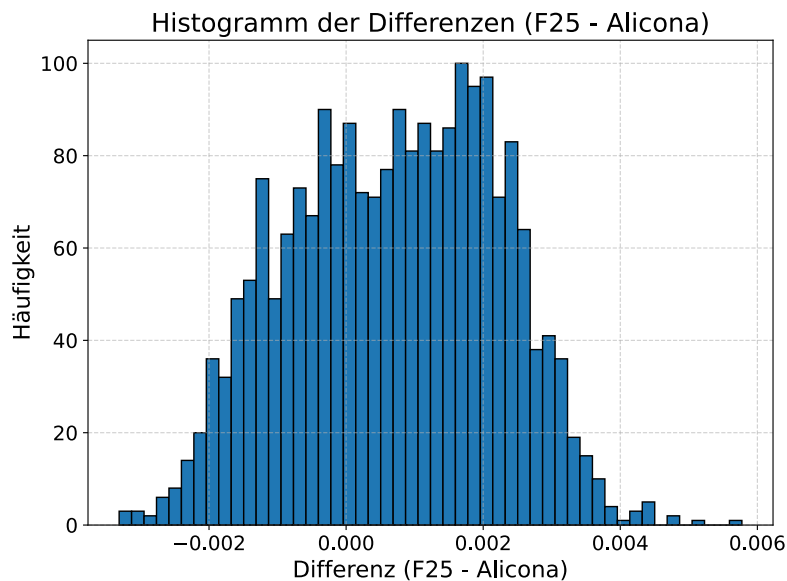


Abbildung 5.22: Beispielhaftes Histogramm der Punkt-zu-Punkt-Abweichungen zwischen einer optischen Alicona-Messung und der taktilen F25-Referenz (A_Ernstberger 2025).

5.6 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methodik grundsätzlich geeignet ist, eine konsistente geometrische Qualitätsbewertung von Mikro-Kronenrädern zu ermöglichen. Die Kombination aus mathematisch definierter Sollgeometrie, deterministischem Auswertalgorithmus und normnaher Messstrategie erlaubt eine reproduzierbare und geometrisch konsistente Bestimmung relevanter Qualitätsmerkmale.

Die mathematische Sollgeometrie stellt dabei einen hochaufgelösten, kontinuierlichen Referenzraum bereit, der gegenüber simulativ generierten Repräsentationen eine deutlich höhere geometrische Konsistenz aufweist. Insbesondere die Reduktion diskretisierungsbedingter Artefakte trägt wesentlich zur Stabilität der Auswertung bei.

Die Untersuchungen der Messstrategie verdeutlichen jedoch, dass die erreichbare Aussagekraft der Qualitätsbewertung maßgeblich durch die Qualität der Eingangsdaten begrenzt wird. Während die taktile Messung eine hochpräzise Referenz darstellt, ist sie mit Artefakten und erheblichem zeitlichem Aufwand verbunden. Die optische Messung hingegen unterliegt einem Zielkonflikt zwischen Auflösung, Messdauer und Messrauschen.

Die Variation des Downsampling-Faktors zeigt, dass eine Reduktion der Punktdichte bis zu einem gewissen Maß sowohl die Messzeit als auch die Abweichung zur Referenzmessung

verringert. Dieses Verhalten kann als Filtereffekt interpretiert werden, bei dem hochfrequentes Messrauschen geglättet wird. Eine maximale Punktdichte führt somit nicht zwangsläufig zu einer verbesserten geometrischen Beschreibung, sondern kann die Auswertung durch verstärkte Artefakte beeinflussen. Der gewählte Downsampling-Faktor 8 stellt in diesem Kontext einen geeigneten Kompromiss dar.

Für die Merkmalsberechnung ist entscheidend, dass sich verbleibendes Messrauschen nur begrenzt auf die abgeleiteten Qualitätskennwerte auswirkt, da diese auf aggregierten Größen basieren und zufällige Abweichungen weitgehend kompensiert werden. Damit wird die grundsätzliche Robustheit der definierten Merkmale gegenüber stochastischen Messabweichungen gezeigt.

Gleichzeitig ist zu betonen, dass die hier dargestellten Ergebnisse primär die methodische Funktionsfähigkeit und Plausibilität der Qualitätsbewertung belegen. Eine belastbare Validierung der kausalen Zusammenhänge zwischen Prozessabweichungen und geometrischen Merkmalen erfolgt erst auf Basis der in Kapitel 6 hergeleiteten Fehlerhypothesen und deren experimenteller Überprüfung in Kapitel 7.

6 Simulationsgestützte Ursache-Wirkungs-Analyse im Wälzfräsprozess

Die in Kapitel 5 entwickelten Qualitätsmerkmale ermöglichen eine normnahe Quantifizierung geometrischer Abweichungen von Mikro-Kronenrädern. Ihre Aussagekraft hinsichtlich zugrunde liegender Prozessabweichungen ist jedoch zunächst nicht gegeben und erfordert eine gezielte Validierung.

Ziel dieses Kapitels ist daher die Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Wälzfräsprozess, um die Interpretation der Merkmale zu fundieren. Hierzu wird ein kinematisches Simulationsmodell aufgebaut, mit dem definierte Prozess- und Werkzeugabweichungen gezielt variiert und deren Einfluss auf die resultierende Bauteilgeometrie systematisch untersucht werden können.

Der Einsatz der Simulation ist durch die eingeschränkte experimentelle Zugänglichkeit motiviert: Die Handhabung und Variation von Mikro-Kronenrädern ist aufwendig, sodass isolierte Untersuchungen einzelner Einflussgrößen an realen Bauteilen nur begrenzt möglich sind. Das Simulationsmodell ermöglicht daher eine ressourceneffiziente Analyse der zugrunde liegenden Mechanismen. Wesentliche Teile der in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden bereits in Bilen et al. (2026a) veröffentlicht.

Auf Basis der Simulationsergebnisse werden in Abschnitt 6.6 Fehlerhypothesen formuliert, die den Zusammenhang zwischen Prozessabweichungen und geometrischen Qualitätsmerkmalen beschreiben. Diese bilden die Grundlage für die in Kapitel 7 folgende quantitative Validierung.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die Anforderungen an das Simulationsmodell definiert. Anschließend erfolgt die Modellierung von Werkzeug (Abschnitt 6.2) und Prozess (Abschnitt 6.3). Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.4 vorgestellt und in Abschnitt 6.5 diskutiert, bevor die Ableitung der Fehlerhypothesen in Abschnitt 6.6 den Übergang zur Validierung der Auswertestrategie im Kapitel 7 bildet.

6.1 Anforderungen, Grenzen und Parametrierung des Modells

In diesem Abschnitt werden die konzeptionellen Rahmenbedingungen des entwickelten Simulationsmodells nach Bilen et al. (2026a) definiert. Zunächst werden Anforderungen und Modellabgrenzungen dargestellt, anschließend die Parametrierung beschrieben.

6.1.1 Anforderungen und Grenzen

Das entwickelte Simulationsmodell ist als rein kinematisch-geometrisches Modell ausgelegt. Physikalische Effekte des Zerspanungsprozesses – insbesondere Kräfte, thermische Einflüsse sowie Material- und Verschleißphänomene – werden bewusst nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt ausschließlich auf den geometrischen Konsequenzen der relativen Bewegung zwischen Werkzeug und Werkstück.

Ziel des Modells ist die qualitative Analyse geometrischer Abweichungen, die aus definierten Translations- und Rotationsfehlern des Werkzeugs resultieren. Auf dieser Basis werden Fehlerhypothesen zur Validierung der in Kapitel 5 entwickelten Qualitätsmerkmale abgeleitet.

Da die Verzahnungsgeometrie beim Wälzfräsen primär durch die Prozesskinematik bestimmt wird, wird angenommen, dass auch die dominanten systematischen Formabweichungen kinematischen Ursprungs sind. Die getroffenen Vereinfachungen ermöglichen eine isolierte Betrachtung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen und bilden eine geeignete Grundlage für die Analyse der entstehenden Geometriefehler.

6.1.2 Parametrierung des Modells

Die Parametrierung des Simulationsmodells basiert auf dem erzeugenden Evolventen-Stirnrad als zentraler Referenz des Wälzfräsprozesses. Dessen geometrische Grundparameter definieren das Werkzeugprofil und stellen die primären Einflussgrößen auf die resultierende Zahngeometrie dar.

Zu den wesentlichen Parametern zählen der Modul m , die Zähnezahlen des Stirn- und Kronenrades z_1 und z_2 , der Eingriffswinkel α sowie der Profilverschiebungsfaktor x . Diese bestimmen Zahngröße, Flankenform und Eingriffsverhältnisse. Ergänzend beeinflusst die axiale Breite des Stirnrads den wirksamen Eingriffsbereich und damit die resultierende Flankenbreite des Kronenrades.

6.2 Geometrische Modellierung des Wälzfräswerkzeugs

Dieser Abschnitt beschreibt die geometrische Modellierung des torusförmigen Wälzfräswerkzeugs nach Bilen et al. (2026a). Ziel ist es, die Werkzeuggeometrie zur Generierung des Kronenrades aus dem erzeugenden Stirnradprofil herzuleiten und mathematisch zu beschreiben. Hierzu werden zunächst die grundlegenden Zusammenhänge und Klassifikationen nach Roth (2013) eingeführt. Darauf aufbauend erfolgt die mathematische Beschreibung der Werkzeuggeometrie, die anschließend in eine diskrete, für die Simulation geeignete Form überführt wird.

6.2.1 Einordnung von Wälzfräswerkzeugen zur Herstellung von Kronenrädern nach Roth

Nach Roth (2013, S. 227) lassen sich Wälzfräswerkzeuge zur Herstellung von Kegel- bzw. Kronenrädern in drei Bauformen einteilen. Diese unterscheiden sich durch den Abstand zwischen Werkzeugachse und dem Teilkreismitelpunkt eines virtuellen, erzeugenden Stirnrads. Dieses virtuelle Stirnrad beschreibt im zweidimensionalen Schnitt die Profilform des Werkzeugs und führt in Abhängigkeit dieses Abstands zu tonnen-, kugel- oder torusförmigen Werkzeuggeometrien (vgl. Abbildung 6.1).

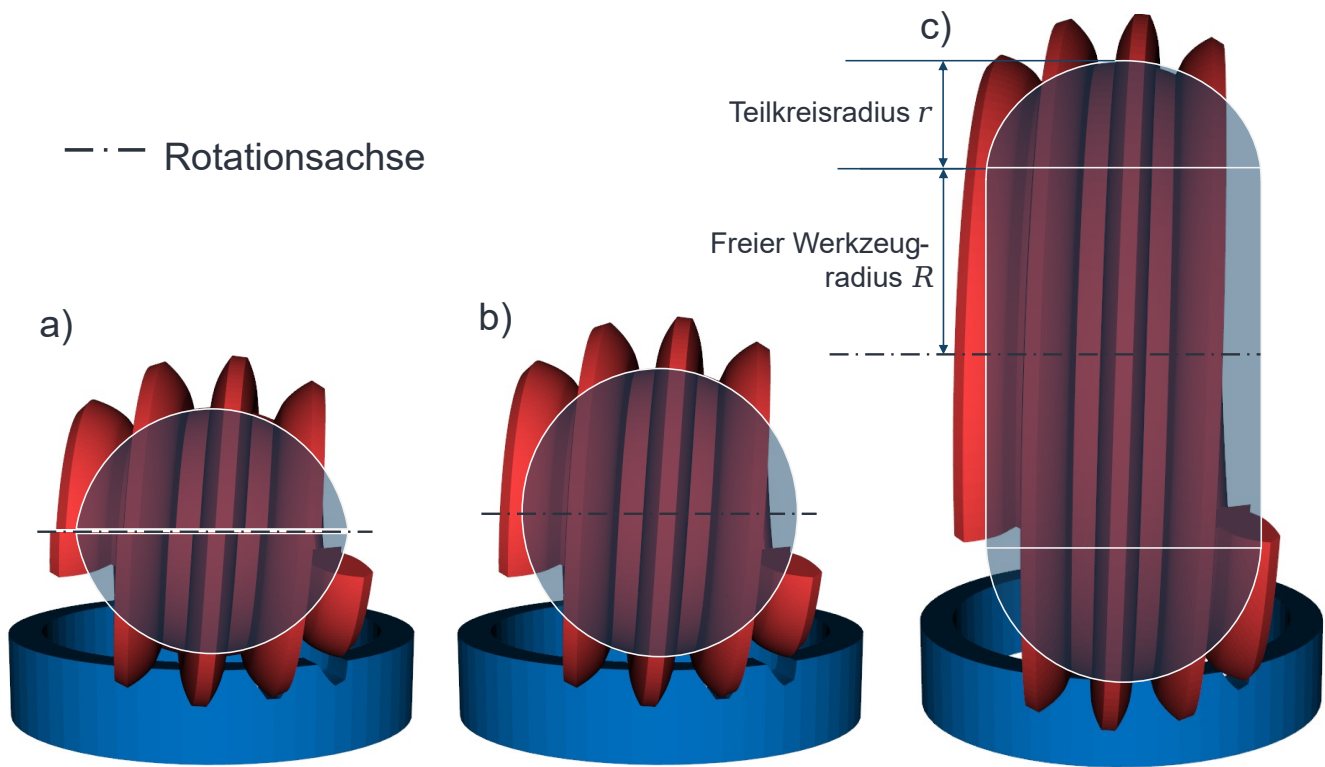


Abbildung 6.1: Fräsergeometrien nach Roth (2013, S. 227), eigene Darstellung aus Bilen et al. (2026a).

Für diese Arbeit wird die torusförmige Ausprägung gewählt, da sie dem industriellen Standard entspricht und größere wirksame Werkzeugdurchmesser ermöglicht (Roth 2013, S. 227).

Das Profil dieses Stirnrads definiert den Schneidquerschnitt. Analog zu zylindrischen Wälzfräsern sind die Schneiden gewindeartig auf der Werkzeugoberfläche angeordnet. Die Werkzeuggeometrie ergibt sich somit aus der kontinuierlichen Fortführung des Stirnradprofils entlang einer schraubenförmigen Bahn auf einem torusförmigen Grundkörper.

6.2.2 Generierung der Werkzeuggeometrie

Im Folgenden wird gezeigt, wie basierend auf den theoretischen Beschreibungen von Roth (2013), das Wälzfräswerkzeug als kontinuierliche, dreidimensionale Geometrie generiert wird.

6.2.2.1 Prinzip der Geometrieentstehung

Die Werkzeuggeometrie basiert auf einem diskreten Stirnradprofil, das durch eine Punktmenge $\mathbf{p}_j = (x_j, y_j, z_j)$ beschrieben wird (siehe Abbildung 6.2a). Die Anzahl der betrachteten Zähne ist dabei nicht beliebig gewählt: Während des Eingriffs befinden sich typischerweise drei Schneiden gleichzeitig im Kontakt mit dem Werkstück. Um die Kontinuität der Schneidenstruktur bei der Abbildung des Profils auf den Torus sicherzustellen, wird ein zusätzlicher Zahn berücksichtigt. Insgesamt werden somit vier Zähne modelliert, sodass bei einer vollständigen Umdrehung ein Zahn um eine Teilung weitergeschoben wird und ein kontinuierlicher Übergang zwischen den Schneiden gewährleistet ist.

Die Kopplung

$$\theta = \frac{\phi}{z_{\text{stirn}}} \quad 6.1$$

stellt sicher, dass nach einer vollständigen Umdrehung ($\phi = 2\pi$) das Profil exakt um eine Zahnteilung weitergeschoben ist. Dadurch geht ein Zahn kontinuierlich in den nächsten über, sodass eine geschlossene, gewindeartige Schneidenstruktur entsteht. Die resultierende Werkzeuggeometrie kann somit als Abbildung des Stirnradprofils auf eine torusförmige Fläche interpretiert werden (siehe Abbildung 6.2b).

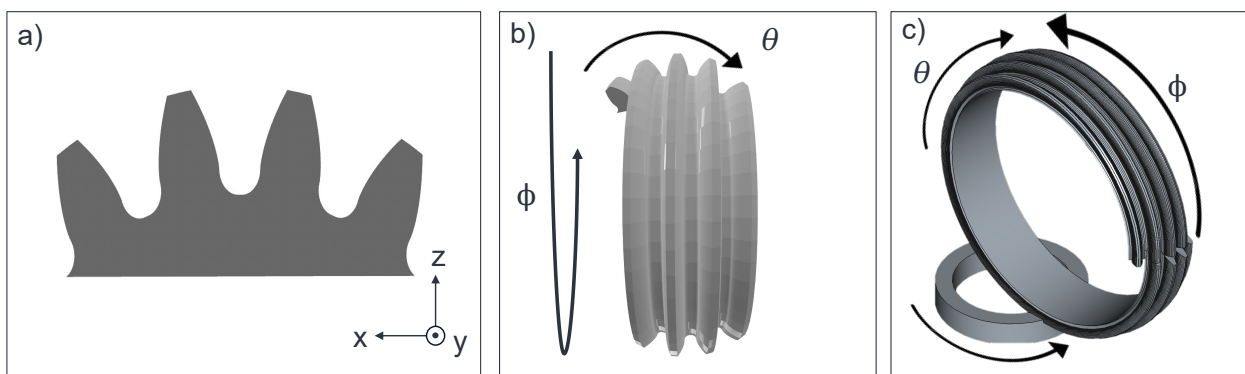


Abbildung 6.2: Werkzeugentstehung: a) Stirnradprofil, b) Darstellung der Winkel ϕ und θ , c) dreidimensionale Werkzeug-Werkstück-Konstellation (Bilen et al. 2026a).

6.2.2.2 Kinematische Transformation

Das Profil wird entlang einer Kreisbahn mit dem Radius R geführt, wobei R den Abstand zwischen Werkzeugachse und dem Teilkreismittelpunkt des virtuellen Stirnrads beschreibt. Für jede diskrete Position ϕ_i umfasst die Transformation drei Schritte:

1. Rotation des Profils um den Wälzwinkel $\theta_i = \phi_i / z_{stirn}$ zur Abbildung des Abwälzvorgangs,
2. Translation auf den Radius R ,
3. Rotation um die Werkzeugachse mit dem Winkel ϕ_i .

Die Einhüllende aller transformierten Profilpositionen bildet die wirksame Werkzeugoberfläche, auf der die Zähne gewindeartig angeordnet sind (siehe Abbildung 6.2b).

6.2.2.3 Kontinuierliche Beschreibung

Die Bahn des Profilmittelpunkts lässt sich somit als Raumkurve auf einem Torus beschreiben. Mit dem großen Torusradius R und dem Teilkreisradius bzw. kleinen Torusradius r des virtuellen Stirnrads ergibt sich für die mathematische Beschreibung des Wälzfräswerkzeuges (Do Carmo 2016):

$$\mathbf{r}(\phi) = \begin{bmatrix} \left(R + r \cos\left(\frac{\phi}{z_{stirn}}\right)\right) \cos \phi \\ \left(R + r \cos\left(\frac{\phi}{z_{stirn}}\right)\right) \sin \phi \\ r \sin\left(\frac{\phi}{z_{stirn}}\right) \end{bmatrix} \quad 6.2$$

Diese Gleichung beschreibt die Führungskurve des Stirnradprofils und definiert damit die Geometrie des Wälzfräswerkzeugs vollständig.

6.3 Aufbau der Fertigungssimulation

Aufbauend auf der Beschreibung des Werkzeuges im vorherigen Abschnitt wird im Folgenden die Fertigungskinetik modelliert. Zunächst wird die ideale Abwälzkinematik formuliert, die die grundlegende Werkzeug- und Werkstückbewegung beschreibt. Darauf aufbauend werden translatorische und rotatorische Fertigungsabweichungen gemäß Bilen et al. (2026a) in das Modell integriert. Aufgrund des effektiven Steigungswinkels des toroidalen Werkzeuges steht dieses im Eingriff jedoch schräg zur Zahnücke des Kronenrades, was zu einer asymmetrischen Materialabnahme führen würde. Daher wird in einem abschließenden Schritt eine Korrektur der Werkzeugorientierung eingeführt.

6.3.1 Modellierung der Abwälzbewegung

Die Fertigungssimulation beschreibt den Wälzfräsprozess als diskrete Folge gekoppelter Werkzeug- und Werkstückbewegungen. Der Materialabtrag erfolgt schrittweise durch boolesche Subtraktion des Werkzeugvolumens vom Werkstück, das als rotationssymmetrischer Hohlzylinder um die z -Achse modelliert ist.

Das Werkzeug rotiert mit dem Winkel ϕ_{tool} , während die Abwälzbewegung entlang des Kronenradumfangs durch eine kinematisch gekoppelte Rotation des Werkstücks mit dem Winkel θ_{crown} abgebildet wird. In jedem Simulationsschritt werden beide Körper entsprechend der Inkremente $\Delta\phi_{tool}$ und $\Delta\theta_{crown}$ transformiert und der Materialabtrag berechnet.

Die Kopplung stellt sicher, dass sich das Werkstück pro Werkzeugumdrehung um eine Teilung weiterdreht. Das Rotationsinkrement $\Delta\theta_{crown}$ ergibt sich aus dem Rotationsinkrement $\Delta\phi_{tool}$ und der Zahnzahl z_2 zu

$$\Delta\theta_{crown} = \frac{\Delta\phi_{tool}}{z_2}. \quad 6.3$$

Für die vollständige Erzeugung eines Kronenrades mit z_2 Zähnen ist eine Werkzeugdrehung von $360^\circ \cdot z_2$ erforderlich. Die Anzahl der Simulationsschritte N ergibt sich in Abhängigkeit des gewählten Rotationsinkrements $\Delta\phi_{tool}$ zu

$$N = \left\lceil \frac{360^\circ \cdot z_2}{\Delta\phi_{tool}} \right\rceil. \quad 6.4$$

6.3.2 Modellierung von Fertigungsabweichungen

Fertigungsabweichungen werden durch gezielte Modifikation der idealen Werkzeugtransformation eingebracht, wobei zwischen statischen translatorischen Abweichungen und dynamischen rotatorischen Abweichungen in Form von Taumelfehlern unterschieden wird.

6.3.2.1 Translatorische Abweichungen

Translatorische Abweichungen (vgl. Abbildung 6.3) beschreiben konstante Fehlstellungen des Werkzeugs relativ zum Werkstück, die durch einen Verschiebungsvektor $\Delta r = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ zur nominalen Werkzeugposition modelliert werden:

$$r_{real} = r_{nominal} + \Delta r. \quad 6.5$$

- **Tangentialer Versatz (Δx):** Ein Versatz in tangentialer Richtung führt zu einem asymmetrischen Eingriff des Werkzeugs in den Zahnzwischenraum und resultiert in einer ungleichmäßigen Materialabnahme an den beiden Zahnflanken.

- **Radialer Versatz (Δy):** In y -Richtung erfolgt im Prozess die kontinuierliche Vorschubbewegung des Werkzeugs relativ zum Werkstück. Diese Richtung ist somit kinematisch bereits durch eine zeitabhängige Bewegung belegt und stellt keinen statischen Freiheitsgrad dar.
- **Axialer Versatz (Δz):** Ein axialer Versatz bewirkt eine Verschiebung des Zahnprofils entlang der z -Achse und beeinflusst primär die Lage der Kontaktzone, ohne die grundsätzliche Symmetrie der Zahnform aufzuheben.

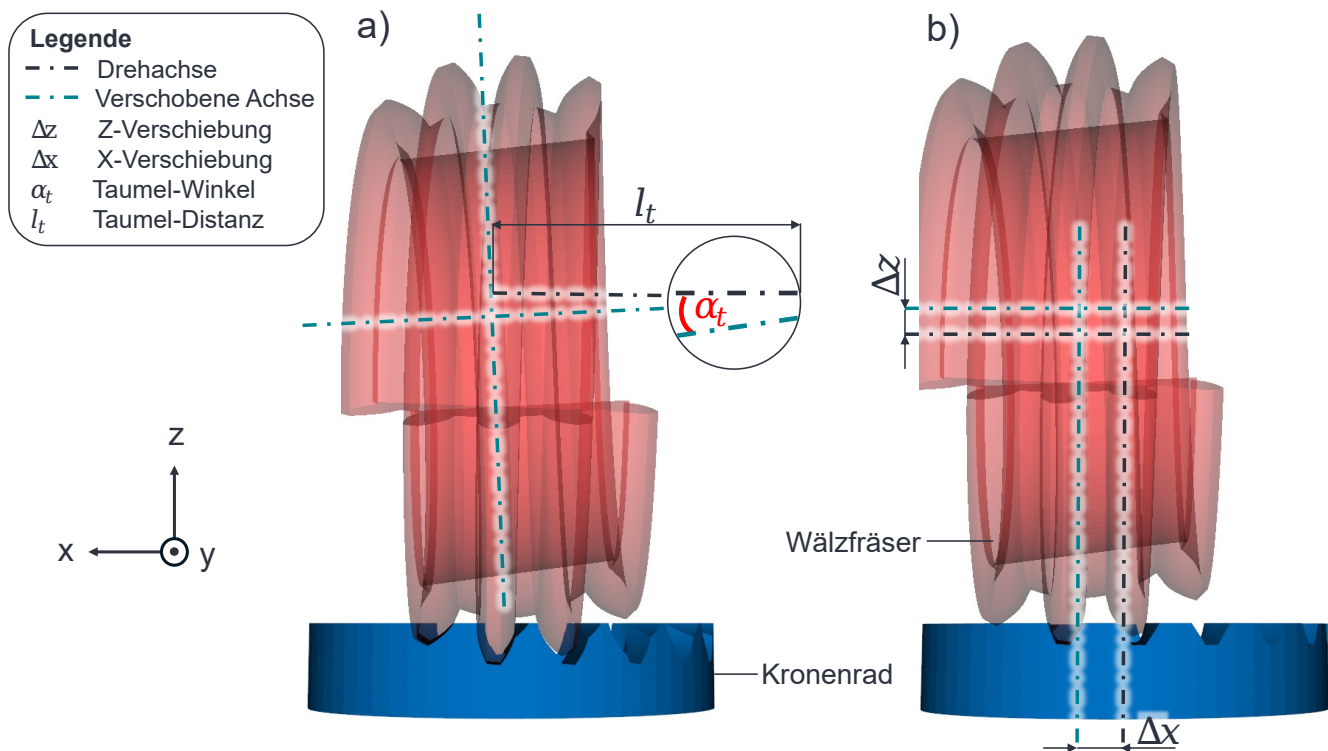


Abbildung 6.3: Visualisierung der modellierten Fertigungsabweichungen (Bilen et al. 2026a).

6.3.2.2 Rotatorische Abweichung (Taumelfehler)

Der Taumelfehler stellt eine praxisrelevante rotatorische Abweichung der Werkzeugachse dar, da er im Gegensatz zu statischen Versätzen zeitlich variiert und sich periodisch mit der Werkzeugrotation überlagert. Die ideale Werkzeugrotation wird durch den Werkzeugwinkel $\phi(t) = \omega t$ beschrieben, wobei ω die konstante Winkelgeschwindigkeit des Werkzeugs ist.

Der Taumel wird durch einen konstanten Taumelwinkel α_t sowie eine exzentrische Taumeldistanz l_t charakterisiert (vgl. Abbildung 6.3). Mathematisch wird er als gebundene Rotation modelliert, bei der eine geneigte Werkzeugachse synchron mit der Werkzeugrotation umläuft. Die resultierende zeitabhängige Rotationsmatrix lautet nach Anpassung der winkelabhängi-

gen Rotationsmatrix aus der Standardliteratur wie von Craig (2009, S. 31)

$$\mathbf{R}(\phi) = \mathbf{R}_x(\phi) \mathbf{R}_y(\alpha_t) \mathbf{R}_x(\phi), \quad 6.6$$

mit

$$\mathbf{R}_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_y(\alpha_t) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_t & 0 & \sin \alpha_t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_t & 0 & \cos \alpha_t \end{pmatrix}. \quad 6.7$$

Zusätzlich wird ein exzentrisches Rotationszentrum

$$\mathbf{l}_t = (l_t, 0, 0)^\top \quad 6.8$$

berücksichtigt, sodass sich die vollständige Taumeltransformation eines Werkzeugpunkts $\mathbf{x}$ zu

$$\mathbf{x}'(\phi) = \mathbf{R}(\phi) (\mathbf{x} - \mathbf{l}_t) + \mathbf{l}_t \quad 6.9$$

ergibt.

In der praktischen Fertigung wird der Taumel üblicherweise durch Rundlaufmessungen an der Werkzeugaufnahme minimiert, typischerweise im Neuzustand auf Werte unterhalb weniger Mikrometer. Aufgrund thermischer Effekte, Verschleiß und veränderter Spannbedingungen kann dieser Zustand jedoch nicht dauerhaft gewährleistet werden. Der Taumelfehler ist daher besonders kritisch, da er zu periodisch wechselndem Materialabtrag führt, der sich nicht eindeutig lokalen Prozessparametern zuordnen lässt und konventionell nur schwer kompensierbar ist.

6.3.3 Korrektur des effektiven Steigungswinkels des Werkzeugs

Beim Wälzfräsen von Kronenrädern muss das erzeugende Stirnradprofil aufgrund der Werkzeugsteigung relativ zur Werkstückachse gezielt angestellt werden, um eine gleichmäßige Materialabnahme auf beiden Zahnflanken sicherzustellen (Klocke et al. 2017, S. 187). Dieses Anstellen beschreibt eine zusätzliche Rotation des Werkzeugs um die z -Achse zur Korrektur des effektiven Steigungswinkels. Ursächlich ist die toroidale Wicklung des Stirnradprofils um das Kronenrad, entlang der sich der lokale Neigungswinkel des Profils kontinuierlich ändert. Ohne Korrektur würde dies zu einer asymmetrischen Belastung und Abtragung der Zahnflanken führen. Der Einfluss nimmt mit zunehmendem Werkzeugdurchmesser ab, da der erforderliche Steigungswinkel kleiner wird.

Zur Kompensation wird das Werkzeug nach der Generierung um einen mittleren Steigungswinkel ζ um die z -Achse rotiert. Dadurch wird der lokal variierende Steigungswinkel in eine repräsentative mittlere Orientierung überführt und eine symmetrische Bearbeitung beider Zahnflanken ermöglicht.

Der Korrekturwinkel ergibt sich aus dem Verhältnis der transversalen Teilung p_t zur Bogenlänge L einer vollständigen Wicklung:

$$\zeta = \arctan\left(\frac{p_t}{L}\right). \quad 6.10$$

Die Bogenlänge L ergibt sich dabei aus dem Bogenlängenintegral

$$L = \int_0^{2\pi} \left\| \frac{d\mathbf{r}(\phi)}{d\phi} \right\| d\phi, \quad 6.11$$

wobei sowohl die Umlaufbewegung um ϕ als auch die gekoppelte Eigenrotation θ berücksichtigt werden.

6.4 Ergebnisse der simulativen Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen im Wälzfräsprozess

Aufbauend auf dem in den vorangegangenen Abschnitten entwickelten Simulationsframework werden im Folgenden die Ergebnisse gemäß Bilen et al. (2026a) dargestellt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Geometrie von Kronenrädern analysiert. Der Fokus liegt dabei auf zwei Fehlerkategorien: statischen translatorischen Versätzen sowie dynamischen Taumel-Effekten. Jede Abweichung wird zunächst in der Simulation untersucht, um ihre geometrische Ausprägung auf den Zahnflanken zu verstehen und anschließend an realen Werkstücken validiert, die mit identischen, gezielt eingebrachten Parametervariationen gefertigt wurden.

6.4.1 Einfluss translatorischer Versätze

Die translatorischen Versätze Δx , Δy und Δz beschreiben statische Positionierfehler des Werkzeugs relativ zum Werkstück. In der vorliegenden Analyse wird der Versatz in Vorschubrichtung (Δy) vernachlässigt, da dieser lediglich den Zeitpunkt des Werkzeugeingriffs verschiebt, ohne die grundlegende Flankengeometrie zu verändern. Der Schwerpunkt liegt daher auf tangentialen (Δx) sowie radialen bzw. vertikalen (Δz) Abweichungen.

6.4.1.1 Tangentialer Versatz

Der tangentielle Versatz Δx erweist sich als der kritischste Parameter im Hinblick auf die Zahnsymmetrie.

Kinematischer Effekt und Simulation Wird das Werkzeug entlang der Tangente seiner Abwälzbahn verschoben, kommt es zu einem unausgebalancierten kinematischen Eingriff. Die Simulation zeigt eine asymmetrische Verteilung der funktionsrelevanten Flankenflächen: Auf der Seite, zu der das Werkzeug verschoben ist, vergrößert sich die wirksame Flankenfläche, während die gegenüberliegende Flanke einen ausgeprägten Unterschnitt aufweist.

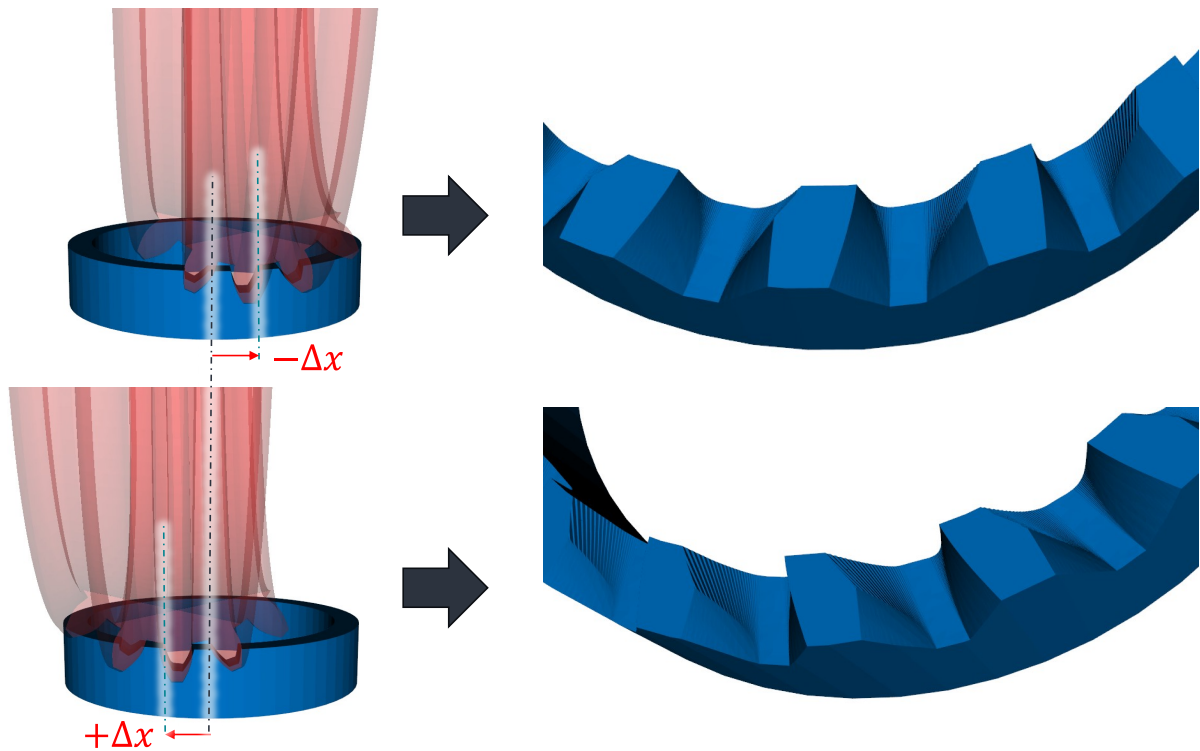


Abbildung 6.4: Simulierter Effekt eines x -Versatzes: Asymmetrische Flankenausbildung und lokaler Unterschnitt (Bilen et al. 2026a).

Experimenteller Vergleich Der Effekt des höheren Materialabtrags auf der der Verschiebung entgegengesetzten Seite wird in den realen Messungen bestätigt (vgl. Abbildung 6.5).

Auf der Seite, zu der das Werkzeug verlagert wurde, wächst der funktionsrelevante Flankenbereich, was auf eine breitere und stärker lasttragende Kontaktzone hinweist. Auf der gegenüberliegenden Seite nimmt der funktionsfähige Bereich hingegen signifikant ab.

Diese asymmetrische Veränderung der nutzbaren Geometrie ist in den in Abbildung 6.5 dargestellten Versuchsbauteilen deutlich erkennbar. Die Geometrie auf der linken Seite (Versatz $\Delta x = +0,1 \text{ mm}$) weist auf der Flanke in positiver x -Richtung eine erweiterte funktionale Zone auf, während die gegenüberliegende Flanke entsprechend reduziert ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Geometrie auf der rechten Seite (Versatz $\Delta x = -0,1 \text{ mm}$) einen ausgeprägteren Unterschnitt sowie eine deutliche Verringerung des funktionsrelevanten Bereichs auf der Flan-

ke in negativer x -Richtung, wobei auch hier die jeweils gegenüberliegende Flanke reduziert ist. Damit wird das in der Simulation beobachtete Verhalten bestätigt.

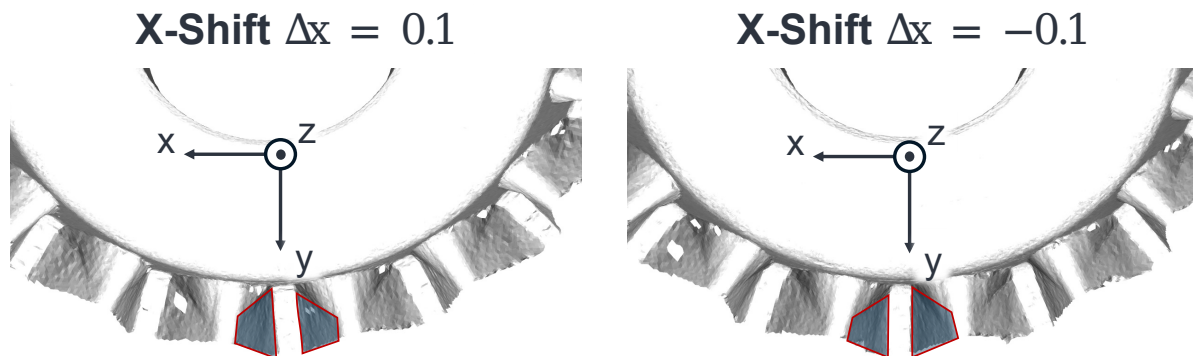


Abbildung 6.5: Vergleich gemessener Zahnprofile bei tangentialem Werkzeugversatz. Links: Versatz von $+0,1$ mm (positive x -Richtung), rechts: Versatz von $-0,1$ mm (negative x -Richtung) (Bilen et al. 2026a).

6.4.1.2 Axialer Versatz

Kinematischer Effekt und Simulation Die Simulation zeigt, dass die Erhöhung der Werkzeugeindringtiefe ($\Delta z < 0$) zu einer proportionalen Zunahme der Zahnhöhe und zur Abnahme der Zahndicke führt. Dadurch verändert sich zudem insbesondere die Zahnkopfgeometrie: Die Zähne werden zunehmend „spitz“ und die Breite der Kopfebene nimmt ab (vgl. Abbildung 6.6). Eine zu geringe Eindringtiefe führt hingegen zu einer unvollständigen Zahnausbildung und zu einem reduzierten Überdeckungsgrad.

Experimenteller Vergleich Die Validierung an realen Bauteilen bestätigt, dass die axiale Werkzeugposition direkt das radiale Zahnprofil beeinflusst (vgl. Abbildung 6.7). Die Messungen zeigen, dass eine zu große Eindringtiefe zu einer kritischen Reduktion der Zahnkopfdicke führt, die unter Umständen unter sicherheitsrelevante Grenzwerte der Zahnfestigkeit fallen kann.

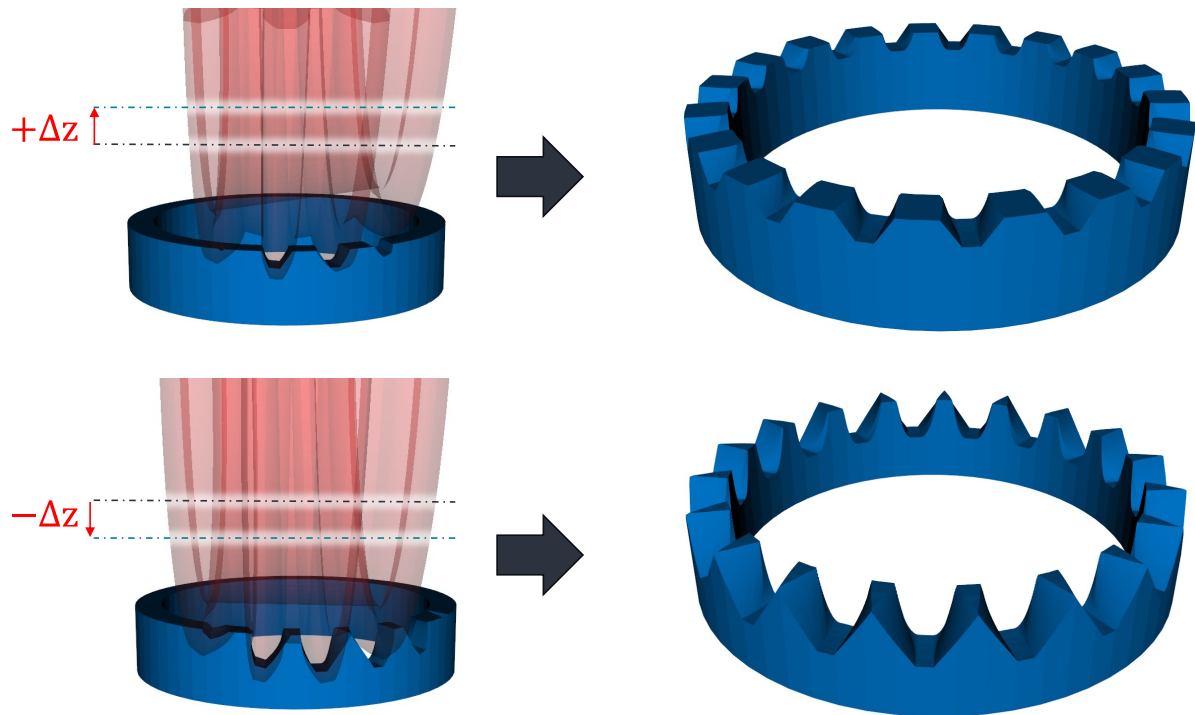


Abbildung 6.6: Simulierter Effekt eines z-Versatzes: Variation der Zahnhöhe und der Zahnkopfdicke (Bilen et al. 2026a).

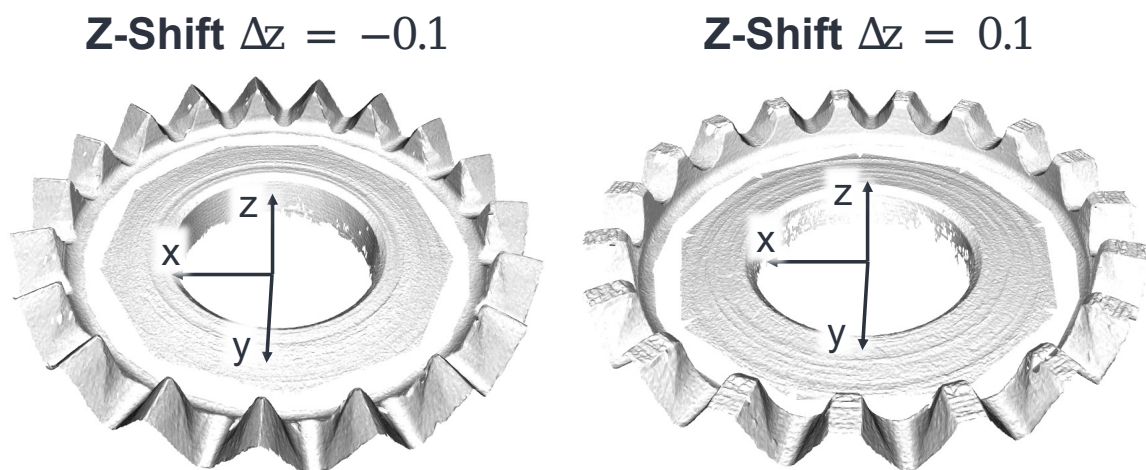


Abbildung 6.7: Experimenteller Einfluss des z-Versatzes: Gemessene Abweichungen in Zahnhöhe und Profilkrümmung (Bilen et al. 2026a).

6.4.2 Einfluss dynamischer Taumelfehler

Im Gegensatz zu statischen Versätzen führt der Taumelfehler zu einer zeitabhängigen Abweichung, die periodisch mit dem Rotationswinkel ϕ variiert.

Kinematischer Effekt und Simulation Die Taumelbewegung führt zu mehreren überlagerten Schneidbahnen. Die Simulation zeigt, dass die stärksten Schädigungen an der Stelle maximaler Exzentrizität auftreten, an der das Werkzeug eine charakteristische Kerbe oder Furche – abhängig von der Drehrichtung einseitig – in die Flanke einprägt. Diese Kerben treten insbesondere im inneren, unterschrittenen Bereich des Zahnes auf, da dort die Eingriffsbedingungen und die lokale Relativkinematik besonders sensitiv gegenüber Taumelabweichungen sind. Darüber hinaus kommt es zu lokalen Materialabträgen im Bereich des Zahnkopfes. Beide Effekte sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

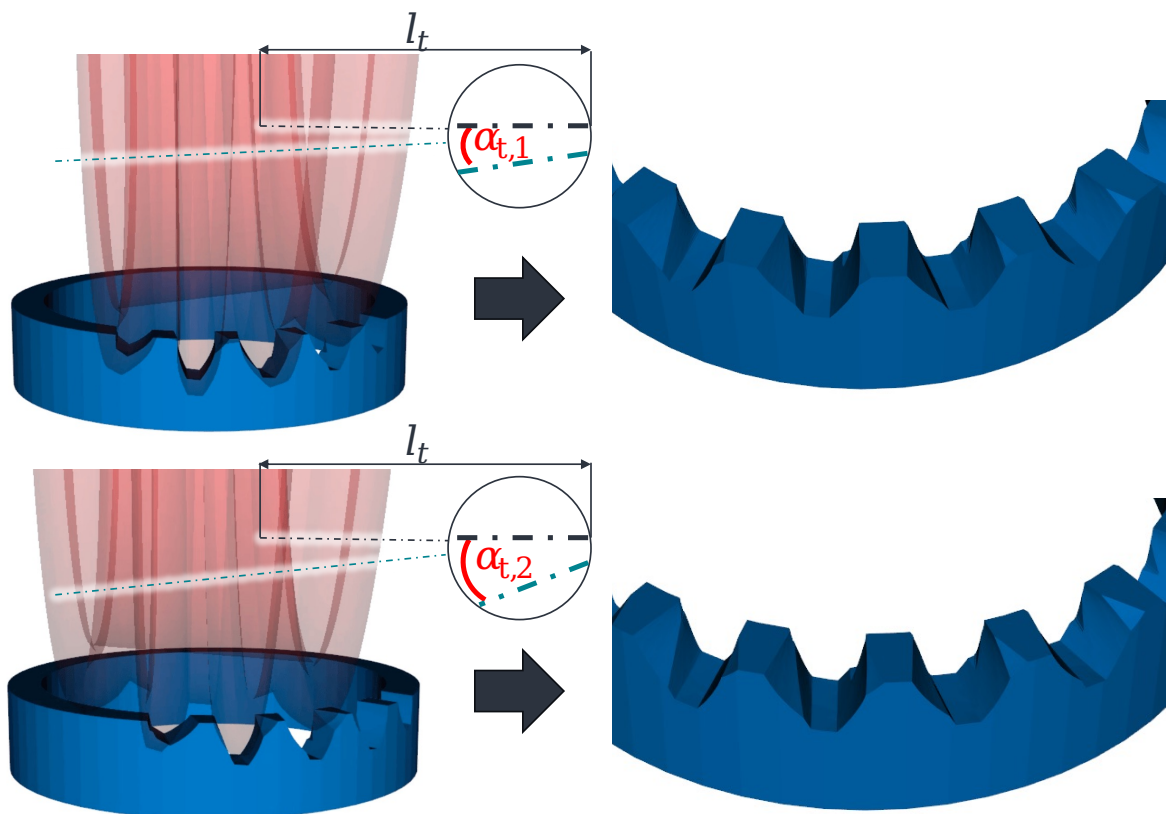


Abbildung 6.8: Simulierter Taumelfehler: Dynamische Oberflächenkerben und periodische Flankenabweichungen (Bilen et al. 2026a).

Experimenteller Vergleich Der Vergleich mit gefertigten Bauteilen bestätigt das in der Simulation vorhergesagte Wirkprinzip (vgl. Abbildung 6.9). Die charakteristischen Kerben

treten auch in der realen Geometrie einseitig auf und folgen der durch die Prozesskinematik bestimmten Orientierung.

Die in der Simulation vorhergesagten Strukturen treten in der Realität in vergleichbarer Ausprägung auf. Insbesondere die einseitige Kerbenbildung sowie die periodische Struktur der Flankenabweichungen stimmen qualitativ mit den Messungen überein. Die experimentellen Flankentopographien zeigen ebenfalls eine erhöhte Facettierung sowie eine winkelabhängige Segmentierung der Oberfläche, was den simulierten kinematischen Überlagerungseffekten direkt entspricht.

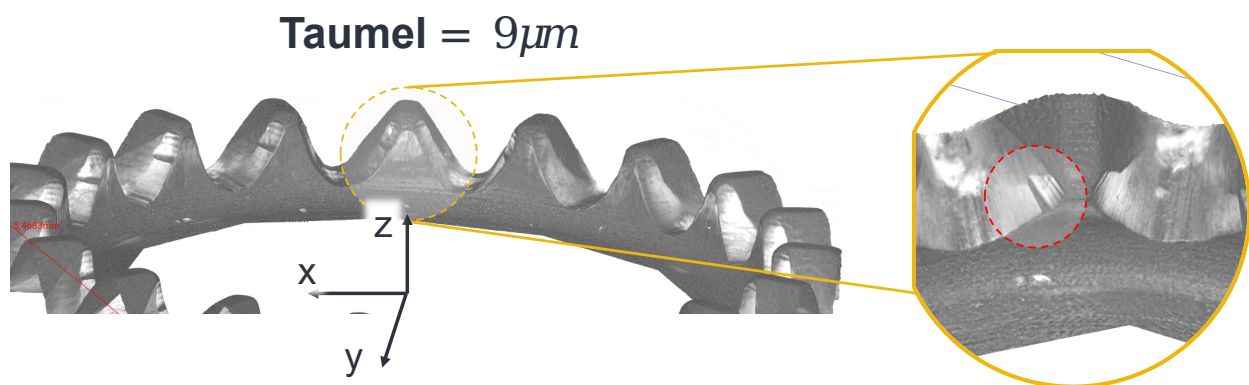


Abbildung 6.9: Versuchsbauteil, gefertigt mit Taumel von 9 μm; experimentell beobachtete, einseitig auftretende Kerben infolge von Taumelabweichungen. In der Vergrößerung wird zudem eine lokale Zerstörung weiterer Flankenbereiche sichtbar.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Simulationsmodell die zentralen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Wälzfräsprozess von Mikro-Kronenrädern qualitativ abbildet. Die untersuchten Werkzeugabweichungen führen zu klar unterscheidbaren, geometrisch interpretierbaren Abweichungsmustern, die sich in den Messdaten real gefertigter Bauteile wiederfinden. Damit wird bestätigt, dass die zugrunde liegende kinematische Modellierung geeignet ist, die dominanten geometriebildenden Mechanismen des Prozesses realitätsnah zu beschreiben.

Der tangentialer Versatz Δx erweist sich als dominanter Einflussfaktor, da er unmittelbar die Symmetrie der Zahnflanken sowie die Ausprägung des Querschnitts beeinflusst. Die resultierenden Änderungen der funktionsrelevanten Flankenbereiche sind sowohl geometrisch als auch funktional von hoher Relevanz. Der axiale Versatz Δz wirkt primär auf Zahnhöhe und Zahnkopfdicke und beeinflusst damit insbesondere aufgrund der höhenabhängigen Flankenlinienform die Kontaktbedingungen im Zahneingriff.

Dynamische Taumelfehler zeigen ein grundsätzlich anderes Wirkprinzip, das durch eine zeitlich variierende Überlagerung der Schneidbahnen charakterisiert ist. Die Simulation prognostiziert hierbei ausgeprägte periodische Flankenstörungen sowie lokal konzentrierte Kerben im unterschrittenen Bereich der Zahnflanke infolge maximaler Exzentrizität. Insbesondere die einseitige Kerbenbildung tritt bei real untersuchten Bauteilen ebenfalls auf. Die experimentellen Flankentopographien zeigen qualitativ eine erhöhte Facettierung, was den simulierten kinematischen Überlagerungseffekten direkt entspricht.

Das Modell beschreibt somit die Entstehung der beobachteten Geometrieabweichungen ursächlich richtig und bildet eine belastbare Grundlage für die Analyse und Interpretation prozessinduzierter Fehler. Die identifizierten, charakteristischen Abweichungsmuster lassen sich dabei eindeutig spezifischen Prozessabweichungen zuordnen und zeigen konsistente, physikalisch interpretierbare Wirkzusammenhänge.

Aus diesen beobachteten Ursache-Wirkungs-Beziehungen lassen sich im nächsten Schritt gezielt Fehlerhypothesen ableiten, die die dominanten Zusammenhänge zwischen Werkzeugabweichungen und geometrischen Qualitätsmerkmalen formal beschreiben und einer systematischen Untersuchung der Qualitätsmerkmale aus Kapitel 5 zugänglich machen.

6.6 Ableitung von Fehlerhypothesen

Auf Basis der zuvor gewonnenen Simulationsergebnisse werden im Folgenden Fehlerhypothesen nach Bilen et al. (2026c) formuliert, die den Zusammenhang zwischen definierten Prozessabweichungen und resultierenden geometrischen Qualitätsmerkmalen beschreiben. Ziel ist die strukturierte Überführung der qualitativen Analyse in überprüfbare Ursache-Wirkungs-Annahmen als Grundlage für die nachfolgende empirische Validierung und Modellbildung. Diese Hypothesen dienen insbesondere dazu, die in Kapitel 5 eingeführten Qualitätsmerkmale hinsichtlich ihrer Sensitivität, Trennschärfe und physikalischen Interpretierbarkeit zu bewerten.

Zur strukturierten Untersuchung werden drei repräsentative Fehlerhypothesen betrachtet. Obwohl in realen Prozessen mehrere Einflussgrößen gleichzeitig wirken, ermöglichen diese eine isolierte Analyse dominanter Zusammenhänge und bilden damit die Grundlage für ein systematisches Prozessverständnis.

H1 – Axialer Werkzeugversatz (Δz): Eine axiale Verschiebung des Wälzfräswerkzeugs verändert die axiale Lage des erzeugten Zahnprofils und damit die effektive Eingriffssituation entlang der Zahnflanke. Für einen idealen axialen Versatz wird das Profil im Wesentlichen *äquidistant* verschoben, sodass sich der Profilwinkel nicht systematisch ändern sollte. Erwartet wird daher primär eine systematische Reaktion der funktionalen Zahndickenabweichung

Δt sowie – aufgrund des höhenabhängigen Eingriffswinkels beim Kronenrad – eine Veränderung der flankenbezogenen Winkelkennwerte (z. B. $f_{H\beta}$ bzw. flankenwinkelbezogene Abweichungsmetriken).

H2 — Tangentialer Werkzeugversatz (Δx) Ein tangentialer Versatz führt zu einer Links–Rechts-Asymmetrie im funktionalen Zahnzwischenraum, wobei auf der Versatzseite zusätzliche Flankenfläche entsteht und die gegenüberliegende Seite zum Unterschnitt tendiert. Diese laterale Asymmetrie sollte sich insbesondere in den Links–Rechts-Verhältnissen der Profil- und Flankenkenngößen, also etwa in $F_{\alpha,\text{links}}/F_{\alpha,\text{rechts}}$ sowie $F_{\beta,\text{links}}/F_{\beta,\text{rechts}}$, widerspiegeln. Ergänzend sollte sich dieser Zusammenhang auch in dem in Abschnitt 5.3.1 eingeführten Indikator für Exzentrizität r_e zeigen. Die Hypothese adressiert damit insbesondere die Fähigkeit der definierten Qualitätsmerkmale, richtungsabhängige geometrische Veränderungen zuverlässig zu erfassen.

H3 — Dynamischer Taumel (Taumelfehler) Ein dynamischer Taumel der Werkzeugachse führt zu zeitabhängigen Eingriffsstörungen und fördert die Ausbildung lokaler Facettenstrukturen auf den Zahnflanken. Erwartet wird eine erhöhte Unregelmäßigkeit der Oberflächentopographie, die sich insbesondere in formbezogenen Abweichungskennwerten ($f_{f\alpha}, f_{f\beta}$) widerspiegelt. Die Hypothese zielt darauf ab, zu prüfen, ob dynamische Prozessstörungen anhand charakteristischer Muster in den geometrischen Qualitätsmerkmalen identifiziert werden können.

7 Körperschallbasierte Vorhersage geometrischer Fertigungsabweichungen

Eine zentrale Hypothese dieser Arbeit ist, dass sich aus dem im Wälzfräsprozess erfassten Körperschallsignal mit ausreichender Prognosegüte auf geometrische Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern schließen lässt (siehe Abschnitt 1.3). Ziel dieses Kapitels ist die Untersuchung dieser Zusammenhänge auf Basis einer durchgängigen datengetriebenen Verarbeitungskette, deren wesentliche Bestandteile im Rahmen der Arbeit von Bilen et al. (2026b) veröffentlicht wurden.

Zu Beginn erfolgt eine Untersuchung der Auswertestrategie (Abschnitt 7.1). Dabei wird überprüft, inwieweit die in Kapitel 5 definierten Qualitätsmerkmale geeignet sind, die in Abschnitt 6.6 abgeleiteten Fehlerhypothesen konsistent und physikalisch plausibel abzubilden. Grundlage bildet eine DoE-Versuchsreihe mit 225 Kronenrädern. Anschließend wird die Datenverarbeitungskette beschrieben, die in Abbildung 7.1 dargestellt ist.

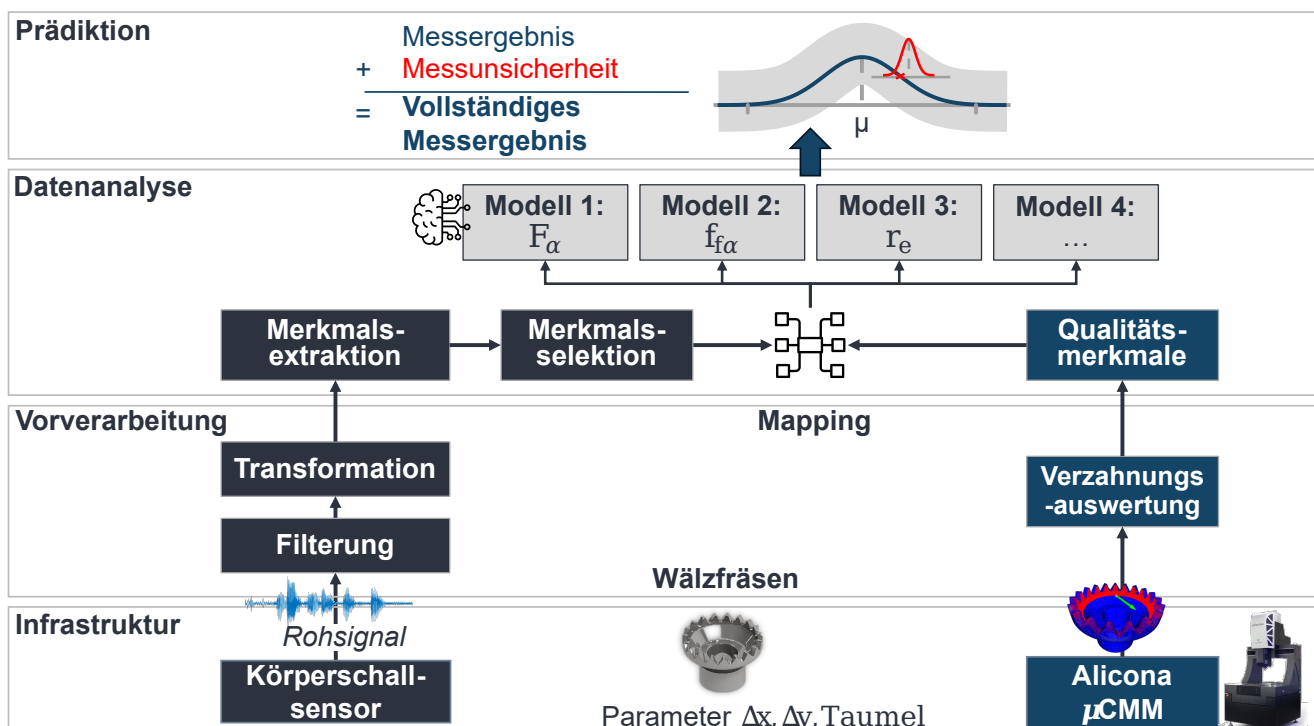


Abbildung 7.1: Struktur der Datenverarbeitungskette zur körperschallbasierten Qualitätsvorhersage (Bilen et al. 2026b)¹.

Die Abbildung zeigt links die Verarbeitung der Körperschalldaten von der Sensorintegration bis zur Merkmalsextraktion, während rechts die Messung und Aufbereitung der geometri-

¹Darstellung Alicona μCMM : <https://www.alicon.com/de/produkte/optisches-koordinatenmessgerät>, zuletzt geprüft am 02.04.2026

schen Qualitätsmerkmale als Zielgrößen erfolgt. Beide Datenströme werden im Rahmen der Modellbildung zusammengeführt und im Rahmen von Kapitel 8 hinsichtlich ihrer Unsicherheit untersucht.

Die Datenverarbeitung umfasst die Integration der Sensorkette (Abschnitt 7.2), die Signalerfassung und -vorverarbeitung (Abschnitt 7.3) sowie die Merkmalsextraktion und -selektion (Abschnitt 7.4). Die Datengenerierung im Rahmen der statistischen Versuchsplanung wird in Abschnitt 7.5 dargestellt.

Darauf aufbauend erfolgt die Modellentwicklung in Abschnitt 7.6. Hierbei werden die extrahierten Körperschallmerkmale mit den optisch bestimmten Qualitätsmerkmalen (Labels) verknüpft und für jedes Merkmal überwachte Vorhersagemodelle trainiert.

Die Ergebnisse der Modellbildung werden in Abschnitt 7.7 präsentiert und abschließend in Abschnitt 7.8 diskutiert. Die Bewertung der Modellunsicherheiten erfolgt in Kapitel 8.

7.1 Vorgehen zur Validierung der Strategie zur Qualitätsbewertung

Die Validierung der in Kapitel 5 eingeführten geometrischen Qualitätsmerkmale erfolgt mittels der in Abschnitt 6.6 formulierten Fehlerhypothesen nach Bilen et al. (2026c). Diese beschreiben den erwarteten Zusammenhang zwischen definierten Prozessabweichungen und den resultierenden Qualitätsmerkmalen, insbesondere für die betrachteten Störgrößen axialer Versatz Δz (H1), tangentialer Versatz Δx (H2) sowie Taumel (H3).

Ziel der Validierung ist es, zu überprüfen, inwieweit die Qualitätsmerkmale diese Ursache-Wirkungs-Beziehungen konsistent abbilden. Hierzu wird eine kombinierte Analyse aus experimenteller Sensitivitätsuntersuchung und datengetriebener Modellierung durchgeführt, die sowohl die Sichtbarkeit als auch die quantitative Modellierbarkeit der Zusammenhänge bewertet.

Als Datengrundlage dient die in Abschnitt 7.5 beschriebene Versuchsreihe, in der die relevanten Prozessparameter systematisch variiert werden. Die Validierung erfolgt in zwei komplementären Schritten:

(1) Deskriptive Analyse und Sensitivitätsuntersuchung Zunächst werden die Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit der jeweiligen Prozessparameter ausgewertet. Hierzu werden die Merkmalsausprägungen über den korrespondierenden Parameterstufen dargestellt, beispielsweise in Form von Boxplots oder Streudiagrammen.

Diese Darstellung ermöglicht eine direkte visuelle Bewertung der Sensitivität der Merkmale gegenüber gezielten Parameteränderungen. Insbesondere wird untersucht,

- ob sich systematische Verschiebungen der Merkmalsausprägungen mit zunehmender Parameteränderung zeigen,
- ob monotone oder richtungsabhängige Zusammenhänge vorliegen,
- sowie inwieweit sich unterschiedliche Parameterzustände im Merkmalsraum voneinander trennen lassen.

Die Ergebnisse dieser Analyse dienen der qualitativen Überprüfung der in Kapitel 6 formulierten Fehlerhypothesen.

(2) Datengetriebene Vorwärtsmodellierung Ergänzend zur deskriptiven Analyse werden datengetriebene Modelle trainiert, die die Abbildung von den Prozessparametern (x-Shift, z-Shift, Taumel) auf die geometrischen Qualitätsmerkmale (F_α , F_β etc.) approximieren:

$$\mathbf{q} = f(\mathbf{p})$$

mit den Prozessparametern $\mathbf{p}$ und den Qualitätsmerkmalen $\mathbf{q}$.

Die Modellgüte wird anhand von Testdatensätzen und Kreuzvalidierung bewertet. Eine hohe Vorhersagegüte (z. B. gemessen durch R^2) wird dabei als Indikator dafür interpretiert, dass die betrachteten Qualitätsmerkmale die zugrunde liegenden Prozesszustände konsistent und mit ausreichender Informationsdichte abbilden.

Ergänzend zur deskriptiven Analyse erlaubt dieses Vorgehen eine Bewertung der statistischen Abbildbarkeit nichtlinearer Zusammenhänge zwischen Parametern und Qualitätsmerkmalen. Die Modellierung liefert zudem Hinweise auf die relative Bedeutung einzelner Parameter sowie auf mögliche Überlagerungseffekte. Kausale Interpretationen stützen sich dabei nicht auf die Regressionsmodelle selbst, sondern auf die in Kapitel 6 simulativ abgeleiteten Wirkmechanismen.

7.2 Integration der Sensorkette in die Wälzfräsmaschine

Die Integration der Körperschallsensorik in die verwendete Wälzfräsmaschine erfolgte im Rahmen der Arbeit von Schiller et al. (2023) in Zusammenarbeit mit *Dentsply Sirona*, in der die körperschallbasierte Untersuchung des Wälzfräsprozesses zur Herstellung von Mikro-Stirnrädern adressiert wurde. In diesem Kontext wurde der piezoelektrische Körperschallsensor erstmals in die Maschine integriert und hinsichtlich Positionierung und Kopplung ausgelegt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieselbe Wälzfräsanlage für die Fertigung von Mikro-Kronenrädern umgebaut. Da die grundlegenden Prozessbedingungen und die mechanische Struktur der Maschine unverändert blieben, konnte die bestehende Sensorkette unverändert übernommen werden. Anpassungen an Sensorposition, Halterung oder Ankopplung waren hierfür nicht erforderlich.

Der Sensor ist werkzeugnah am Werkzeughalter montiert, wodurch ein konstanter Abstand zur Eingriffszone gewährleistet ist und dynamische Dämpfungseinflüsse reduziert werden. Eine direkte Anbringung am Werkzeug oder Werkstück ist aufgrund der geringen Bauteilabmessungen nicht realisierbar. Die Montage erfolgt auf einer speziell konstruierten Halterung, die am Wälzfräsaggregat verschraubt ist. Der Sensor wird mit dem vom Hersteller vorgegebenen Anzugsmoment von 8 Nm befestigt, um reproduzierbare Kopplungsbedingungen sicherzustellen. Abbildung 7.2 zeigt die vollständige Integration des Sensors in die Maschine.

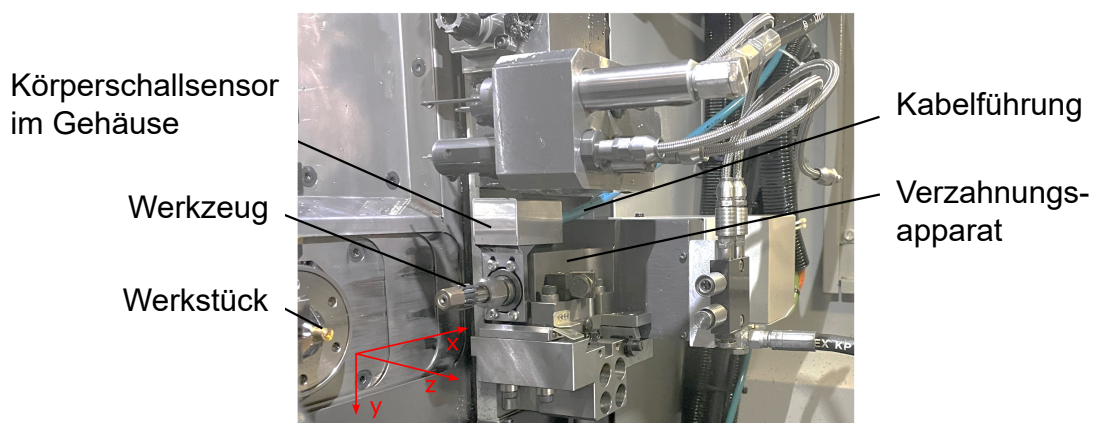


Abbildung 7.2: Anbringung des Körperschallsensors am Wälzfräsapparat (Schiller et al. 2023).

7.3 Signalerfassung und -vorverarbeitung

In diesem Abschnitt wird die Erfassung und Aufbereitung der Körperschallsignale beschrieben, die als Grundlage für die anschließende Merkmalsextraktion und Modellbildung dienen. Ziel ist es, reproduzierbare und qualitativ hochwertige Signalverläufe bereitzustellen, die eine robuste datengetriebene Analyse ermöglichen.

7.3.1 Signalerfassung

Die Signalerfassung erfolgt über das Hochfrequenz-Körperschallmesssystem *Optimizer4D* der Firma QASS (vgl. Abbildung 7.3). Das Sensorsignal wird über eine abgeschirmte Leitung an einen Vorverstärker übertragen und anschließend digitalisiert. Das System verfügt über vier simultan arbeitende Messkanäle sowie eine maximale Abtastrate von bis zu 100 MHz,

wodurch auch kurzzeitige hochfrequente Impulsereignisse mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden können (QASS GmbH 2025). Zur frequenzbasierten Analyse der Signale wird eine parallele Fouriertransformation mit einem zeitlichen Abstand von bis zu $40\text{ }\mu\text{s}$ pro Spektrum durchgeführt.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der erfassten Körperschalldatensätze ist eine reproduzierbare zeitliche Referenzierung der Messungen erforderlich. Hierfür wird die Datenerfassung einheitlich getriggert, sodass alle Signalaufzeichnungen synchron zum Prozessbeginn erfolgen. Der Beginn der Messung wird über die gezielte Ansteuerung eines digitalen Triggersignals direkt aus der Maschinensteuerung realisiert. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass sämtliche Körperschallsignale prozesssynchron und unter identischen zeitlichen Startbedingungen aufgezeichnet werden.

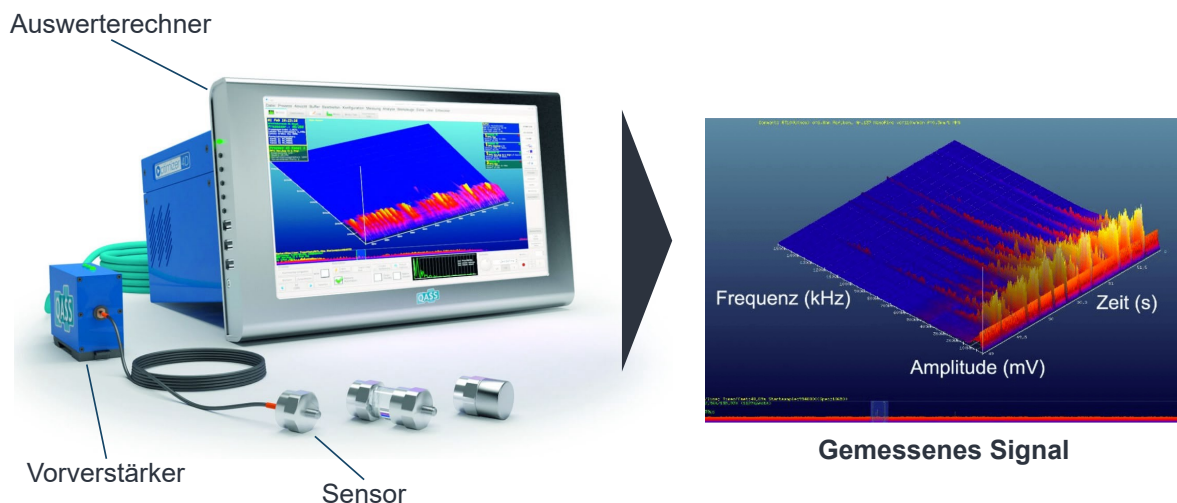


Abbildung 7.3: System zur Erfassung des Körperschallsignals der Firma QASS (QASS GmbH 2025)¹.

7.3.2 Datenvorverarbeitung

Vor der weiteren Signalverarbeitung werden die erfassten Körperschalldaten einer grundlegenden Datenvorverarbeitung unterzogen. Zur Reduktion hochfrequenter Störanteile und zur Eliminierung einzelner Ausreißer wird ein Gauß-Filter eingesetzt (León et al. 2011, S. 362). Ergänzend erfolgt eine automatische Fehlstellen- und Ausreißererkennung, um unplausible Messpunkte infolge von Messartefakten, Übersteuerungen oder Übertragungsfehlern zu identifizieren und aus den Datensätzen zu entfernen.

¹Quelle Darstellungen: <https://www.qass.net>, zuletzt geprüft am 02.04.2026.

7.4 Merkmalsextraktion und -selektion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie sich die Modellgüte bei der Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale unterscheidet, wenn (i) der vollständige Merkmalsraum verwendet wird, (ii) eine dimensionsreduzierte Hauptkomponentendarstellung (PCA) genutzt wird oder (iii) eine explizite Merkmalsselektion erfolgt. Grundlage hierfür bildet der in diesem Kapitel definierte Merkmalsraum aus Körperschallsignalen sowie dessen Transformation und Reduktion. Die folgende Abbildung visualisiert den Datenverarbeitungsprozess von der Datenvorverarbeitung über die Transformation und Merkmalsextraktion bis hin zur Merkmalsselektion schematisch:

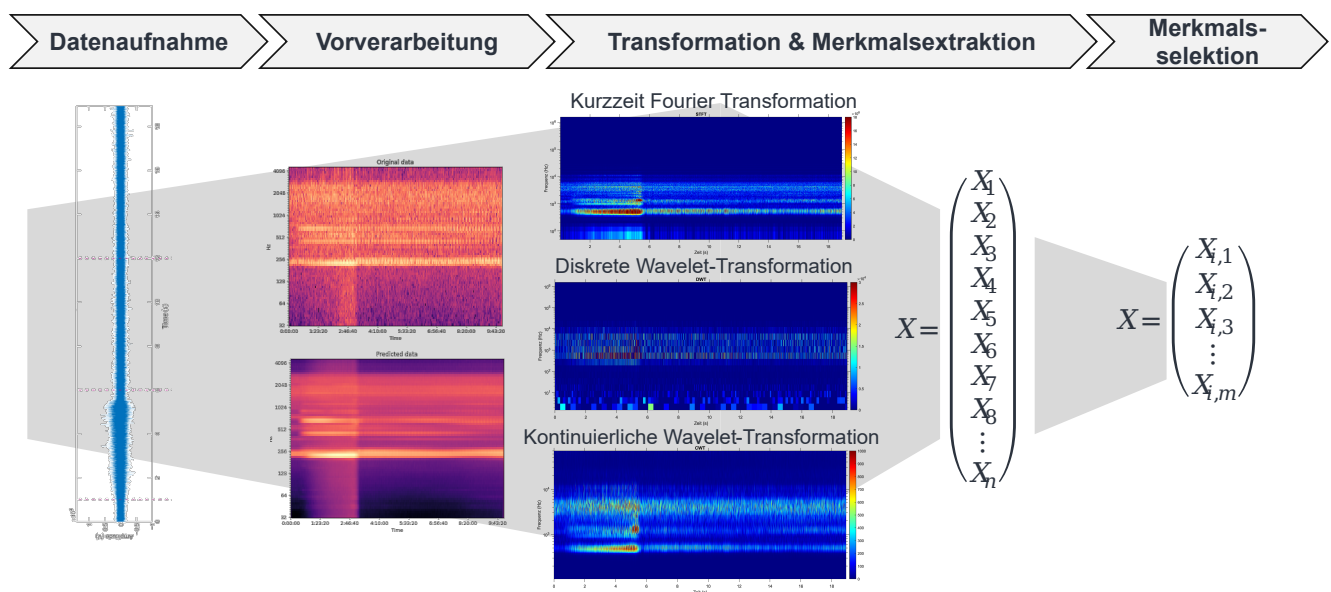


Abbildung 7.4: Schematische Darstellung der Datenverarbeitung.

7.4.1 Merkmalsextraktion

Die Güte der späteren Prädiktion von Prozess- und Qualitätsgrößen hängt maßgeblich von der Qualität der aus den Körperschallsignalen extrahierten Merkmale ab (Li et al. 2022; Liu et al. 2019). Ziel der Merkmalsextraktion ist es daher, aus den hochdimensionalen Zeitreihensignalen kompakte, statistisch beschreibende Größen zu gewinnen, die die relevanten physikalischen Prozessinformationen möglichst vollständig abbilden.

Die Auswahl der betrachteten Merkmalsarten orientiert sich an den in Schiller et al. (2023) identifizierten und erfolgreich eingesetzten Feature-Typen zur körperschallbasierten Prozessanalyse. Dort wurde gezeigt, dass insbesondere Merkmale aus zeitfrequenten Transformationen des Rohsignals – namentlich der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) sowie der kontinuierlichen und diskreten Wavelet-Transformation (CWT, DWT) – eine hohe Trennschärfe für die Klassifikation verschiedener Prozesszustände besitzen.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden in der vorliegenden Arbeit Merkmale aus dem Rohsignal sowie aus STFT-, CWT- und DWT-Darstellungen extrahiert. Ergänzend werden klassische statistische Kennwerte des Rohsignals berechnet, darunter Maximum, Minimum, Spannweite, Mittelwert, Standardabweichung, quadratischer Mittelwert (RMS), Signalenergie und Signalleistung. Diese Merkmale sind in der Literatur etabliert (Mikut 2008; Wantzen 2021; Liu et al. 2019) und beschreiben die globale Intensität, Streuung und Dynamik der akustischen Prozessaktivität.

Zur Abbildung frequenzabhängiger Prozessphänomene werden zeitfrequente Spektren mittels STFT, CWT und DWT berechnet. Während die STFT eine konstante Zeit-Frequenz-Auflösung liefert, ermöglichen Wavelet-basierte Verfahren eine adaptive Auflösung mit höherer Zeitauf-
lösung in hochfrequenten Bereichen und höherer Frequenzauflösung in niederfrequenten Bereichen (León et al. 2011, S. 258,262,265). Die Parametrierung der Merkmalsextraktion folgt dabei etablierten Vorgehensweisen nach (Wantzen 2021; Liu et al. 2019) sowie den Erkenntnissen von Schiller et al. (2023) und ist in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Eingesetzte Parameter der Merkmalsextraktion.

Samplingrate f_s	781,25 kHz
Downsampling-Faktor D	10
STFT: Fensterfunktion	Hann
STFT: n_{perseg}	$\left\lfloor \frac{f_s/d}{64} \right\rfloor + 1$
STFT: Überlappung	0,5
CWT: Wavelet-Typ	<i>cmor1.5–1.0</i>
CWT: Skalenanzahl	128 (logarithmisch)
DWT: Wavelet-Typ	<i>sym8</i>
DWT: Zerlegungstiefe	maximal zulässiges Level (Zielwert 20)
DWT: Padding-Modus	constant
Auswertesegmente t	[0, 6], [6,16], [16,30], [30,56] s

Aus den resultierenden Zeit-Frequenz-Darstellungen werden statistische Kenngrößen sowohl global als auch bandweise berechnet, darunter Mittelwert, Median, Standardabweichung und RMS-Werte der Amplituden. Dabei bezeichnet die bandweise Auswertung die separate Berechnung dieser Kenngrößen innerhalb vordefinierter Frequenzintervalle (bspw. 1–1,5 kHz), um frequenzabhängige Signalcharakteristika gezielt zu erfassen. Zusätzlich werden frequenz-spezifische Extremwerte sowie deren zeitliche und spektrale Lage bestimmt. Diese Merkmale haben sich in vergleichbaren Arbeiten als sensitiv gegenüber Zahneingriffsereignissen, lokalen Instabilitäten und Mikroschädigungen erwiesen (Wantzen 2021; Liu et al. 2019).

Im Gegensatz zur Vorarbeit von Schiller et al. (2023), deren Fokus auf der Klassifikation diskreter Prozesszustände lag, wird hier ein Regressionsmodell zur kontinuierlichen Vorhersage

geometrischer Qualitätsmerkmale aufgebaut. Für Regressionsaufgaben sind Merkmale mit möglichst monotonem, physikalisch interpretierbarem Zusammenhang zur Zielgröße erforderlich, weshalb die nachfolgende Merkmalsselektion konzeptionell angepasst ist, obwohl der zugrunde liegende Merkmalsraum bewusst an Schiller et al. (2023) angelehnt ist.

In Anlehnung an Marinescu et al. (2008) erfolgt die Merkmalsextraktion segmentiert über mehrere definierte Zeitintervalle, die unterschiedlichen Prozessphasen zugeordnet sind. Diese segmentierte Betrachtung erlaubt es, Merkmalsausprägungen abzubilden, die nur in spezifischen Abschnitten des Werkzeugeingriffs auftreten und in einer rein globalen Analyse überlagert würden.

Die Benennung der Merkmale erfolgt systematisch anhand der Datenquelle, des Merkmals-typs und des betrachteten Zeitintervalls. Auf diese Weise entsteht ein konsistenter, literatur-gestützter Merkmalsraum als Grundlage für die nachfolgende Reduktion und Selektion.

Hauptkomponentenanalyse Zusätzlich zur direkten Verwendung des extrahierten Merkmalsraums wird die Hauptkomponentenanalyse (PCA) als optionaler Verarbeitungsschritt gem. Unterabschnitt 2.4.3 untersucht. Ziel ist es, den hochdimensionalen und teilweise stark korrelierten Merkmalsraum in eine kompaktere Darstellung zu überführen und zu analysieren, inwiefern sich hierdurch die Vorhersagegüte der Modelle verbessern lässt.

Hierzu wird der ursprüngliche Merkmalsraum linear auf orthogonale Hauptkomponenten projiziert, sodass ein Großteil der Varianz erhalten bleibt und redundante bzw. stark korrelierte Merkmale zusammengefasst werden (vgl. Runkler 2015, S. 39–43). Vor der Transformation werden alle Merkmale standardisiert, um eine gleichgewichtete Varianzbewertung zu gewährleisten.

Die Anzahl der beibehaltenen Hauptkomponenten wird so gewählt, dass mindestens 95 % der Gesamtvarianz des ursprünglichen Merkmalsraums erhalten bleiben. Damit wird ein Kompromiss zwischen Dimensionsreduktion und Informationsverlust angestrebt.

7.4.2 Merkmalsselektion

Zur expliziten Reduktion des Merkmalsraums und zur Verbesserung der Modellgüte wird eine modulare Merkmalsselektion implementiert. Die Struktur umfasst zwei komplementäre Verfahren: eine univariate Bewertung mittels F-Regression sowie eine multivariate Verdichtung mittels Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis - PCA). Beide Ansätze dienen der Bewertung des Informationsgehalts der Merkmale und der Eliminierung redundanter oder irrelevanter Größen.

Univariate Selektion (F-Regression) Jedes Körperschallmerkmal wird gemäß Unterabschnitt 2.4.4 hinsichtlich seines linearen Zusammenhangs mit der Zielgröße bewertet. Die wesentlichen Verfahrensparameter sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Methode basiert auf der Varianzanalyse und berechnet für jedes Merkmal einen F-Wert sowie den zugehörigen p-Wert. Auf Basis dieser Kennzahlen werden Merkmale mit signifikantem Einfluss identifiziert und für die weitere Modellierung priorisiert. Alle Merkmale werden vor der Analyse standardisiert, um unterschiedliche Skalierungen zu eliminieren. Das Verfahren wird getrennt für jede Zielgröße durchgeführt, sodass für Taumel, Shift und axiale Zustellung jeweils spezifische Merkmalsmengen entstehen.

Tabelle 7.2: Eingesetzte Parameter der F-Regression.

Signifikanzniveau	$\alpha = 0,03$
Korrekturverfahren	Benjamini–Hochberg
Mindestanzahl beizubehaltender Merkmale	50
Skalierung	Standardisierung (z-Transformation)
Train/Test-Aufteilung	80 % / 20 %

7.5 Statistische Versuchsplanung zur Generierung von Trainings- und Testdaten

Zur Analyse des Einflusses relevanter Prozessparameter auf die entstehenden Körperschall-signale und die resultierende Geometrie der Mikro-Kronenräder wird eine statistische Versuchsplanung (engl. *Design of Experiments* – DoE) durchgeführt. Die geometrische Qualität der gefertigten Versuchsteile wird gemäß Kapitel 5 anhand definierter Merkmale quantifiziert. Hierfür werden auf jeder Zahnflanke jeweils 20 Profillinien und 20 Flankenlinien untersucht, um den funktionalen Bereich ganzheitlich abdecken zu können.

Als Eingangsfaktoren werden die drei in der Simulation in Kapitel 6 modellierten Prozessgrößen variiert: der Taumel des Werkzeug-Spanndorns, die axiale Zustellung z (z-Shift) sowie die tangentielle Verschiebung des Werkzeuges in x -Richtung (x-Shift). Das DoE dient der orthogonalen und statistisch ausbalancierten Abdeckung des relevanten Parameterraums zur Erfassung von Haupteffekten und Wechselwirkungen (Dean et al. 2017). Die resultierende Datenbasis bildet die Grundlage für die Modellbildung sowie die Unsicherheitsbewertung der Prädiktion.

Eine vollständige Randomisierung der Versuchsreihenfolge ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Insbesondere der Taumel des Werkzeug-Spanndorns muss manuell und mit hohem Aufwand eingestellt werden und kann nicht dynamisch zwischen einzelnen Versuchen variiert

werden. Daher erfolgt die Durchführung der Experimente blockweise hinsichtlich der Taumelstufen. Dies birgt grundsätzlich das Risiko systematischer Störeinflüsse (z. B. durch Drift im Prozess oder Umgebungsbedingungen), die mit den Faktorstufen korreliert sein können.

Eine Übersicht der variierten Faktoren und Faktorstufen ist in Tabelle 7.3 dargestellt. Die Wertebereiche orientieren sich an praxisrelevanten Abweichungen aus der industriellen Fertigung und decken stabile sowie grenznahe Prozesszustände ab.

Tabelle 7.3: Übersicht der Faktoren und Faktorstufen des Design of Experiments.

Faktor	Einheit	Faktorstufen
Taumel	μm	0 5 9
Axiale Zustellung	mm	-0,10 -0,05 0 0,05 0,10
Shift (laterale Verschiebung)	mm	-0,10 -0,05 0 0,05 0,10

Die Kombination der drei Taumelstufen mit fünf Stufen der axialen Zustellung und des Shifts ergibt eine vollständige faktorielle Versuchsmatrix mit

$$N = 3 \cdot 5 \cdot 5 = 75$$

Parameterkombinationen. Jede Kombination wird dreifach wiederholt, sodass sich insgesamt

$$N_{\text{gesamt}} = 225$$

Fertigungsdurchläufe ergeben. Eine vollständige Auflistung ist in Anhang Abschnitt A2.1 enthalten.

Während der Bearbeitung werden die Körperschallsignale in-process mit einer Abtastrate von $f_s = 781,25$ kHz erfasst und den jeweiligen Parameterkombinationen zugeordnet. Jedes gefertigte Versuchsteil wird anschließend mit dem Alicona μCMM digitalisiert und analysiert.

7.6 Modellentwicklung

Die Modellentwicklung erfolgt in zwei aufeinander aufbauenden Schritten, die ein einheitliches Vorgehen aus *Datenvorbereitung*, *Modelltraining*, *Evaluation* und *Modellvergleich* teilen. Dadurch wird sichergestellt, dass Unterschiede in der Modellgüte auf die zugrunde liegenden physikalischen Zusammenhänge und nicht auf Variationen im Trainingsprozess zurückzuführen sind. Die gewählten Modelle decken dabei unterschiedliche Komplexitätsgrade ab:

- (i) **lineare Regression** als interpretierbares Basismodell,

- (ii) **Random-Forest-Regressor** als robustes Ensembleverfahren sowie
- (iii) **Support-Vector-Regression** (SVR) zur Modellierung nichtlinearer Zusammenhänge.

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der Merkmalsrepräsentation werden drei unterschiedliche Datenkonstellationen betrachtet:

- (i) **vollständiger Merkmalsraum** (alle extrahierten Merkmale),
- (ii) **transformierter Merkmalsraum** mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) zur dimensionsreduzierten Darstellung der Daten sowie
- (iii) **reduzierter Merkmalsraum** auf Basis einer univariaten Merkmalsselektion mittels F-Regression.

Während die F-Regression eine explizite Auswahl einzelner Merkmale vornimmt, erfolgt bei der PCA eine Transformation des ursprünglichen Merkmalsraums in einen orthogonalen Komponentenraum. Ziel ist es, den Einfluss von Redundanz, Rauschen und Korrelationsstrukturen auf die Modellgüte systematisch zu analysieren. Damit wird nicht nur die Relevanz einzelner Merkmale untersucht, sondern auch, inwiefern eine komprimierte, latente Darstellung der Signalcharakteristik die Generalisierungsfähigkeit der Modelle verbessert.

Die daraus resultierenden Kombinationen sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4: Übersicht der getesteten Modell- und Datenrepräsentations-Kombinationen.

Datenrepräsentation	Modelltyp
Alle Merkmale	Linear Regression
Alle Merkmale	SVR
Alle Merkmale	Random Forest
F-Regression	Lineare Regression
F-Regression	SVR
F-Regression	Random Forest
PCA (95 % Var.)	Lineare Regression
PCA (95 % Var.)	SVR
PCA (95 % Var.)	Random Forest

Damit ergeben sich für insgesamt 12 Zielgrößen (3 Prozessparameter, 9 Qualitätsmerkmale) bei 9 verschiedenen Modellkonstellationen insgesamt 108 Modelle.

Die anschließende Auswertung der Modellgüte erfolgt nicht isoliert, sondern entlang eines zweistufigen Vorgehens, das aufeinander aufbauende Zielsetzungen verfolgt. Dabei wird zunächst die physikalische Aussagekraft der Sensordaten überprüft, bevor deren Eignung für eine direkte Qualitätsvorhersage bewertet wird. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die spätere Anwendung im Sinne der virtuellen Messung auf einem nachgewiesenen Ursache-Wirkungs-Verständnis basiert.

In Unterabschnitt 7.7.2 und Unterabschnitt 7.7.3 werden die Ergebnisse entsprechend dieser beiden Schritte strukturiert dargestellt:

Schritt 1: Rekonstruktion der Fertigungsparameter Im ersten Schritt wird untersucht, inwieweit sich die zugrunde liegenden Fertigungsparameter *Taumel*, *Shift* und *axiale Zustellung* aus den extrahierten Körperschallmerkmalen rekonstruieren lassen. Ziel ist der Nachweis, dass die Sensorsignale die prozessbedingten Zustandsänderungen sensitiv und konsistent abbilden. Damit wird überprüft, ob ein belastbarer Zusammenhang zwischen Prozessführung und akustischer Signatur besteht und somit die physikalische Grundlage für datengetriebene Modelle gegeben ist.

Schritt 2: Vorhersage geometrischer Qualitätsabweichungen Aufbauend auf dieser Validierung wird im zweiten Schritt untersucht, ob sich aus den gleichen Sensordaten direkt auf geometrische Qualitätsabweichungen schließen lässt. Hierbei werden Modelle trainiert, die ausschließlich auf Basis der Körperschallsignale die resultierende Bauteilqualität prognostizieren. Dieser Schritt adressiert die zentrale Fragestellung der virtuellen Messung und bewertet das Potenzial, qualitätsrelevante Kenngrößen ohne unmittelbare Bauteilvermessung vorherzusagen und damit perspektivisch eine qualitätsführende Prozessregelung zu ermöglichen.

7.7 Ergebnisse der körperschallbasierten Vorhersage

Dieser Abschnitt präsentiert die Ergebnisse der datengetriebenen Auswertung der Körperschallsignale auf Basis von 225 Versuchsbauteilen aus der statistischen Versuchsplanung (Abschnitt 7.5). Die zugehörigen, aus optischen Messungen abgeleiteten Qualitätsmerkmale sind im Anhang dokumentiert (Abschnitt A2.2).

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden maßgeblich in Bilen et al. (2026b) veröffentlicht und werden im Folgenden im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit konsistent eingeordnet und erweitert.

Zunächst wird die Gültigkeit der formulierten Fehlerhypothesen anhand der experimentellen Daten überprüft, indem die Zusammenhänge zwischen Prozessabweichungen und geometrischen Qualitätsmerkmalen deskriptiv analysiert werden (Unterabschnitt 7.7.1.1). Anschließend wird die Rekonstruktion der Fertigungsparameter aus den Körperschallsignalen untersucht, um die im Signal enthaltene prozessbezogene Information zu bewerten (Unterabschnitt 7.7.2). Abschließend erfolgt die Analyse der Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale, um das Potenzial der virtuellen Qualitätsmessung zu bewerten (Unterabschnitt 7.7.3).

Die Modellbildung basiert auf einer signifikanzbasierten Merkmalsselektion (F-Regression) sowie linearen und nichtlinearen Regressionsverfahren (lineare Regression, Random Forest, Support-Vector-Regression). Die Modellgüte wird anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 mittels Kreuzvalidierung sowie Test- und Holdout-Datensätzen bewertet.

7.7.1 Validierung der Strategie zur Qualitätsbewertung

Die Validierung der entwickelten Strategie zur Qualitätsbewertung erfolgt mehrstufig und kombiniert physikalisch interpretierbare Analysen mit datengetriebenen Bewertungsansätzen. Zunächst wird im Rahmen einer deskriptiven Analyse überprüft, ob die in Kapitel 5 definierten Qualitätsmerkmale die variierten Prozesszustände konsistent, sensitiv und richtungsabhängig abbilden und damit die zugrunde liegenden Fehlerhypothesen bestätigen. Aufbauend darauf wird die datenbasierte Modellierbarkeit der Merkmale untersucht, um zu bewerten, inwieweit die relevanten Informationen im Körperschallsignal enthalten sind. Ziel ist es, sowohl die physikalische Validität als auch die diagnostische und prädiktive Eignung des definierten Merkmalsraums ganzheitlich nachzuweisen.

7.7.1.1 Deskriptive Validierung der Parameter-Merkmal-Beziehungen anhand der Fehlerhypothesen

Im ersten Schritt werden ausgewählte Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit der variierten Prozessparameter deskriptiv analysiert. Die vollständigen methodischen Details sind in (Bilen et al. 2026c) dokumentiert; im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse für H1 bis H3 zusammengefasst.

H1 – Sensitivität gegenüber axialer Zustellung Δz Die Boxplot-Darstellungen in Abbildung 7.6 und Abbildung 7.5 zeigen eine eindeutige Abhängigkeit der geometrischen Qualitätsmerkmale von der axialen Zustellung Δz . Mit zunehmender Einstelltiefe verändern sich sowohl die Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ als auch die Zahndickenabweichung Δt systematisch.

Wie in Abbildung 7.5 ersichtlich, reagiert die Zahndicke Δt besonders sensitiv auf Änderungen der Zustellung, was sich in einer klaren Verschiebung der Medianwerte über die untersuchten Δz -Stufen hinweg äußert. Die axiale Zustellung wird somit direkt in eine effektive Zahndickenänderung überführt.

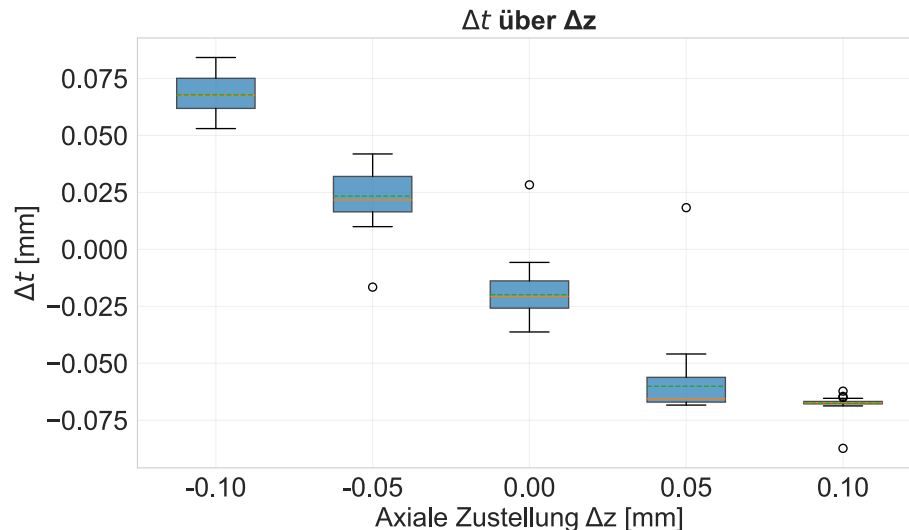


Abbildung 7.5: Zahndickenabweichung Δt in Abhängigkeit der axialen Zustellung Δz (nach (Bilen et al. 2026c)).

Gleichzeitig zeigt Abbildung 7.6, dass auch die Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ mit variierender Zustellung zunimmt. Dies verdeutlicht, dass Δz nicht nur eine Höhenänderung bewirkt, sondern über die Normalkomponente des Eingriffs die effektive Profilgeometrie beeinflusst.

Auffällig ist die starke Überlappung der Gruppen $\Delta z = 0,05$ mm und $\Delta z = 0,10$ mm in beiden Diagrammen. Eine plausible Erklärung hierfür ist der fortschreitende Abtrag des Zahnkopfes bei größerer Eindringtiefe: Ab etwa $\Delta z \geq 0,05$ mm wird der Zahnkopf weitgehend zerstört, sodass die zusammenhängende Kopffläche als geometrischer Höhenbezug für die Punktwolkenregistrierung entfällt. Die Registrierung basiert dann primär auf den verbleibenden Zahnsitzen, was zu einer reduzierten effektiven Höhenauflösung der abgeleiteten Merkmale führt und die beobachtete Annäherung der Merkmalsausprägungen für die beiden oberen Δz -Stufen erklären kann (Bilen et al. 2026c).

Insgesamt bestätigen die in den Abbildungen dargestellten Trends die Sensitivität der betrachteten Merkmale gegenüber der axialen Zustellung. Hypothese H1 wird damit bestätigt.

H2 – Sensitivität gegenüber tangentialer Verschiebung Δx Gemäß der in Abschnitt 6.6 formulierten Hypothese H2 führt ein tangentialer Werkzeugversatz Δx zu einer lateralen Verschiebung der Eingriffszonen, die sich in einer richtungsabhängigen Links-Rechts-Asymmetrie

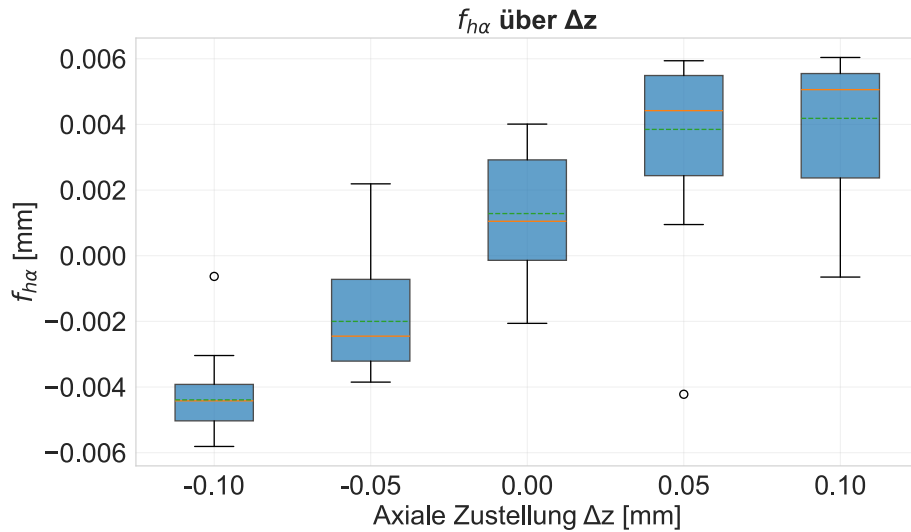


Abbildung 7.6: Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ in Abhängigkeit der axialen Zustellung Δz (nach (Bilen et al. 2026c)).

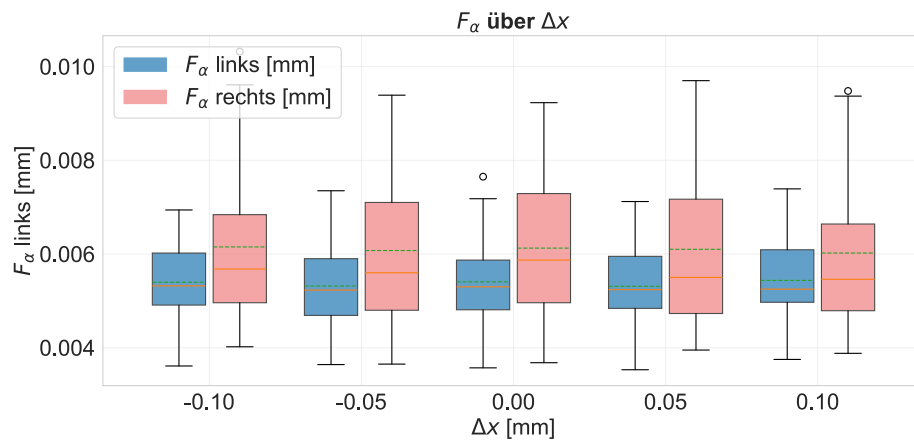
der Formabweichungen äußern sollte. Entsprechend wird erwartet, dass sich diese Asymmetrie in den getrennt ausgewerteten links- und rechtsseitigen Anteilen der Profil- und Flankenformabweichung widerspiegelt.

Die deskriptive Analyse der Profilformabweichung in Abbildung 7.7a zeigt, dass sich die links- und rechtsseitigen Merkmalsausprägungen mit zunehmendem Δx zwar systematisch verschieben, die Differenz zwischen beiden Seiten jedoch vergleichsweise gering bleibt. Das Verhältnis der beiden Flanken zueinander verändert sich nur schwach, sodass keine ausgeprägte Divergenz entsteht. Die Profilformabweichung $f_{f\alpha,L/R}$ reagiert damit nur begrenzt auf den tangentialen Versatz und bildet die postulierte Asymmetrie lediglich in abgeschwächter Form ab.

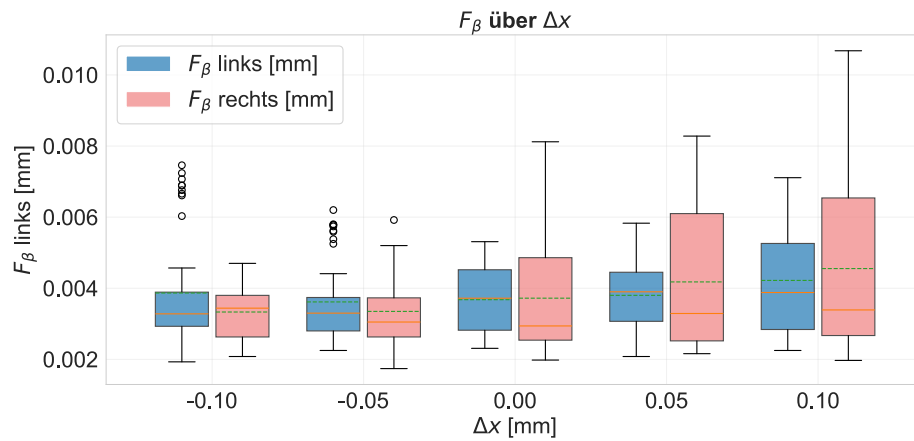
Für die Flankenformabweichung ergibt sich ein deutlich sensibleres Verhalten (vgl. Abbildung 7.7b). Mit zunehmender Verschiebung Δx zeigt sich eine klare Verschiebung des Verhältnisses zwischen linker und rechter Zahnflanke, wobei insbesondere die Abweichungen auf der rechten Seite stärker zunehmen.

Die resultierende Divergenz der Medianwerte deutet darauf hin, dass $f_{f\beta,L/R}$ die durch den tangentialen Versatz verursachte asymmetrische Materialabnahme besser abbildet. Dennoch ist auch hier die Trennschärfe zwischen den einzelnen Verschiebungsstufen aufgrund der vorhandenen Streuung begrenzt, sodass keine eindeutig robuste Zuordnung zu konkreten Δx -Werten möglich ist.

Die Ergebnisse zeigen somit, dass die in Hypothese H2 postulierte Links-Rechts-Asymmetrie in den betrachteten Qualitätsmerkmalen grundsätzlich enthalten ist, ihre Ausprägung jedoch



(a) Links-Rechts-Asymmetrie der Profilformabweichung $f_{f\alpha,L/R}$ in Abhängigkeit von Δx .



(b) Links-Rechts-Asymmetrie der Flankenformabweichung $f_{f\beta,L/R}$ in Abhängigkeit von Δx .

Abbildung 7.7: Links-Rechts-Asymmetrien ausgewählter Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Δx (nach (Bilen et al. 2026c)).

vom gewählten Merkmal abhängt. Während die Profilformabweichung nur eine geringe Sensitivität aufweist, reagiert die Flankenformabweichung deutlich stärker auf den tangentialen Versatz, ohne jedoch eine ausreichend stabile und eindeutige Quantifizierung zu ermöglichen.

Gleichzeitig erlauben die Ergebnisse eine Rückkopplung auf die formulierte Hypothese: Die Annahme einer klar ausgeprägten und robust nutzbaren Asymmetrie in klassischen Formabweichungen erweist sich als nur eingeschränkt zutreffend. Die zugrunde liegende Ursache-Wirkungs-Beziehung ist zwar vorhanden, wird jedoch durch die gewählten Qualitätsmerkmale nicht vollständig und eindeutig erfasst.

Ein deutlich robusteres und konsistenteres Verhalten zeigt hingegen der in Bilen et al. (2026c) eingeführte Exzentrizitätsradius r_e , dessen Boxplot in Abbildung 7.8 dargestellt ist.

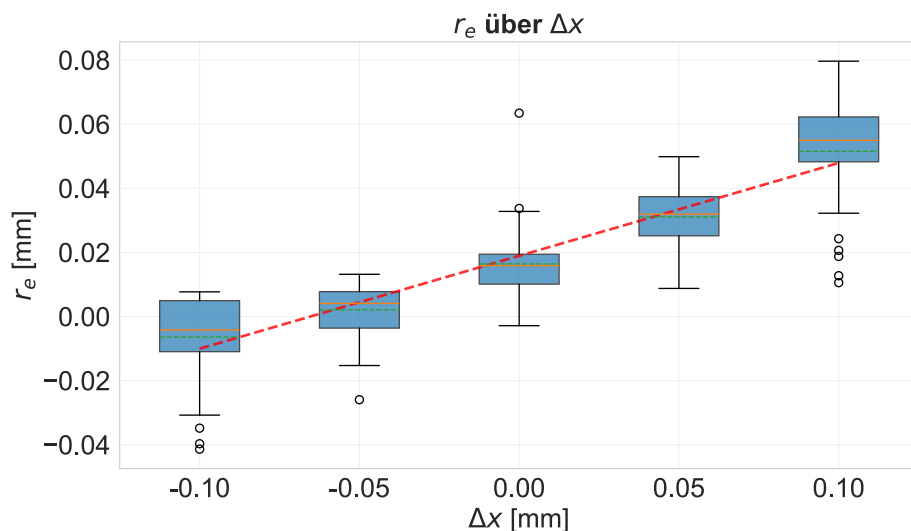


Abbildung 7.8: Exzentrizitätsradius r_e als quantitativer Indikator für die tangentiale Verschiebung Δx (nach (Bilen et al. 2026c)).

Der Exzentrizitätsradius bildet Δx monoton und vorzeichenstabil ab und zeigt eine klare Trennung der unterschiedlichen Verschiebungsstufen bei gleichzeitig geringer Streuung. Im Gegensatz zu den Formabweichungen eignet sich r_e damit als robustes und eindeutig interpretierbares Merkmal zur Beschreibung des tangentialen Versatzes.

Insgesamt wird Hypothese H2 durch die Ergebnisse qualitativ bestätigt, jedoch zeigt sich, dass eine direkte Nutzung klassischer Formabweichungen zur Quantifizierung des Effekts nur eingeschränkt möglich ist. Erst durch die Einführung eines spezifisch auf die Fehlercharakteristik abgestimmten Merkmals wie r_e kann die Ursache-Wirkungs-Beziehung in eine für die Regelung geeignete Form überführt werden.

H3 – Sensitivität gegenüber Taumel Für die Hypothese H3 wird untersucht, inwieweit sich ein erhöhter Taumel in den formbezogenen Qualitätsmerkmalen widerspiegelt. Nach der in Abschnitt 6.6 formulierten Annahme sollte ein zunehmender Taumel zu größeren Formabweichungen führen. Die Boxplot-Darstellung in Abbildung 7.9 zeigt für die Profilformabweichung $f_{f\alpha}$ jedoch keine eindeutig monotone Zunahme mit steigendem Taumel. Der größte Mittelwert beziehungsweise die höchste zentrale Tendenz tritt bei den Versuchsbauteilen mit dem kleinsten eingestellten Taumel auf. Für die Taumelstufen $5\ \mu\text{m}$ und $9\ \mu\text{m}$ liegen die Werte auf ähnlichem Niveau. Der Unterschied zwischen den Gruppen beträgt insgesamt nur etwa $1\ \mu\text{m}$.

Die Ergebnisse zeigen somit, dass sich die in Hypothese H3 erwartete monotone Zunahme der Formabweichung mit steigendem Taumel im betrachteten Datensatz nicht eindeutig nachweisen lässt. Der direkte Zusammenhang zwischen Taumel und $f_{f\alpha}$ ist im initialen experimentellen Ergebnisbild nur schwach ausgeprägt und wird durch die gewählte Darstellung nicht trennscharf abgebildet.

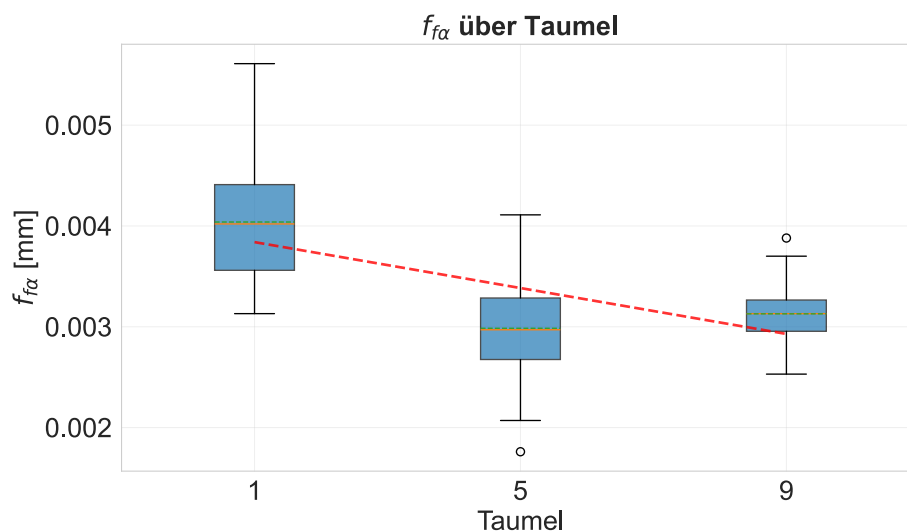


Abbildung 7.9: Profilformabweichung $f_{f\alpha}$ in Abhängigkeit vom eingestellten Taumel (nach (Bilen et al. 2026c)).

Aufbauend auf der deskriptiven Validierung zeigt sich, dass die betrachteten Qualitätsmerkmale die zugrunde liegenden Prozessabweichungen mit unterschiedlicher Ausprägung abbilden. Während für einzelne Parameter klare und systematische Zusammenhänge identifiziert werden können, ist für andere Einflüsse keine eindeutige oder trennscharfe Abbildung im Merkmalsraum erkennbar.

Im nächsten Schritt wird daher untersucht, inwieweit sich diese Zusammenhänge auch datenbasiert modellieren lassen. Ziel ist es, die Abbildbarkeit der Ursache-Wirkungs-Beziehungen

durch statistische Modelle zu bewerten und damit die Grundlage für eine spätere signalbasierte Vorhersage der Qualitätsmerkmale zu schaffen.

7.7.1.2 Vorwärtsmodelle und Korrelationsanalyse

Als Ergänzung zur deskriptiven Analyse werden datenbasierte Vorwärtsmodelle untersucht, die geometrische Qualitätsmerkmale direkt aus den variierten Fertigungsparametern – axiale Zustellung Δz , tangentialer Versatz Δx und Taumel – vorhersagen. Ziel ist es, den Informationsgehalt dieser Einstellgrößen gegenüber der resultierenden Bauteilgeometrie zu quantifizieren. Diese Modelle bilden damit eine Referenz: Die hier erzielte Vorhersagegüte stellt eine obere Schranke für die nachfolgende körperschallbasierte Vorhersage dar, da letztere den Umweg über das akustische Signal nimmt und somit zusätzlichen Informationsverlusten unterliegt.

In Tabelle 7.5 sind die jeweils besten Modelle pro Qualitätsmerkmal angegeben, ausgewählt auf Basis der Testgüte und der Kreuzvalidierung.

Tabelle 7.5: Beste datenbasierte Vorwärtsmodelle zur Vorhersage der Qualitätsmerkmale.¹

Qualitätsmerkmal	Modell	R^2_{Test}	RMSE	R^2_{CV}
Zahndickenabweichung Δt	Random Forest	0,981	0,007	$0,972 \pm 0,025$
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$	Random Forest	0,969	0,001	$0,950 \pm 0,022$
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$	Random Forest	0,955	0,001	$0,943 \pm 0,048$
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β	Random Forest	0,841	0,000	$0,788 \pm 0,025$
Exzentrizitätsradius r_e	Random Forest	0,801	0,011	$0,859 \pm 0,045$
Profil-Gesamtabweichung F_α	Random Forest	0,774	0,000	$0,784 \pm 0,072$
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$	Random Forest	0,721	0,000	$0,486 \pm 0,131$
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$	Random Forest	0,700	0,000	$0,683 \pm 0,052$
Teilungsabweichung F_p	Random Forest	0,305	0,069	$0,480 \pm 0,108$

Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich die Qualitätsmerkmale hinsichtlich ihrer datenbasierten Vorhersagbarkeit in drei Gruppen einteilen:

- **sehr gut vorhersagbar** ($R^2_{\text{Test}} \geq 0,9$): Δt , $f_{H\beta}$, $f_{H\alpha}$
- **gut vorhersagbar** ($0,7 \leq R^2_{\text{Test}} < 0,9$): F_β , r_e , F_α , $f_{f\beta}$, $f_{f\alpha}$
- **eingeschränkt vorhersagbar** ($R^2_{\text{Test}} < 0,5$): F_p

¹RMSE-Werte von 0,000 ergeben sich durch Rundung auf drei Nachkommastellen; die tatsächlichen Werte liegen im Submikrometerbereich.

Die Ergebnisse verdeutlichen eine klare Trennung zwischen lokal wirkenden geometrischen Qualitätsmerkmalen und global aggregierten Größen. Winkelabweichungen sowie die Zahndickenabweichung reagieren direkt und sensitiv auf die betrachteten Maschinenparameter und lassen sich entsprechend mit sehr hoher Genauigkeit vorhersagen. Formabweichungen und Gesamtabweichungen weisen ebenfalls eine robuste Vorhersagbarkeit auf, sind jedoch zusätzlich durch nicht-parametrische Einflüsse wie Werkzeugzustand, lokale Materialeffekte und Messunsicherheiten überlagert.

Die Teilungsabweichung stellt eine Sonderrolle dar. Als globales, über alle Zähne aggregiertes Merkmal enthält sie zusätzliche Beiträge aus der Segmentierung, Referenzierung und optischen Messaufnahme und ist daher nur eingeschränkt durch die betrachteten Maschinenparameter erklärbar. Auffällig ist zudem die Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$, deren Testgüte ($R^2_{\text{Test}} = 0,721$) deutlich über der mittleren Kreuzvalidierungsgüte ($R^2_{\text{CV}} = 0,486 \pm 0,131$) liegt. Diese Diskrepanz deutet auf eine günstige Zusammensetzung des Testdatensatzes hin und unterstreicht die Notwendigkeit, die Kreuzvalidierung als robusteres Gütemaß heranzuziehen.

Nichtlineare Modelle, insbesondere der Random Forest, erreichen für die Mehrzahl der Qualitätsmerkmale die höchste Testgüte. Dies weist darauf hin, dass die Abbildung zwischen Maschinenparametern und Qualitätsmerkmalen wesentlich nichtlinear geprägt ist.

7.7.2 Rekonstruktion der Fertigungsparameter aus Körperschall

Die Rekonstruktion der Fertigungsparameter zeigt, dass die prozessnahen Körperschallmerkmale die Stellgrößen Taumel und z-Shift in deutlicher Weise abbilden. Für beide Parameter werden hohe Modellgüten erzielt, wobei der Taumel nahezu vollständig und der z-Shift mit etwas geringerer Genauigkeit rekonstruiert werden kann. Der x-Shift kann hingegen nicht zuverlässig aus dem Körperschallsignal rekonstruiert werden. Dies zeigt sich in durchgehend negativen Bestimmtheitsmaßen (R^2), die darauf hindeuten, dass die verwendeten Modelle keine belastbare erklärende Beziehung zwischen den Körperschallmerkmalen und dieser Stellgröße erfassen können und teils schlechter als ein triviales Mittelwertmodell abschneiden. Die wesentlichen Ergebnisse der jeweils besten Modell- und Selektionskombinationen sind in Tabelle 7.6 zusammengefasst und in Abbildung 7.10 exemplarisch visualisiert. Die vollständige Auswertung ist im Anhang unter Abschnitt A2.3 aufgeführt.

7.7.2.1 Taumel

Für den Taumelparameter werden sehr hohe Bestimmtheitsmaße erzielt. Das beste Ergebnis liefert der Random Forest in Kombination mit einer vorgeschalteten F-Regressions-Selektion. Dabei wird in der Kreuzvalidierung ein mittleres R^2 von 0,993 erreicht; im Testdatensatz ergibt

Tabelle 7.6: Beste Modell- und Feature-Selektionskombinationen zur Rekonstruktion der Fertigungsparameter aus Körperschallmerkmalen.

Zielgröße	Modell / Selektion	R_{CV}^2	R_{Test}^2	MAE	Einheit
Taumel	Random Forest / F-reg	0,9930	0,9970	0,0720	μm
z-Shift	Lineare Regression / F-reg	0,9680	0,9240	0,0120	mm
x-Shift	SVR / All	-0,0140	-0,0150	0,0620	mm

sich eine Modellgüte von $R^2 = 0,997$. Damit lässt sich die Varianz des Taumelparameters nahezu vollständig aus den Körperschallmerkmalen erklären.

Im Vergleich zu vorherigen Auswertungen zeigt sich, dass eine gezielte Merkmalsselektion die Modellgüte leicht verbessert. Dies deutet darauf hin, dass die für den Taumel relevante Information zwar breit im Signal vorhanden ist, jedoch durch die Reduktion auf signifikante Merkmale robuster genutzt werden kann. Insgesamt zeigt sich damit, dass der Taumelparameter im betrachteten Datensatz sehr zuverlässig aus dem Körperschallsignal rekonstruiert werden kann.

7.7.2.2 z-Shift

Auch der z -Shift lässt sich aus den Körperschallmerkmalen gut rekonstruieren. Das beste Ergebnis wird mit einer F-Regressions-Selektion in Kombination mit einer linearen Regression erzielt. Dabei ergibt sich ein mittleres R^2 von 0,968 in der Kreuzvalidierung und ein R^2 von 0,924 im Testdatensatz.

Im Vergleich zum Taumel ist die Modellgüte für den z -Shift geringer, bleibt jedoch auf einem hohen Niveau. Dies weist darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen Körperschallsignal und z -Shift weniger stark ausgeprägt oder stärker durch andere Einflüsse überlagert ist. Gleichzeitig bestätigt die gute Performance der Merkmalsselektion, dass die relevante Information auf wenige besonders aussagekräftige Signalanteile konzentriert ist. Insgesamt ist damit auch für den z -Shift eine robuste und stabile Rekonstruktion möglich, wenn auch mit geringerer Präzision als beim Taumel.

7.7.2.3 x-Shift

Die Rekonstruktion des x-Shifts ist mit den betrachteten Modellen nicht möglich. Selbst die beste Modellkonfiguration, der Support-Vector-Regressor mit allen Merkmalen, erreicht in der Kreuzvalidierung lediglich $R_{CV}^2 = -0,014$ und im Testdatensatz $R^2 = -0,015$. Damit verbleiben die Ergebnisse auf dem Niveau eines trivialen Mittelwertmodells oder darunter.

Dies weist darauf hin, dass der x-Shift im vorliegenden Körperschallsignal nicht ausreichend eindeutig kodiert ist oder seine Signatur durch andere Prozesseinflüsse überlagert wird. Auf Basis der verwendeten Merkmalsrepräsentation und Modellansätze kann der x-Shift daher nicht belastbar datenbasiert rekonstruiert werden.

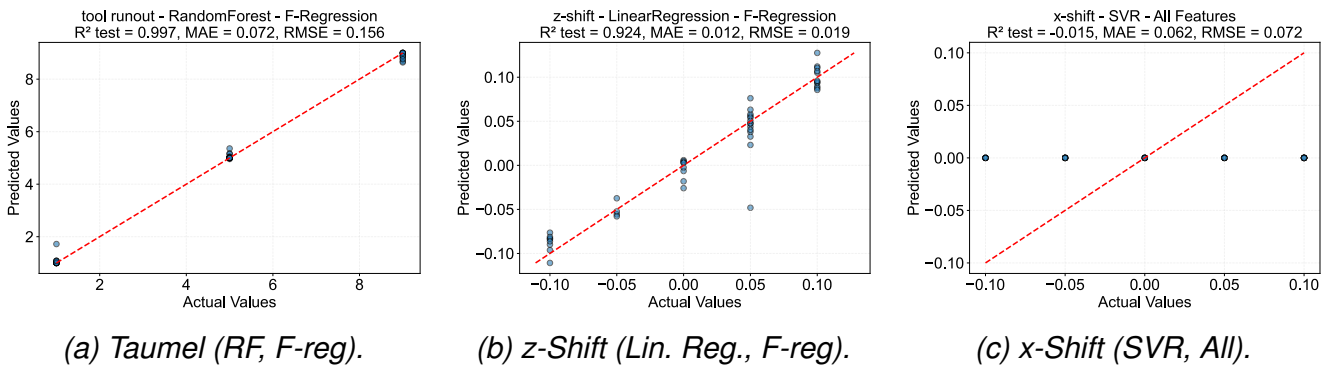


Abbildung 7.10: Vergleich von vorhergesagten und tatsächlichen Werten für die drei Fertigungsparameter (Bilen et al. 2026b).

7.7.2.4 Analyse relevanter Körperschallmerkmale

Die folgende Analyse konzentriert sich auf diejenigen Fertigungsparameter, die im Rahmen der Modellierung belastbar aus dem Körperschallsignal rekonstruiert werden konnten. Dies betrifft den *Taumel* sowie den *z-Shift*. Für den *x-Shift* können aufgrund der negativen Bestimmtheitsmaße keine belastbaren Aussagen über charakteristische Signalrepräsentationen abgeleitet werden.

Die Auswertung der wichtigsten Merkmale (vgl. Abbildung 7.11) zeigt für den *Taumel* eine Verteilung relevanter Merkmale über mehrere Signalintervalle, insbesondere über die Intervalle 2, 3 und 4. Diese breite Verteilung zeigt, dass der *Taumel* den Eingriffsverlauf nicht nur lokal, sondern in einer über mehrere Prozessabschnitte verteilten Weise.

Für den *Taumel* dominieren RMS-basierte Merkmale sowie weitere STFT-Kenngrößen. Dies weist auf eine durchgehende Veränderung der Signalenergie und der spektralen Amplitudenverteilung hin. Der *Taumel* zeigt damit eine über mehrere Intervalle konsistente und global wirkende Signatur im Körperschallsignal.

Für den *z-Shift* ergibt sich hingegen ein klar lokalisiertes Muster mit einer starken Konzentration relevanter Merkmale im Intervall 2, unmittelbar nach dem initialen Werkzeugeingriff. Dass für den *z-Shift* gerade die F-Regressions-Selektion zur besten Modellgüte führt, stützt diese Beobachtung zusätzlich: Offenbar ist die für den *z-Shift* relevante Information auf wenige besonders aussagekräftige Merkmale konzentriert. Auffällig ist dabei die gleichzeitige Dominanz von STFT- und CWT-basierten Merkmalen, was darauf hindeutet, dass der *z-Shift* sowohl in

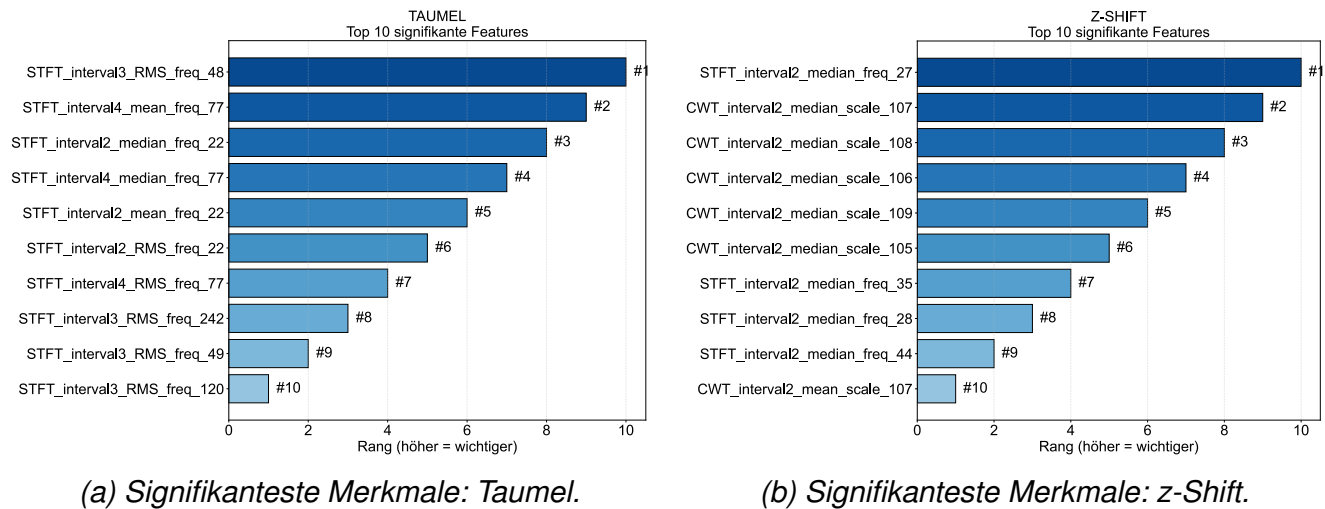


Abbildung 7.11: Top-10 Merkmale für die rekonstruierbaren Fertigungsparameter Taumel und z-Shift basierend auf der F-Regression.

klassischen Frequenzanteilen als auch in skalenabhängigen, lokalisierten Signalstrukturen abgebildet ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich die rekonstruierbaren Fertigungsparameter durch unterschiedliche räumlich-zeitliche Signaturmuster im Körperschallsignal charakterisieren lassen: Während der Taumel eine globale, energiegetriebene Wirkung über mehrere Intervalle hinweg zeigt und seine relevante Information breit über den Merkmalsraum verteilt vorliegt, ist der z-Shift deutlich stärker lokalisiert – beide profitieren dabei von einer gezielten F-Regressions-Selektion, die die jeweils relevanten Signalanteile identifiziert.

7.7.3 Vorhersage der geometrischen Merkmale aus Körperschall

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, inwieweit sich die geometrischen Qualitätsmerkmale auf Basis der Körperschallmerkmale vorhersagen lassen. Die Ergebnisse der jeweils besten Modell- und Selektionskombinationen sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst.

7.7.3.1 Ergebnisse der Modellierung

Die Ergebnisse der Modellierung sind in Tabelle 7.7 dargestellt. Die erzielten Bestimmtheitsmaße zeigen eine deutliche Streuung zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen.

Für Winkel- und Zahndickenabweichungen werden hohe Bestimmtheitsmaße sowohl in der Kreuzvalidierung als auch im Testdatensatz erreicht. Demgegenüber weisen Formabweichungen und Gesamtabweichungen weiterhin geringere Modellgüten auf. Für die Teilungsabweichung F_p sowie den Exzentrizitätsradius r_e ergeben sich keine belastbaren Vorhersagegüten.

Auf Basis der erzielten Bestimmtheitsmaße lassen sich die Qualitätsmerkmale in drei Gruppen einteilen. Die Schwellenwerte fallen dabei bewusst niedriger aus als bei den Vorwärtsmodellen in Tabelle 7.5, da die indirekte Vorhersagekette über das Körperschallsignal mit zusätzlichen Unsicherheitsquellen verbunden ist:

- **gut vorhersagbar** ($R_{\text{Test}}^2 \geq 0,8$): Δt , $f_{H\beta}$, $f_{H\alpha}$
- **eingeschränkt vorhersagbar** ($0,3 \leq R_{\text{Test}}^2 < 0,8$): F_{α} , $f_{f\alpha}$, F_{β} , $f_{f\beta}$
- **nicht vorhersagbar** ($R_{\text{Test}}^2 < 0,3$): F_p , r_e

Tabelle 7.7: Beste Modell- und Feature-Selektionskombinationen zur Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale.¹

Zielgröße	Modell / Selektion	R_{CV}^2	R_{Test}^2	MAE	Einheit
Zahndickenabweichung Δt	LR / F-reg	0,912	0,906	12	μm
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$	RF / F-reg	0,887	0,871	1	μm
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$	RF / F-reg	0,903	0,886	1	μm
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$	RF / F-reg	0,597	0,670	0,0	μm
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$	RF / All	0,453	0,395	0,0	μm
Profil-Gesamtabweichung F_{α}	RF / F-reg	0,651	0,672	0,5	μm
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β}	RF / F-reg	0,528	0,511	1	μm
Teilungsabweichung F_p	RF / PCA	-0,064	0,011	0,058	°
Exzentrizitätsradius r_e	LR / PCA	-11,240	-0,003	21	μm

Neben dem Bestimmtheitsmaß erlaubt insbesondere der mittlere absolute Fehler (MAE) eine direkte Bewertung der Modellgüte in physikalischen Einheiten. Für die gut vorhersagbaren Merkmale ergeben sich weiterhin geringe absolute Abweichungen. So liegt der MAE für die Zahndickenabweichung Δt bei etwa 12 μm , während die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ Fehler von etwa 1 μm aufweisen. Diese Werte sind im Verhältnis zur Streuung der Zielgrößen sowie zu typischen fertigungsbedingten Toleranzen als niedrig einzustufen, zeigen jedoch im Vergleich zu vorherigen Auswertungen eine leicht reduzierte Genauigkeit.

Für die eingeschränkt vorhersagbaren Merkmale ergeben sich ebenfalls sehr kleine absolute Fehler im Submikrometerbereich, jedoch bei gleichzeitig reduzierter Varianzaufklärung, was auf eine nur teilweise erfasste Systematik hinweist. Die teilweise sehr kleinen MAE-Werte bei

¹MAE-Werte von 0,0 μm ergeben sich durch Rundung auf eine Nachkommastelle; die tatsächlichen Werte liegen im Submikrometerbereich.

gleichzeitig moderatem R^2 deuten darauf hin, dass die Modelle vor allem Mittelwertstrukturen gut approximieren, jedoch die Streuung der Zielgrößen nicht vollständig erfassen.

Demgegenüber zeigen die nicht vorhersagbaren Merkmale sowohl geringe Bestimmtheitsmaße als auch vergleichsweise hohe absolute Fehler. Während für die Teilungsabweichung F_p ein MAE von etwa $0,058^\circ$ resultiert, weist der Exzentrizitätsradius r_e einen Fehler von etwa $21\text{ }\mu\text{m}$ auf, wodurch eine zuverlässige Rekonstruktion aus dem Körperschallsignal nicht gegeben ist. Der stark negative R^2_{CV} -Wert für r_e zeigt darüber hinaus, dass die PCA-basierte Merkmalsrepräsentation in einzelnen Kreuzvalidierungsfolds zu erheblicher Überanpassung führt; im Testdatensatz resultiert hingegen ein nahe null liegendes R^2 , was die fehlende Vorhersagbarkeit bestätigt. Eine abschließende Bewertung der praktischen Einsetzbarkeit unter Berücksichtigung von Unsicherheiten erfolgt in Kapitel 8.

7.7.3.2 Interpretation der begrenzten Vorhersagegüte

Die beobachtete heterogene Vorhersagegüte der geometrischen Qualitätsmerkmale lässt sich plausibel auf mehrere Faktoren entlang der Mess- und Prozesskette zurückführen. Die nachfolgenden Aspekte stellen dabei keine isoliert nachgewiesenen Ursachen dar, sondern begründete Erklärungsansätze für die beobachteten Zusammenhänge:

1. **Unterschiedliche physikalische Kopplung an den Prozess:** Winkel- und Zahndickenabweichungen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Eingriffsgeschehen und der Werkzeug-Werkstück-Interaktion. Diese Effekte wirken unmittelbar auf die Kontaktbedingungen und sind damit direkt im Körperschallsignal repräsentiert, was die hohen Bestimmtheitsmaße für diese Merkmale erklärt. Demgegenüber sind globale Form- und Lageabweichungen stärker von integrierten, über mehrere Eingriffe akkumulierten Effekten geprägt und daher vermutlich weniger eindeutig im Signal abgebildet.
2. **Limitierungen der optischen Messdatenerfassung:** Die optische Erfassung der komplexen dreidimensionalen Zahngeometrie weist bei den komplexen Zahnflanken mit unterschiedlichen Raumwinkeln der einzelnen Facetten Einschränkungen auf. Lokale Abschattungen und unvollständig erfasste Bereiche führen zu Messlücken und damit zu Unsicherheiten in der Rekonstruktion der Geometrie (vgl. exemplarisch Abbildung 7.12). Diese können die berechneten Qualitätskennwerte beeinflussen und somit die Modellierbarkeit einschränken.
3. **Limitierungen der statistischen Versuchsplanung (DoE):** In den Randbereichen der untersuchten axialen Zustellung Δz zeigen sich inkonsistente geometrische Ausprägungen der erzeugten Bauteile. Insbesondere für $\Delta z \geq 0,05\text{ mm}$ kommt es zu einem teilweisen Verlust des Zahnkopfs, der jedoch als Referenzbereich für die optische

Auswertung benötigt wird. Dadurch entstehen Zielgrößen mit reduzierter Trennschärfe, was sich direkt negativ auf die Modellierbarkeit auswirken kann (vgl. Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6).

4. **Stochastische Prozesseffekte und Unsicherheiten:** Prozessimmanente Schwankungen sowie Messunsicherheiten führen dazu, dass identische Fertigungsparameter nicht zwangsläufig zu identischen Geometrien und Signalverläufen führen. Dies reduziert das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis und limitiert insbesondere die datenbasierte Rekonstruktion von Qualitätsmerkmalen mit geringer Sensitivität gegenüber den betrachteten Prozessabweichungen.

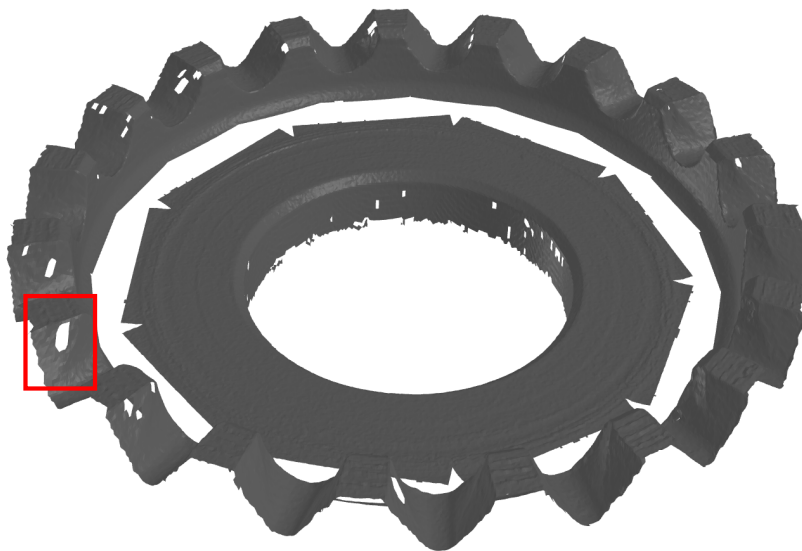


Abbildung 7.12: Exemplarische Messung mit Messlücken (A_Ernstberger 2025).

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass insbesondere solche Qualitätsmerkmale zuverlässig aus dem Körperschallsignal vorhergesagt werden können, die in direkter physikalischer Kopplung zum Eingriffsgeschehen stehen. Demgegenüber sind global aggregierte oder indirekt beeinflusste Merkmale vermutlich nur eingeschränkt im Signal abgebildet und daher deutlich schlechter modellierbar.

7.8 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Auswertestrategie die wesentlichen Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Wälzfräsprozess überwiegend konsistent abbildet. Dabei dient die Validierung nicht ausschließlich der Bestätigung der in Abschnitt 6.6 formulierten Annahmen, sondern ermöglicht zugleich deren kritische Überprüfung und Präzisierung auf Basis realer Messdaten. Insbesondere die klare Abhängigkeit der Zahndickenabweichung Δt von der

axialen Zustellung Δz sowie die monotone und vorzeichenstabile Beschreibung des tangentialen Versatzes Δx über den Exzentrizitätsradius r_e bestätigen die physikalische Validität der definierten Qualitätsmerkmale und stützen die zugrunde liegenden Hypothesen.

Für den Taumel ergibt sich hingegen kein eindeutiger Zusammenhang in den deskriptiven Kenngrößen der betrachteten Formabweichungen – weder im Mittelwert noch in der Streuung zeigt sich eine systematische, monotone Abhängigkeit vom eingestellten Taumel. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die ursprüngliche Hypothese einer primär über univariate Merkmalsstatistiken abbildbaren Wirkung des Taumels zu kurz greift. Der Einfluss des Taumels manifestiert sich offenbar in subtileren Mustern und Wechselwirkungen innerhalb des multivariaten Merkmalsraums, die erst durch die datenbasierte Inversmodellierung in Kapitel 9 nutzbar werden. Gleichzeitig können Einschränkungen im Versuchsdesign, insbesondere die fehlende vollständige Randomisierung und mögliche zeitabhängige Störeinflüsse, die Beobachtungen überlagern.

Die datenbasierte Modellierung verdeutlicht eine klare Differenzierung hinsichtlich der Beobachtbarkeit der Prozessgrößen im Körperschallsignal: Während Taumel und z-Shift mit hoher Genauigkeit aus dem Körperschallsignal rekonstruiert werden können, ist der x-Shift nicht belastbar vorhersagbar und somit im vorliegenden Signal nur schwach oder nicht abgebildet. Da dieser Parameter geometrisch über r_e gut rekonstruierbar ist, liegt die Ursache nicht in einer fehlenden geometrischen Wirkung, sondern in einer fehlenden bzw. schwachen akustischen Kopplung. Für den Qualitätsregelkreis bedeutet dies, dass x-Shift-Abweichungen nicht in-process detektiert werden können und eine Offline-Vermessung als Rückkopplungsquelle erfordern (vgl. Kapitel 9).

Ein vergleichbares Bild ergibt sich für die geometrischen Qualitätsmerkmale. Lokal wirkende und direkt eingriffsbezogene Größen, insbesondere Winkel- und Zahndickenabweichungen, lassen sich zuverlässig vorhersagen. Demgegenüber weisen Formabweichungen und global aggregierte Größen deutlich geringere Modellgüten auf, was auf eine indirektere Kopplung an das Eingriffsgeschehen sowie auf zusätzliche Einflüsse entlang der Mess- und Prozesskette zurückzuführen ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass in-process Qualitätsvorhersagen auf Basis von Körperschall insbesondere für solche geometrischen Merkmale geeignet sind, die eine starke und direkte physikalische Kopplung zum Eingriffsgeschehen aufweisen. Für diese Merkmale ist nicht nur eine zuverlässige Vorhersage möglich, sondern auch eine weiterführende quantitative Analyse, insbesondere im Hinblick auf die Vorhersageunsicherheit. Sie bilden damit die Grundlage für die nachfolgende Unsicherheitsanalyse und die Ableitung geeigneter Regelgrößen.

8 Quantifizierung von Unsicherheiten in der Qualitätsvorhersage

Nach dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie (VIM) (BIPM et al. 2012) gehört zu jeder Messung eine Abschätzung der Unsicherheiten der Endergebnisse (DIN 15530-3 2018). Die quantitative Angabe der Vorhersageunsicherheit ist damit eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz der in Kapitel 7 entwickelten Modelle als Messtechnik-Substitut. Klassische Bewertungskennzahlen wie R^2 oder MAE beschreiben lediglich die globale Modellgüte und erlauben keine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit einzelner Vorhersagen (Klås et al. 2018, S. 432). Für regelungsnahen Anwendungen ist hingegen das Unsicherheitsintervall essenziell, innerhalb dessen der wahre Qualitätswert mit definierter Wahrscheinlichkeit liegt (Imkamp et al. 2012, S. 329). Die im Folgenden vorgestellte Methodik basiert auf dem GUM (BIPM et al. 2008a) und GUM-Supplement 1 (BIPM et al. 2008b) und wird ausschließlich auf diejenigen Modelle angewandt, für die in Kapitel 7 eine hinreichende Modellgüte nachgewiesen wurde (vgl. Tabelle 7.7). Die wesentlichen methodischen Ansätze sowie zentrale Erkenntnisse dieses Kapitels wurden bereits in Bilen et al. (2026b) veröffentlicht.

Das Kapitel gliedert sich wie folgt: Abschnitt 8.1 legt das methodische Vorgehen und die Modellformulierung fest. Die drei Unsicherheitskomponenten werden anschließend separat bestimmt: die Labelunsicherheit der optischen Referenzmessung in Abschnitt 8.2, die Wiederholstreuung der Körperschallmesskette in Abschnitt 8.3 sowie die epistemische Modellunsicherheit in Abschnitt 8.4. Abschnitt 8.5 führt diese Komponenten mittels Monte-Carlo-Simulation zur merkmalspezifischen Gesamtunsicherheit zusammen. Die quantitativen Ergebnisse werden in Abschnitt 8.6 dargestellt und in Abschnitt 8.7 diskutiert.

8.1 Methodisches Vorgehen zur Unsicherheitsquantifizierung

Nach dem GUM-Rahmenwerk (BIPM et al. 2008a) bildet die systematische und vollständige Identifikation aller relevanten Unsicherheitseinflüsse den Ausgangspunkt einer konsistenten Unsicherheitsbewertung. Ziel ist es, sämtliche Beiträge zu erfassen, die entlang der gesamten Vorhersagepipeline – von der prozessintegrierten Sensorik über die Referenzmesstechnik bis hin zur datengetriebenen Modellierung – zur Gesamtunsicherheit der Qualitätsvorhersage beitragen (Bilen et al. 2026b). Zur strukturierten Erhebung dieser Einflüsse wurde ein übergeordnetes Ishikawa-Diagramm erstellt (vgl. Abbildung 8.1). Dieses dient als zentrales Ordnungsinstrument und bildet sowohl klassische metrologische Einflusskategorien (z. B. Messgerät, Werkstück, Umwelt) als auch daten- und modellbezogene Unsicherheitsquellen ab.

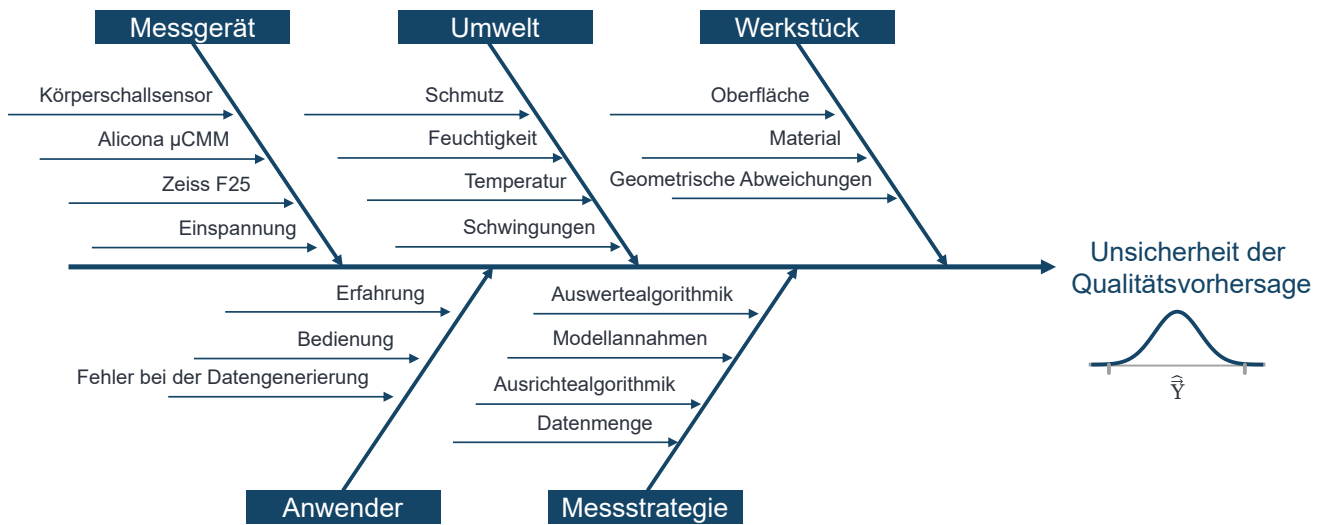


Abbildung 8.1: Ishikawa-Diagramm zur Identifikation sämtlicher Unsicherheitsquellen entlang der Vorhersagepipeline (orientiert an Gauder et al. (2022b), aus Bilen et al. (2026b)).

Die im Ishikawa-Diagramm identifizierten Unsicherheitsquellen lassen sich systematisch zwei grundlegenden Unsicherheitsarten zuordnen: aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten.

Aleatorische Unsicherheiten umfassen alle zufallsbedingten, statistisch streuenden Einflüsse, die dem betrachteten System inhärent sind und sich durch zusätzliche Information nicht weiter reduzieren lassen (Kiureghian et al. 2009). In der vorliegenden Arbeit betreffen diese insbesondere die prozessintegrierte Körperschallmesskette, wie sie im linken Bereich des Übersichtsschaubilds 8.2 abgebildet ist. Zufällige Störeinflüsse aus Sensorik, Signalübertragung und Merkmalsextraktion führen zu einer Streuung der Körperschallmerkmale, die als Eingangsgrößen in das Vorhersagemodell eingehen und sich dort unmittelbar fortpflanzen.

Darüber hinaus unterliegen auch die zur Modellbildung herangezogenen Referenzdaten aleatorischen Unsicherheiten. Die mit der Alicona µCMM erzeugten Labeldaten weisen messbedingte Streuungen auf, die aus der Sensorphysik, der Oberflächenbeschaffenheit der Mikroverzahnung sowie aus Wiederhol- und Rekonstruktionsprozessen resultieren (Gauder et al. 2021). Diese zufälligen Abweichungen stellen einen irreduziblen Bestandteil der Datenbasis dar und überlagern sich im Modell mit weiteren Unsicherheitsbeiträgen.

Epistemische Unsicherheiten hingegen resultieren aus unvollständigem Wissen über das System und sind prinzipiell durch zusätzliche Information oder eine Erweiterung der Datenbasis reduzierbar (Kiureghian et al. 2009; Hora 1996). In der vorliegenden Arbeit betreffen diese insbesondere die datengetriebene Modellierung selbst. Begrenzte Trainingsdaten,

eine eingeschränkte Abdeckung des Prozessraums sowie Modellannahmen führen zu einer Unsicherheit der Modellparameter und der Modellstruktur.

Die Unsicherheitsbewertung folgt im weiteren Verlauf der im GUM Supplement 1 beschriebenen dreistufigen Vorgehensweise bestehend aus *Formulierung*, *Fortpflanzung* und *Zusammenfassung* der Unsicherheit (BIPM et al. 2008b, S. 7–8). Das datengetriebene Vorhersagemodell wird dabei als deterministisch auswertbare Abbildung interpretiert, sodass die Monte-Carlo-basierte Fortpflanzung der identifizierten Unsicherheitsverteilungen auf konsistente Weise möglich ist.

Die im Ishikawa-Diagramm eingeführten Unsicherheitsbeiträge werden im Folgenden innerhalb eines gemeinsamen Unsicherheitsmodells kombiniert. Abbildung 8.2 zeigt den konzeptionellen Gesamtzusammenhang zwischen den einzelnen Unsicherheitskomponenten sowie deren Zusammenführung im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Modellgesamtunsicherheit. Auf die Bestimmung der einzelnen Komponenten – Labelunsicherheit u_{label} , Körperschall-Wiederholunsicherheit $u_{p,KS}$ und epistemische Unsicherheit u_{epi} – wird in den folgenden Abschnitten jeweils gesondert eingegangen.

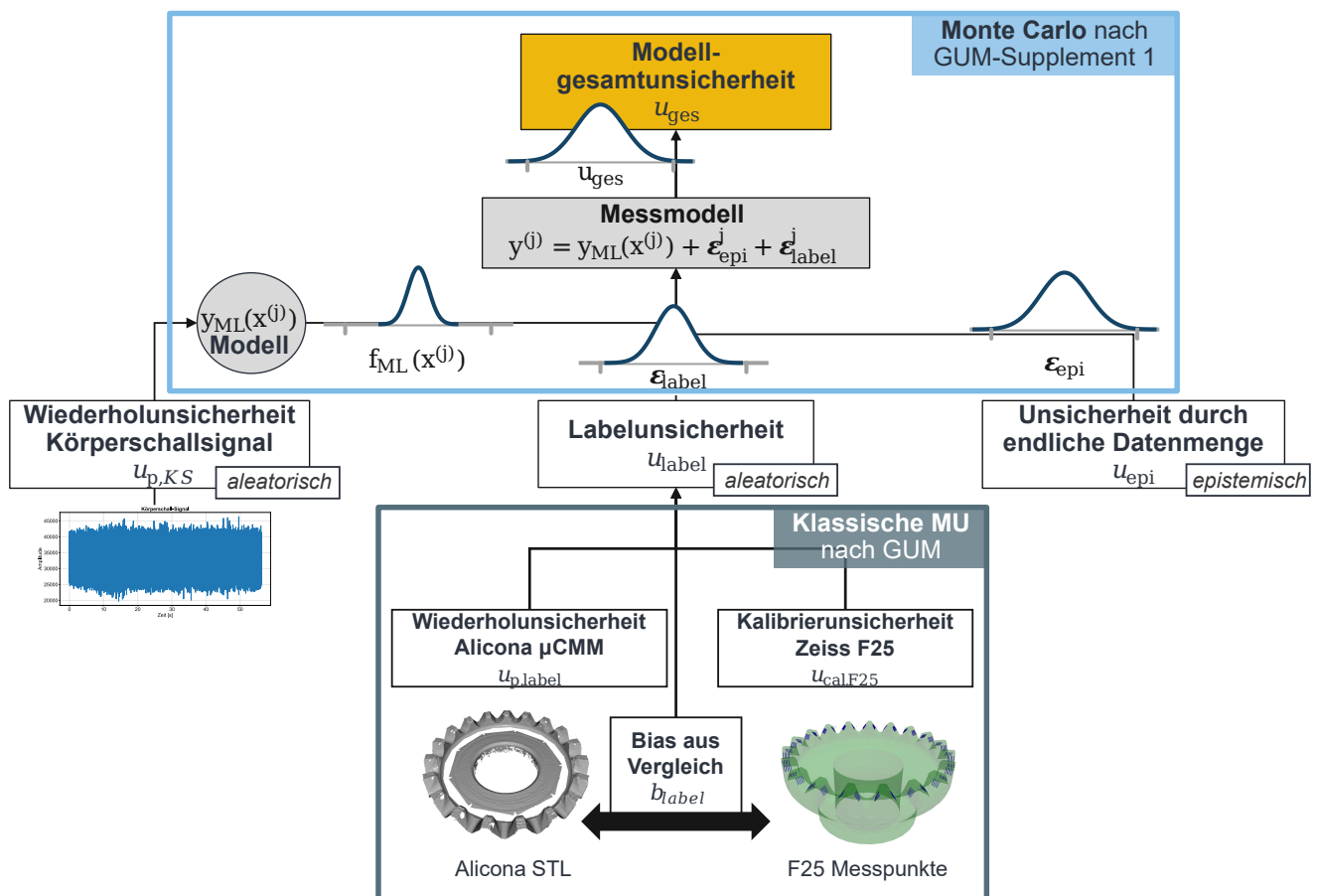


Abbildung 8.2: Überblick über die Zusammensetzung der Modellgesamtunsicherheit (Bilen et al. 2026b).

8.1.1 Kritische Einordnung: Anwendbarkeit von GUM Supplement 1 auf datengetriebene Modelle

Das GUM Supplement 1 ist formal auf beliebige deterministische Modelle anwendbar, insbesondere in Fällen, in denen die Linearisierungsannahmen des klassischen GUM-Verfahrens nicht erfüllt sind (BIPM et al. 2008b, S. VII). Die Monte-Carlo-Methode erlaubt dabei die direkte Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch nichtlineare Modelle und stellt somit ein geeignetes Werkzeug zur Unsicherheitsbewertung komplexer numerischer Auswerteprozesse dar.

Im Kontext datengetriebener, auf unsicherheitsbehafteten Labeldaten trainierter Modelle ergibt sich jedoch eine zentrale Einschränkung (Bilen et al. 2026b): Die Monte-Carlo-Fortpflanzung erfasst zunächst ausschließlich die *aleatorische Unsicherheit*, d. h. die stochastische Streuung der Ausgangsgröße infolge zufälliger Variabilität der Eingangsgrößen, etwa durch Sensorrauschen oder Wiederholungsunsicherheiten der Körperschallmesskette (Hora 1996; Kiureghian et al. 2009; Hüllermeier et al. 2021). Diese Unsicherheitsanteile sind im Sinne des GUM durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Eingangsgrößen beschrieben und werden durch das Modell propagiert.

Demgegenüber wird die *epistemische Unsicherheit* nicht automatisch erfasst. Diese resultiert im vorliegenden Fall aus endlichen Trainingsdatensätzen, Regularisierungseffekten sowie der begrenzten Generalisierungsfähigkeit des datengetriebenen Modells (Hüllermeier et al. 2021). Die daraus resultierende Abweichung zwischen Modellvorhersage und unbekannter wahrer Größe umfasst sowohl systematische als auch zufällige Anteile im Sinne des Bias-Varianz-Dilemmas (Geman et al. 1992).

Wird das trainierte Modell im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation als perfekte Blackbox behandelt, bleiben diese epistemischen Abweichungen unberücksichtigt. In diesem Fall können Überdeckungsintervalle zwar formal korrekt aus der resultierenden Ausgangsverteilung bestimmt werden, jedoch gegenüber der realen Messgröße systematisch verschoben sein (Bilen et al. 2026b). Da Überdeckungsintervalle im GUM-Kontext eine probabilistische Aussage über die Lage der wahren Messgröße darstellen sollen, ist eine solche Verschiebung metrologisch kritisch (BIPM et al. 2008a; BIPM et al. 2008b).

Analog zur Behandlung systematischer Effekte im klassischen GUM ist es daher erforderlich, epistemische Modellabweichungen explizit als eigene Unsicherheitsbeiträge im Messmodell zu berücksichtigen (Bilen et al. 2026b).

8.1.2 Formulierung des Unsicherheitsmodells (Formulation)

Im Sinne der Formulierungsphase nach GUM Supplement 1 wird zunächst die Ausgangsgröße Y definiert (BIPM et al. 2008b, S. 7-8). Diese entspricht in der vorliegenden Arbeit den funktionsrelevanten geometrischen Merkmalen, die in Kapitel 5 entwickelt wurden.

Die Ausgangsgröße hängt von einem Vektor unsicherheitsbehafteter Eingangsgrößen

$$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_N)^T \quad 8.1$$

ab, der die aus der Körperschallmesskette extrahierten Merkmale repräsentiert (vgl. Unterabschnitt 7.4.1). Der funktionale Zusammenhang wird durch ein Machine Learning (ML) Modell beschrieben als

$$Y_{\text{ML}} = f_{\text{ML}}(\mathbf{X}). \quad 8.2$$

Das Modell wird um additive stochastische Abweichungsterme erweitert, um alle Unsicherheitseinflüsse im Rahmen der Monte-Carlo-Analyse berücksichtigen zu können. Die Struktur des erweiterten Messmodells folgt der in Abbildung 8.2 dargestellten Zerlegung der Gesamtunsicherheit u_{ges} in messkettenbedingte Eingangsunsicherheiten, labelbezogene Unsicherheiten sowie epistemische Modellabweichungen, die additiv im Messmodell berücksichtigt werden:

$$Y = f_{\text{ML}}(\mathbf{X}) + \varepsilon_{\text{label}} + \varepsilon_{\text{epi}}. \quad 8.3$$

Dabei bezeichnet $f_{\text{ML}}(\mathbf{X})$ die deterministische Modellvorhersage, während $\varepsilon_{\text{label}}$ (siehe Abschnitt 8.2) und ε_{epi} (siehe Abschnitt 8.4) als Zufallsvariablen modellierte Abweichungsterme darstellen. Den Eingangsgrößen und Abweichungstermen werden folgende Verteilungen $\mathcal{N}$ zugewiesen:

$$X_i^{(j)} \sim \mathcal{N}(x_i, (u_{p,\text{KS}} \cdot x_i)^2) \quad 8.4$$

$$\varepsilon_{\text{label}}^{(j)} \sim \mathcal{N}(0, u_{\text{label}}^2) \quad 8.5$$

$$\varepsilon_{\text{epi}}^{(j)} \sim \mathcal{N}(\mu_{\text{epi}}, u_{\text{epi}}^2) \quad 8.6$$

Die multiplikative Störung der Eingangsmerkmale X_i mit der relativen Wiederholunsicherheit $u_{p,\text{KS}}$ bildet die stochastische Variabilität der Körperschallmesskette ab. Die Labelunsicherheit wird als mittelwertfrei modelliert, da der systematische Bias b_{label} nicht separat korrigiert, sondern gemäß Gleichung 8.15 als Typ-B-Beitrag in die kombinierte Standardunsicherheit

u_{label} eingeflossen ist; der Erwartungswert von $\varepsilon_{\text{label}}$ ist damit null, der Biaseffekt jedoch im erhöhten u_{label} enthalten.

Abschätzung der epistemischen Modellunsicherheit Die epistemische Unsicherheit wird empirisch aus den Residuen eines unabhängigen Holdout-Datensatzes abgeleitet, welcher dem Trainings- und Testdatensatz vorenthalten wird (siehe Abschnitt 8.4). Hierbei wird die Verteilung der Abweichungen zwischen Modellvorhersage und Referenzlabel analysiert. Da die Labels selbst unsicherheitsbehaftet sind, wird die epistemische Modellunsicherheit als jener Streuungsanteil definiert, der über die bekannte Labelunsicherheit hinausgeht. (Bilen et al. 2026b)

Die Parametrierung der Zufallsgröße $\varepsilon_{\text{epi}} \sim \mathcal{N}(\mu_{\text{epi}}, u_{\text{epi}}^2)$ erfolgt über den Erwartungswert und die Varianz der um die Labelunsicherheit bereinigten Holdout-Residuen. Die detaillierte Herleitung der Schätzfunktion und die numerische Bestimmung dieser Parameter erfolgen in Abschnitt 8.4. Die Modellierung stellt eine datengetriebene Approximation dar und ist auf den durch Trainings- und Validierungsdaten abgedeckten Merkmalsraum beschränkt (Kendall et al. 2017; Hüllermeier et al. 2021).

8.1.3 Fortpflanzung der Unsicherheiten (Propagation)

In der Fortpflanzungsphase, welche detaillierter Gegenstand von Abschnitt 8.5 ist, werden die definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels Monte-Carlo-Simulation gemeinsam durch das erweiterte Messmodell propagiert (BIPM et al. 2008b). Hierzu werden Stichproben erzeugt:

$$\mathbf{x}^{(j)} \sim p(\mathbf{X}), \quad \varepsilon_{\text{epi}}^{(j)} \sim p(\varepsilon_{\text{epi}}), \quad \varepsilon_{\text{label}}^{(j)} \sim p(\varepsilon_{\text{label}}), \quad 8.7$$

die ausgewertet werden zu

$$y^{(j)} = f_{\text{ML}}(\mathbf{x}^{(j)}) + \varepsilon_{\text{epi}}^{(j)} + \varepsilon_{\text{label}}^{(j)}. \quad 8.8$$

Die resultierende Stichprobe approximiert die Zielverteilung $p(Y)$.

8.1.4 Zusammenfassung der Unsicherheit (Summarizing)

In der Zusammenfassungsphase (vgl. Abschnitt 8.5) werden mit der Stichprobengröße M aus der Monte-Carlo-Stichprobe der Schätzwert

$$\hat{y} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y^{(j)} \quad 8.9$$

sowie die zugehörige Standardunsicherheit

$$u(\hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (y^{(j)} - \hat{y})^2} \quad 8.10$$

bestimmt (BIPM et al. 2008b). Überdeckungsintervalle (siehe Unterabschnitt 2.3.5) werden bevorzugt direkt aus Quantilen der empirischen Verteilung abgeleitet, wodurch auch nicht-gaußförmige oder asymmetrische Verteilungen konsistent berücksichtigt werden.

Da sämtliche als relevant identifizierten Unsicherheitsquellen gemeinsam im Messmodell abgebildet und propagiert werden (siehe Abbildung 8.2), ergibt sich die Gesamtunsicherheit u_{ges} direkt aus der resultierenden Ausgangsverteilung.

8.1.5 Empirische Validierung der Überdeckung

Zur Überprüfung der Belastbarkeit der ermittelten Gesamtunsicherheit wird eine empirische Überdeckungsanalyse auf einem unabhängigen Validierungsdatensatz $\mathcal{D}_{\text{val}}$ durchgeführt, der weder in das Modelltraining noch in die Bestimmung der epistemischen Unsicherheit eingeflossen ist. Für jedes Bauteil $i \in \mathcal{D}_{\text{val}}$ wird geprüft, ob der Referenzwert y_i innerhalb des symmetrischen Unsicherheitsintervalls

$$[\hat{y}_i - u_{\text{ges}}, \hat{y}_i + u_{\text{ges}}] \quad 8.11$$

liegt, wobei $\hat{y}_i$ die Punktvorhersage des Modells bezeichnet. Die empirische Überdeckungsrate ergibt sich als Anteil der korrekt überdeckten Bauteile:

$$\hat{p}_{\text{cov}} = \frac{1}{n_{\text{val}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{val}}} \mathbb{1}(y_i \in [\hat{y}_i - u_{\text{ges}}, \hat{y}_i + u_{\text{ges}}]) . \quad 8.12$$

Da u_{ges} als 95 %-Perzentil der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten definiert ist (vgl. Abschnitt 8.5), ist die erwartete Überdeckung nicht unmittelbar mit der eines klassischen 95 %-Überdeckungsintervalls im GUM-Sinne gleichzusetzen. Die empirische Überdeckung dient daher als Plausibilitätsprüfung der modellierten Unsicherheit und nicht als formaler Kalibrierungsnachweis.

8.2 Bestimmung der Labelunsicherheit nach GUM

Die für die Virtual-Metrology-Modelle benötigten Labelwerte basieren auf den geometrischen Qualitätsmerkmalen, die aus der optischen Messung mittels *Alicona μCMM* nach Kapitel 5 abgeleitet werden. Zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit erfolgt eine

Validierung gegen eine taktile Referenzmessung mit der *Zeiss F25*. Dieses Vorgehen folgt den Leitlinien des *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) (BIPM et al. 2008a) sowie der DIN 15530-3 (2018).

Zur Bewertung werden die in Kapitel 5 entwickelten Qualitätsmerkmale herangezogen. Da die Merkmalsbildung für beide Messsysteme identisch erfolgt, liegt die Vergleichsgröße direkt in Form zweier realisierter Messwerte Y_{Alicona} und M_{F25} vor. Der Unterschied liegt lediglich in der Datenausgangsform, denn die optisch gemessenen Daten liegen als Dreiecks-Meshes vor, während die taktil erfassten Messdaten Koordinaten sowie Normalenvektoren enthalten. Zur Ermittlung der Unsicherheitskomponenten werden gem. BIPM et al. (2008a) wiederholte Messungen des optischen Systems durchgeführt und mit präzisen taktilen Referenzmessungen verglichen.

8.2.1 Ermittlung der Unsicherheitskomponenten

Die kombinierte Messunsicherheit der optischen Messungen, welche für das Modelltraining als Labels dienen, setzt sich nach Härtig et al. (2009a) und Schwenke et al. (2007) aus vier wesentlichen Standardunsicherheiten zusammen:

1. Kalibrierunsicherheit $u_{\text{cal,F25}}$: Diese stellt die Standardunsicherheit der taktilen Referenzmessung an der *Zeiss F25* dar. Sie wird aus den Kalibrierprotokollen des verwendeten Mikroverzahnungsnormalis abgeleitet.
2. Wiederholunsicherheit des optischen Verfahrens $u_{\text{p,label}}$: Zur Bewertung der stochastischen Einflüsse des *Alicona*-Systems werden $n = 10$ unabhängige Wiederholmessungen durchgeführt. Die Standardunsicherheit ergibt sich aus der Standardabweichung der Messreihe:

$$u_{\text{p,label}} = \sigma(Y_{\text{Alicona}}). \quad 8.13$$

3. Systematische Abweichung b_{label} : Der Bias beschreibt die Differenz zwischen dem Mittelwert der optischen Messungen und dem Referenzwert:

$$b_{\text{label}} = \bar{Y}_{\text{Alicona}} - Y_{\text{F25}}. \quad 8.14$$

Die systematische Abweichung b_{label} wird nicht korrigiert, sondern in Übereinstimmung mit Härtig et al. (2009a) und Schwenke et al. (2007) sowie DIN 15530-3 (2018) direkt als Unsicherheitskomponente in die Berechnung der kombinierten Messunsicherheit einbezogen.

4. Material- und Produktionsstreuung $u_{w,label}$: Diese Komponente beschreibt Einflüsse durch das Werkstück selbst. Da im vorliegenden Versuchsaufbau identische Referenz-Werkstücke verwendet werden, wird diese Komponente analog zu Gauder (2024) als vernachlässigbar ($u_{w,label} \approx 0$) eingestuft.

8.2.2 Kombinierte Messunsicherheit der optischen Messung

Die Messunsicherheit u_{label} wird nach BIPM et al. (2008a) durch die quadratische Addition der Einzelkomponenten ermittelt:

$$u_{label} = \sqrt{u_{cal,F25}^2 + u_{p,label}^2 + b_{label}^2} \quad 8.15$$

8.3 Bestimmung der Unsicherheit der Körperschallmesskette

Die Eingabedatenunsicherheit der Körperschallmesskette wird als Typ-A-Unsicherheit nach GUM (BIPM et al. 2008a, S. 10) empirisch bestimmt, indem die Streuung extrahierter Körperschallmerkmale unter nominal konstanten Fertigungsbedingungen ausgewertet wird. Hierzu werden mehrere zeitlich begrenzte Stichproben (Zeitfenster) betrachtet, innerhalb derer von stationären Prozessbedingungen ausgegangen werden kann.

Jedes Zeitfenster umfasst $n = 30$ Bauteile, die mit identischen Maschinenparametern gefertigt wurden. Die innerhalb eines Zeitfensters beobachtete Varianz der Körperschallmerkmale wird als Wiederholunsicherheit $u_{p,KS}$ interpretiert. Sie beschreibt die kurzfristigen, stochastischen Schwankungen der Körperschallsignale und wird im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation (vgl. Abschnitt 8.5) zur Variation des Körperschall-Merkmalsvektors $\mathbf{x}$ verwendet.

Zur robusten Schätzung dieser Unsicherheit werden Daten aus einer Langzeit-DoE herangezogen. Der Gesamtdatensatz wird hierzu in $K = 16$ Zeitfenster segmentiert, um langsame zeitabhängige Einflüsse wie Drift oder Chargeneffekte von der kurzfristigen Streuung zu entkoppeln. Die Unsicherheitskennwerte werden zunächst fensterweise bestimmt und anschließend über alle Zeitfenster aggregiert, wodurch eine repräsentative Abschätzung der stochastischen Variabilität der Körperschallmerkmale unter quasi-stationären Bedingungen erfolgt.

Innerhalb jedes Zeitfensters werden $N = 30$ für die Vorhersage relevante Körperschallmerkmale betrachtet. Tabelle 8.1 zeigt exemplarisch die Struktur der zugrunde liegenden Datengrundlage, bestehend aus mehreren Zeitfenstern mit jeweils n Bauteilen und N extrahierten Merkmalen. Die dargestellten Daten bilden die Grundlage zur Berechnung der merkmals- und zeitfensterspezifischen Streuungskennwerte.

Tabelle 8.1: Exemplarische Struktur der Datengrundlage zur Bestimmung der Wiederholungsunsicherheit der Körperschallmerkmale. Dargestellt sind Messwerte $x_{i,j}$ des Merkmals i am Bauteil j innerhalb eines Zeitfensters.

Bauteilindex j	Zeitstempel	$x_{1,j}$	$x_{2,j}$	$x_{3,j}$	...	$x_{N,j}$
65	2024-05-12 08:31	$x_{1,65}$	$x_{2,65}$	$x_{3,65}$	...	$x_{N,65}$
66	2024-05-12 08:34	$x_{1,66}$	$x_{2,66}$	$x_{3,66}$	...	$x_{N,66}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
94	2024-05-12 10:05	$x_{1,94}$	$x_{2,94}$	$x_{3,94}$	...	$x_{N,94}$

Für jedes Merkmal x_i , $i \in \{1, \dots, N\}$, und jedes Zeitfenster $k \in \{1, \dots, K\}$ werden der Mittelwert $\mu_{i,k}$ und die empirische Standardabweichung $\sigma_{i,k}$ bestimmt. Die zugehörige relative Standardabweichung ergibt sich zu:

$$\sigma_{\text{rel},i,k} = \frac{\sigma_{i,k}}{\mu_{i,k}}. \quad 8.16$$

Zur Aggregation über alle Merkmale und Zeitfenster wird die Menge aller relativen Standardabweichungen

$$\mathcal{S} = \{\sigma_{\text{rel},i,k} \mid i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K\}$$

gebildet. Die Wiederholungsunsicherheit der Körperschallmesskette wird anschließend als 95 %-Perzentil dieser Verteilung definiert:

$$u_{p,KS} = P_{95}(\mathcal{S}). \quad 8.17$$

Die Verwendung des Perzentils führt zu einer robusten und konservativen Abschätzung der stochastischen Variabilität, da extreme Ausreißer keinen dominanten Einfluss auf den resultierenden Unsicherheitswert ausüben.

Der Wert $u_{p,KS}$ ist dimensionslos und entspricht einer relativen Unsicherheit der Körperschallmerkmale. In der Monte-Carlo-basierten Gesamtunsicherheitsbewertung dient er zur Parametrisierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(\mathbf{X})$, um die Sensitivität des Vorhersagemodells gegenüber der Variabilität der Eingangsmerkmale konsistent abzubilden.

8.4 Abschätzung der epistemischen Unsicherheit

Zur quantitativen Bestimmung der in Unterabschnitt 8.1.2 eingeführten Modellkomponente ε_{epi} wird ein unabhängiger Holdout-Datensatz (Dwork et al. 2015)

$$\mathcal{D}_{\text{HO}} = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^{n_{\text{HO}}} \quad 8.18$$

herangezogen. Dabei bezeichnet n_{HO} die Anzahl der im Holdout-Datensatz enthaltenen Stichproben, und der Index $i = 1, \dots, n_{\text{HO}}$ nummeriert die einzelnen Beobachtungen. Jede Beobachtung besteht aus einem Merkmalsvektor $\mathbf{x}_i$ sowie dem zugehörigen Zielwert y_i . Der Datensatz dient ausschließlich der Modellbewertung und fließt zuvor nicht in das Training oder die Hyperparameteroptimierung im Rahmen von Kapitel 7 ein.

Für jedes Holdout-Sample wird zunächst das Residuum bestimmt:

$$r_i = y_i - f_{\text{ML}}(\mathbf{x}_i). \quad 8.19$$

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 8.2 hergeleiteten Labelunsicherheit u_{label} wird das Residuum als Überlagerung zweier unabhängiger stochastischer Prozesse interpretiert:

$$r_i = \varepsilon_{\text{epi},i} + \varepsilon_{\text{label},i}. \quad 8.20$$

Die Zufallsgröße ε_{epi} beschreibt die Modellabweichung infolge begrenzter Datenverfügbarkeit und eingeschränkter Generalisierung. Unter der Annahme stochastischer Unabhängigkeit folgt für die Varianz des Residuums:

$$\mathbb{V}(r) = \mathbb{V}(\varepsilon_{\text{epi}}) + u_{\text{label}}^2. \quad 8.21$$

Die empirische Residuenvarianz $\hat{\sigma}_r^2$ und der Mittelwert $\bar{r}$ werden aus dem Holdout-Datensatz geschätzt. Durch Herausrechnung des bekannten Label-Beitrags ergibt sich die Varianz der epistemischen Modellunsicherheit zu:

$$\hat{u}_{\text{epi}}^2 = \max(0, \hat{\sigma}_r^2 - u_{\text{label}}^2). \quad 8.22$$

Der Mittelwert $\bar{r}$ wird als Schätzwert für den Erwartungswert μ_{epi} interpretiert. Die resultierende Verteilung $\varepsilon_{\text{epi}} \sim \mathcal{N}(\bar{r}, \hat{u}_{\text{epi}}^2)$ bildet die Grundlage für die anschließende Monte-Carlo-Simulation. Dieses Vorgehen vermeidet eine Doppelzählung der Labelunsicherheit und liefert eine bereinigte Schätzung der Modellgüte.

8.5 Bestimmung der Gesamtunsicherheit

Die quantitative Bestimmung der Gesamtunsicherheit erfolgt für jedes in Kapitel 5 definierte geometrische Qualitätsmerkmal separat auf Basis des jeweils zugehörigen Vorhersa-

gemodells mittels Monte-Carlo-Simulation des in Abschnitt 8.1 hergeleiteten erweiterten Messmodells.

Ziel ist es, für jedes geometrische Merkmal eine robuste globale Unsicherheitskennzahl anzugeben, welche die kombinierte Wirkung zufälliger und systematischer Unsicherheitseinflüsse des jeweiligen Vorhersagemodells beschreibt.

8.5.1 Parametrierung der Monte-Carlo-Simulation

Für jedes der $n = 200$ (DoE Versuchsteile, exkl. Holdout) untersuchten Bauteile werden gemäß GUM Supplement 1 (BIPM et al. 2008b, S. 28) insgesamt $M = 10^5$ Monte-Carlo-Stichproben pro geometrischem Qualitätsmerkmal erzeugt.

Dabei werden die Feature-Vektoren $\mathbf{x}_i^{(j)}$, die epistemische Modellabweichung $\varepsilon_{\text{epi}}^{(j)}$ sowie die Labelunsicherheit $\varepsilon_{\text{label}}^{(j)}$ simultan aus den jeweils zugrunde gelegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen, wie in Unterabschnitt 8.1.3 beschrieben.

Aus den resultierenden Stichproben $\{y_i^{(j)}\}_{j=1}^M$ wird für jedes Bauteil und jedes geometrische Qualitätsmerkmal eine bauteilspezifische Vorhersageverteilung approximiert.

8.5.2 Bauteilspezifische Auswertung und Bias-Berücksichtigung

Gemäß GUM Supplement 1 (BIPM et al. 2008b, S. 32) wird der Erwartungswert der bauteilspezifischen Vorhersageverteilung als Schätzwert $\tilde{y}_i$ des jeweiligen geometrischen Merkmals interpretiert.

Die Streuung der bauteilspezifischen Vorhersage ergibt sich aus der Standardabweichung der Monte-Carlo-Stichprobe und beschreibt die lokale Standardunsicherheit des betrachteten Vorhersagemodells:

$$u_i = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M \left(y_i^{(j)} - \tilde{y}_i \right)^2}. \quad 8.23$$

Neben der zufälligen Streuung können unkorrigierte systematische Abweichungen zwischen dem Schätzwert $\tilde{y}_i$ und dem Referenzlabel y_i des jeweiligen geometrischen Merkmals auftreten.

Der lokale Bias wird daher als

$$e_i = \tilde{y}_i - y_i \quad 8.24$$

bestimmt.

Zur ganzheitlichen Beschreibung der lokalen Unsicherheit wird eine kombinierte Unsicherheitskennzahl definiert, in der zufällige und systematische Anteile gemeinsam berücksichtigt werden:

$$u_{\text{tot},i} = \sqrt{u_i^2 + e_i^2}. \quad 8.25$$

8.5.3 Merkmalsspezifische globale Unsicherheit

Die globale Unsicherheit eines geometrischen Qualitätsmerkmals wird aus der Verteilung der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ des zugehörigen Vorhersagemodells bestimmt.

Als konservative und zugleich robuste Kenngröße wird das 95 %-Perzentil dieser Verteilung herangezogen:

$$u_{\text{ges}} = P_{95}(u_{\text{tot},i}). \quad 8.26$$

Dieser Wert beschreibt die Unsicherheit, unterhalb derer 95 % aller bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten des betrachteten geometrischen Merkmals im durch die Trainingsdaten abgedeckten Merkmalsraum liegen, und stellt die globale Unsicherheitskennzahl des jeweiligen Vorhersagemodells dar.

8.6 Ergebnisse der Messunsicherheitsquantifizierung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Unsicherheitsquantifizierung der VM-Vorhersagemodelle aus Kapitel 7 nach Bilen et al. (2026b) dargestellt. Die Unsicherheitsanalyse wird ausschließlich für jene Modelle durchgeführt, für die dort belastbare Korrelationen zwischen Körperschallsignalen und geometrischen Qualitätsmerkmalen nachgewiesen wurden. Für die Teilungsabweichung F_p und den Exzentrizitätsradius r_e wird also aufgrund unzureichender Modellgüten auf eine ganzheitliche Unsicherheitsanalyse verzichtet; betrachtet wird im Folgenden für diese zwei Merkmale lediglich die Labelunsicherheit.

8.6.1 Messunsicherheit der optisch erfassten Labeldaten

In diesem Abschnitt werden die quantitativen Ergebnisse der Messunsicherheitsermittlung für die optisch erfassten Messungen, welche als Labeldaten dienen, präsentiert. Die Berechnung folgt dem in Abschnitt 8.2 vorgestellten Ansatz, wobei die Wiederholunsicherheit des optischen Systems, die systematische Abweichung zur taktilen Referenz sowie die Kalibrierunsicherheit der *Zeiss F25* berücksichtigt werden.

8.6.1.1 Wiederholunsicherheit und systematischer Bias der optischen Messung

Die Ergebnisse in Tabelle 8.2 zeigen eine sehr geringe Wiederholunsicherheit des optischen Systems, die bei den profil- und flankenbezogenen Merkmalen deutlich unter $0,1 \mu\text{m}$ liegt. Der systematische Bias stellt hierbei die dominante Komponente dar, was die Notwendigkeit der Einbeziehung in die Gesamtabwicherung unterstreicht.

Tabelle 8.2: Standardabweichung der Wiederholmessung u_p und systematischer Bias b_{label} (Bilen et al. 2026b).

Merkmal	Wiederholunsicherheit Label u_p	Bias Label b_{label}
Profil-Gesamtabweichung F_α [μm]	0,014	-0,14
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	0,018	-1,79
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	0,14	1,1
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β [μm]	0,023	1,34
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ [μm]	0,013	0,37
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ [μm]	0,09	0,05
Zahndickenabweichung Δt [μm]	0,15	0,81
Teilungsabweichung F_p [$^\circ$]	0,005	0,034
Exzentrizitätsradius r_e [μm]	6,93	5,34

Auffällig ist hingegen der Exzentrizitätsradius r_e . Mit $u_p = 6,93 \mu\text{m}$ und $b_{\text{label}} = 5,34 \mu\text{m}$ liegt er um Größenordnungen über den übrigen Merkmalen. Das Ergebnis weist auf eine mangelnde Robustheit der zugrunde liegenden Berechnungsmethodik für dieses spezifische Merkmal hin. Insbesondere bei geringen Exzentrizitäten ist die Bestimmung des Exzenterkreises numerisch instabil, da die aus den Zahngeometrien abgeleiteten Hauptnormalen nur schwach konvergieren. Entsprechend dominieren beim Merkmal r_e algorithmische Effekte (z. B. Normalenstreuung und Fit-Instabilität) gegenüber der eigentlichen physikalischen Wiederholunsicherheit der Messkette.

8.6.1.2 Standardunsicherheit der Labelmessungen

Die kombinierte Standardunsicherheit wurde unter Berücksichtigung der Kalibrierunsicherheit der Zeiss F25 $u_{\text{cal}} = 0,3 \mu\text{m}$ (siehe Anhang Abschnitt A1.2) sowie der vernachlässigbaren Materialstreuung $u_w \approx 0$ berechnet.

Tabelle 8.3: Messunsicherheit u_{label} der funktionalen Merkmale (Bilen et al. 2026b).

Merkmals	u_{label}
Profil-Gesamtabweichung F_{α} [μm]	0,33
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	1,81
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	0,15
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} [μm]	1,37
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ [μm]	0,47
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ [μm]	0,17
Zahndickenabweichung Δt [μm]	0,87
Teilungsabweichung F_p [$^{\circ}$]	0,0015
Exzentrizitätsradius r_e [μm]	8,76

8.6.2 Unsicherheit der Körperschallmesskette

Die Unsicherheit der Körperschallmessung wird in dieser Arbeit über die Wiederholstreuung der aus dem Signal abgeleiteten spektralen Merkmale unter konstanten Prozessbedingungen quantifiziert. Hierzu werden 16 zeitlich voneinander getrennte Versuchsreihen betrachtet (vgl. Abschnitt 8.3), die jeweils $n = 30$ unmittelbar aufeinanderfolgende Bauteile umfassen, um die natürliche Variation des Körperschallsignals bei gleichbleibenden Fertigungsparametern und -ergebnissen zu ermitteln.

Für jedes Merkmal und jede Versuchsreihe wird die relative Standardabweichung in Prozent bestimmt und als Maß der Wiederholstreuung verwendet. Ein exemplarischer Auszug der resultierenden Kennwerte ist in Tabelle 8.4 dargestellt.

Tabelle 8.4: Exemplarischer Auszug der Wiederholstreuung ausgewählter spektraler Merkmale je Versuchsreihe mit Shapiro-Wilk p -Wert.

Merkmals	Versuchsreihe	Std [%]	p -Wert
Standardabweichung STFT Frequenzband 1334Hz	1	4,45	0,364
Standardabweichung STFT Frequenzband 1286Hz	1	4,24	0,302
RMS STFT Frequenzband 1334Hz	1	4,09	0,006
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Standardabweichung STFT Frequenzband 5335Hz	16	3,03	0,466
RMS STFT Frequenzband 6050Hz	16	4,43	0,016
Median STFT Frequenzband 762Hz	16	2,57	0,159

Zur Plausibilisierung der stochastischen Modellierung wird zusätzlich die Annahme einer näherungsweisen Normalverteilung der Merkmalswerte je Versuchsreihe mittels Shapiro-Wilk-Test (Hanusz et al. 2016) geprüft. Für $p \geq 0,05$ wird die Hypothese einer Normalverteilung nicht verworfen. In der vorliegenden Datengrundlage (insgesamt 30 Merkmale pro Versuchsreihe, somit 480 Merkmals-Versuchsreihen-Kombinationen) ergeben sich 54 Fälle mit $p < 0,05$. Diese Abweichungen treten nicht konsistent für dieselben Merkmale über alle Versuchsreihen hinweg auf und werden daher als vereinzelte Effekte bewertet, die die Parametrierung der Eingabestörung nicht maßgeblich beeinflussen.

Die Verteilung der relativen Standardabweichungen $Std[\%]$ über alle betrachteten Merkmale und Versuchsreihen ist in Abbildung 8.3 als Histogramm dargestellt. Auf Basis der dargestellten Verteilung wird für die nachfolgende Monte-Carlo-Auswertung eine Wiederholungsunsicherheit von $u_{p,KS} = 5,62\%$ angesetzt, welche das 95%-Perzentil darstellt.

Die Verwendung dieses globalen Perzentilwertes stellt eine konservative Abschätzung der Eingabedatenunsicherheit dar. Während einzelne Merkmale eine deutlich geringere Streuung aufweisen, werden auch diese im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation mit der durch das 95 %-Perzentil repräsentierten Unsicherheit variiert. Insbesondere für modellrelevante, sensitiv wirksame Merkmale führt dies tendenziell zu einer Überschätzung der tatsächlichen Unsicherheitsfortpflanzung und damit zu einer sicheren, jedoch eher zu hohen Abschätzung der resultierenden Vorhersageunsicherheit.

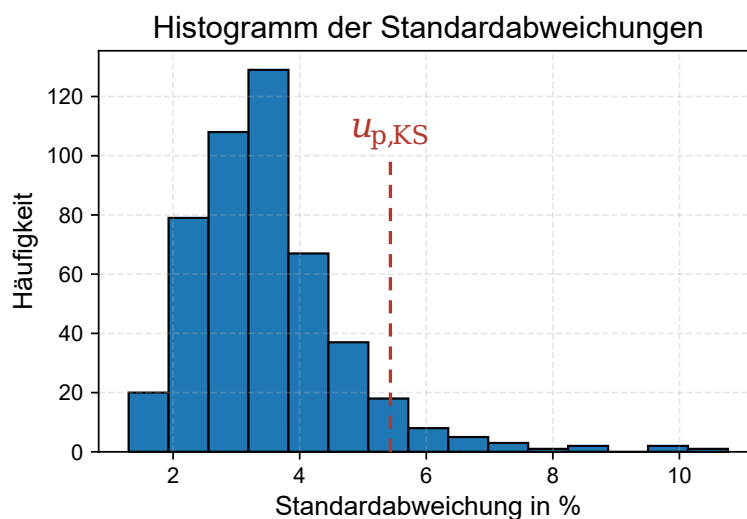


Abbildung 8.3: Histogramm der relativen Standardabweichungen der relevanten Körperschallmerkmale (Bilen et al. 2026b).

8.6.3 Abschätzung der epistemischen Unsicherheit

Die epistemische Unsicherheit ε_{epi} wird auf Basis eines unabhängigen Holdout-Datensatzes mit 25 Bauteilen gemäß der in Abschnitt 8.4 beschriebenen Methodik bestimmt. Tabelle 8.5 fasst die resultierenden Schätzwerte der epistemischen Unsicherheit für die jeweils besten Modelle je Zielgröße aus Unterabschnitt 7.7.3 zusammen.

Tabelle 8.5: Abschätzung der epistemischen Unsicherheit u_{epi} (Bilen et al. 2026b).

Merkmal	u_{epi}
Profil-Gesamtabweichung F_{α} [μm]	0,63
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	0
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	1,8
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} [μm]	0
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ [μm]	0
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ [μm]	0,9
Zahndickenabweichung Δt [μm]	14,69
Teilungsabweichung F_p [$^{\circ}$]	0,0881
Exzentrizitätsradius r_e [μm]	23,44

Es zeigt sich, dass die Höhe der epistemischen Unsicherheit stark zielgrößenabhängig ist und direkt aus der in Abschnitt 8.4 eingeführten Varianzzerlegung gemäß 8.21 resultiert. Epistemische Unsicherheit tritt genau dann auf, wenn die empirische Residuenvarianz $\hat{\sigma}_r^2$ die bekannte Labelunsicherheit u_{label}^2 übersteigt, sodass nach 8.22 ein positiver Modellanteil verbleibt.

Für die *Zahndickenabweichung* Δt ergibt sich die mit Abstand größte epistemische Unsicherheit. Dies bedeutet, dass ein wesentlicher Anteil der Residuenvarianz nicht durch die bekannte Messunsicherheit erklärt werden kann. Entsprechend bleibt ein signifikanter Anteil $\hat{u}_{\text{epi}}^2 > 0$, was auf systematische Modellabweichungen und eine unvollständige Abbildung der zugrunde liegenden Zusammenhänge hinweist.

Für die *Profil-Gesamtabweichung* F_{α} sowie die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ ergeben sich moderate epistemische Unsicherheiten. In diesen Fällen ist $\hat{\sigma}_r^2 > u_{\text{label}}^2$, jedoch nur in begrenztem Umfang, sodass die Modelle die dominierenden Zusammenhänge erfassen, aber weiterhin nicht vollständig generalisieren. Der verbleibende epistemische Anteil ist somit als Indikator für modellbedingte Vereinfachungen oder nicht modellierte Einflussgrößen zu interpretieren.

Demgegenüber zeigen die *Profil-Formabweichung* $f_{f\alpha}$, die *Flankenlinien-Gesamtabweichung* F_{β} sowie die *Flankenlinien-Formabweichung* $f_{f\beta}$ sehr geringe epistemische Unsicherheiten. Für diese Zielgrößen gilt näherungsweise $\hat{\sigma}_r^2 \leq u_{\text{label}}^2$, sodass nach 8.22 kein zusätzlicher

Modellanteil verbleibt und $\hat{u}_{\text{epi}}^2 \approx 0$ gesetzt wird. Die beobachtete Streuung kann somit vollständig durch die bekannte Labelunsicherheit erklärt werden, was auf eine hinreichende Modellbeschreibung im Rahmen der verfügbaren Daten hindeutet.

8.6.4 Ermittlung merkmalspezifischer globaler Unsicherheiten auf Basis der Monte-Carlo-Analyse

Auf Basis der bauteilspezifischen Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation wird für jedes in Kapitel 5 definierte geometrische Qualitätsmerkmal eine globale Unsicherheitskennzahl des zugehörigen Vorhersagemodells bestimmt.

Hierzu wird für jedes Bauteil zunächst die kombinierte Unsicherheit $u_{\text{tot},i}$ gem. Gleichung 8.25 berechnet, welche sowohl die stochastische Streuung der Vorhersageverteilung als auch einen möglichen bauteilspezifischen Bias des jeweiligen geometrischen Merkmals berücksichtigt. Die globale Unsicherheit eines geometrischen Qualitätsmerkmals wird anschließend als das 95 %-Perzentil der Verteilung dieser bauteilspezifischen Unsicherheiten über alle betrachteten Bauteile gem. Gleichung 8.26 definiert. Die zugrundeliegenden Verteilungen von $u_{\text{tot},i}$ für alle Zielgrößen sind weiterführend in Abbildung A3.1 und Abbildung A3.2 im Anhang dargestellt. Tabelle 8.6 stellt die resultierenden globalen Unsicherheiten u_{ges} dar:

Tabelle 8.6: Merkmalspezifische globale Unsicherheiten u_{ges} der betrachteten geometrischen Zielgrößen (Bilen et al. 2026b).

Geometrisches Qualitätsmerkmal	u_{ges}
Profil-Gesamtabweichung F_{α} [μm]	0,85
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	1,84
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	1,8
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} [μm]	1,57
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ [μm]	0,49
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ [μm]	1,5
Zahndickenabweichung Δt [μm]	22,98

Die Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit der globalen Unsicherheit von der jeweiligen geometrischen Zielgröße und damit vom betrachteten Vorhersagemodell.

Die geringsten Unsicherheiten treten bei der *Flankenlinien-Formabweichung* $f_{f\beta}$ sowie der *Profil-Gesamtabweichung* F_{α} auf, die im Submikrometerbereich liegen. Auch die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ weisen mit $1,8 \mu\text{m}$ beziehungsweise $1,5 \mu\text{m}$ vergleichsweise geringe Unsicherheitsniveaus auf. Dies deutet darauf hin, dass die zugrunde liegenden Zusammenhänge für diese Zielgrößen durch das Vorhersagemodell stabil und mit geringer Streuung abgebildet werden können.

Demgegenüber zeigen die *Profil-Formabweichung* $f_{f\alpha}$ sowie die *Flankenlinien-Gesamtabweichung* F_β erhöhte Unsicherheitsniveaus. Dies weist darauf hin, dass die Vorhersage dieser Zielgrößen stärker von verbleibenden Unsicherheitsanteilen beeinflusst wird, die sich aus der Kombination von stochastischer Streuung und bauteilspezifischem Bias ergeben.

Die mit Abstand höchste Unsicherheit tritt bei der *Zahndickenabweichung* Δt auf. Dieses deutlich erhöhte Unsicherheitsniveau deutet darauf hin, dass sich Unsicherheitsanteile entlang der Zahngeometrie akkumulieren und sowohl aleatorische als auch epistemische Effekte in der Vorhersage stärker wirksam werden.

Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere lokal definierte geometrische Merkmale mit begrenzter räumlicher Ausdehnung eine geringe Unsicherheit aufweisen, während stärker aggregierende Zielgrößen ein erhöhtes Unsicherheitsniveau zeigen.

8.6.5 Empirische Überdeckung auf dem Validierungsdatensatz

Zur Überprüfung der in Unterabschnitt 8.1.5 beschriebenen Überdeckungsanalyse wird die empirische Überdeckungsrate $\hat{p}_{\text{cov}}$ auf einem unabhängigen Validierungsdatensatz mit $n_{\text{val}} = 20$ Bauteilen bestimmt. Tabelle 8.7 fasst die Ergebnisse für alle betrachteten Zielgrößen zusammen.

Tabelle 8.7: Empirische Überdeckungsrate $\hat{p}_{\text{cov}}$ der untersuchten Zielgrößen auf dem Validierungsdatensatz ($n_{\text{val}} = 20$) (Bilen et al. 2026b).

Geometrisches Qualitätsmerkmal	$\hat{p}_{\text{cov}}$
Profil-Gesamtabweichung F_α [μm]	0,85
Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	1,00
Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	0,90
Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β [μm]	1,00
Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ [μm]	1,00
Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ [μm]	0,85
Zahndickenabweichung Δt [μm]	0,60

Für die Mehrzahl der betrachteten geometrischen Merkmale wird eine hohe empirische Überdeckung erzielt. Die Profil- und Flankenlinien-Formabweichungen sowie die Flanken-gesamtabweichung erreichen eine vollständige Überdeckung von $\hat{p}_{\text{cov}} = 1,00$, was darauf hindeutet, dass das kombinierte Unsicherheitsmodell für diese Zielgrößen eher konservativ ausgelegt ist. Die Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ erreicht mit 0,90 eine Überdeckung nahe des nominalen Niveaus.

Die Profil-Gesamtabweichung F_α sowie die Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$ liegen mit jeweils 0,85 unterhalb des erwarteten Niveaus. Bei einer Stichprobengröße von lediglich 20 Bauteilen entspricht ein einzelnes nicht überdecktes Bauteil einer Verschiebung der empirischen Überdeckung um 5 Prozentpunkte, sodass diese Abweichungen im Rahmen der statistischen Auflösung als moderat einzustufen sind.

Die *Zahndickenabweichung* Δt zeigt mit $\hat{p}_{\text{cov}} = 0,60$ ein deutliches Überdeckungsdefizit. Trotz der vergleichsweise hohen epistemischen Unsicherheit, die bereits im Modell berücksichtigt wird (vgl. Tabelle 8.5), reichen die resultierenden Unsicherheitsintervalle nicht aus, um die tatsächliche Vorhersagevariabilität vollständig abzubilden. Dies deutet auf zusätzliche, nicht modellierte systematische Effekte oder Verteilungsabweichungen hin, die über die im Holdout-Datensatz beobachteten Residuen hinausgehen.

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die geringe Stichprobengröße von $n_{\text{val}} = 20$ die statistische Aussagekraft der empirischen Überdeckungsschätzung begrenzt. Die Ergebnisse sind daher als Plausibilitätsprüfung zu verstehen und nicht als formaler Kalibrierungsnachweis.

8.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-basierten Unsicherheitsanalyse zeigen – analog zu den Vorhersagegüten in Kapitel 7 – eine deutliche merkmalspezifische Differenzierung der Unsicherheitsniveaus. Während einzelne Zielgrößen Gesamtunsicherheiten im Submikrometer- bis unteren Mikrometerbereich aufweisen, erreicht die Zahndickenabweichung Δt einen Wert von $u_{\text{ges}} = 22,98 \mu\text{m}$. Diese Spreizung ergibt sich unmittelbar aus dem Zusammenspiel von Labelunsicherheit und epistemischer Unsicherheit: Für Merkmale, bei denen die empirische Residuenvarianz vollständig durch die bekannte Labelunsicherheit erklärt werden kann ($u_{\text{epi}} \approx 0$), wie die Formabweichungen $f_{f\alpha}$, $f_{f\beta}$ sowie die Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β , wird die Gesamtunsicherheit ausschließlich durch die Messunsicherheit der Referenzlabels begrenzt. Für die globalen Abweichungsmaße F_α und F_β sowie die Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$ ergibt sich ein mittleres Unsicherheitsniveau, das je nach Merkmal entweder durch eine erhöhte Labelunsicherheit ($u_{\text{label}} = 1,81 \mu\text{m}$ für $f_{f\alpha}$; $1,37 \mu\text{m}$ für F_β) oder durch einen verbleibenden epistemischen Anteil ($u_{\text{epi}} = 0,63 \mu\text{m}$ für F_α) getrieben wird.

Der Abgleich mit den empirischen Überdeckungsraten zeigt, dass die Unsicherheitsquantifizierung für die meisten Merkmale plausibel ist. Die Winkelabweichungen und Formabweichungen erzielen Überdeckungsraten zwischen 0,85 und 1,00, was auf eine konservative, aber hinreichend genaue Abschätzung hindeutet. Die gewählte Modellierung – insbesondere die Variation der Körperschallmerkmale auf Basis des globalen 95 %-Perzentils der beobachteten Standardabweichungen – führt für diese Merkmale systematisch zu einer Überschätzung der

tatsächlichen Unsicherheitsfortpflanzung und damit zu einer sicherheitsorientierten Absicherung.

Anders verhält es sich bei der Zahndickenabweichung Δt . Trotz der bereits hohen epistemischen Unsicherheit von $u_{\text{epi}} = 14,69 \mu\text{m}$ und der daraus resultierenden größten Gesamtunsicherheit aller betrachteten Merkmale beträgt die empirische Überdeckungsrate lediglich $\hat{p}_{\text{cov}} = 0,60$. Die Unsicherheitsintervalle unterschätzen also die tatsächliche Vorhersagevariabilität, obwohl das Modell bereits das höchste Unsicherheitsniveau ausweist. Dies deutet darauf hin, dass die im Holdout-Datensatz beobachteten Residuen die vollständige Streubreite auf unabhängigen Validierungsdaten nicht abbilden – etwa infolge nicht modellierter systematischer Effekte oder einer instabilen Merkmalskopplung bei der Zahndickenberechnung. Der Konservatismus der gewählten Modellierung reicht für dieses Merkmal folglich nicht aus; die Gesamtunsicherheit kann für Δt nicht als obere Schranke im Sinne einer sicheren Absicherung interpretiert werden.

In der Gesamtschau unterstreichen die Ergebnisse, dass die Aussagekraft der Unsicherheitsquantifizierung selbst merkmalspezifisch zu bewerten ist. Die Unsicherheitsanalyse liefert für die Winkel- und Formabweichungen belastbare Kenngrößen, die eine regelungsrelevante Nutzung der VM-Prognosen grundsätzlich ermöglichen. Für Merkmale mit erhöhtem Unsicherheitsniveau ist eine Dämpfung der Stellgrößenanpassung sinnvoll, um Überkompensation zu vermeiden. Für bspw. Δt ist eine direkte, ungedämpfte Nutzung der VM-Vorhersage als Regelgröße auf Basis der vorliegenden Unsicherheitslage nicht zu empfehlen.

9 Entwicklung von Strategien zur Qualitätsregelung

Aufbauend auf den in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Methoden zur geometrischen Qualitätsbewertung sowie zur Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen wird im folgenden Kapitel der Qualitätsregelkreis für das Wälzfräsen von Mikro-Kronenrädern mit der Entwicklung einer Regelungslogik geschlossen.

Die entwickelte Regelungslogik ist dabei bewusst agnostisch gegenüber der Herkunft der zugrunde liegenden Qualitätsinformationen. Sie kann sowohl auf mittels Labormesstechnik gemessene Qualitätsgrößen als auch auf prädizierte Größen aus der in Kapitel 7 entwickelten VM-Pipeline angewendet werden. Die Frage, unter welchen Bedingungen VM-basierte Prädiktionen als Regeleingang hinreichend verlässlich sind, wurde in Kapitel 8 durch eine explizite Unsicherheitsquantifizierung nach GUM adressiert. Das vorliegende Kapitel fokussiert hingegen auf die Entwicklung der zugehörigen Regelungsarchitektur und ist damit bewusst von der konkreten Verfügbarkeit oder Güte der Qualitätsinformationen entkoppelt.

Die Grundlage hierfür bildet der in Unterabschnitt 7.7.1 erbrachte Nachweis, dass prozessinduzierte Abweichungen im Wälzfräsprozess zu charakteristischen und reproduzierbaren Veränderungen in den definierten geometrischen Qualitätsmerkmalen führen. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, Qualitätsabweichungen nicht nur zu detektieren, sondern gezielt auf zugrunde liegende Prozessparameter zurückzuführen und im Rahmen einer Regelung zu kompensieren.

Vor diesem Hintergrund werden zwei unterschiedliche Regelungsansätze verfolgt: Der erste Ansatz basiert auf einer regelbasierten Regelungslogik, die direkt aus den simulativ gewonnenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen sowie den entwickelten Qualitätsmerkmalen analytisch abgeleitet wird. Ziel ist die Formulierung physikalisch interpretierbarer Korrekturstrategien zur gezielten Beeinflussung einzelner Qualitätsmerkmale.

Der zweite Ansatz verfolgt eine datengetriebene Regelungsstrategie, bei der auf Basis der DoE-Daten ein prädiktives Modell trainiert wird, das den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und resultierenden Qualitätsmerkmalen abbildet und für eine modellbasierte Optimierung der Stellgrößen genutzt wird.

9.1 Regelbasierter Qualitätsregler

Im Folgenden wird ein regelbasierter Ansatz zur Qualitätsregelung vorgestellt, bei dem aus gemessenen oder prädizierten Qualitätsmerkmalen direkt Korrekturen für die zugrunde liegenden Prozessstellgrößen abgeleitet werden. Ziel ist die Entwicklung einer analytisch

beschreibbaren Regelungslogik, die auf physikalisch interpretierbaren Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen basiert und eine automatisierte Kompensation relevanter Abweichungen im Wälzfräsprozess ermöglicht.

Aufbauend auf den formulierten Fehlerhypothesen werden hierzu Korrekturgleichungen angegeben, mit denen aus den Qualitätsmerkmalen abgeleitete Abweichungen auf konkrete Prozessstellgrößen zurückgeführt werden können. Die analytische Rückführung beschränkt sich dabei bewusst auf quasi-statische, translatorische Fehlerarten des Fertigungsprozesses, da diese direkt parametrierbar und im laufenden Betrieb automatisiert korrigierbar sind. Hierzu zählen insbesondere der axiale und der tangentialer Werkzeugversatz.

Dynamische Fehlerarten wie Taumel werden hingegen nicht als kontinuierlich nachregelbare Stellgrößen behandelt. Ihr Auftreten äußert sich primär in erhöhten Profil- und Flankenformabweichungen und erfordert typischerweise einen manuellen Eingriff, etwa eine Neujustage der Werkzeugaufnahme. Entsprechend wird Taumel im vorliegenden Ansatz nicht analytisch kompensiert, sondern lediglich als Indikator für einen erforderlichen Eingriff genutzt.

9.1.1 Axialer Werkzeugversatz (Δz)

Der axiale Versatz Δz führt zu einer systematischen Höhenverschiebung der Zahngeometrie, die sich in einer Änderung des Zahndickenmerkmals Δt widerspiegelt. Unter Berücksichtigung des effektiven Eingriffswinkels α_N des Kronenrades ergibt sich eine projektionsbasierte Schätzung des axialen Versatzes zu

$$\widehat{\Delta z} = \frac{\Delta t}{2 \cdot \tan(\alpha_N)}. \quad 9.1$$

Die Rückführung erfolgt als axiale Gegenkorrektur der Werkzeugposition, wodurch eine direkte und modellbasierte Kompensation dieser Fehlerart ermöglicht wird.

9.1.2 Tangentialer Werkzeugversatz (Δx)

Der tangentialer Versatz wird über den in Abschnitt 5.3.1 eingeführten korrigierten Exzentrizitätsradius r_e geometrisch erfasst. Mit dem Sollwert $r_{e,0}$ ergibt sich die tangentialer Abweichung als

$$\widehat{\Delta x} = r_e - r_{e,0}. \quad 9.2$$

Die Rückführung auf die Stellgröße erfolgt analog zum axialen Fall über eine proportionale Gegenkorrektur

$$\Delta x_{\text{kor}} = -\widehat{\Delta x}. \quad 9.3$$

Aufgrund der direkten geometrischen Ableitung ist Δx deterministisch und ohne zusätzliche Modellannahmen korrigierbar, was eine robuste Integration in einen geschlossenen Qualitätsregelkreis erlaubt.

9.1.3 Einordnung in den Qualitätsregelkreis

Die hergeleiteten Zusammenhänge ermöglichen die direkte Abbildung eines geschlossenen Qualitätsregelkreises, in dem geometrische Qualitätsmerkmale als Regelgröße dienen und über eine analytische Rückführung auf die Prozessstellgrößen Δz und Δx abgebildet werden. Die Gleichungen 9.1–9.3 definieren dabei die inverse Abbildung der Prozessstrecke und erlauben eine unmittelbare Kompensation identifizierter Abweichungen.

Die Regelstrategie beschränkt sich bewusst auf deterministisch beschreibbare, quasi-statische Einflussgrößen. Nicht modellierte oder nicht kontinuierlich beeinflussbare Effekte wie Taumel werden hingegen nicht in den Regelkreis integriert, sondern im Sinne einer zustandsbasierten Überwachung als Indikator für strukturelle Prozessabweichungen genutzt. Dadurch ergibt sich eine klare Trennung zwischen automatisierter Stellgrößenanpassung und übergeordneter Prozessintervention.

9.2 Datenbasierter Qualitätsregler

Neben dem modellbasierten Qualitätsregler aus Abschnitt 9.1, der auf expliziten geometrisch-kinematischen Beziehungen beruht, wird im Folgenden ein datengetriebener Ansatz zur Qualitätsregelung betrachtet. Ziel ist es, Qualitätsabweichungen direkt auf die zugrunde liegenden Stellgrößen zurückzuführen und damit auch komplexe oder überlagerte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge regelungstechnisch nutzbar zu machen. Die grundsätzliche Abbildbarkeit dieser Zusammenhänge wurde bereits in Unterabschnitt 7.7.1 nachgewiesen.

9.2.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage bildet die in Abschnitt 7.5 beschriebene Versuchsreihe mit insgesamt 225 gefertigten Mikro-Kronenrädern. Jedes Bauteil wurde unter definierter Variation der Maschinenparameter (Δx , Δz , Taumel) gefertigt und anschließend messtechnisch charakterisiert. Für jedes Bauteil liegen damit sowohl die eingestellten Prozessparameter als auch die resultierenden Qualitätsmerkmale vor. Hierzu zählen insbesondere Profil- und Flankenabweichungen, die Zahndickenabweichung, die Teilungsabweichung sowie der Exzentrizitätsradius.

Die Kombination aus Stellgrößen und resultierenden Qualitätsmerkmalen bildet die Grundlage für die datengetriebene Modellierung des Reglers.

9.2.2 Datenbasierte Modellierung

Ausgangspunkt der datengetriebenen Qualitätsregelung ist die in Abschnitt 7.1 untersuchte Vorwärtsabbildung zwischen Prozessparametern und resultierenden Qualitätsmerkmalen. Diese wurde im Rahmen der Validierung genutzt, um die Sensitivität der Qualitätsmerkmale gegenüber gezielten Variationen der Stellgrößen zu analysieren und die formulierten Fehlerhypothesen zu überprüfen. Formal ergibt sich die Abbildung als

$$\hat{q} = f_{\text{fwd}}(\mathbf{p}) \quad 9.4$$

mit den Prozessparametern $\mathbf{p}$ als Eingangsgröße und den daraus resultierenden Qualitätsmerkmalen $\mathbf{q}$ als Ausgangsgröße. Die Vorwärtsmodellierung diene dabei primär dem Systemverständnis sowie der Identifikation von Korrelationen und funktionalen Abhängigkeiten zwischen Stellgrößen und Qualitätsausprägungen.

Für die Qualitätsregelung ist jedoch nicht die Vorhersage der Qualitätsmerkmale aus gegebenen Prozessparametern entscheidend, sondern die umgekehrte Fragestellung: Welche Anpassung der Stellgrößen ist erforderlich, um einen gegebenen Qualitätszustand gezielt zu beeinflussen? Diese regelungstechnisch relevante Umkehrung der Abbildungsrichtung führt zur Definition des Inversmodells

$$\hat{\mathbf{p}} = f_{\text{inv}}(\mathbf{q}) \quad 9.5$$

mit dem Vektor der Qualitätsmerkmale $\mathbf{q}$ als Eingangsgröße und den geschätzten Prozessparametern $\hat{\mathbf{p}}$ als Ausgangsgröße. Das Inversmodell ermöglicht somit die Ableitung der Stellgrößen Δx und Δz sowie eine Schätzung des Taumelzustands aus gemessenen oder prädizierten Qualitätsabweichungen. Die inversen Schätzwerte für Δx und Δz wirken als Korrekturgrößen im Regelkreis. Der geschätzte Taumelwert hingegen dient nicht als direkter Stelleingriff, sondern als prozessnaher Monitoring-Indikator: Überschreitet der Schätzwert einen definierten Schwellwert, wird der Prozess unterbrochen und ein manueller Eingriff – etwa eine Neujustage der Werkzeugaufnahme – signalisiert.

Die inverse Modellierung entspricht dabei der Umkehrung der zuvor analysierten Ursache-Wirkungs-Beziehungen und überführt diese in eine regelungstechnisch nutzbare Form. Die

geschätzten Parameter wirken unmittelbar als Korrekturgrößen im Regelkreis und bilden die Grundlage eines datengetriebenen Reglers.

Zur Approximation des Inversmodells werden die in Unterabschnitt 2.4.5 eingeführten Regressionsverfahren eingesetzt, bestehend aus linearer Regression, Random Forest und Support Vector Regressor.

Der datengetriebene Ansatz erweitert den regelbasierten Regler um eine direkte Rückführung von Qualitätsabweichungen auf die Stellgrößen und ist damit auch für komplexe, analytisch schwer beschreibbare Zusammenhänge geeignet.

9.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur regel- und datenbasierten Qualitätsregelung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der entwickelten regel- und datenbasierten Ansätze zur Qualitätsregelung dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse des regelbasierten Qualitätsreglers präsentiert, gefolgt von der Auswertung des datengetriebenen Ansatzes.

9.3.1 Ergebnisse und Bewertung der regelbasierten Qualitätsregelung

Auf Basis der in Abschnitt 9.1 definierten Korrekturgleichungen wird die regelbasierte Qualitätsregelung für Mikro-Kronenräder evaluiert. Ziel ist die Prüfung, ob die aus den geometrischen Qualitätsmerkmalen rückgeführten Abweichungen als Stellgrößen geeignet sind und ob die eingeführten Korrekturformeln eine deterministische Gegenkorrektur erlauben. Für die Bewertung werden alle 225 im Rahmen des DoE erzeugten Bauteile berücksichtigt, sodass sowohl isolierte als auch überlagerte Fehlerzustände in die Analyse eingehen.

Zur quantitativen Bewertung werden für jedes Bauteil die bei der Fertigung eingestellten Stellgrößen Δx und Δz den jeweils aus den Qualitätsmerkmalen berechneten Korrekturwerten $\widehat{\Delta x}$ gemäß 9.2 und $\widehat{\Delta z}$ gemäß 9.1 gegenübergestellt (siehe Abbildung 9.1). Hierzu werden die eingestellten Sollwerte auf der Abszisse und die rückgeführten Korrekturwerte auf der Ordinate aufgetragen. Die resultierenden Scatterplots umfassen somit alle DoE-Bauteile und ermöglichen eine direkte Bewertung der Güte der Rückführung über den gesamten Parameterraum.

In beiden Fällen ist eine klare Tendenz erkennbar: Die berechneten Korrekturwerte erfassen das Vorzeichen sowie die Größenordnung der zugrunde liegenden Abweichungen. Gleichzeitig zeigt sich eine ausgeprägte Streuung um die ideale 1:1-Abbildung, was darauf hinweist, dass die univariaten Korrekturformeln die realen geometrischen Wechselwirkungen im Eingriff nicht vollständig erfassen.

Die Scatterpunkte sind entsprechend der Taumelgröße eingefärbt (blau: $1\ \mu\text{m}$, orange: $5\ \mu\text{m}$, rot: $9\ \mu\text{m}$), um mögliche systematische Einflüsse sichtbar zu machen. In den vorliegenden Daten zeigt sich jedoch keine klare monotone Abhängigkeit der Rückführfehler von der Taumelhöhe. Dies deutet darauf hin, dass Taumel nicht als isolierter Einflussfaktor wirkt, sondern über komplexe, gekoppelte Geometrieeffekte in die resultierenden Qualitätsmerkmale eingeht.

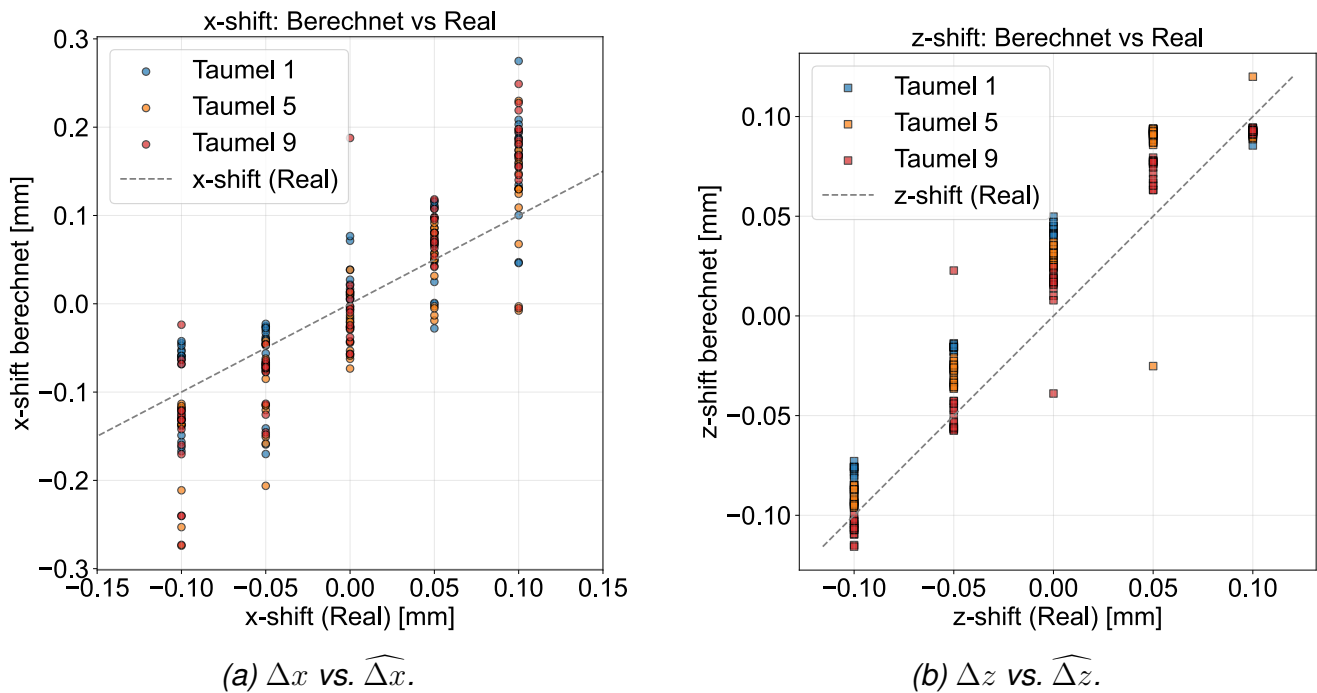


Abbildung 9.1: Eingestellte DoE-Stellgrößen vs. berechnete Korrekturwerte für alle DoE-Bauteile.

Eine quantitative Einordnung der beobachteten Zusammenhänge erfolgt anhand der in Tabelle 9.1 dargestellten Gütemaße. Für den z-Shift ergibt sich mit $R^2 = 0.872$ eine hohe Varianzaufklärung bei gleichzeitig geringen absoluten Fehlern (MAE $\approx 0,0208\ \text{mm}$, RMSE $\approx 0,0253\ \text{mm}$). Dies bestätigt, dass die zugrunde liegende analytische Beziehung zwischen den Qualitätsmerkmalen und Δz eine robuste und weitgehend deterministische Rückführung erlaubt.

Tabelle 9.1: Rückschätzung der Maschinenparameter aus Qualitätsmerkmalen (regelbasiert/analytisch).

Parameter	Modell	R^2_{Test}	MAE [mm]	RMSE [mm]
Δx	Regelbasiert	0.294	0.0464	0.0597
Δz	Regelbasiert	0.872	0.0208	0.0253

Demgegenüber zeigt der x-Shift mit $R^2 = 0.294$ eine deutlich reduzierte Modellgüte bei gleichzeitig höheren Fehlerkennzahlen ($MAE \approx 0,0464 \text{ mm}$, $RMSE \approx 0,0597 \text{ mm}$). Die geringe Varianzaufklärung verdeutlicht, dass die verwendeten Qualitätsmerkmale die zugrunde liegenden Einflussmechanismen von Δx nur unzureichend abbilden. Insbesondere laterale Eingriffsverschiebungen und daraus resultierende gekoppelte Flankenformänderungen können durch die einfache analytische Rückführung nicht hinreichend beschrieben werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die regelbasierte Qualitätsregelung für den z-Shift grundsätzlich geeignet ist, während für den x-Shift deutliche Einschränkungen bestehen. Dies bestätigt die in Abbildung 9.1 beobachtete Streuung und weist darauf hin, dass für eine präzisere und robuste Rückführung komplexer Prozessabweichungen datengetriebene Modellansätze erforderlich sind.

9.3.2 Ergebnisse und Bewertung der datenbasierten Qualitätsregelung

Zur Bewertung der datenbasierten Qualitätsregelung wurden überwachte Regressionsmodelle trainiert, die auf Basis der Qualitätsmerkmale die zugrundeliegenden Maschinenparameter (Δx , Δz , Taumel) vorhersagen. Die Modellgüte wurde anhand separater Trainings- und Testdatensätze sowie mittels fünffacher Kreuzvalidierung bewertet. Als Bewertungsgrößen wurden das Bestimmtheitsmaß R^2 , der Root Mean Squared Error (RMSE) und der Mean Absolute Error (MAE) herangezogen.

Die Ergebnisse der Inversmodelle in Tabelle 9.2 zeigen, dass alle betrachteten Maschinenparameter aus den geometrischen Qualitätsmerkmalen zuverlässig rückgeschätzt werden können. Der Taumel ist mit hoher Genauigkeit rekonstruierbar ($R_{\text{Test}}^2 = 0.855$), wobei ein Großteil der Vorhersagen innerhalb enger Toleranzgrenzen liegt. Besonders deutlich ausgeprägt ist die Rückschätzbarkeit der axialen Verschiebung Δz ($R_{\text{Test}}^2 = 0.949$), was auf eine starke und konsistente Kopplung dieses Parameters an die geometrischen Qualitätsmerkmale hinweist. Auch die laterale Verschiebung Δx ist mit $R_{\text{Test}}^2 = 0.795$ gut identifizierbar.

Damit bestätigen die inversen Modelle, dass die betrachteten Qualitätsmerkmale hinreichend sensitiv und eindeutig auf die zugrunde liegenden Maschinenparameter reagieren und somit eine geeignete Grundlage für datenbasierte, rückgekoppelte Qualitätsregelstrategien darstellen.

Tabelle 9.2: Rückschätzung der Maschinenparameter aus Qualitätsmerkmalen.

Parameter	Modell	R_{Test}^2	MAE	RMSE
Taumel	Random Forest	0.855	0.415	0.755
Δx	Random Forest	0.795	0.0045	0.0149
Δz	Random Forest	0.949	0.0013	0.0070

Zur Quantifizierung der Merkmalsbeiträge wird die aus der Varianzanalyse (Dean et al. 2017, S. 41) bekannte Trennung zwischen *Hauptwirkungen* und *Wechselwirkungen* in einen modellbasierten Rahmen übertragen. Hauptwirkungen beschreiben den isolierten Einfluss einzelner Qualitätsmerkmale auf die Rückschätzung der Prozessparameter und werden über permutation-basierte Effekte eines Random-Forest-Modells bestimmt (Performanceverlust beim zufälligen Permutieren eines einzelnen Merkmals) (Altmann et al. 2010). Wechselwirkungen werden erfasst, indem der zusätzliche Performanceverlust beim gleichzeitigen Permutieren eines Merkmalspaares mit der Summe der individuellen Permutation-Importances verglichen wird. Ein positiver Überschuss wird als *Synergie* interpretiert (gemeinsame Nutzung verstärkt den Effekt), ein negativer als *Redundanz* (Merkmale tragen weitgehend dieselbe Information und schwächen sich im Modell gegenseitig ab) (Timme et al. 2014).

Zur statistischen Bewertung werden aus den wiederholten Permutationen Konfidenzintervalle für die Hauptwirkungen abgeleitet. Wechselwirkungen gelten als signifikant, wenn ihr Beitrag oberhalb einer Schwelle liegt, die aus dem kleinsten noch signifikanten Haupteffekt bestimmt wird (Dean et al. 2017, S. 438). Die kombinierte Visualisierung von Haupt- und Wechselwirkungen erlaubt damit eine konsistente Bewertung isolierter und interagierender Signalträger, wie in Abbildungen 9.2, 9.3 und 9.4 dargestellt.

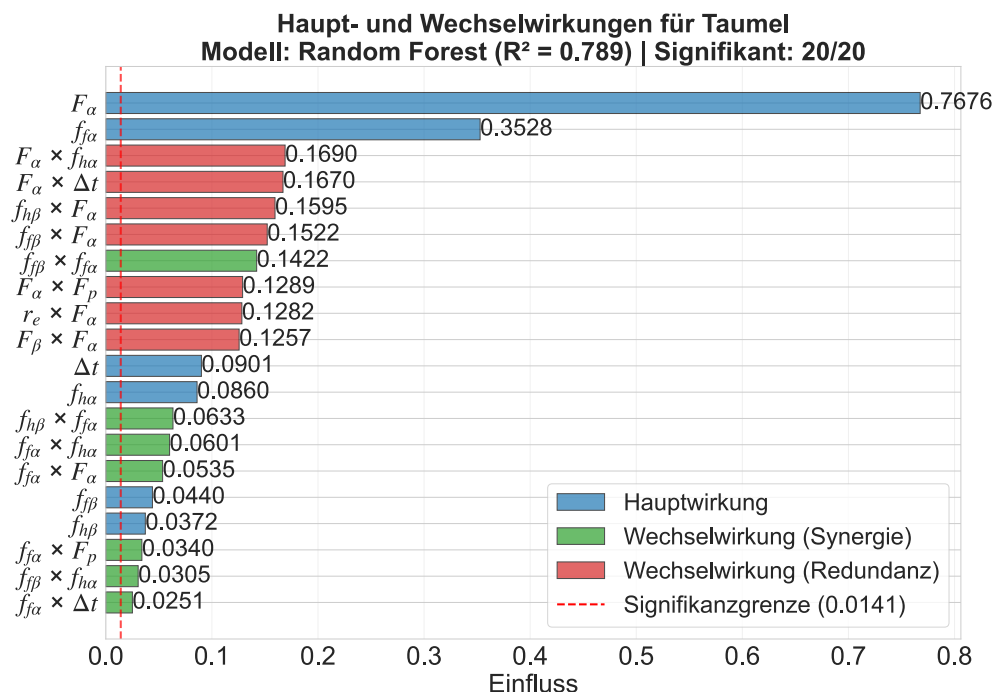


Abbildung 9.2: Haupt- und Wechselwirkungen für Taumel.

Die Analyse der Merkmalsbeiträge bestätigt für Δx und Δz die in Abschnitt 6.6 formulierten Annahmen zur Informationsrichtung der Qualitätsmerkmale. Für den Taumel zeigt Abbildung 9.2, dass die Profil-Gesamtabweichung F_α sowie deren Formanteil $f_{f\alpha}$ den größten

Anteil zur Modellentscheidung tragen, ergänzt durch moderat ausgeprägte Wechselwirkungen. Damit bestätigt sich die in Hypothese H3 angenommene Informationsrichtung – Taumel wirkt primär über profilbasierte Merkmale. Dieses Ergebnis ist jedoch im Licht der in Unterunterabschnitt 7.7.1.1 dargestellten deskriptiven Analyse einzuordnen: Der Zusammenhang zwischen Taumel und $f_{f\alpha}$ äußert sich nicht in einer systematischen Verschiebung univariater Merkmalsstatistiken, sondern in subtilen Mustern und Wechselwirkungen innerhalb des multivariaten Merkmalsraums, die erst durch das Inversmodell nutzbar werden.

Für den x -Shift ergibt sich ein deutlich anderes Bild: Hier wird die inverse Rekonstruktion maßgeblich durch den Exzentrizitätsradius r_e sowie dessen Interaktionen bestimmt, während Profil- und Flankenmerkmale nur sekundäre Beiträge aufweisen (vgl. Abbildung 9.3). Dies deckt sich mit der Hypothese, dass translatorische Tangentialverschiebungen primär geometrische Symmetriebrüche erzeugen, die sich in der Exzentrizität abbilden.

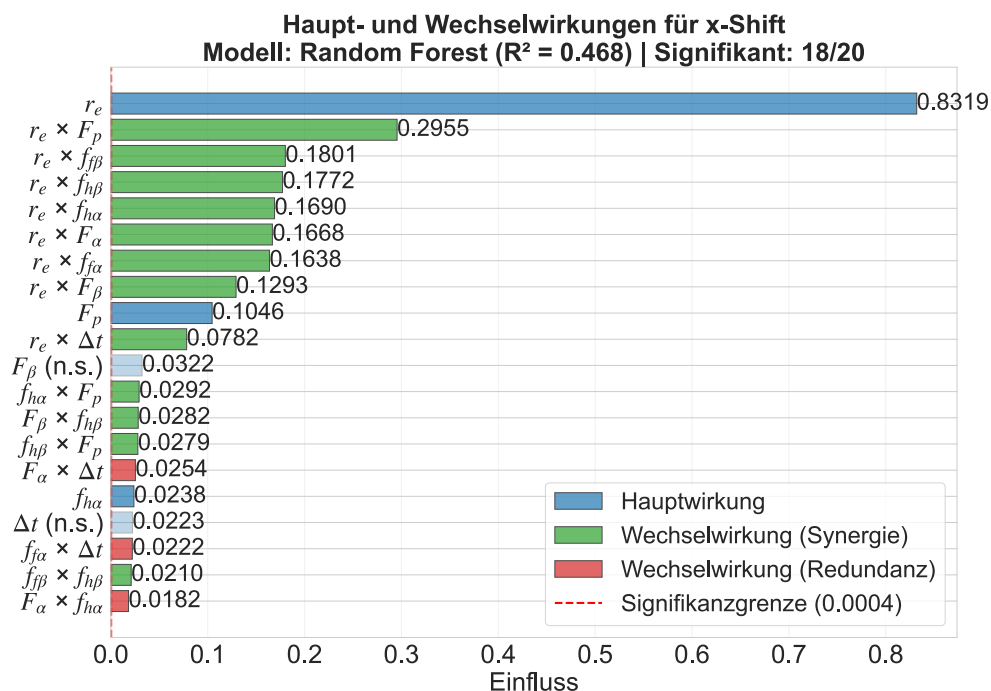


Abbildung 9.3: Haupt- und Wechselwirkungen für x -Shift.

Für den z -Shift sind hingegen Zahndickenänderungen Δt sowie Form- und Winkelanteile der Profil- und Flankenabweichung dominant (vgl. Abbildung 9.4). Diese Merkmalskonstellation ist konsistent mit den Mechanismen axialer Verschiebungen, die zu systematischen Dickenänderungen führen und zugleich lokale Profilwinkellagen beeinflussen.

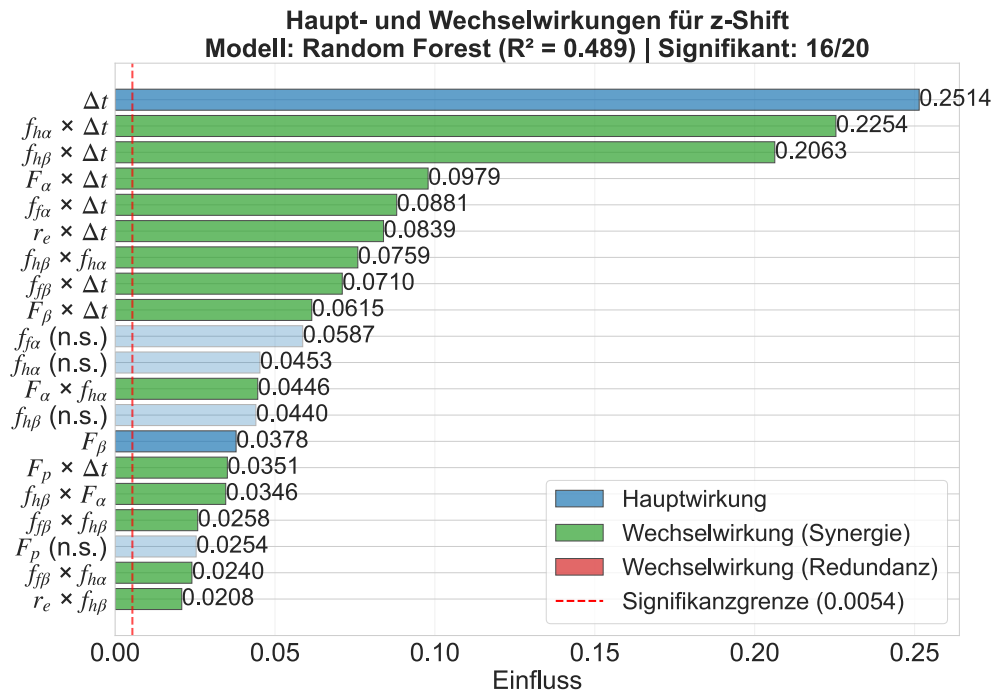


Abbildung 9.4: Haupt- und Wechselwirkungen für z -Shift.

Damit zeigt sich über alle Prozessparameter hinweg eine kohärente Struktur unterschiedlicher Signalträger:

- **Taumel:** profilbasierte Merkmale
- x -**Shift:** Exzentrizität
- z -**Shift:** Zahndicke und Winkelanteile

9.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die in dieser Arbeit entwickelten Qualitätsmerkmale eine geeignete Grundlage für die Rückführung von Qualitätsabweichungen auf die zugrunde liegenden Prozessparameter darstellen. Sowohl die regelbasierte als auch die datenbasierte Vorgehensweise bestätigen einen konsistenten Zusammenhang zwischen Geometrie und Stellgrößen, unterscheiden sich jedoch deutlich in Abbildungsgenauigkeit und Robustheit.

Die regelbasierte Qualitätsregelung folgt einem klassischen *Whitebox*-Ansatz, bei dem Korrekturgrößen explizit aus analytischen Zusammenhängen abgeleitet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Vorzeichen und Größenordnung der Abweichungen zuverlässig erfasst werden, insbesondere bei isolierten Fehlerzuständen. Die beobachtete Streuung um die ideale 1:1-Abbildung verdeutlicht jedoch die Grenzen der univariaten Korrekturbeziehungen, die

die tatsächlich gekoppelten Wirkzusammenhänge nur näherungsweise abbilden. Diese Einschränkung tritt insbesondere bei überlagerten Fehlerzuständen auf und ist eine direkte Folge der zugrunde liegenden Modellvereinfachungen.

Insbesondere für den x-Shift zeigt sich, dass die zugrunde liegenden geometrischen Effekte nicht isoliert auf ein einzelnes Qualitätsmerkmal zurückgeführt werden können, sondern sich gleichzeitig in mehreren, miteinander gekoppelten Merkmalen manifestieren. Die regelbasierte Rückführung, die auf einzelnen dominanten Zusammenhängen basiert, kann diese Überlagerungseffekte nur unzureichend erfassen, was sich in der deutlich reduzierten Modellgüte widerspiegelt.

Demgegenüber ermöglicht die datenbasierte Qualitätsregelung als *Blackbox*-Ansatz eine deutlich genauere Abbildung der Zusammenhänge. Sowohl die Vorwärtsmodellierung als auch die inverse Rekonstruktion der Stellgrößen zeigen hohe Modellgüten, insbesondere für Δz , aber auch für Δx und Taumel. Die Stärke dieses Ansatzes liegt in der impliziten Erfassung nichtlinearer und gekoppelter Zusammenhänge, wodurch auch komplexe Fehlerzustände robust behandelt werden können. Insbesondere bei Δx wird deutlich, dass die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Qualitätsmerkmale und deren Wechselwirkungen eine deutlich präzisere Rückführung ermöglicht als isolierte analytische Beziehungen. Gleichzeitig bestätigen die analysierten Merkmalsbeiträge die physikalische Plausibilität der gelernten Zusammenhänge.

Die Leistungsfähigkeit datenbasierter Ansätze ist jedoch unmittelbar an die Qualität und Repräsentativität der Trainingsdaten gekoppelt. Messunsicherheiten, Ausreißer und eine begrenzte Abdeckung des Parameterraums wirken sich direkt auf die Modellgüte aus und erklären die verbleibenden Streuungen.

Insgesamt zeigt sich eine klare Rollenverteilung: Die regelbasierte Modellierung bietet Transparenz und Interpretierbarkeit, ist jedoch durch die isolierte Betrachtung einzelner Wirkzusammenhänge limitiert. Die datenbasierte Modellierung hingegen ermöglicht die integrierte Berücksichtigung gekoppelter Effekte und erreicht dadurch eine höhere Genauigkeit und Robustheit, erfordert jedoch eine geeignete Datenbasis. Eine Kombination beider Ansätze erscheint daher besonders vielversprechend, um Interpretierbarkeit und Leistungsfähigkeit zu vereinen.

10 Kritische Diskussion und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend im Rahmen der Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschnitt 3.6 diskutiert und kritisch gewürdigt. Zudem wird auf weiterführende Forschungspotenziale eingegangen, die sich aus den Untersuchungen dieser Arbeit ergeben.

10.1 Diskussion der Ergebnisse und kritische Würdigung

In diesem Abschnitt werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit entlang der Forschungsfragen (FF1–FF5) zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Aussagekraft sowie ihrer Implikationen diskutiert.

FF1: Geometrische Qualitätsbeschreibung *Wie lassen sich geometrische Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern so definieren und auswerten, dass relevante Abweichungen robust erfasst und für eine prozessnahe Bewertung nutzbar gemacht werden können?*

Die Beantwortung dieser Fragestellung erfordert eine ganzheitliche Betrachtung aus Datenerfassung und Auswertestrategie.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 zeigen zunächst, dass optische Messtechnik grundsätzlich geeignet ist, eine hochaufgelöste und flächige Datenbasis für die Qualitätsbewertung zu erzeugen und damit gegenüber taktilen Messverfahren deutliche Vorteile hinsichtlich Informationsdichte und Effizienz bietet. Gleichzeitig wird jedoch deutlich, dass insbesondere bei komplexen Geometrien wie Mikro-Kronenrädern physikalische Grenzen der optischen Erfassung auftreten können, beispielsweise durch Abschattungseffekte oder ungünstige Reflexionsbedingungen.

Für die anschließende Auswertung erweist sich eine präzise definierte Sollgeometrie als zentrale Voraussetzung. Das mathematische Modell stellt hierbei eine deutlich robustere Referenz dar als diskretisierte CAD-Modelle, da es Diskretisierungsartefakte vermeidet und eine stabile Bestimmung von Normalenvektoren ermöglicht. Dadurch wird eine reproduzierbare und physikalisch konsistente Ableitung geometrischer Abweichungen aus den Messdaten gewährleistet.

Die entwickelten Qualitätsmerkmale bilden die zweite zentrale Säule der Methodik. Durch die Übertragung etablierter Verzahnungskennwerte, insbesondere Profil- und Flankenlinienabweichungen sowie Teilungsabweichungen, konnte eine belastbare Basis geschaffen werden. Die Erweiterung dieses Merkmalsraums um die Zahndickenabweichung Δt sowie den Exzentrizitätsradius r_e erweist sich dabei als entscheidend, da erst diese Merkmale eine

direkte und eindeutige Abbildung zentraler Fertigungsabweichungen ermöglichen. Insbesondere der Exzentrizitätsradius erlaubt eine monotone und vorzeichenstabile Beschreibung des tangentialen Versatzes Δx , der durch klassische Formabweichungen nur unzureichend erfasst wird.

Die Validierung anhand der simulativ abgeleiteten Fehlerhypothesen sowie der experimentellen Untersuchungen zeigt konsistent, dass die definierten Qualitätsmerkmale in der Lage sind, die relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge des Prozesses abzubilden. Dies gilt sowohl für die deskriptive Analyse als auch für die anschließenden datenbasierten Modellierungen. Die Eignung der Merkmale als Zielvariablen für datengetriebene Vorhersagemodelle wurde dabei explizit bestätigt: Die Merkmale reagieren sensitiv und reproduzierbar auf die untersuchten Prozessabweichungen und erlauben damit eine Nutzung in der Virtual-Metrology-Pipeline sowie als Regelgrößen im Qualitätsregelkreis.

Implikation: Die Ergebnisse belegen, dass eine robuste geometrische Qualitätsbewertung nur durch das Zusammenspiel aus geeigneter Messtechnik, präziser Sollgeometrie und spezifisch auf die Fehlermechanismen abgestimmten Qualitätsmerkmalen erreicht werden kann. Die Notwendigkeit, den Merkmalsraum über klassische Verzahnungskennwerte hinaus zu erweitern, ist dabei keine methodische Einschränkung, sondern eine direkte Konsequenz der spezifischen geometrischen Eigenschaften von Kronenrädern, für die etablierte Normen fehlen.

FF2: Ursache-Wirkungs-Analyse *Wie können Zusammenhänge zwischen Prozessabweichungen, Stellgrößen und geometrischen Qualitätsmerkmalen systematisch analysiert und quantifiziert werden?*

Aufgrund der aufwändigen Handhabung und messtechnischen Erfassung von Mikro-Kronenrädern wurde in dieser Arbeit ein zweistufiger Ansatz gewählt: Das kinematische Simulationsmodell schafft zunächst ein grundlegendes Prozessverständnis und leitet Fehlerhypothesen ab; die experimentelle Versuchsreihe quantifiziert diese Zusammenhänge anschließend empirisch.

Das in Kapitel 6 entwickelte kinematische Simulationsmodell ermöglicht die gezielte Variation zentraler Prozessparameter und die Analyse ihrer geometrischen Auswirkungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Simulation betrachteten dominanten Abweichungsparameter auch im realen Fertigungsprozess konsistent wirksam sind und sich in vergleichbarer Form in den Messdaten wiederfinden. Obwohl grundsätzlich eine Vielzahl weiterer Einflussgrößen, wie beispielsweise Werkstückrundlauf oder thermische Effekte, berücksichtigt werden könnten, hat sich die fokussierte Betrachtung der durch Industrieexperten identifizierten Hauptparameter als zielführend erwiesen.

Die empirische Quantifizierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erfolgte auf Basis der in Unterabschnitt 7.7.1 ausgewerteten Vorwärtsmodelle, die aus den Daten des statistischen Versuchsplans ($n = 225$ Bauteile) trainiert wurden. Für die axiale Zustellung Δz ergeben sich eindeutige und monotone Zusammenhänge mit Qualitätsmerkmalen wie der Zahndickenabweichung Δt sowie der Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$. Der tangentialer Versatz Δx führt zu einer physikalisch klar ausgeprägten Asymmetrie der Flanken, die sich jedoch im Exzentrizitätsradius r_e am deutlichsten abbildet ($R^2 = 0,80$), während klassische Formabweichungen diesen Parameter nur unzureichend erfassen. Die Quantifizierung bestätigt damit die in der Simulation abgeleiteten Fehlerhypothesen und belegt die Notwendigkeit des erweiterten Merkmalsraums.

Für den Taumel zeigt sich hingegen kein eindeutiger Zusammenhang in den univariaten Statistiken klassischer Qualitätskennwerte – weder im Mittelwert noch in der Streuung ist eine systematische Abhängigkeit vom eingestellten Taumel erkennbar. Dessen Einfluss manifestiert sich offenbar in subtileren Mustern und Wechselwirkungen innerhalb des multivariaten Merkmalsraums, was auf die dynamische und periodische Natur dieses Fehlers zurückzuführen ist. Dies hat unmittelbare Konsequenzen für die Regelbarkeit: Taumel lässt sich über multivariate Modelle zuverlässig detektieren und als Zustandsindikator nutzen, entzieht sich jedoch einer deterministischen, auf univariaten Merkmalen basierenden Gegenkorrektur.

Implikation: Die Ergebnisse zeigen, dass die Quantifizierung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen stark von der Wahl geeigneter Qualitätsmerkmale und der Analysemethodik abhängt. Für translatorische Abweichungen gelingt eine robuste, zahlenmäßige Beschreibung über univariate Merkmale; für dynamische Fehler wie Taumel werden die relevanten Zusammenhänge erst durch multivariate Modelle sichtbar.

FF3: Datengetriebene Qualitätsvorhersage *In welchem Umfang lassen sich geometrische Qualitätsmerkmale von Mikro-Kronenrädern auf Basis prozessintegrierter Körperschallsignale durch datengetriebene Modelle vorhersagen?*

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde in Kapitel 7 zunächst untersucht, inwieweit sich die zugrunde liegenden Prozessparameter aus dem Körperschallsignal rekonstruieren lassen. Dieser Zwischenschritt bewertet die im Signal enthaltene prozessbezogene Information und legt die Grundlage für das Verständnis der nachfolgenden Qualitätsvorhersagen. Die Ergebnisse zeigen, dass Taumel mit sehr hoher Güte aus dem Signal rekonstruierbar ist, ebenso die axiale Zustellung Δz , während der tangentialer Versatz Δx keine belastbare akustische Signatur aufweist ($R_{\text{Test}}^2 < 0$). Dies verdeutlicht, dass nicht alle relevanten Prozessabweichungen gleichermaßen im Körperschall kodiert sind.

Für die Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale ergibt sich daraus ein strukturiertes Bild, das sich anhand dreier Merkmalsgruppen beschreiben lässt: Lokal wirkende Merkmale, die sensitiv auf signalrelevante Prozessparameter reagieren, lassen sich mit hoher Güte vorhersagen. Dies gilt insbesondere für die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ sowie die Zahndickenabweichung Δt , für die Bestimmtheitsmaße von $R^2 > 0,86$ im Holdout-Test erzielt werden. Eine mittlere Vorhersagbarkeit zeigen die Formabweichungen $f_{f\alpha}$, F_α , F_β und $f_{f\beta}$ mit R^2 -Werten zwischen 0,39 und 0,67, die zwar eine belastbare Tendenzaussage ermöglichen, jedoch für eine direkte Substitution der Labormessung nicht ausreichen. Global aggregierte Merkmale hingegen, deren Ausprägung an akustisch nicht beobachtbare Parameter gekoppelt ist, sind aus dem Körperschallsignal nicht vorhersagbar. Dies betrifft den Exzentrizitätsradius r_e ($R^2_{\text{Test}} < 0$) sowie die Teilungsabweichung F_p , bei der zusätzlich Referenzdatenunsicherheiten die erreichbare Modellgüte begrenzen.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen ist dabei kein zufälliges Ergebnis, sondern Ausdruck eines konsistenten physikalischen Mechanismus: Die Vorhersagbarkeit eines Qualitätsmerkmals ist unmittelbar an die akustische Beobachtbarkeit des zugrunde liegenden Prozessparameters geknüpft. Wo diese Beobachtbarkeit fehlt – wie beim tangentialen Versatz Δx – bleibt auch das geometrisch eindeutig identifizierbare Merkmal r_e akustisch unsichtbar.

Implikation: In welchem Umfang Qualitätsmerkmale vorhersagbar sind, lässt sich damit nicht pauschal beantworten, sondern erfordert eine merkmalspezifische Betrachtung. Für lokal wirkende, signalbeobachtbare Größen ist eine prozessnahe virtuelle Qualitätsmessung mit hoher Güte realisierbar. Für andere Zielgrößen sind weiterhin geometrische Messinformationen erforderlich. Die entwickelte Vorhersagepipeline liefert damit keine universelle Substitution der Labormessung, wohl aber eine substanzielle Erweiterung der Informationsverfügbarkeit im laufenden Fertigungsprozess.

FF4: Unsicherheit und Ersatzfähigkeit *Welche Unsicherheiten sind mit den modellbasierten Qualitätsvorhersagen verbunden und sind diese hinreichend gering, um klassische Labormessungen in prozessbegleitenden Anwendungen zu substituieren?*

Die Beantwortung dieser Fragestellung ist unmittelbar an den klassischen Begriff der Messunsicherheit gekoppelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierfür eine durchgängige Unsicherheitspipeline entwickelt, die Unsicherheiten entlang der Messkette des Körperschallsignals, Unsicherheiten der zur Modellbildung verwendeten Qualitätsdaten sowie epistemische Modellunsicherheiten berücksichtigt und im Sinne von GUM Supplement 1 mittels Monte-Carlo-Analyse zusammenführt.

Dabei wird bewusst eine konservative Betrachtung gewählt, indem die Unsicherheiten nicht eingangsgrößenabhängig modelliert, sondern in aggregierter Form auf Modellebene berücksichtigt werden. Dies führt zu einer robusten, jedoch tendenziell überschätzenden Bewertung der resultierenden Gesamtunsicherheit.

Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse in Kapitel 8 zeigen eine ausgeprägte Zielgrößenabhängigkeit. Für die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ fallen die Gesamtunsicherheiten vergleichsweise gering aus, sodass eine unsicherheitsqualifizierte Nutzung als prozessnahe Bewertungsgröße realistisch ist. Für die Zahndickenabweichung Δt ergibt sich trotz hoher Modellgüte eine deutlich erhöhte Gesamtunsicherheit, die maßgeblich durch epistemische Modellfehler bestimmt wird. Für den Exzentrizitätsradius r_e schließt die geringe Vorhersagegüte aus dem Körperschallsignal eine Substitution der Labormessung grundsätzlich aus. Ein zentrales Ergebnis ist dabei, dass modell- und dateninduzierte Unsicherheitsanteile gegenüber sensorischen Beiträgen dominieren – eine Verbesserung der Sensorik allein würde die Gesamtunsicherheit daher nur marginal reduzieren.

Die Frage der Ersatzfähigkeit lässt sich damit differenziert beantworten: Eine Substitution klassischer Labormessung ist aktuell für $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ in unsicherheitsqualifizierter Form realistisch. Für Δt und r_e ist die virtuelle Messung hingegen als ergänzendes Prozessüberwachungsinstrument zu verstehen, nicht als vollwertiger Ersatz. Der Monte-Carlo-Ansatz liefert dabei den entscheidenden Mehrwert: Er macht die Bedingungen für eine kontrollierte, unsicherheitsbewusste Nutzung von VM-Prädiktionen quantitativ greifbar und schafft damit die Voraussetzung für einen verantwortungsvollen Einsatz im Regelkreis.

Implikation: Eine hohe Vorhersagegüte im Sinne klassischer Gütemaße ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Ersatzfähigkeit. Erst die explizite Unsicherheitsquantifizierung nach GUM ermöglicht eine belastbare Aussage darüber, für welche Merkmale und unter welchen Bedingungen eine virtuelle Messung als Eingangsgröße eines Qualitätsregelkreises geeignet ist.

FF5: Qualitätsregelung *Wie kann auf Basis der vorhergesagten Qualitätsgrößen eine Regelungsstrategie entwickelt werden, die Prozessabweichungen kompensiert und die geometrische Bauteilqualität gezielt verbessert?*

Die in Kapitel 9 entwickelten Regelungsansätze zeigen, dass die definierten Qualitätsmerkmale eine geeignete Grundlage zur Rückführung von Qualitätsabweichungen auf die zugrunde liegenden Prozessparameter darstellen. Dabei wurden zwei komplementäre Ansätze untersucht, die sich in Transparenz und Abbildungsgenauigkeit unterscheiden.

Die regelbasierte Qualitätsregelung ermöglicht eine direkte, physikalisch interpretierbare Rückführung der Stellgrößen aus den geometrischen Qualitätsmerkmalen. Vorzeichen und Größenordnung der Abweichungen werden zuverlässig erfasst; die deutliche Streuung um die ideale 1:1-Abbildung zeigt jedoch, dass die univariaten Korrekturbeziehungen die realen, gekoppelten Wirkzusammenhänge nur näherungsweise beschreiben. Insbesondere bei überlagerten Fehlerzuständen stößt dieser Ansatz an seine Grenzen.

Demgegenüber zeigen die datenbasierten Inversmodelle eine deutlich höhere Abbildungsgenauigkeit. Die axiale Zustellung Δz lässt sich mit $R_{\text{Test}}^2 = 0,949$ aus den Qualitätsmerkmalen rekonstruieren, der tangentielle Versatz Δx mit $R_{\text{Test}}^2 = 0,795$ und der Taumel mit $R_{\text{Test}}^2 = 0,855$. Die Merkmalsbeitragsanalyse bestätigt dabei eine klare physikalische Struktur: Taumel wird primär über profilbasierte Merkmale beschrieben, Δx über den Exzentrizitätsradius r_e und Δz über Zahndicke und Winkelanteile – konsistent mit den in den Fehlerhypothesen angenommenen Kopplungen.

Für Taumel ist dabei eine differenzierte Einordnung notwendig: Da Taumel nicht als kontinuierlich nachregelbare Stellgröße eingesetzt werden kann, dient der aus dem Inversmodell geschätzte Taumelwert nicht als direkte Korrekturgröße, sondern als prozessnaher Monitoring-Indikator. Überschreitet der Schätzwert einen definierten Schwellwert, wird ein manueller Eingriff – etwa eine Neujustage der Werkzeugaufnahme – signalisiert. Damit übernimmt das datenbasierte Modell auch für diese nicht direkt korrigierbare Fehlergröße eine geregelte Überwachungsfunktion.

Im Zusammenspiel mit den Ergebnissen aus Kapitel 7 wird zudem deutlich, dass nicht alle Prozessparameter gleichermaßen im Körperschallsignal beobachtbar sind: Der x -Shift ist geometrisch eindeutig identifizierbar, hinterlässt jedoch keine belastbare akustische Signatur. Für eine vollständig signalbasierte, geschlossene Regelschleife müsste die Stellgrößenkorrektur für Δx daher auf geometrischen Messdaten basieren.

Zur Frage, ob die Regelungsstrategie auf Basis *vorhergesagter* Qualitätsgrößen – also VM-Prädiktionen anstelle direkter Messungen – realisierbar ist: Die entwickelte Regelungsarchitektur ist bewusst agnostisch gegenüber der Herkunft der Qualitätsinformation. Kapitel 9 entwickelt die Regelungslogik als eigenständigen Baustein, der mit jeder hinreichend verlässlichen Qualitätsquelle kombinierbar ist; die Frage, unter welchen Unsicherheitsbedingungen VM-Prädiktionen als Regeleingang geeignet sind, beantwortet Kapitel 8. Für Merkmale mit geringer Vorhersageunsicherheit ($f_{H\alpha}$, $f_{H\beta}$) ist ein unsicherheitsqualifizierter Einsatz als Regeleingang realistisch. Für Merkmale mit hoher Vorhersageunsicherheit empfiehlt sich eine unsicherheitsgewichtete Dämpfung der Korrekturgröße oder ein expliziter Sperrmechanismus unterhalb einer definierten Konfidenzschwelle. Die vollständige experimentelle

Demonstration dieser Kette – von der Körperschallerfassung über die VM-Vorhersage bis zur Stellgrößenanpassung – ist dabei als Gegenstand weiterführender Arbeiten zu verstehen.

Implikation: Eine robuste Qualitätsregelung erfordert einen hybriden Ansatz: Für signalbeobachtbare Prozessgrößen (Δz , Taumel) ermöglichen datenbasierte Inversmodelle eine hochgenaue Rückführung, die im Zusammenspiel mit der VM-Pipeline zu einem in-process Regelkreis geschlossen werden kann. Für Δx bleibt die Regelung auf geometriebasierte Messinformationen angewiesen. In beiden Fällen bildet die explizite Unsicherheitsquantifizierung die Voraussetzung für einen kontrollierten, verantwortungsvollen Einsatz des Gesamtsystems.

10.2 Ausblick auf weiterführende Forschungspotenziale

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der entwickelte Ansatz über den betrachteten Anwendungsrahmen hinaus erhebliches Potenzial besitzt. Die identifizierten Limitationen sind dabei weniger als grundsätzliche methodische Einschränkungen zu interpretieren, sondern vielmehr als gezielte Ansatzpunkte für weiterführende Forschung.

Die Vorhersagekette hochpräziser geometrischer Qualitätsgrößen wird derzeit durch überlagerte Unsicherheiten aus Sensorik, Referenzmesstechnik und datengetriebener Modellierung begrenzt. Gleichzeitig belegen die Ergebnisse, dass fertigungstechnisch relevante Informationen in hohem Maße im Körperschallsignal enthalten sind und eine robuste Charakterisierung des Prozesszustands ermöglichen. Die zuverlässige Rekonstruktion zentraler Stellgrößen sowie die klare Differenzierung von Fehlermechanismen unterstreichen dieses Potenzial. Auch wenn eine hochpräzise Quantifizierung einzelner Geometrieabweichungen nicht in allen Fällen möglich ist, ergeben sich vielfältige Anwendungen in der Prozessüberwachung, Anomaliedetektion sowie in der selektiven Nutzung hochgenauer Referenzmessungen. Die eingeschränkte Beobachtbarkeit des tangentialen Versatzes Δx verdeutlicht jedoch, dass einzelne Sensoren den Prozesszustand nicht vollständig erfassen. Die Fusion komplementärer Signalquellen, etwa Körperschall, Schnittkräfte, Spindelströme oder thermische Größen, stellt daher einen vielversprechenden Ansatz zur ganzheitlichen Prozesscharakterisierung dar.

Weiteres Forschungspotenzial besteht in der Erweiterung der betrachteten Fehlerbilder. Neben den analysierten Abweichungen können insbesondere Rundlauf- und Planlaufabweichungen sowie Einflüsse von Werkzeugverschleiß, Maschinenkinematik und thermischer Drift systematisch untersucht werden, um komplexe Fertigungszustände umfassender abzubilden.

Ein zentrales Ergebnis ist zudem die hohe Bedeutung der Datenqualität. Die Leistungsfähigkeit datengetriebener Modelle wird primär durch die Qualität und Konsistenz der Referenzdaten bestimmt und weniger durch die Wahl des Regressionsverfahrens. Zukünftige Arbeiten sollten daher auf die gezielte Reduktion von Unsicherheiten entlang der gesamten Datenkette abzielen, etwa durch verbesserte Versuchsplanung, robuste Auswerteverfahren sowie systematische Robustheitsanalysen.

Ein unmittelbar anschließendes Forschungsvorhaben ist die Realisierung eines geschlossenen, echtzeitfähigen Regelkreises, der Körperschallsignale, Virtual-Metrology-Vorhersagen und automatisierte Stellgrößenanpassungen integriert. Während die methodischen Grundlagen vorliegen, erfordert die Umsetzung unter industriellen Randbedingungen insbesondere die Berücksichtigung von Latenzanforderungen und Stabilitätskriterien.

Darüber hinaus stellt die langfristige Stabilität datengetriebener Modelle ein wesentliches Forschungsfeld dar. Zeitliche Veränderungen von Prozess und Sensorik machen Verfahren zur Modellüberwachung, zur Detektion von Concept Drift sowie adaptive Rekalibrierungsstrategien erforderlich.

Methodisch bietet insbesondere die Kombination physikalischer Modelle mit datengetriebenen Ansätzen ein hohes Potenzial. Die Weiterentwicklung hin zu Physics-Informed Machine Learning (Raissi et al. 2019) erscheint vielversprechend, um physikalische Nebenbedingungen explizit zu integrieren, die Generalisierbarkeit zu erhöhen und den Trainingsdatenbedarf zu reduzieren.

Die entwickelte Methodik ist zudem nicht auf Kronenräder beschränkt. Eine Übertragung auf andere Verzahnungstypen sowie verwandte Präzisionsfertungsverfahren ist naheliegend. Gleichzeitig können die definierten Merkmale und Auswerteverfahren als Grundlage für eine zukünftige Standardisierung dienen, da bislang kein normiertes Bewertungsverfahren für Mikro-Kronenräder existiert.

11 Zusammenfassung

Mikro-Kronenräder sind zentrale Funktionselemente moderner Dentalinstrumente und unterliegen aufgrund ihrer geringen Abmessungen extrem hohen Anforderungen an die geometrische Genauigkeit. Bereits kleinste Abweichungen im einstelligen Mikrometerbereich beeinflussen Laufverhalten und Geräuschentwicklung maßgeblich. Die Qualitätssicherung nimmt daher eine Schlüsselrolle ein, stößt jedoch zunehmend an technologische und methodische Grenzen: Etablierte Messketten sind zeitlich vom Fertigungsprozess entkoppelt, technisch limitiert und ein standardisiertes geometrisches Bewertungsmodell für Kronenräder – analog zur VDI 2612 für Stirnräder – existiert nicht. Die Folge sind lange Regelungszeiten und eingeschränkte Möglichkeiten zur prozessnahen Qualitätsbeeinflussung.

Vor diesem Hintergrund gewinnen datengetriebene Ansätze der Virtual Metrology an Bedeutung, bei denen qualitätsrelevante Informationen aus prozessnah erfassten Sensorsignalen gewonnen werden. Insbesondere Körperschallsignale besitzen aufgrund ihrer hohen zeitlichen Auflösung und Sensitivität gegenüber mikrogeometrischen Eingriffsvorgängen ein hohes Potenzial. Für Mikro-Kronenräder fehlte bislang jedoch eine konsistente Methodik, die geometrische Qualitätsbewertung, Prozessverständnis, datengetriebene Modellierung und Unsicherheitsbetrachtung integriert. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine solche methodische Grundlage für eine prozessnahe, datengetriebene Qualitätsbewertung und Qualitätsregelung im Wälzfräsprozess bereitzustellen.

Hierzu wird zunächst ein geometrisches Bewertungsverfahren für Mikro-Kronenräder entwickelt. Ausgehend von einer mathematisch exakten Sollgeometrie werden etablierte und neue Qualitätskennwerte – Zahndickenabweichungen, Exzentrizität sowie Profil- und Flankenabweichungen – abgeleitet, die die dominierenden Fehlermechanismen differenziert abbilden und als regelungsrelevante Größen geeignet sind. Ergänzend wird ein kinematisches Simulationsmodell des Wälzfräsprozesses entwickelt, das die systematische Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Maschinenabweichungen und resultierenden Zahngeometrien ermöglicht und ein physikalisch fundiertes Interpretationswerkzeug für Mess- und Sensordaten liefert.

Darauf aufbauend wird eine durchgängige Virtual-Metrology-Pipeline entwickelt. Grundlage bildet ein statistisch geplanter Versuchsraum mit $n = 225$ Mikro-Kronenrädern unter Variation der dominanten Maschinenparameter – axialer Versatz Δz , tangentialer Versatz Δx und Tammel. Die Pipeline umfasst die Erfassung der Körperschallsignale, deren Verarbeitung und Merkmalsextraktion sowie die datengetriebene Modellbildung. Lokal wirkende Qualitätsmerkmale – insbesondere Winkelabweichungen und die Zahndickenabweichung – lassen sich mit hoher Güte in-process vorhersagen ($R^2 > 0,86$ im Holdout-Test). Die Vorhersagbarkeit

anderer Merkmale ist hingegen eingeschränkt: Global aggregierte Größen wie die Teilungsabweichung sind durch Referenzdatenunsicherheiten begrenzt; der Exzentrizitätsradius r_e ist akustisch nicht rekonstruierbar, da der zugrunde liegende tangentialer Versatz Δx keine belastbare Signatur im Körperschallsignal erzeugt.

Ein zentrales Ergebnis ist die durchgängige Quantifizierung der Unsicherheiten entlang der Vorhersagekette nach GUM. Die Analyse zeigt, dass modell- und dateninduzierte Beiträge die Gesamtunsicherheit dominieren – eine Verbesserung der Sensorik allein führt daher nur zu begrenzten Fortschritten. Für Merkmale mit geringer Vorhersageunsicherheit, insbesondere die Winkelabweichungen, ist eine unsicherheitsqualifizierte Substitution der Labormessung realistisch. Für die Zahndickenabweichung Δt zeigt die empirische Überdeckungsanalyse hingegen, dass die modellierten Unsicherheitsintervalle die tatsächliche Vorhersagevariabilität nicht vollständig erfassen – eine direkte metrologische Nutzung ist hier nicht vertretbar.

Abschließend wird gezeigt, dass die entwickelten Modelle eine belastbare Grundlage für eine datengetriebene Qualitätsregelung bilden. Prozessparameter lassen sich robust aus geometrischen Merkmalen rekonstruieren ($R_{\text{Test}}^2 = 0,949$ für Δz , $0,795$ für Δx); für Taumel wird eine schwellwertbasierte Prozessüberwachung realisiert. Die Regelungsarchitektur ist agnostisch gegenüber der Herkunft der Qualitätsinformation und erlaubt den Einsatz sowohl gemessener als auch prognostizierter Größen, wobei die Unsicherheitsquantifizierung die Bedingungen für einen verantwortungsvollen Einsatz VM-basierter Eingänge definiert. Die vollständige experimentelle Demonstration der geschlossenen Regelkette bleibt Gegenstand weiterführender Arbeiten.

Insgesamt stellt die Arbeit einen wesentlichen Fortschritt für die Qualitätssicherung von Mikro-Kronenrädern dar. Sie kombiniert erstmals geometrische Bewertung, simulationsgestützte Prozessanalyse, datengetriebene Virtual Metrology und unsicherheitsfundierte Interpretation zu einem konsistenten Ansatz und schafft damit die methodische Voraussetzung für eine zukünftige prozessnahe, autonome Qualitätsregelung.

Liste eigener Veröffentlichungen

- Bilen, A.; Braunschweiger, N. P.; Karabegović, R.; Kircher, T. F.; Wagnershauser, F. E.; Wübbena, P. M.; Weiland, L. A.; Reister, L. R.; Gindin, E. & Lanza, G. (2026a), „A kinematics-based simulation framework for face gear hobbing and manufacturing error analysis“, *Measurement Science and Technology*, 37(26). DOI: 10.1088/1361-6501/ae7aaf.
- Bilen, A.; Decman, M.; Ernstberger, S. C.; Stamer, F. & Lanza, G. (2026b), „A method for uncertainty quantification in virtual metrology models: acoustic-emission-based quality prediction in micro crown gear manufacturing“, *Measurement Science and Technology*. DOI: 10.1088/1361-6501/ae739c.
- Bilen, A.; Ernst, L.; Gindin, E.; Schubert, J.; Rauwolf, M.; Rauschenberg, E. L.; Edelmann, T.; Schnaith, S. M. & Lanza, G. (2026c), „Quality Features for Holistic Evaluation and Quality Control of Micro Face Gears“, *Measurement Science and Technology*. DOI: 10.1088/1361-6501/ae804d.
- Bilen, A.; Decman, M.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025a), „Minimizing Optical Measurement Time of Micro Spur Gears through Point Cloud Completion Techniques“, *Measurement Science and Technology*, 36(12), S. 125202. DOI: 10.1088/1361-6501/ae1d9c.
- Bilen, A.; Grommes, A.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025b), „Coping with concept drift in a virtual metrology application to predict part quality in micro gear manufacturing“, *Measurement: Sensors*, S. 101797. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101797.
- Bilen, A.; Klumpp, J.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025c), „Harmonizing micro crown gear and spur gear geometries: A novel approach for geometry evaluation through analogous transformation“, *Measurement: Sensors*, 38. DOI: 10.1016/j.measen.2025.101882.
- Bilen, A.; Skade, K. L.; Ernstberger, S. C.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025d), „Towards a Comprehensive Virtual Metrology Framework: Integrating AutoML, Data Integration, Uncertainty Quantification & Model Maintenance“, *IFAC-PapersOnLine*. 30. Bd. 59. The 5th Modeling, Estimation and Control Conference (MECC 2025). Pittsburgh, Pennsylvania, USA, S. 395–400. DOI: 10.1016/j.ifacol.2025.12.269.
- Gindin, E.; Bilen, A. & Lanza, G. (2025), „Eine mathematische Beschreibung der Flanken-geometrie geradverzahnter Kronenräder“, *tm - Technisches Messen*. DOI: 10.1515/teme-2025-0033.
- Bilen, A.; Kaiser, J.-P.; Gauder, D.; Stamer, F. & Lanza, G. (2024a), „Quality Control Loop for Tool Wear Compensation in Milling Process using different Optimization Methods“, *Procedia CIRP*. 17th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME '23). Bd. 126. 17th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME '23). Naples, Italy, S. 396–401. DOI: 10.1016/j.procir.2024.08.385.

- Bilen, A.; Stamer, F.; Behrendt, S. & Lanza, G. (2024b), „A Quality Data Model Based on Asset Administration Shell Technology to Enable Autonomous Quality Control Loops“, *Proceedings of the 13th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Freudenstadt, November 2023*. Hrsg. von T. Bauernhansl. WGP Jahreskongress 2023. Freudenstadt, Germany, S. 195–204. DOI: 10.1007/978-3-031-47394-4_20.
- Bilen, A.; Stamer, F.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „A development approach for a standardized quality data model using asset administration shell technology in the context of autonomous quality control loops for manufacturing processes“, *Conference proceedings : 23rd international conference & exhibition*. euspen Conference Proceedings: 23rd International Conference & Exhibition. Copenhagen, S. 1–4.
- Schiller, V.; Klaus, S.; Bilen, A. & Lanza, G. (2023), „In-Process Monitoring of Hobbing Process Using an Acoustic Emission Sensor and Supervised Machine Learning“, *Algorithms*, 16(4), S. 183. DOI: 10.3390/a16040183.

Literaturverzeichnis

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

A_Ernstberger 2025

Ernstberger, S. C. (2025), *Unsicherheitsermittlung einer Machine Learning Messung zur Prädiktion von Qualitätskennzahlen bei Mikrozahnradern auf Basis von in-process Körperschalldaten*.

Albers et al. 2017

Albers, A.; Stürmlinger, T.; Wantzen, K.; Bartosz, G. & Münke, F. (2017), „Prediction of the Product Quality of Turned Parts by Real-time Acoustic Emission Indicators“, *Procedia CIRP*, 63, S. 348–353. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.173.

Altmann et al. 2010

Altmann, A.; Tološi, L.; Sander, O. & Lengauer, T. (2010), „Permutation importance: a corrected feature importance measure“, *Bioinformatics*, 26(10), S. 1340–1347. DOI: 10.1093/bioinformatics/btq134.

Beggan et al. 1999

Beggan, C.; Woulfe, M.; Young, P. & Byrne, G. (1999), „Using Acoustic Emission to Predict Surface Quality“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(10), S. 737–742. DOI: 10.1007/s001700050126.

Bender et al. 2020

Bender, B. & Göhlich, D., Hrsg. (2020), *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662597101. DOI: 10.1007/978-3-662-59711-8.

Bilen et al. 2026a

Bilen, A.; Braunschweiger, N. P.; Karabegović, R.; Kircher, T. F.; Waggershäuser, F. E.; Wübbena, P. M.; Weiland, L. A.; Reister, L. R.; Gindin, E. & Lanza, G. (2026a), „A kinematics-based simulation framework for face gear hobbing and manufacturing error analysis“, *Measurement Science and Technology*. DOI: 10.1088/1361-6501/ae7aaf.

Bilen et al. 2026b

Bilen, A.; Decman, M.; Ernstberger, S. C.; Stamer, F. & Lanza, G. (2026b), „A method for uncertainty quantification in virtual metrology models: acoustic-emission-based quality prediction in micro crown gear manufacturing“, *Measurement Science and Technology*. DOI: 10.1088/1361-6501/ae739c.

Bilen et al. 2026c

Bilen, A.; Ernst, L.; Gindin, E.; Schubert, J.; Rauwolf, M.; Rauschenberg, E. L.; Edelmann, T.; Schnaith, S. M. & Lanza, G. (2026c), „Quality Features for Holistic Evaluation and Quality Control of Micro Face Gears“, *Measurement Science and Technology*. DOI: 10.1088/1361-6501/ae804d.

Bilen et al. 2025a

Bilen, A.; Grommes, A.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025a), „Coping with concept drift in a virtual metrology application to predict part quality in micro gear manufacturing“, *Measurement: Sensors*, S. 101797. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101797.

Bilen et al. 2025b

Bilen, A.; Klumpp, J.; Stamer, F. & Lanza, G. (2025b), „Harmonizing micro crown gear and spur gear geometries: A novel approach for geometry evaluation through analogous transformation“, *Measurement: Sensors*, 38. DOI: 10.1016/j.measen.2025.101882.

BIPM et al. 2008a

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP & OIML (2008a), *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

BIPM et al. 2008b

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP & OIML (2008b), *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. DOI: 10.59161/JCGM101-2008.

BIPM et al. 2012

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP & OIML (2012), *International Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. DOI: 10.59161/JCGM200-2012.

Breiman 2001

Breiman, L. (2001), „Random forests“, *Machine Learning*, 45(1), S. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Chang et al. 2006

Chang, Y.-J.; Kang, Y.; Hsu, C.-L.; Chang, C.-T. & Chan, T. Y. (2006), „Virtual metrology technique for semiconductor manufacturing“. *The 2006 IEEE International joint conference on neural network proceedings*. Hrsg. von IEEE, S. 5289–5293. DOI: 10.1109/IJCNN.2006.247284.

Chen et al. 2005

Chen, P. H.; Wu, S.; Lin, J.; Ko, F.; Lo, H.; Wang, J.; Yu, C. H. & Liang, M. S. (2005), „Virtual metrology: A solution for wafer to wafer advanced process control“, *Proceedings of the IEEE international symposium on semiconductor manufacturing*. ISSM 2005, IEEE International

Symposium on Semiconductor Manufacturing. IEEE, San Jose, CA, S. 155–157. DOI: 10.1109/ISSM.2005.1513322.

Cheng et al. 2011

Cheng, F.-T.; Huang, H.-C. & Kao, C.-A. (2011), „Developing an automatic virtual metrology system“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(1), S. 181–188.

Craig 2009

Craig, J. J. (2009), *Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. ISBN: 9788131718360.

Dean et al. 2017

Dean, A.; Voss, D. & Draguljić, D. (2017), *Design and Analysis of Experiments*, Springer Texts in Statistics, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319522500. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0.

Do Carmo 2016

Do Carmo, M. P. (2016), *Differential geometry of curves and surfaces: revised and updated second edition*, Dover Publications Inc., Mineola, New York. ISBN: 9780486806990.

Dreyfus et al. 2022

Dreyfus, P.-A.; Psarommatis, F.; May, G. & Kiritsis, D. (2022), „Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework“, *International Journal of Production Research*, 60(2), S. 742–765.

Drucker et al. 1996

Drucker, H.; Burges, C. J.; Kaufman, L.; Smola, A. & Vapnik, V. (1996), „Support vector regression machines“, *NIPS'96: Proceedings of the 10th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Bd. 9, S. 155–161.

Durakbasa et al. 2017

Durakbasa, N. M.; Bauer, J. & Poszvek, G. (2017), „Advanced Metrology and Intelligent Quality Automation for Industry 4.0-Based Precision Manufacturing Systems“, *Solid State Phenomena*, 261, S. 432–439. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.261.432.

Dwork et al. 2015

Dwork, C.; Feldman, V.; Hardt, M.; Pitassi, T.; Reingold, O. & Roth, A. (2015), „Generalization in adaptive data analysis and holdout reuse“, *Advances in neural information processing systems*, 28.

Erkaya et al. 2016

Erkaya, S. & Ulus, Ş. (2016), „An Experimental Study on Gear Diagnosis by Using Acoustic Emission Technique“, *The International Journal of Acoustics and Vibration*, 21(1). DOI: 10.20855/ijav.2016.21.1400.

Fan et al. 2008

Fan, Q.; DaFoe, R. S. & Swanger, J. W. (2008), „Higher-Order Tooth Flank Form Error

Correction for Face-Milled Spiral Bevel and Hypoid Gears“, *Journal of Mechanical Design*, 130(72601). DOI: 10.1115/1.2898878.

Fischler et al. 1981

Fischler, M. A. & Bolles, R. C. (1981), „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography“, *Communications of the ACM*, 24(6), S. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.

Galczyński 1984

Galczyński, R. (1984), „Effect of hob wear on the sounds emitted in the gear hobbing process“, *Precision Engineering*, 6(1), S. 25–30. DOI: 10.1016/0141-6359(84)90072-2.

Gama et al. 2014

Gama, J.; Žliobaitė, I.; Bifet, A.; Pechenizkiy, M. & Bouchachia, A. (2014), „A survey on concept drift adaptation“, *ACM Comput. Surv.*, 46(4). DOI: 10.1145/2523813.

Gauder et al. 2022a

Gauder, D.; Biehler, M.; Gölz, J.; Schulze, V. & Lanza, G. (2022a), „In-process acoustic pore detection in milling using deep learning“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, S. 125–133. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.008.

Gauder et al. 2021

Gauder, D.; Gölz, 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. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.06.016.

Gauder et al. 2022b

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

Gauder 2024

Gauder, D. S. (2024), *Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000169560.

Geman et al. 1992

Geman, S.; Bienenstock, E. & Doursat, R. (1992), „Neural Networks and the Bias/Variance Dilemma“, *Neural Computation*, 4(1), S. 1–58. DOI: 10.1162/neco.1992.4.1.1.

Gindin et al. 2025

Gindin, E.; Bilen, A. & Lanza, G. (2025), „Eine mathematische Beschreibung der Flanken-geometrie geradverzahnter Kronenräder“, *tm - Technisches Messen*. DOI: 10.1515/teme-2025-0033.

Givant 2009

Givant, S. (2009), „Boolean Algebras“. *Introduction to Boolean Algebras*. Hrsg. von P. Halmos & S. Givant. Springer, New York, NY, S. 8–13. ISBN: 9780387684369. DOI: 10.1007/978-0-387-68436-9_2.

Goch et al. 2023

Goch, G.; Guenther, A.; Peng, Y. & Ni, K. (2023), „Gear metrology – An update“, *CIRP Annals*, 72(2), S. 725–751. DOI: 10.1016/j.cirp.2023.05.008.

Gorgels et al. 2007

Gorgels, C.; Schröder, T. & Klocke, F. (2007), *Hartfeinbearbeitung kleinmoduliger verzahnungen*. FVA-Forschungsvorhaben 567 II (Nr. 813). Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA).

Gravel 2013

Gravel, G. (2013), *Simulation of Deviations in Hobbing and Generation Grinding*, VDI-Bericht 2148, Düsseldorf.

Guo et al. 2022

Guo, H.; Ma, T.; Zhang, S.; Zhao, N. & Fuentes-Aznar, A. (2022), „Computerized generation and surface deviation correction of face gear drives generated by skiving“, *Mechanism and Machine Theory*, 173, S. 104839. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104839.

Guyon et al. 2003

Guyon, I. & Elisseeff, A. (2003), „An introduction to variable and feature selection“, *The Journal of Machine Learning Research*. DOI: 10.5555/944919.944968.

Han et al. 2022

Han, J.; Jiang, H.; Tian, X.; Chen, R. & Xia, L. (2022), „Online gear hobbing error estimation based on shaft vibration signal analysis“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, S. 108559. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108559.

Hanselka et al. 2020

Hanselka, H.; Bös, J. & Nestorović, T. (2020), „Maschinenakustik“. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1: Grundlagen und Tabellen*. Hrsg. von B. Bender & D. Göhlich. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 879–899. ISBN: 9783662597101. DOI: 10.1007/978-3-662-59711-8_48.

Hanusz et al. 2016

Hanusz, Z.; Tarasinska, J. & Zielinski, W. (2016), „Shapiro–Wilk test with known mean“, *REVSTAT-statistical Journal*, 14(1), S. 89–100.

Härtig et al. 2009a

Härtig, F. & Krystek, M. (2009a), „Correct treatment of systematic errors for the evaluation of measurement uncertainty“, *Proceedings of 9th international symposium on measurement technology and intelligent instruments (ISMTII)*, Saint Petersburg. Bd. 1, S. 1–016.

Härtig et al. 2009b

Härtig, F.; Kniel, K.; Rost, K. & Ehrig, W. (2009b), *Messung von Mikroverzahnung: Studie zum Bedarf und den Möglichkeiten der Messung von kleinen Verzahnungen*. FVA-Heft 567. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Braunschweig, Deutschland.

Hochrein et al. 2022

Hochrein, J.-F.; Trübswetter, M.; Otto, M. & Stahl, K. (2022), „Direct flank geometry calculation for face gears“, *Forschung im Ingenieurwesen*, 86(3), S. 617–625.

Höhn 2020

Höhn, B.-R. (2020), „Zahnradgetriebe“. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*. Hrsg. von B. Bender & D. Göhlich. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 389–452. ISBN: 9783662597125. DOI: 10.1007/978-3-662-59713-2_15.

Hora 1996

Hora, S. C. (1996), „Aleatory and epistemic uncertainty in probability elicitation with an example from hazardous waste management“, *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2), S. 217–223. DOI: 10.1016/S0951-8320(96)00077-4.

Hüllermeier et al. 2021

Hüllermeier, E. & Waegeman, W. (2021), „Aleatoric and epistemic uncertainty in machine learning: an introduction to concepts and methods“, *Machine Learning*, 110(3), S. 457–506. DOI: 10.1007/s10994-021-05946-3.

Imkamp et al. 2016

Imkamp, D.; Berthold, J.; Heizmann, M.; Kniel, K.; Manske, E.; Peterek, M.; Schmitt, R.; Seidler, J. & Sommer, K.-D. (2016), „Challenges and trends in manufacturing measurement technology - The 'Industrie 4.0' concept“, *Journal of sensors and sensor systems*, 5(2), S. 325–335. DOI: 10.5194/jsss-5-325-2016.

Imkamp et al. 2012

Imkamp, D.; Schmitt, R. & Berthold, J. (2012), „Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik“, *tm – Technisches Messen*, 79(10), S. 433–439. DOI: 10.1524/teme.2012.0251.

Jantzen et al. 2018

Jantzen, S.; Stein, M.; Dietzel, A. & Kniel, K. (2018), „Microgear Measurement Standards: Comparing Tactile, Optical and Computed Tomography Measurements“. AGMA's 2018 fall technical meeting. Oakbrook, Illinois.

Kendall et al. 2017

Kendall, A. & Gal, Y. (2017), *What uncertainties do we need in bayesian deep learning for computer vision?* URL: <https://arxiv.org/abs/1703.04977>.

Kissling et al. 2012

Kissling, U.; Beermann, S. & Hirn, T. (2012), *Kronenräder: Geometrie und Festigkeit*. Technischer Bericht. KISSsoft AG. Bubikon, Schweiz.

Kiureghian et al. 2009

Kiureghian, A. D. & Ditlevsen, O. (2009), „Aleatory or epistemic? Does it matter?“, *Structural Safety*, 31(2), S. 105–112. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.06.020.

Klås et al. 2018

Klås, M. & Vollmer, A. M. (2018), „Uncertainty in machine learning applications: A practice-driven classification of uncertainty“. International conference on computer safety, reliability, and security. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 431–438. DOI: 10.1007/978-3-319-99229-7_36.

Klocke 2018

Klocke, F. (2018), *Fertigungsverfahren 2 - Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662580929. DOI: 10.1007/978-3-662-58092-9.

Klocke et al. 2017

Klocke, F. & Brecher, C. (2017), *Zahnrad- und Getriebetechnik: Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation*, Hanser eLibrary, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446431409. DOI: 10.3139/9783446431409.

Kniel et al. 2015

Kniel, K.; Dunovska, V.; Härtig, F. & Klemm, M. (2015), *Entwicklung von Verfahren zur Eignungsprüfung von Messgeräten für die Mikroverzahnungsmessung*. FVA 567 II IGF 17088N. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). Frankfurt am Main.

König et al. 1992

König, W.; Kutzner, K. & Schehl, U. (1992), „Tool monitoring of small drills with acoustic emission“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 32(4), S. 487–493. DOI: 10.1016/0890-6955(92)90040-N.

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“. *Metrology*. Hrsg. von W. Gao. Springer, Singapore, S. 399–433. ISBN: 9789811049385.

León et al. 2011

León, F. P.; Kiencke, U. & Jäkel, H. (2011), *Signale und Systeme*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 9783486707977.

Li et al. 2025

Li, J.; Wang, Z.; Chen, M.; Yuan, C.; Gou, Z. & Wu, Y. (2025), „Tooth surface error correction method of hypoid gear based on Morris–LM (Levenberg–Marquard) fusion algorithm“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 139(3), S. 1291–1310. DOI: 10.1007/s00170-025-15821-3.

Li et al. 2022

Li, Y.; Wang, X.; He, Y.; Wang, Y.; Wang, Y. & Wang, S. (2022), „Deep Spatial-Temporal Feature Extraction and Lightweight Feature Fusion for Tool Condition Monitoring“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(7), S. 7349–7359. DOI: 10.1109/TIE.2021.3102443.

Lin et al. 2016

Lin, C.; Cao, X.-J.; Fan, Y. & Zeng, D. (2016), „Pitch deviation measurement and analysis of curve-face gear pair“, *Measurement*, 81, S. 95–101. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.12.006.

Linke et al. 2022

Linke, H. & Börner, J. (2022), *Stirnradverzahnung: Berechnung–werkstoffe–fertigung*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446470361.

Litvin et al. 1992

Litvin, F. L.; Zhang, Y.; Wang, J.-C.; Bossler, R. B. & Chen, Y.-J. D. (1992), „Design and Geometry of Face-Gear Drives“, *Journal of Mechanical Design*, 114(4), S. 642–647. DOI: 10.1115/1.2917055.

Litvin et al. 2000

Litvin, F. L.; Egelja, A.; Tan, J.; Chen, D.-D. & Heath, G. (2000), *Handbook on face gear drives with a spur involute pinion*.

Litvin et al. 2002

Litvin, F. L.; Fuentes, A.; Zanzi, C.; Pontiggia, M. & Handschuh, R. F. (2002), „Face-gear drive with spur involute pinion: geometry, generation by a worm, stress analysis“, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(25), S. 2785–2813. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00215-3.

Liu et al. 2019

Liu, M.-K.; Tseng, Y.-H. & Tran, M.-Q. (2019), „Tool wear monitoring and prediction based on sound signal“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, S. 3361–3373. DOI: 10.1007/s00170-019-03782-1.

Liu et al. 2021

Liu, S.; Zhang, M.; Kadam, P. & Kuo, C.-C. J. (2021), *3D Point cloud analysis*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783030891800. DOI: 10.1007/978-3-030-89180-0.

Lu et al. 2022

Lu, X.; Zhao, X.; Hu, B.; Zhou, Y.; Cao, Z. & Tang, J. (2022), „A measurement solution of face gears with 3d optical scanning“, *Materials*, 15(17), S. 6069. DOI: 10.3390/ma15176069.

Lu et al. 2024

Lu, X.; Zhou, Y.; Cao, Z. & Tang, J. (2024), „A novel mathematical model for the accurate

measurement of face gears by considering the geometric deviations of multiple teeth“, *Measurement*, 231, S. 114545. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114545.

Marinescu et al. 2008

Marinescu, I. & Axinte, D. A. (2008), „A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, S. 1148–1160. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.03.010.

Marxer et al. 2021

Marxer, M.; Bach, C. & Keferstein, C. P. (2021), „Koordinatenmesstechnik“. *Fertigungsmesstechnik: Alles zu messunsicherheit, konventioneller messtechnik und multisensorik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 55–105. ISBN: 9783658341688. DOI: 10.1007/978-3-658-34168-8_4.

McGrath et al. 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. DOI: 10.1111/j.1600-0528.2004.00119.x.

Mertins 2020

Mertins, A. (2020), *Signaltheorie*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 9783658296476. DOI: 10.1007/978-3-658-29648-3.

Meyer 2021

Meyer, M. (2021), *Signalverarbeitung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 9783658328009. DOI: 10.1007/978-3-658-32801-6.

Mikut 2008

Mikut, R. (2008), *Data Mining in der Medizin und Medizintechnik*. Bd. 22, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. ISBN: 9783866442535.

Nalbach et al. 2018

Nalbach, O.; Linn, C.; Derouet, M. & Werth, D. (2018), „Predictive quality: Towards a new understanding of quality assurance using machine learning tools“, *Business information systems*. Lecture notes in business information processing. Bd. 320. Hrsg. von W. Abramowicz & A. Paschke. International Conference on Business Information Systems. Berlin, S. 30–42. DOI: 10.1007/978-3-319-93931-5_3.

Piegl et al. 2012

Piegl, L. & Tiller, W. (2012), *The NURBS book*, Monographs in Visual Communication, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642592232. DOI: 10.1007/978-3-642-59223-2.

QASS GmbH 2025

QASS GmbH (2025), *Optimizer4D – das kognitive Messsystem*. URL: <https://www.qass.net/optimizer4d>.

Raissi et al. 2019

Raissi, M.; Perdikaris, P. & Karniadakis, G. E. (2019), „Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations“, *Journal of Computational Physics*, 378, S. 686–707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.

Razali et al. 2013

Razali, A. R. & Qin, Y. (2013), „A Review on Micro-manufacturing, Micro-forming and their Key Issues“, *Procedia Engineering*, 53, S. 665–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.086.

Roth 2013

Roth, K. (2013), *Zahnradtechnik Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung: Evoloid-, Komplement-, Keilschräg-, Konische-, Konus-, Kronenrad-, Torus-, Wälzkolbenverzahnungen, Zahnrad-Erzeugungsverfahren*. 1. Aufl. Bd. 3, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642588907.

Runkler 2015

Runkler, T. A. (2015), *Data mining. Modelle und Algorithmen Intelligenter Datenanalyse*. 2. Aufl., Computational intelligence, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783834816948. DOI: 10.1007/978-3-8348-2171-3.

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. DOI: 10.1111/j.1600-0579.2006.00393.x.

Schiller et al. 2023

Schiller, V.; Klaus, S.; Bilen, A. & Lanza, G. (2023), „In-Process Monitoring of Hobbing Process Using an Acoustic Emission Sensor and Supervised Machine Learning“, *Algorithms*, 16(4), S. 183. DOI: 10.3390/a16040183.

Schmitt et al. 2023

Schmitt, R. & Dietrich, E. (2023), *Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446465596.

Schmitt et al. 2008

Schmitt, R. H. & Damm, B. E. (2008), „Prüfen und Messen im Takt: Wie Sie mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren“, *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)*, 53, S. 57–59.

Schmitt et al. 2020

Schmitt, R. H.; Kurzhals, R.; Ellerich, M.; Nilgen, G.; Schlegel, P. & Dietrich, E. (2020), „Predictive quality—data analytics in produzierenden unternehmen“. *Internet of production:*

Turning data into value. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen, S. 226–253. DOI: 10.24406/IPT-N589615.

Schuth et al. 2017

Schuth, M. & Buerakov, W. (2017), *Handbuch optische Messtechnik. Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446436619.

Schwenke et al. 2007

Schwenke, H. & Franke, M. (2007), „Bestimmung der Unsicherheit von Messungen mit KMG - Status und Ausblick“, *PTB Mitteilungen*, 117(4), S. 363.

Sinambari 2017

Sinambari, G. R. (2017), *Konstruktionsakustik*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658169909
DOI: 10.1007/978-3-658-16990-9.

Spath et al. 2001

Spath, D.; Schmidt, J.; Dyck, M.; Mussa, S.; Plutowsky, A. & Simon, M. (2001), „Mikrofertigung, Genauigkeitssteigerung und Trockenbearbeitung: Aktuelle Themen zur Produktionstechnik“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 96(11), S. 602–606. DOI: 10.3139/104.100492.

Tao et al. 2023

Tao, J.; Zhou, J.; Wang, S.; Dong, J.; Ma, C.; Xiao, Y. & Xia, M. (2023), „An efficient and accurate measurement method of tooth flank variations for face gears“, *Measurement*, 221, S. 113486. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113486.

Tercan et al. 2022

Tercan, H. & Meisen, T. (2022), „Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(7), S. 1879–1905. DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8.

Timme et al. 2014

Timme, N.; Alford, W.; Flecker, B. & Beggs, J. M. (2014), „Synergy, redundancy, and multivariate information measures: an experimentalist's perspective“, *Journal of Computational Neuroscience*, 36(2), S. 119–140. DOI: 10.1007/s10827-013-0458-4.

Toal 2008

Toal, D., Hrsg. (2008), *Mechatronics 2008: Proceedings of the 11th mechatronics forum biennial international conference*. University of Limerick, Limerick, Ireland. ISBN: 9781905952052.

Tschöke et al. 2019

Tschöke, H.; Gutzmer, P. & Pfund, T., Hrsg. (2019), *Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb*. Springer, Berlin, Heidelberg.

ISBN: 9783662603567. DOI: 10.1007/978-3-662-60356-7. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-60356-7>.

Wang et al. 2015

Wang, H.; Li, J.; Gao, Y. & Yang, J. (2015), „Closed-Loop Feedback Flank Errors Correction of Topographic Modification of Helical Gears Based on Form Grinding“, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), S. 635156. DOI: 10.1155/2015/635156.

Wang et al. 2022

Wang, S.; Zhou, Y.; Tang, J.; Tang, K. & Li, Z. (2022), „Digital tooth contact analysis of face gear drives with an accurate measurement model of face gear tooth surface inspected by CMMs“, *Mechanism and Machine Theory*, 167, S. 104498. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104498.

Wantzen 2021

Wantzen, K. (2021), *Methode zur Entwicklung merkmalsbasierter Zustandsüberwachungssysteme mittels der Körperschallmesstechnik*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000127590.

Weckenmann 2012

Weckenmann, A., Hrsg. (2012), *Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hanser, München. ISBN: 9783446429475. URL: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446429475>.

Wedmann et al. 2014

Wedmann, A.; Kniel, K.; Dunovska, V. & Härtig, F. (2014), *Rückführung von Mikroverzahnungsmessungen*. VDI-Berichte. Düsseldorf, S. 199–212.

WENZEL Präzision GmbH 2024

WENZEL Präzision GmbH (2024), *Poster Verzahnungsparameter*. URL: https://www.metromec.ch/images/pdf/WENZEL_Poster_Verzahnungsparameter.pdf.

Wittel et al. 2017

Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J. & Spura, C. (2017), *Roloff/matek maschinenelemente*. Bd. 23, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783658023263.

Yan et al. 2024

Yan, Y.; Guo, H.; Sun, L.; Zhao, N. & Teng, W. (2024), „An approximate grinding and deviation correction method for helical face gear“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(5), S. 2271–2291. DOI: 10.1007/s00170-024-13379-0.

Yu et al. 2011

Yu, F.; Lu, Z.; Luo, H. & Wang, P. (2011), *Three-dimensional model analysis and processing*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642126512. DOI: 10.1007/978-3-642-12651-2.

Zhou 2018

Zhou, Q. (2018), *PyMesh: Geometry processing library*. URL: <https://pymesh.readthedocs.io/>.

Zhou 2021

Zhou, Z.-H. (2021), *Machine learning*, Springer Nature, Singapore. ISBN: 9789811519673.
DOI: 10.1007/978-981-15-1967-3.

Normen

DIN-Normen

DIN 15530-3 2018

DIN 15530-3 (2018), *DIN 15530-3 (2018): Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen*. Berlin.

DIN EN ISO 14253-1 2018

DIN EN ISO 14253-1 (2018), *Geometrische produktspezifikationen (GPS) – prüfung von werkstücken und messgeräten durch messen – teil 1: Entscheidungsregeln für den nachweis von konformität oder nichtkonformität mit spezifikationen*. Berlin.

DIN ISO 1328-1 2018

DIN ISO 1328-1 (2018), *Zylinderräder – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken (ISO 1328-1:2013)*.

DIN EN ISO 5349-1 2001

DIN EN ISO 5349-1 (2001), *Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 5349-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 5349-1:2001*. Berlin.

DIN 3960 1987

DIN 3960 (1987), *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung*. Berlin.

DIN 867 1986

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

DIN 868 1976

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

VDI-Normen

VDI/VDE 2612 Blatt 1 2024

VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2024), *VDI/VDE 2612 Blatt 1: Messen und Prüfen von Verzahnungen – Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil*. Berlin.

VDI 2731 2009

VDI 2731 (2009), *VDI 2731 Blatt 1:2009-04 – Mikrogetriebe– Grundlagen*. Düsseldorf.

Erklärung zum Einsatz generativer künstlicher Intelligenz

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurden generative Werkzeuge der künstlichen Intelligenz, insbesondere ChatGPT (Version 5) sowie Gemini (Version 3.0), zur Unterstützung der sprachlichen Überarbeitung ausgewählter Textpassagen (z.B. Grammatik, Ausdruck und Struktur) sowie bei der Implementierung und Dokumentation von Programmcode eingesetzt. Nach der Nutzung dieser Werkzeuge wurden sämtliche Inhalte vom Autor kritisch geprüft und bei Bedarf überarbeitet.

Der Autor übernimmt die volle Verantwortung für den Inhalt dieser Arbeit. Alle wissenschaftlichen Ergebnisse, methodischen Entwicklungen und Schlussfolgerungen wurden eigenständig vom Autor erarbeitet.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Visualisierung der grundlegenden Verzahnungsgrößen in Anlehnung an (DIN 868 1976, S. 14).	7
2.2	Prinzipdarstellung des Wälzfräsens mit den relevanten kinematischen Größen nach Klocke et al. (2017, S. 187).	10
2.3	Schematische Darstellung von Profil-, Flankenlinien-, Teilungs- und Rundlaufabweichungen bei Stirnradverzahnungen in Anlehnung an (Klocke et al. 2017) und (WENZEL Präzision GmbH 2024).	11
2.4	links: Geometrie des resultierenden Zahnes mit den beschriebenen geometrischen Grenzen, Darstellung basierend auf (Litvin et al. 1992), rechts: Fertigung von Kronenrädern mittels Wälzfräsen (Litvin et al. 2002).	16
2.5	Schematische Darstellung eines Qualitätsregelkreises mit seinen zentralen Funktionsbereichen (Messtechnik, Qualitätsregler und Fertigung) (Lanza et al. 2019, S. 400).	19
2.6	Klassifizierung der Messstrategien nach Integrationsgrad in Anlehnung an Lanza et al. (2019, S. 402).	21
2.7	Funktionsprinzip der Fokusvariation	22
2.8	Data Mining Vorgehen nach Mikut (2008, S. 74).	27
2.9	CWT-Spektrogramm: Zeit-Frequenz-Verteilung während eines spannenden Fertigungsprozesses (Bilen et al. 2026b).	29
2.10	Veranschaulichung von Underfitting (linker Bereich), optimaler Anpassung und Overfitting (rechter Bereich) im Modelltraining nach (Zhou 2021, S. 51).	32
2.11	Vergleich einer unstrukturierten Punktwolke (links) und eines daraus generierten Polygonnetzes (rechts).	34
2.12	Vergleich einer STL mit 3200 Dreiecken (links) und einer STL mit 450 Dreiecken (rechts).	35
2.13	Darstellung von booleschen Operationen in 3D (Zhou 2018).	37
3.1	Ansatz Schiller et al. (2023).	43
3.2	Ansatz nach Gauder (2024). Es wird zwischen einem „kleinen“ Regelkreis zur fertigungstechnischen Regelung auf Basis von Funktionsvorhersagen und einem „großen“ Regelkreis zur Qualitätsregelung durch organisatorische Maßnahmen, wie etwa die Bauteilpaarung, unterschieden.	45
3.3	Harvey Balls Matrix zur Bewertung der betrachteten Ansätze.	48
4.1	Zielbild des VM-basierten Qualitätsregelkreises für Mikro-Kronenräder. Darstellung Wälzfräsen entnommen aus Litvin et al. (2002).	51

4.2	Abhängigkeitsstruktur und Informationsflüsse zwischen den fünf Arbeitspaketen. Pfeile kennzeichnen gerichtete Informationsflüsse; Beschriftungen benennen den konkreten Inhalt (Labels, Fehlerhypothesen, Modelle, Unsicherheiten).	52
4.3	Modernes Dentalinstrument der Firma Dentsply Sirona im Schnitt. Das Instrument besteht im sogenannten Kopftrieb aus einer Kronenrad-Stirnrad-Paarung. (Quelle: Dentsply Sirona).	54
5.1	Geometrische Verhältnisse am Kronenrad nach Gindin et al. 2025.	57
5.2	a) Schnittdarstellung des evolventischen Schneidrades in der XZ-Ebene. Abgebildet sind die eingeführten Beschreibungsgrößen x , H sowie der Drehwinkel der Evolvente ϕ und die Hilfsgröße W . b) Geometrische Herleitung der Hilfsgröße W (Gindin et al. 2025).	58
5.3	Links: Entstehung der Kronenradflanke im A-A-Schnitt durch die Pferchkurve der bildenden Flankenlinien des Stirnrades, rechts: Visualisierung des A-A-Schnitts in der XY -Ebene (Gindin et al. 2025).	59
5.4	Visualisierung der Unterschnittsgrenze: (a) Schnittansicht in der XY -Ebene, (b) 3D-Darstellung des Unterschnitts am Innendurchmesser (Gindin et al. 2025).	61
5.5	Grobausrichtung mittels RANSAC und anschließende Feinausrichtung über ICP (Bilen et al. 2026c).	62
5.6	Registrierung auf Basis der Zahnkopfebene und des Innenzylinders (Bilen et al. 2026c).	63
5.7	Segmentierung der Zähne durch Peak-Valley-Erkennung (Bilen et al. 2026c).	63
5.8	Einzelzahnausrichtung nach Bilen et al. (2026c).	64
5.9	Rasterbasierte Abstandsberechnung: Strahlenprojektion zur Soll-Geometrie (links), Auswertepunkte (mitte) und Normalabstand zur Ist-Geometrie (rechts) (Bilen et al. 2026c).	65
5.10	Auswertung der Profil- und Flankenlinienabweichungen auf Basis linearer Regression (Bilen et al. 2026c).	67
5.11	Methode A: Bestimmung der Hauptrichtung über Flankenregressionen (Bilen et al. 2026c).	69
5.12	Methode B: Profilbasierte Referenzkonstruktion (Bilen et al. 2026c).	70
5.13	Exzenterkreis mit dem Radius r_e in der XY -Ebene (Bilen et al. 2026c).	71
5.14	Mikroskopische Aufnahme des Antastprozesses der Kronenradgeometrie.	73
5.15	Messpunkte der taktilen Referenzmessung mit dem Zeiss-F25 KMG.	73
5.16	Messtechnischer Aufbau auf der Alicona μ CMM (Bilen et al. 2026c) ¹ .	76

5.17 Vergleich der Sollgeometrien nach Gindin et al. 2025 (grün) und Dentsply Sirona (grau) (Bilen et al. 2026c).	77
5.18 Links: Visualisierung der mittels Raycasting ermittelten Auswertepunkte; rechts: lokale Distanzen zwischen Soll- (blau) und Istpunkten (schwarz-gelbe Farbcodierung in Abhängigkeit der Abweichung).	78
5.19 Taktile erfasste Messpunkte. Korrekt erfasste Messpunkte sind in blau dargestellt, Artefakte in rot.	79
5.20 Beispielhafte optische Messungen zweier mit der Alicona μ CMM gemessener Kronenräder bei unterschiedlicher Eindringtiefe Δz .	80
5.21 Einfluss des Downsampling-Faktors auf Messzeit und Punkt-zu-Punkt-Abweichung (A_Ernstberger 2025).	81
5.22 Beispielhaftes Histogramm der Punkt-zu-Punkt-Abweichungen zwischen einer optischen Alicona-Messung und der taktilen F25-Referenz (A_Ernstberger 2025).	82
6.1 Fräsergeometrien nach Roth (2013, S. 227), eigene Darstellung aus Bilen et al. (2026a).	86
6.2 Werkzeugentstehung: a) Stirnradprofil, b) Darstellung der Winkel ϕ und θ , c) dreidimensionale Werkzeug-Werkstück-Konstellation (Bilen et al. 2026a).	87
6.3 Visualisierung der modellierten Fertigungsabweichungen (Bilen et al. 2026a).	90
6.4 Simulierter Effekt eines x-Versatzes: Asymmetrische Flankenausbildung und lokaler Unterschnitt (Bilen et al. 2026a).	93
6.5 Vergleich gemessener Zahnprofile bei tangentialem Werkzeugversatz. Links: Versatz von +0,1 mm (positive x -Richtung), rechts: Versatz von -0,1 mm (negative x -Richtung) (Bilen et al. 2026a).	94
6.6 Simulierter Effekt eines z-Versatzes: Variation der Zahnhöhe und der Zahnkopfdicke (Bilen et al. 2026a).	95
6.7 Experimenteller Einfluss des z-Versatzes: Gemessene Abweichungen in Zahnhöhe und Profilkrümmung (Bilen et al. 2026a).	95
6.8 Simulierter Taumelfehler: Dynamische Oberflächenkerben und periodische Flankenabweichungen (Bilen et al. 2026a).	96
6.9 Versuchsbauteil, gefertigt mit Taumel von $9\text{ }\mu\text{m}$; experimentell beobachtete, einseitig auftretende Kerben infolge von Taumelabweichungen. In der Vergrößerung wird zudem eine lokale Zerstörung weiterer Flankenbereiche sichtbar.	97
7.1 Struktur der Datenverarbeitungskette zur körperschallbasierten Qualitätsvorhersage (Bilen et al. 2026b) ¹ .	100

7.2	Anbringung des Körperschallsensors am Wälzfräsapparat (Schiller et al. 2023).	103
7.3	System zur Erfassung des Körperschallsignals der Firma QASS (QASS GmbH 2025) ¹ .	104
7.4	Schematische Darstellung der Datenverarbeitung.	105
7.5	Zahndickenabweichung Δt in Abhängigkeit der axialen Zustellung Δz (nach (Bilen et al. 2026c)).	113
7.6	Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ in Abhängigkeit der axialen Zustellung Δz (nach (Bilen et al. 2026c)).	114
7.7	Links-Rechts-Asymmetrien ausgewählter Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von Δx (nach (Bilen et al. 2026c)).	115
7.8	Exzentrizitätsradius r_e als quantitativer Indikator für die tangentielle Verschiebung Δx (nach (Bilen et al. 2026c)).	116
7.9	Profilformabweichung $f_{f\alpha}$ in Abhängigkeit vom eingestellten Taumel (nach (Bilen et al. 2026c)).	117
7.10	Vergleich von vorhergesagten und tatsächlichen Werten für die drei Fertigungsparameter (Bilen et al. 2026b).	121
7.11	Top-10 Merkmale für die rekonstruierbaren Fertigungsparameter Taumel und z-Shift basierend auf der F-Regression.	122
7.12	Exemplarische Messung mit Messlücken (A_Ernstberger 2025).	125
8.1	Ishikawa-Diagramm zur Identifikation sämtlicher Unsicherheitsquellen entlang der Vorhersagepipeline (orientiert an Gauder et al. (2022b), aus Bilen et al. (2026b)).	128
8.2	Überblick über die Zusammensetzung der Modellgesamtunsicherheit (Bilen et al. 2026b).	129
8.3	Histogramm der relativen Standardabweichungen der relevanten Körperschallmerkmale (Bilen et al. 2026b).	142
9.1	Eingestellte DoE-Stellgrößen vs. berechnete Korrekturwerte für alle DoE-Bauteile.	153
9.2	Haupt- und Wechselwirkungen für Taumel.	155
9.3	Haupt- und Wechselwirkungen für x -Shift.	156
9.4	Haupt- und Wechselwirkungen für z -Shift.	157
A3.1	Verteilung der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ für die profil- und flankenbezogenen Qualitätsmerkmale.	XLV
A3.2	Verteilung der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ für die übrigen Qualitätsmerkmale und Prozessparameter.	XLVI

Tabellenverzeichnis

2.1	Zentrale Parameter zur Parametrierung einer evolventischen Stirnradverzahnung.	8
4.1	Geometrische Kenndaten der im Anwendungsfall betrachteten Mikro-Kronenrad–Stirnrad-Paarung.	54
5.1	Messparameter der Fokusvariation nach Gauder et al. (2022b).	75
5.2	Auswertung der F25-Referenzmessung (Mittelwerte).	79
5.3	Verwendete Messparameter für die Alicona- μ CMM-Messungen.	81
7.1	Eingesetzte Parameter der Merkmalsextraktion.	106
7.2	Eingesetzte Parameter der F-Regression.	108
7.3	Übersicht der Faktoren und Faktorstufen des Design of Experiments.	109
7.4	Übersicht der getesteten Modell- und Datenrepräsentations-Kombinationen.	110
7.5	Beste datenbasierte Vorwärtsmodelle zur Vorhersage der Qualitätsmerkmale. ¹	118
7.6	Beste Modell- und Feature-Selektionskombinationen zur Rekonstruktion der Fertigungsparameter aus Körperschallmerkmalen.	120
7.7	Rekonstruktion der Qualitätsmerkmale	123
8.1	Exemplarische Struktur der Datengrundlage zur Bestimmung der Wiederholunsicherheit der Körperschallmerkmale. Dargestellt sind Messwerte $x_{i,j}$ des Merkmals i am Bauteil j innerhalb eines Zeitfensters.	136
8.2	Standardabweichung der Wiederholmessung und systematischer Bias	140
8.3	Messunsicherheit u_{label} der funktionalen Merkmale (Bilen et al. 2026b).	141
8.4	Exemplarischer Auszug der Wiederholstreuung ausgewählter spektraler Merkmale je Versuchsreihe mit Shapiro-Wilk p -Wert.	141
8.5	Abschätzung der epistemischen Unsicherheit u_{epi} (Bilen et al. 2026b).	143
8.6	Merkmalsspezifische globale Unsicherheiten u_{ges} der betrachteten geometrischen Zielgrößen (Bilen et al. 2026b).	144
8.7	Empirische Überdeckungsrate $\hat{p}_{\text{cov}}$ der untersuchten Zielgrößen auf dem Validierungsdatensatz ($n_{\text{val}} = 20$) (Bilen et al. 2026b).	145
9.1	Rückschätzung der Maschinenparameter aus Qualitätsmerkmalen (regelbasiert/analytisch).	153
9.2	Rückschätzung der Maschinenparameter aus Qualitätsmerkmalen.	154

A1.1 Ergebnisse der Messreihen zur Analyse von Downsampling, Messzeit und Punkt-zu-Punkt-Abweichung.	XXX
A2.1 Versuchsplan: Kombination der Maschinenparameter.	XXXI
A2.2 Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile.	XXXIV
A2.3 Modell- und Feature-Selektionskombinationen zur Prädiktion der Prozessparameter.	XL
A2.4 Bestes Regressionsmodell pro Merkmal basierend auf dem Test- R^2 .	XLIV

Anhang

A1 Anhang Qualitätsbewertung

A1.1 Exemplarisches Verzahnungsprotokoll

Das folgende Messprotokoll zeigt exemplarisch die Profil- und Flankenbewertung eines Kronenrades gemäß Kapitel 5. Es umfasst sowohl globale Kenngrößen als auch detaillierte Auswertungen für die linke und rechte Flanke. Darüber hinaus sind für jeden ausgewerteten Zahn sowie für jede Profil- und Flankenlinie entsprechende Diagramme dargestellt.

Verzahnungsprotokoll für Profillinienanalyse

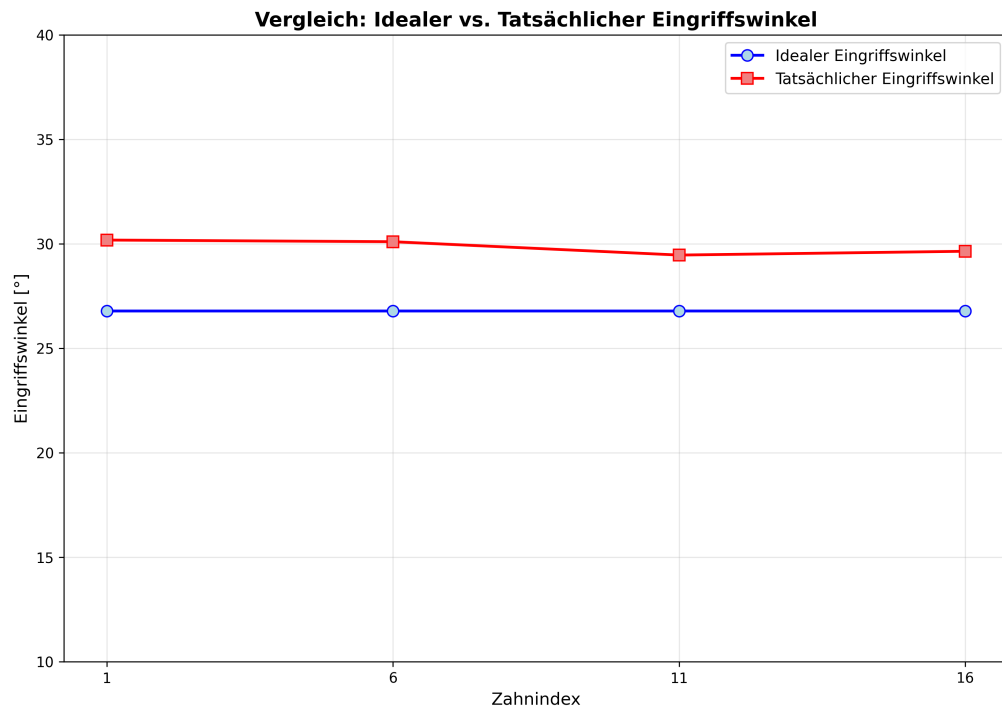
Attribut	Ausprägung
Pfad Ist-Messung	DOE_1_A.stl
Pfad Soll-Zahn Kreisbahn	SironaZahn_KreisBahn.stl
Datei Referenz-Kronenrad	
Zähnezahl	19
Radius innen [mm]	2.3
Radius außen [mm]	2.74
Radius Auswertebereich innen [mm]	2.38
Anzahl Profillinien	5
Punkte pro Profillinie	20

	Links	Rechts
Mittelwert Gesamtabweichung Profillinie	0.0049	0.0059
Max Gesamtabweichung Profillinie	0.0066	0.0109
Mittlere Gesamtabweichung Flankenlinie	0.0039	0.0039
Max Gesamtabweichung Flankenlinie	0.0081	0.0089

	Links	Rechts
Mittelwert Formabweichung Profillinie	0.0036	0.0036
Max Formabweichung Profillinie	0.0076	0.006
Mittlere Formabweichung Flankenlinie	0.0009	0.0007
Max Formabweichung Flankenlinie	0.002	0.0025

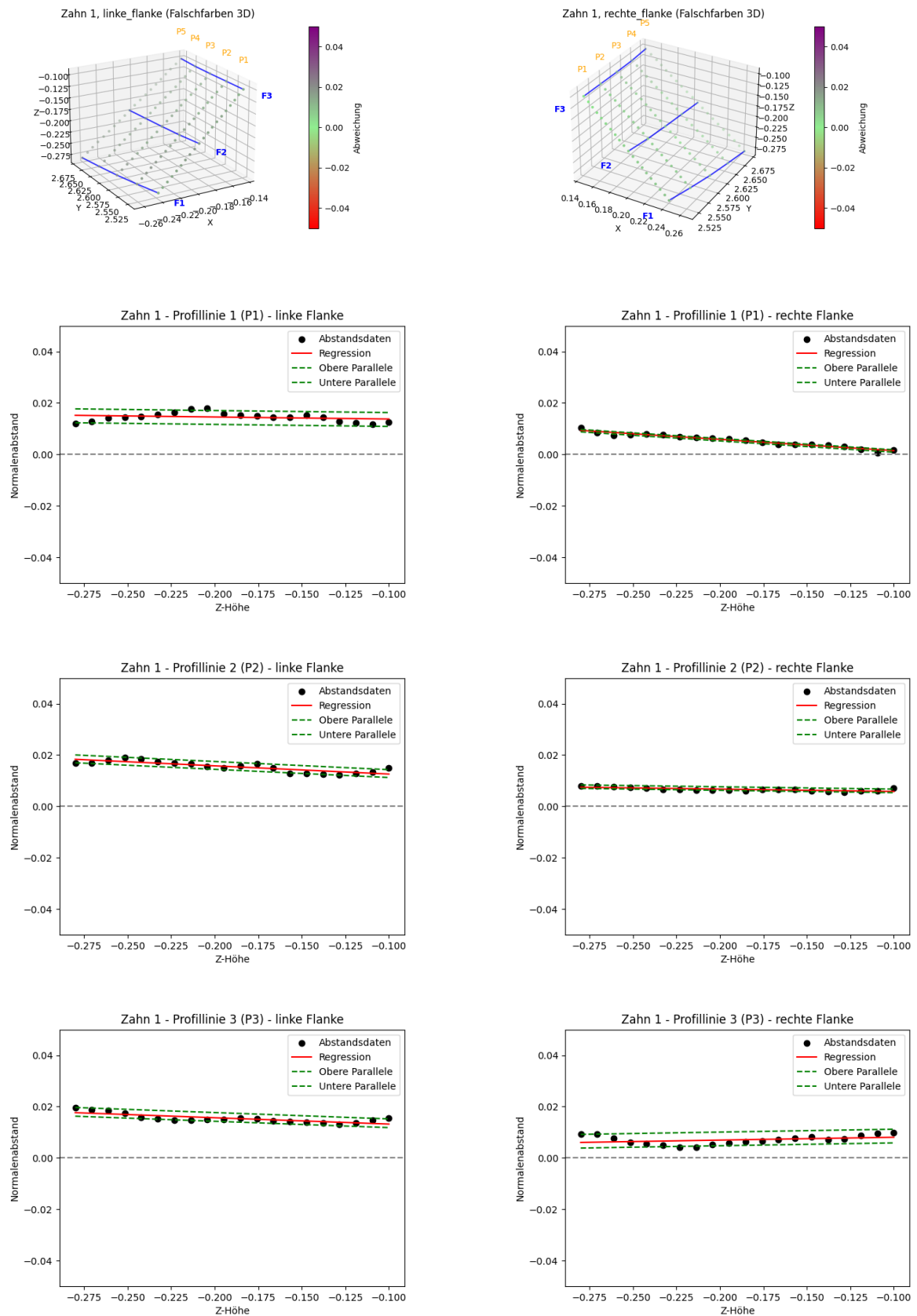
	Links	Rechts
Mittelwert Winkelabweichung Profillinie	-0.0033	0.0011
Max Winkelabweichung Profillinie	-0.0006	0.0109
Mittlere Winkelabweichung Flankenlinie	0.0037	0.0021
Max Winkelabweichung Flankenlinie	0.0083	0.0092

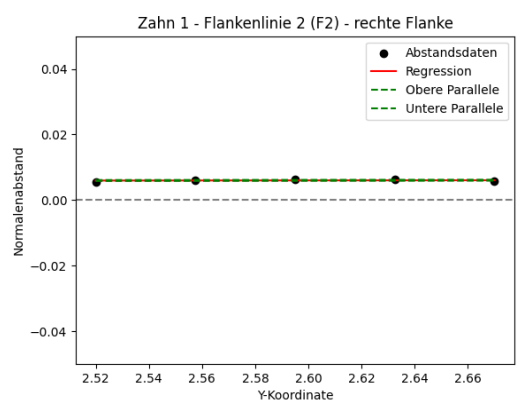
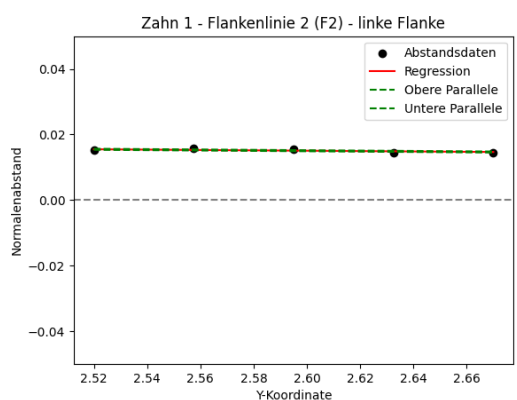
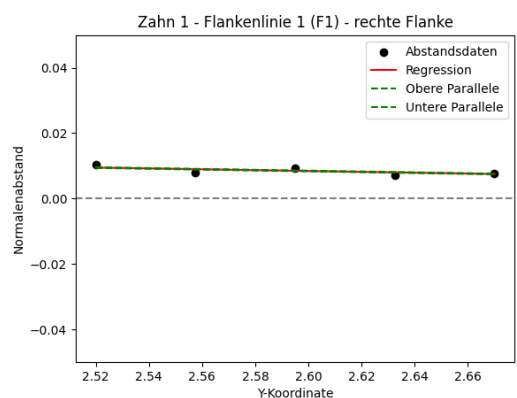
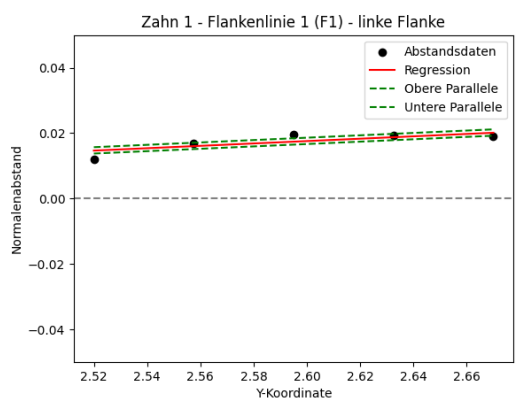
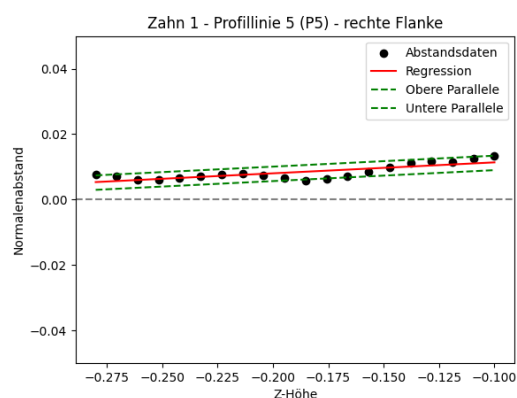
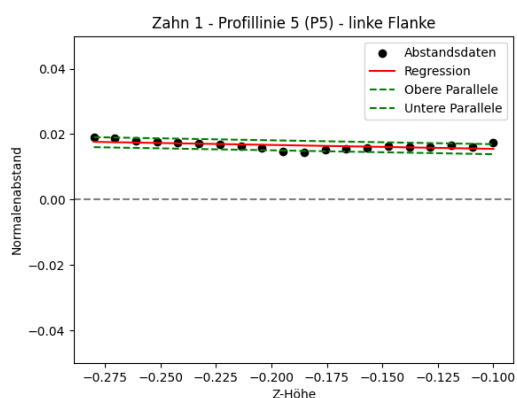
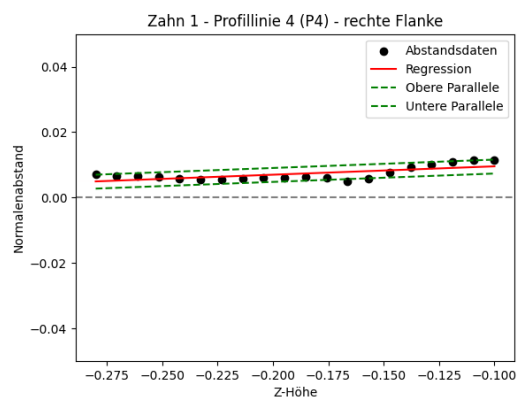
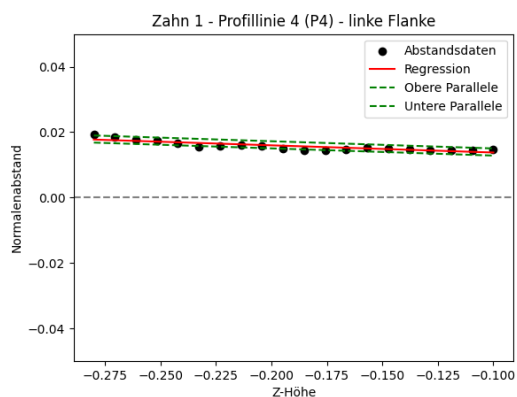
Eingriffswinkel



Kennwert	Zahn 1	Zahn 6	Zahn 11	Zahn 16
Aufgezeichnete Verschiebung (deg)	-359.955799	-94.817641	-189.521136	-284.202345
Ideale Teilung (deg)	0.0	94.736842	189.473684	284.210526
Teilungsabweichung (deg)	0.044201	-0.080799	-0.047452	0.008181

Analyseergebnisse Zahn 1





A1.2 Kalibrierschein Zeiss F25

Der folgende Kalibrierschein belegt die rückführbare Kalibrierung des taktilen Koordinatenmessgeräts Zeiss F25. Die dokumentierte Kalibrierunsicherheit $u_{\text{cal}} = 0,3\,\mu\text{m}$ geht als Eingangskomponente in die Berechnung der Labelunsicherheit u_{label} ein (vgl. Unterabschnitt 8.6.1).

Kalibrierschein

Gegenstand	3D Koordinatenmessgerät
Hersteller	Carl Zeiss
Typ	F25
Fabrikat/Serien-Nr.	171430
Inventar-Nr.	-
Auftraggeber	Karlsruher Institut für Technologie WBK Engelbert-Arnold-Str. 8 D-76131 Karlsruhe
Aufstellort	Messraum
Auftrags-Nr.	8583806950
Kalibrierscheinnummer	8583806950
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines	13
Kalibrierdatum	20.11.2025
Nächste Kalibrierung (Empfehlung)	11/2026

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Das Kalibrierlabor von ZEISS besitzt die Kompetenz nach DIN EN ISO/IEC 17025. Diese Kompetenz erstreckt sich über den Bereich der Koordinatenmesstechnik zur „vor Ort“ Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

Dieser Kalibrierschein (V2021) darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des Kalibrierlabors von ZEISS. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

Dieser Kalibrierschein wurde mit dem Universellen Auswertetool Version 10.0.0.1412 erstellt.

Datum

Für den Auftragnehmer

20.11.2025

Földesch



1. Kalibrieraufgabe

An dem Koordinatenmessgerät wurde die Anzeigeabweichung **EL** für Längenmessabweichungen und die Einzeltaster-Antastabweichung **PFTU** erfasst.

Zusätzlich wurde die Wiederholspannweite der Längenmessabweichung **R0** ermittelt.

Bei KMGs die im Scanning Modus betrieben werden wurde die Scanning-Antastabweichung **THP** und deren Prüfdauer **τ** sowie die Formmessabweichung für Rundheit **RONt (MZCI)** erfasst.

Bei vorhandenem Drehtisch wurde die Vierachsen-Abweichungen **FR**, **FT** und **FA**, sofern diese Messung in Auftrag gegeben wurde, erfasst.

Bei vorhandenem optischem Messkopfsystem wurde die Längenmessabweichung **EU** sowie die Antastabweichungen **PFV2D** und **PF2D** erfasst.

Außerdem wurde die unidirektionale Wiederholspannweite, **RU(Z)** erfasst.

Bei vorhandenem LineScan / CFS wurde die Längenmessabweichung **E[Uni:Tr:ODS]** sowie die Antastabweichung **FForm / FSize** (nach ISO 10360-8: 2014) erfasst.

Das Koordinatenmessgerät hatte zum Zeitpunkt der Kalibrierung folgende Konfiguration:

Steuerung:	C99N #380115041
Messkopf:	SSP #003YM9VG, ViScan #keine
Messsoftware:	CALYPSO 6.0.2802
Einmesskugel:*	#6.3-F25-Nr.33 r=3,17548
Drehtisch:	-
Messbereich:	X = 130 mm Y = 130 mm Z = 100 mm
KMG-Ausdehnungskoeffizienten:	X = $0,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Y = $0,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Z = $0,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

*) Die Einmesskugel ist ein Bestandteil des Koordinatenmessgerätes.

Der ihr zugeordnete mittlere Radius ist für die Einhaltung der zugesicherten Gerätespezifikation notwendig.



2. Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung der messtechnischen Eigenschaften des Koordinatenmessgerätes wurde nach DIN EN ISO 10360 durchgeführt. Zur Anwendung kamen die Normen DIN EN ISO 10360-2 (2010), DIN EN ISO 10360-3 (2000) DIN EN ISO 10360-4 (2003) , DIN EN ISO 10360-5 (2011), DIN EN ISO 10360-7 (2011) und DIN EN ISO 10360-8 (2014) sowie VDI/VDE 2617 Blatt 2.2 (2000) für die Messungen der Formmessabweichungen für Rundheit sowie Blatt 6.1 (2007) bzw. Blatt 6.2 (2005) für die Prüfung von optischen Messkopfsystemen.

Die Längenmessungen **EL** und **RO** wurden mittels taktiler Antastungen an Parallel- oder Stufenendmassen ermittelt.

Die Längenmessungen **EU** und **RU** wurden mittels optischer Antastungen an einer optischen Kalibrierschablone oder durch ein Lasersystem ermittelt.

Die Längenmessabweichung **E150** wurden mittels taktiler Antastungen an Stufenendmassen im Werk ermittelt.

Die Einzeltaster-Formabweichung **PFTU** sowie die Scanning-Antastabweichung **THP** und deren Prüfdauer τ wurden an einer Prüfkugel mit $d =$ mm ermittelt.

Die Mehrfachtaster – Antastabweichung **PFTj**, **PLTj**, **PSTj** wurden mittels taktiler Antastungen an einer Prüfkugel mit $d =$ mm im Herstellerwerk ermittelt.

Die Vierachsen-Messabweichungen **FR** (radial), **FT** (tangential) und **FA** (axial) wurden an zwei Keramikkugeln mit $d =$ mm, welche in einem horizontalen Abstand $r =$ mm zur Drehachse sowie einem horizontalen Abstand von $d =$ mm und einem vertikalen Abstand von $h =$ mm zueinander aufgespannt waren, ermittelt.

Die Formmessabweichungen für Rundheit **RONt (MZCI)** wurden mittels Messung eines kalibrierten Einstellrings mit $d = 50$ mm im Scanning Modus ermittelt.

Die optischen Antastabweichungen (2D Kamerasensor) **PFV2D**, **PF2D** wurden an einer Prüfkugel mit $d = 30$ mm und/oder an einem optischen Kalibriernormal ermittelt.

Die Wiederholspannweite **RU(Z)** wurde an einem optischen Kalibriernormal ermittelt.

Die optische Antastabweichung (Abstandsensor) **PForm / PSize** und die zulässige Längenmessabweichung **E[uni:Tr:ODS]** wurden an einer Prüfkugel mit $d = 30$ mm und an einem Stufennormal / Treppennormal ermittelt.

Die Kalibrierung erfolgte an dem auf Seite 1 genannten Aufstellort.



Kalibrierschein-Nr. 8583806950
Seite 4 des Kalibrierscheins vom 20.11.2025

3. Messergebnisse

Die Messergebnisse gelten zur Zeit der Messung. Sie gelten weiterhin nur für den Aufstellort und für die Geräteeinstellungen zum Zeitpunkt der Kalibrierung.

3.1 Anzeigeabweichung für Längenmessungen EL

Für die Bestimmung der Anzeigeabweichungen wurden folgende Stufenendmasse eingesetzt:

Serien-Nr.: 001
Kalibrierzeichen: 50820 PTB 24

In den folgenden Diagrammen sind die ermittelten Anzeigeabweichungen EL und die höchstzulässige Anzeigeabweichung $MPE(EL)$ für Längenmessungen dargestellt.

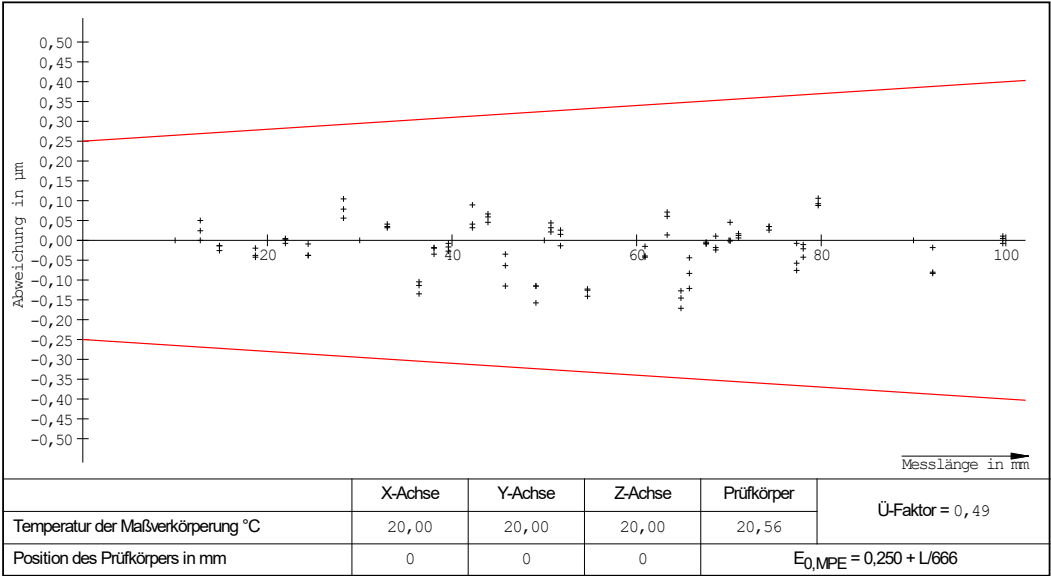
Die höchstzulässige Anzeigeabweichung beträgt:

$$MPE(EL) = (A + L / K) \quad (L \text{ in mm})$$

$$MPE(EL) = (0,250 + L / 666) \quad \mu\text{m} \quad (L \text{ in mm})$$



Anzeigeabweichung in Pos. 10 (XY)



(Table with measuring values see next page)



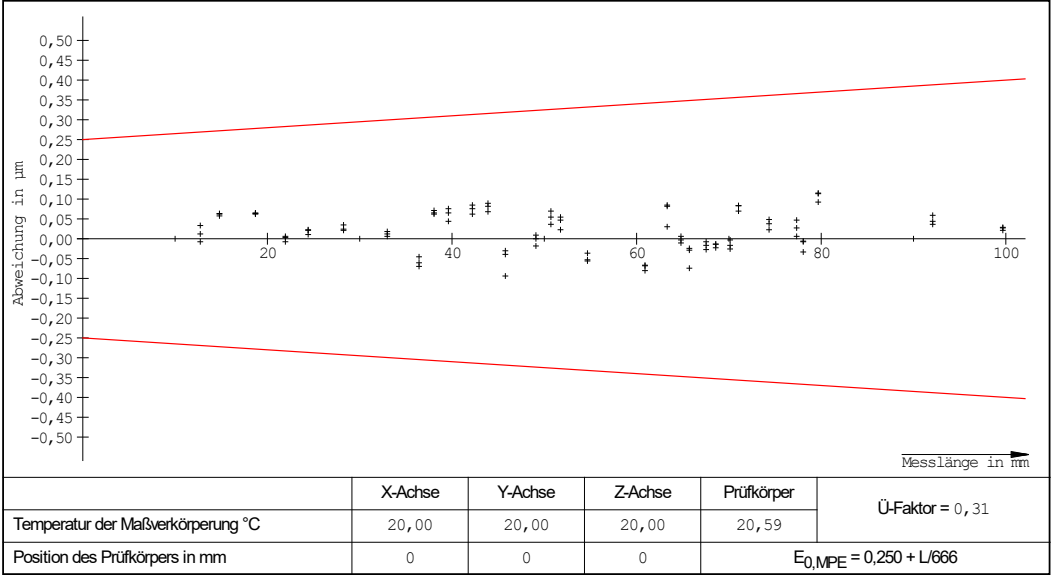
Kalibrierschein-Nr. 8583806950
Seite 6 des Kalibrierscheins vom 20.11.2025

Anzeigeabweichung in Pos. 10 (XY) [value table]

Messlänge L in mm		Abweichungen in mm		
Sollwert	Istwert	Mittelwert	Minimal	Maximal
12,746865	12,746889	0,000024	-0,000001	0,000050
14,778534	14,778517	-0,000017	-0,000025	-0,000013
18,724198	18,724164	-0,000034	-0,000043	-0,000020
21,954066	21,954064	-0,000001	-0,000008	0,000004
24,392357	24,392328	-0,000028	-0,000038	-0,000009
28,226899	28,226979	0,000080	0,000055	0,000105
32,989604	32,989640	0,000036	0,000032	0,000041
36,416577	36,416459	-0,000118	-0,000135	-0,000105
38,025553	38,025529	-0,000024	-0,000035	-0,000018
39,620971	39,620955	-0,000017	-0,000027	-0,000007
42,178664	42,178718	0,000054	0,000032	0,000089
43,907074	43,907131	0,000057	0,000046	0,000066
45,801818	45,801747	-0,000072	-0,000115	-0,000035
49,101880	49,101751	-0,000129	-0,000157	-0,000115
50,689617	50,689649	0,000032	0,000021	0,000044
51,753984	51,753993	0,000009	-0,000013	0,000026
54,678232	54,678102	-0,000130	-0,000141	-0,000123
60,911657	60,911625	-0,000032	-0,000042	-0,000015
63,316527	63,316576	0,000049	0,000014	0,000071
64,815877	64,815729	-0,000148	-0,000172	-0,000127
65,706091	65,706009	-0,000083	-0,000121	-0,000044
67,505508	67,505501	-0,000007	-0,000010	-0,000004
68,585467	68,585457	-0,000011	-0,000025	0,000010
70,131828	70,131843	0,000015	-0,000001	0,000046
71,015082	71,015094	0,000012	0,000006	0,000017
74,358446	74,358478	0,000032	0,000026	0,000036
77,313104	77,313057	-0,000047	-0,000076	-0,000008
78,077611	78,077586	-0,000025	-0,000043	-0,000011
79,661159	79,661255	0,000095	0,000088	0,000106
92,073679	92,073619	-0,000060	-0,000083	-0,000018
99,702274	99,702277	0,000003	-0,000007	0,000011



Anzeigeabweichung in Pos. 11 (Raum (vorn))



(Table with measuring values see next page)



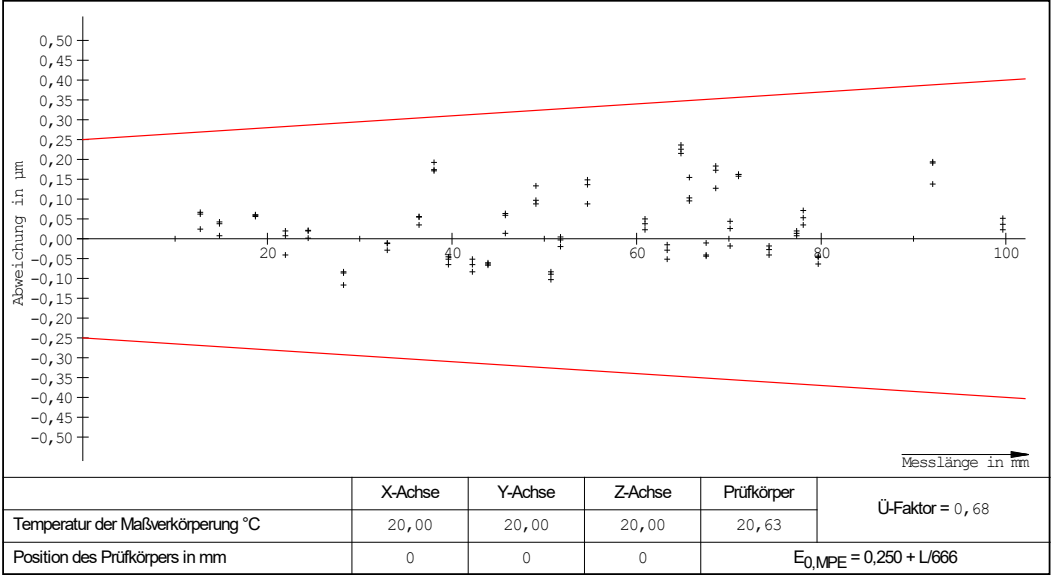
Kalibrierschein-Nr. 8583806950
Seite 8 des Kalibrierscheins vom 20.11.2025

Anzeigeabweichung in Pos. 11 (Raum (vorn)) [value table]

Messlänge L in mm		Abweichungen in mm		
Sollwert	Istwert	Mittelwert	Minimal	Maximal
12,746865	12,746877	0,000012	-0,000008	0,000033
14,778534	14,778596	0,000061	0,000058	0,000063
18,724198	18,724262	0,000063	0,000062	0,000065
21,954066	21,954066	0,000000	-0,000008	0,000006
24,392357	24,392375	0,000018	0,000010	0,000022
28,226899	28,226926	0,000027	0,000021	0,000035
32,989604	32,989616	0,000012	0,000006	0,000018
36,416577	36,416519	-0,000058	-0,000070	-0,000045
38,025553	38,025620	0,000067	0,000063	0,000072
39,620971	39,621033	0,000062	0,000044	0,000075
42,178664	42,178738	0,000074	0,000062	0,000084
43,907074	43,907155	0,000080	0,000069	0,000089
45,801818	45,801764	-0,000055	-0,000094	-0,000030
49,101880	49,101877	-0,000003	-0,000018	0,000009
50,689617	50,689671	0,000054	0,000037	0,000070
51,753984	51,754026	0,000042	0,000023	0,000055
54,678232	54,678184	-0,000048	-0,000055	-0,000037
60,911657	60,911585	-0,000071	-0,000080	-0,000066
63,316527	63,316593	0,000066	0,000030	0,000085
64,815877	64,815875	-0,000003	-0,000010	0,000006
65,706091	65,706049	-0,000043	-0,000074	-0,000025
67,505508	67,505491	-0,000017	-0,000027	-0,000008
68,585467	68,585451	-0,000017	-0,000023	-0,000013
70,131828	70,131812	-0,000015	-0,000026	-0,000004
71,015082	71,015161	0,000079	0,000069	0,000084
74,358446	74,358483	0,000036	0,000023	0,000048
77,313104	77,313131	0,000027	0,000007	0,000047
78,077611	78,077595	-0,000015	-0,000033	-0,000006
79,661159	79,661266	0,000107	0,000092	0,000116
92,073679	92,073726	0,000047	0,000037	0,000059
99,702274	99,702300	0,000026	0,000021	0,000029



Anzeigeabweichung in Pos. 12 (Raum (hinten))



(Table with measuring values see next page)



Kalibrierschein-Nr. 8583806950

Seite 10 des Kalibrierscheins vom 20.11.2025

Anzeigeabweichung in Pos. 12 (Raum (hinten)) [value table]

Messlänge L in mm		Abweichungen in mm		
Sollwert	Istwert	Mittelwert	Minimal	Maximal
12,746865	12,746916	0,000051	0,000025	0,000067
14,778534	14,778564	0,000029	0,000007	0,000042
18,724198	18,724257	0,000059	0,000056	0,000061
21,954066	21,954061	-0,000004	-0,000041	0,000020
24,392357	24,392371	0,000014	0,000001	0,000021
28,226899	28,226804	-0,000096	-0,000116	-0,000084
32,989604	32,989587	-0,000017	-0,000029	-0,000011
36,416577	36,416626	0,000048	0,000035	0,000056
38,025553	38,025732	0,000179	0,000170	0,000192
39,620971	39,620918	-0,000054	-0,000065	-0,000045
42,178664	42,178597	-0,000067	-0,000084	-0,000052
43,907074	43,907011	-0,000064	-0,000067	-0,000060
45,801818	45,801864	0,000045	0,000013	0,000064
49,101880	49,101986	0,000107	0,000089	0,000134
50,689617	50,689524	-0,000092	-0,000103	-0,000083
51,753984	51,753978	-0,000006	-0,000020	0,000005
54,678232	54,678357	0,000124	0,000088	0,000148
60,911657	60,911694	0,000037	0,000023	0,000050
63,316527	63,316496	-0,000032	-0,000052	-0,000015
64,815877	64,816103	0,000226	0,000215	0,000237
65,706091	65,706209	0,000118	0,000095	0,000155
67,505508	67,505476	-0,000032	-0,000044	-0,000010
68,585467	68,585629	0,000161	0,000128	0,000184
70,131828	70,131845	0,000017	-0,000018	0,000044
71,015082	71,015243	0,000161	0,000158	0,000163
74,358446	74,358418	-0,000029	-0,000041	-0,000019
77,313104	77,313118	0,000014	0,000008	0,000020
78,077611	78,077664	0,000053	0,000035	0,000072
79,661159	79,661108	-0,000051	-0,000064	-0,000044
92,073679	92,073853	0,000174	0,000138	0,000194
99,702274	99,702311	0,000037	0,000023	0,000052



Kalibrierschein-Nr. 8583806950
Seite 11 des Kalibrierscheins vom 20.11.2025

3.2 Einzeltaster-Formabweichung *PFTU*

Für die Bestimmung der Einzeltaster-Formabweichung wurde folgende Prüfkugel eingesetzt:

Serien-Nr.: F25-nr.04

Kalibrierzeichen: 41846 D-K-15007-01-00 2025-01

Grenzwert **MPE (*PFTU*) : 0,3 μm**

Messergebnis ***PFTU* : 0,171 μm**

Lage des Prüfkörpers: X = 59mm Y = -66mm Z = -61mm

Temperatur des Prüfkörpers in °C: 20,65

Die Messergebnisse wurden mit einem Taster L = 7 mm und $\varnothing$ 0,3 mm ermittelt.



A1.3 Zusammenhang Punkt-zu-Punkt Abweichung optisch vs. taktil

Tabelle A1.1 zeigt die Ergebnisse der Messreihen zur Analyse des Einflusses des Downsampling-Faktors auf die Messzeit und die Punkt-zu-Punkt-Abweichung σ_{P2P} zwischen optischer und taktiler Messung. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die gewählte Downsampling-Strategie der optischen Messung.

Tabelle A1.1: Ergebnisse der Messreihen zur Analyse von Downsampling, Messzeit und Punkt-zu-Punkt-Abweichung.

Messung	Downsampling	Messzeit [min]	σ_{P2P} [μm]
1	2	8,39	3,11
2	2	8,55	2,36
3	2	7,76	3,18
4	2	8,23	2,85
5	2	8,33	2,06
6	2	8,28	2,74
7	2	7,98	3,09
8	4	6,44	2,29
9	4	6,11	2,08
10	4	6,44	2,25
11	4	6,17	2,59
12	4	6,08	2,63
13	4	5,92	1,83
14	4	6,19	2,08
15	8	4,64	1,53
16	8	4,93	1,63
17	8	5,34	1,69
18	8	4,98	1,66
19	8	5,26	1,51
20	8	4,88	1,34
21	8	5,43	1,63

A2 Anhang Körperschallbasierte Vorhersage

A2.1 Statistischer Versuchsplan

Tabelle A2.1 listet die vollständige Kombination der Maschinenparameter Taumel, x-Shift und z-Shift aller 225 im Rahmen des statistischen Versuchsplans (DoE) gefertigten Versuchsbau-
teile.

Tabelle A2.1: Versuchsplan: Kombination der Maschinenparameter.

Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift	Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift
1	9	-0,1	-0,1	113	5	0,05	-0,05
2	9	0,1	-0,1	114	5	-0,1	0,05
3	9	-0,1	0,05	115	5	-0,05	0,1
4	9	0,1	0,05	116	5	0	0
5	9	-0,1	-0,05	117	5	-0,1	0
6	9	-0,1	0,1	118	5	0,1	-0,1
7	9	0	0,05	119	5	-0,1	0
8	9	0,1	0,1	120	5	0	0
9	9	-0,05	-0,1	121	5	0,1	0
10	9	0,1	-0,05	122	5	0,05	-0,05
11	9	0,1	0,05	123	5	0,05	0,1
12	9	0	0,05	124	5	0,1	-0,1
13	9	0	-0,1	125	5	-0,05	0,1
14	9	0,05	0,05	126	5	-0,05	-0,1
15	9	-0,05	0,05	127	5	0	-0,05
16	9	-0,1	-0,05	128	5	-0,05	-0,05
17	9	-0,05	0	129	5	0,05	0,05
18	9	0	0,05	130	5	-0,05	-0,05
19	9	-0,1	0,05	131	5	0	-0,1
20	9	0,05	-0,05	132	5	0,1	0
21	9	0,1	0	133	5	0,05	-0,1
22	9	0	-0,05	134	5	-0,1	-0,05
23	9	0	-0,05	135	5	0	0,1
24	9	-0,05	0,1	136	5	0,1	-0,05
25	9	0	-0,1	137	5	0,05	-0,1
26	9	0,05	0,1	138	5	0,1	0,05
27	9	0	0,1	139	5	0	0
28	9	-0,1	0	140	5	-0,05	-0,1
29	9	0,05	-0,1	141	5	-0,1	0,1

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Teil	Taumenl	x-Shift	z-Shift	Teil	Taumenl	x-Shift	z-Shift
30	9	0,05	0,1	142	5	0,05	0
31	9	0	0,1	143	5	-0,05	0
32	9	0,05	0	144	5	-0,1	0,1
33	9	0,05	0,05	145	5	-0,05	0
34	9	-0,05	0,05	146	5	-0,05	0,05
35	9	0,1	0,1	147	5	0,1	0,1
36	9	-0,05	-0,05	148	5	0,1	-0,05
37	9	-0,1	-0,1	149	5	-0,1	-0,1
38	9	0,05	-0,05	150	5	0,05	0
39	9	-0,1	0,05	151	1	-0,1	0,05
40	9	-0,05	0,1	152	1	0,1	0,05
41	9	0	0	153	1	-0,1	-0,05
42	9	-0,1	0	154	1	-0,1	0,1
43	9	0,1	-0,1	155	1	0	0,05
44	9	-0,1	0	156	1	0,1	0,1
45	9	0	0	157	1	-0,05	-0,1
46	9	0,1	0	158	1	-0,1	-0,1
47	9	0,05	-0,05	159	1	0,1	-0,05
48	9	0,05	0,1	160	1	0,1	0,05
49	9	0,1	-0,1	161	1	0	0,05
50	9	-0,05	0,1	162	1	0	-0,1
51	9	-0,05	-0,1	163	1	0,05	0,05
52	9	0	-0,05	164	1	-0,05	0,05
53	9	-0,05	-0,05	165	1	-0,1	-0,05
54	9	0,05	0,05	166	1	-0,05	0
55	9	-0,05	-0,05	167	1	-0,1	0,05
56	9	0	-0,1	168	1	0	0,05
57	9	0,1	0	169	1	0,05	-0,05
58	9	0,05	-0,1	170	1	0,1	0
59	9	-0,1	-0,05	171	1	0	-0,05
60	9	0	0,1	172	1	0	-0,05
61	9	0,1	-0,05	173	1	-0,05	0,1
62	9	0,05	-0,1	174	1	0	-0,1
63	9	0,1	0,05	175	1	0,05	0,1
64	9	0	0	176	1	0	0,1
65	9	-0,05	-0,1	177	1	-0,1	0
66	9	-0,1	0,1	178	1	0,05	-0,1
67	9	0,05	0	179	1	0,05	0,1

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift	Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift
68	9	-0,05	0	180	1	0	0,1
69	9	-0,1	0,1	181	1	0,05	0
70	9	-0,05	0	182	1	0,05	0,05
71	9	-0,05	0,05	183	1	-0,05	0,05
72	9	0,1	0,1	184	1	0,1	0,1
73	9	0,1	-0,05	185	1	-0,05	-0,05
74	9	-0,1	-0,1	186	1	0,1	-0,1
75	9	0,05	0	187	1	-0,1	-0,1
76	5	-0,1	0,05	188	1	0,05	-0,05
77	5	0,1	0,05	189	1	-0,1	0,05
78	5	-0,1	-0,05	190	1	-0,05	0,1
79	5	-0,1	0,1	191	1	0	0
80	5	0	0,05	192	1	-0,1	0
81	5	0,1	0,1	193	1	0,1	-0,1
82	5	-0,05	-0,1	194	1	-0,1	0
83	5	-0,1	-0,1	195	1	0	0
84	5	0,1	-0,05	196	1	0,1	0
85	5	0,1	0,05	197	1	0,05	-0,05
86	5	0	0,05	198	1	0,05	0,1
87	5	0	-0,1	199	1	0,1	-0,1
88	5	0,05	0,05	200	1	-0,05	0,1
89	5	-0,05	0,05	201	1	-0,05	-0,1
90	5	-0,1	-0,05	202	1	0	-0,05
91	5	-0,05	0	203	1	-0,05	-0,05
92	5	-0,1	0,05	204	1	0,05	0,05
93	5	0	0,05	205	1	-0,05	-0,05
94	5	0,05	-0,05	206	1	0	-0,1
95	5	0,1	0	207	1	0,1	0
96	5	0	-0,05	208	1	0,05	-0,1
97	5	0	-0,05	209	1	-0,1	-0,05
98	5	-0,05	0,1	210	1	0	0,1
99	5	0	-0,1	211	1	0,1	-0,05
100	5	0,05	0,1	212	1	0,05	-0,1
101	5	0	0,1	213	1	0,1	0,05
102	5	-0,1	0	214	1	0	0
103	5	0,05	-0,1	215	1	-0,05	-0,1
104	5	0,05	0,1	216	1	-0,1	0,1
105	5	0	0,1	217	1	0,05	0

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift	Teil	Taumel	x-Shift	z-Shift
106	5	0,05	0	218	1	-0,05	0
107	5	0,05	0,05	219	1	-0,1	0,1
108	5	-0,05	0,05	220	1	-0,05	0
109	5	0,1	0,1	221	1	-0,05	0,05
110	5	-0,05	-0,05	222	1	0,1	0,1
111	5	0,1	-0,1	223	1	0,1	-0,05
112	5	-0,1	-0,1	224	1	-0,1	-0,1
				225	1	0,05	0

A2.2 Qualitätsdaten der 225 Versuchsteile

Tabelle A2.2 enthält die gemittelten Qualitätskennwerte der optisch erfassten Messungen aller 225 untersuchten DoE-Versuchsbauteile. Die Werte dienen als Labeldaten für die Modellentwicklung und Unsicherheitsanalyse.

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile.

Qass-Nr.	F_α [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_β [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
1	0,0064	0,0034	0,0059	0,0034	0,0007	-0,0025	-0,0687	0,0539	-0,0045
2	0,0064	0,0037	0,0057	0,0038	0,0007	-0,0023	-0,0668	-0,1277	0,0680
3	0,0048	0,0030	-0,0027	0,0037	0,0007	0,0037	0,0415	-0,0101	-0,0059
4	0,0053	0,0034	-0,0033	0,0048	0,0009	0,0037	0,0405	-0,1789	0,0553
5	0,0063	0,0036	0,0046	0,0031	0,0008	-0,0017	-0,0461	-0,0206	0,0052
6	0,0065	0,0033	-0,0054	0,0059	0,0010	0,0061	0,0798	-0,0028	-0,0308
7	0,0054	0,0035	-0,0031	0,0038	0,0009	0,0031	0,0392	-0,0822	0,0133
8	0,0065	0,0032	-0,0046	0,0065	0,0011	0,0058	0,0837	-0,1557	0,0797
9	0,0060	0,0034	0,0053	0,0032	0,0007	-0,0024	-0,0669	0,0040	0,0089
10	0,0055	0,0033	0,0039	0,0037	0,0007	-0,0013	-0,0486	-0,1125	0,0762
11	0,0053	0,0032	-0,0034	0,0046	0,0008	0,0031	0,0361	-0,1423	0,0544
12	0,0052	0,0032	-0,0036	0,0038	0,0007	0,0034	0,0386	-0,1248	0,0183
13	0,0060	0,0032	0,0053	0,0031	0,0008	-0,0023	-0,0661	-0,0561	0,0068
14	0,0052	0,0034	-0,0017	0,0049	0,0009	0,0041	0,0411	-0,2613	0,0316
15	0,0054	0,0032	-0,0038	0,0036	0,0007	0,0035	0,0412	-0,0352	0,0043
16	0,0057	0,0031	0,0044	0,0027	0,0007	-0,0011	-0,0459	0,0240	0,0036
17	0,0052	0,0034	0,0007	0,0028	0,0006	0,0008	-0,0074	-0,0432	0,0025
18	0,0049	0,0030	-0,0028	0,0033	0,0006	0,0030	0,0312	-0,0940	0,0053
19	0,0046	0,0030	-0,0021	0,0032	0,0007	0,0028	0,0310	0,0009	-0,0074
20	0,0052	0,0029	0,0042	0,0031	0,0006	-0,0019	-0,0565	-0,1092	0,0499
21	0,0054	0,0035	0,0016	0,0038	0,0007	-0,0002	-0,0178	-0,1879	0,0649
22	0,0061	0,0035	0,0051	0,0030	0,0007	-0,0019	-0,0557	-0,1142	0,0247
23	0,0058	0,0031	0,0049	0,0029	0,0007	-0,0017	-0,0554	-0,0964	0,0231
24	0,0055	0,0030	-0,0044	0,0052	0,0008	0,0053	0,0759	-0,0191	-0,0075

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile (Fortsetzung).

Qass-Nr.	F_{α} [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_{β} [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
25	0,0061	0,0034	0,0053	0,0032	0,0007	-0,0025	-0,0670	-0,0377	0,0246
26	0,0059	0,0030	-0,0050	0,0053	0,0008	0,0052	0,0751	-0,0987	0,0365
27	0,0067	0,0037	-0,0055	0,0056	0,0009	0,0057	0,0773	-0,0820	0,0115
28	0,0047	0,0030	0,0011	0,0026	0,0005	0,0007	-0,0102	-0,0293	-0,0161
29	0,0057	0,0031	0,0052	0,0032	0,0006	-0,0023	-0,0675	-0,0151	0,0409
30	0,0056	0,0029	-0,0047	0,0053	0,0008	0,0053	0,0765	-0,0545	0,0256
31	0,0064	0,0031	-0,0057	0,0052	0,0009	0,0052	0,0796	-0,0272	0,0139
32	0,0049	0,0031	0,0009	0,0030	0,0006	0,0002	-0,0124	-0,0985	0,0332
33	0,0053	0,0030	-0,0036	0,0038	0,0007	0,0030	0,0419	-0,0900	0,0395
34	0,0054	0,0030	-0,0035	0,0028	0,0006	0,0024	0,0335	-0,0324	-0,0037
35	0,0061	0,0028	-0,0056	0,0053	0,0008	0,0052	0,0782	-0,1732	0,0680
36	0,0052	0,0028	0,0041	0,0027	0,0006	-0,0017	-0,0520	0,0036	0,0019
37	0,0053	0,0029	0,0046	0,0033	0,0006	-0,0025	-0,0673	0,0381	-0,0037
38	0,0055	0,0033	0,0040	0,0031	0,0006	-0,0018	-0,0476	-0,0479	0,0416
39	0,0054	0,0032	-0,0039	0,0032	0,0007	0,0030	0,0407	-0,0250	-0,0037
40	0,0062	0,0027	-0,0058	0,0052	0,0008	0,0053	0,0772	-0,0018	-0,0048
41	0,0052	0,0033	0,0009	0,0030	0,0006	0,0002	-0,0120	-0,0802	0,0183
42	0,0051	0,0033	0,0014	0,0027	0,0006	0,0002	-0,0125	0,0243	-0,0083
43	0,0053	0,0030	0,0046	0,0034	0,0006	-0,0025	-0,0664	-0,0770	0,0558
44	0,0052	0,0034	0,0017	0,0027	0,0006	0,0003	-0,0157	-0,0227	-0,0120
45	0,0049	0,0032	0,0008	0,0027	0,0005	0,0002	-0,0135	-0,1072	0,0101
46	0,0050	0,0033	0,0010	0,0037	0,0007	0,0002	-0,0143	-0,1484	0,0554
47	0,0055	0,0032	0,0047	0,0031	0,0006	-0,0021	-0,0578	-0,0083	0,0438
48	0,0058	0,0028	-0,0050	0,0049	0,0008	0,0049	0,0741	-0,0986	0,0314
49	0,0052	0,0030	0,0045	0,0035	0,0006	-0,0025	-0,0678	-0,0253	0,0541
50	0,0055	0,0028	-0,0044	0,0050	0,0008	0,0050	0,0727	0,0167	-0,0086
51	0,0056	0,0030	0,0053	0,0030	0,0006	-0,0024	-0,0677	0,0646	0,0038
52	0,0051	0,0028	0,0044	0,0028	0,0005	-0,0019	-0,0569	-0,0914	0,0232
53	0,0052	0,0028	0,0045	0,0028	0,0005	-0,0020	-0,0561	0,0171	0,0039
54	0,0050	0,0032	-0,0027	0,0038	0,0007	0,0028	0,0343	-0,1214	0,0318
55	0,0051	0,0029	0,0037	0,0027	0,0005	-0,0017	-0,0500	0,0104	0,0041
56	0,0055	0,0030	0,0049	0,0030	0,0005	-0,0026	-0,0679	-0,0123	0,0181
57	0,0052	0,0034	0,0011	0,0038	0,0007	0,0004	-0,0133	-0,1464	0,0522
58	0,0051	0,0028	0,0047	0,0032	0,0005	-0,0024	-0,0675	-0,0130	0,0478
59	0,0052	0,0029	0,0041	0,0030	0,0005	-0,0020	-0,0542	0,0405	-0,0031
60	0,0060	0,0027	-0,0054	0,0053	0,0008	0,0054	0,0781	-0,0549	0,0062
61	0,0058	0,0032	0,0047	0,0035	0,0007	-0,0020	-0,0565	-0,1033	0,0628
62	0,0056	0,0030	0,0050	0,0032	0,0006	-0,0024	-0,0674	-0,0188	0,0293
63	0,0058	0,0039	0,0022	0,0029	0,0008	-0,0002	-0,0166	-0,0584	0,0188
64	0,0047	0,0030	-0,0021	0,0041	0,0006	0,0023	0,0283	-0,1598	0,0635
65	0,0055	0,0029	0,0049	0,0030	0,0005	-0,0024	-0,0673	0,0463	0,0042
66	0,0056	0,0029	-0,0045	0,0053	0,0009	0,0053	0,0749	0,0864	-0,0397
67	0,0052	0,0032	0,0014	0,0032	0,0007	-0,0001	-0,0138	-0,0706	0,0345
68	0,0051	0,0034	0,0010	0,0026	0,0006	0,0005	-0,0057	-0,0767	0,0045

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile (Fortsetzung).

Qass-Nr.	F_{α} [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_{β} [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
69	0,0059	0,0025	-0,0053	0,0057	0,0008	0,0059	0,0842	-0,0074	-0,0306
70	0,0050	0,0032	0,0014	0,0026	0,0006	0,0002	-0,0114	-0,0074	0,0030
71	0,0045	0,0032	-0,0016	0,0030	0,0008	0,0026	0,0320	-0,0078	0,0039
72	0,0059	0,0029	-0,0051	0,0055	0,0009	0,0054	0,0775	-0,1005	0,0629
73	0,0056	0,0031	0,0048	0,0035	0,0007	-0,0022	-0,0562	-0,0320	0,0716
74	0,0058	0,0031	0,0051	0,0035	0,0006	-0,0026	-0,0679	0,0435	-0,0054
75	0,0049	0,0032	0,0016	0,0029	0,0006	0,0003	-0,0124	-0,1119	0,0346
76	0,0052	0,0034	-0,0028	0,0028	0,0008	0,0016	0,0217	0,0226	0,0067
77	0,0053	0,0039	-0,0022	0,0041	0,0010	0,0021	0,0199	-0,1790	0,0345
78	0,0047	0,0025	0,0024	0,0036	0,0006	-0,0033	-0,0675	0,0192	-0,0058
79	0,0055	0,0034	-0,0032	0,0053	0,0010	0,0054	0,0673	0,0425	-0,0414
80	0,0047	0,0032	-0,0026	0,0025	0,0007	0,0017	0,0182	-0,0359	0,0111
81	0,0057	0,0037	-0,0035	0,0052	0,0011	0,0048	0,0617	-0,1753	0,0106
82	0,0051	0,0029	0,0031	0,0036	0,0007	-0,0032	-0,0686	-0,0107	0,0024
83	0,0053	0,0031	0,0023	0,0042	0,0008	-0,0038	-0,0658	0,1102	0,0050
84	0,0047	0,0028	0,0022	0,0044	0,0007	-0,0033	-0,0632	-0,0754	0,0514
85	0,0047	0,0032	-0,0025	0,0038	0,0007	0,0019	0,0247	-0,1683	0,0531
86	0,0052	0,0035	-0,0022	0,0026	0,0008	0,0013	0,0152	-0,0161	0,0107
87	0,0050	0,0029	0,0028	0,0040	0,0007	-0,0035	-0,0681	-0,0422	0,0195
88	0,0051	0,0033	-0,0029	0,0028	0,0007	0,0012	0,0165	-0,1144	0,0249
89	0,0050	0,0033	-0,0030	0,0028	0,0007	0,0022	0,0240	-0,0096	0,0067
90	0,0047	0,0027	0,0026	0,0039	0,0007	-0,0037	-0,0677	0,0152	-0,0059
91	0,0046	0,0032	-0,0001	0,0023	0,0006	-0,0012	-0,0207	-0,0235	0,0071
92	0,0051	0,0033	-0,0025	0,0027	0,0008	0,0009	0,0179	0,0358	-0,0062
93	0,0052	0,0031	-0,0032	0,0031	0,0009	0,0022	0,0259	-0,0178	0,0104
94	0,0047	0,0027	0,0025	0,0039	0,0006	-0,0033	-0,0684	-0,0439	0,0146
95	0,0048	0,0033	0,0001	0,0039	0,0007	-0,0012	-0,0218	-0,1197	0,0566
96	0,0049	0,0028	0,0024	0,0037	0,0006	-0,0033	-0,0659	-0,0027	0,0147
97	0,0050	0,0029	0,0025	0,0037	0,0007	-0,0033	-0,0638	-0,0500	0,0049
98	0,0061	0,0037	-0,0043	0,0049	0,0010	0,0048	0,0692	-0,0567	-0,0078
99	0,0047	0,0026	0,0024	0,0040	0,0007	-0,0036	-0,0681	-0,0511	0,0162
100	0,0054	0,0031	-0,0038	0,0049	0,0009	0,0047	0,0699	-0,0716	0,0146
101	0,0060	0,0036	-0,0042	0,0049	0,0011	0,0048	0,0700	-0,0445	0,0066
102	0,0043	0,0030	-0,0005	0,0021	0,0006	-0,0011	-0,0182	0,0813	-0,0049
103	0,0046	0,0027	0,0025	0,0042	0,0007	-0,0035	-0,0669	-0,0477	0,0374
104	0,0059	0,0031	-0,0048	0,0049	0,0010	0,0049	0,0681	-0,1286	0,0117
105	0,0061	0,0033	-0,0048	0,0051	0,0010	0,0051	0,0682	-0,0194	-0,0029
106	0,0043	0,0030	-0,0005	0,0031	0,0006	-0,0013	-0,0196	-0,0865	0,0414
107	0,0052	0,0030	-0,0038	0,0030	0,0007	0,0018	0,0234	-0,0544	0,0369
108	0,0049	0,0029	-0,0035	0,0023	0,0007	0,0016	0,0254	0,0594	0,0047
109	0,0058	0,0032	-0,0045	0,0050	0,0010	0,0046	0,0677	-0,1489	0,0391
110	0,0045	0,0024	0,0016	0,0040	0,0006	-0,0038	-0,0625	-0,0274	0,0045
111	0,0042	0,0022	0,0020	0,0047	0,0006	-0,0033	-0,0673	-0,1243	0,0623
112	0,0046	0,0024	0,0021	0,0038	0,0006	-0,0035	-0,0658	0,0642	-0,0042

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile (Fortsetzung).

Qass-Nr.	F_{α} [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_{β} [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
113	0,0043	0,0024	0,0021	0,0040	0,0005	-0,0032	-0,0644	-0,1249	0,0301
114	0,0049	0,0028	-0,0037	0,0025	0,0006	0,0017	0,0245	0,0576	-0,0019
115	0,0062	0,0036	-0,0047	0,0052	0,0010	0,0052	0,0674	0,0294	-0,0153
116	0,0042	0,0029	0,0001	0,0023	0,0006	-0,0010	-0,0210	-0,0415	0,0188
117	0,0055	0,0037	-0,0005	0,0031	0,0010	-0,0005	-0,0177	-0,0032	-0,0076
118	0,0045	0,0026	0,0018	0,0047	0,0008	-0,0032	-0,0654	-0,1173	0,0347
119	0,0045	0,0027	-0,0015	0,0023	0,0005	-0,0008	-0,0194	0,0201	-0,0026
120	0,0042	0,0025	-0,0001	0,0029	0,0006	-0,0008	-0,0224	-0,0193	0,0216
121	0,0055	0,0038	0,0010	0,0031	0,0008	0,0003	-0,0173	0,1182	0,0127
122	0,0037	0,0018	0,0015	0,0040	0,0005	-0,0032	-0,0660	-0,1304	0,0415
123	0,0059	0,0029	-0,0053	0,0052	0,0009	0,0052	0,0687	-0,0710	0,0150
124	0,0048	0,0030	0,0019	0,0050	0,0007	-0,0038	-0,0666	-0,0774	0,0486
125	0,0066	0,0041	-0,0042	0,0050	0,0013	0,0047	0,0619	-0,0094	-0,0259
126	0,0040	0,0022	0,0016	0,0034	0,0006	-0,0031	-0,0664	-0,0014	0,0013
127	0,0039	0,0022	0,0015	0,0036	0,0005	-0,0032	-0,0674	-0,0510	0,0153
128	0,0040	0,0021	0,0015	0,0036	0,0005	-0,0035	-0,0656	-0,0937	-0,0036
129	0,0058	0,0039	-0,0022	0,0035	0,0010	0,0018	0,0266	-0,1109	0,0252
130	0,0040	0,0022	0,0018	0,0032	0,0005	-0,0030	-0,0660	-0,0231	-0,0045
131	0,0055	0,0040	-0,0007	0,0052	0,0016	-0,0012	-0,0873	0,1117	0,0059
132	0,0043	0,0028	-0,0010	0,0036	0,0006	-0,0010	-0,0245	-0,0523	0,0501
133	0,0046	0,0030	0,0019	0,0046	0,0009	-0,0026	-0,0645	-0,1117	0,0223
134	0,0054	0,0030	-0,0042	0,0025	0,0007	0,0017	0,0183	0,0817	-0,0033
135	0,0068	0,0038	-0,0054	0,0051	0,0011	0,0050	0,0633	-0,0555	0,0066
136	0,0040	0,0021	0,0012	0,0046	0,0006	-0,0033	-0,0633	-0,1205	0,0660
137	0,0047	0,0027	0,0010	0,0042	0,0007	-0,0027	-0,0664	-0,0452	0,0319
138	0,0049	0,0030	-0,0030	0,0038	0,0008	0,0014	0,0189	-0,1710	0,0581
139	0,0041	0,0024	-0,0013	0,0024	0,0004	-0,0010	-0,0186	-0,0326	0,0271
140	0,0041	0,0021	0,0019	0,0033	0,0005	-0,0031	-0,0671	-0,0290	0,0022
141	0,0058	0,0029	-0,0050	0,0051	0,0008	0,0052	0,0634	0,0652	-0,0348
142	0,0046	0,0030	-0,0008	0,0034	0,0008	-0,0012	-0,0178	-0,0649	0,0377
143	0,0048	0,0032	-0,0006	0,0029	0,0007	-0,0015	-0,0270	0,0260	0,0034
144	0,0062	0,0036	-0,0047	0,0051	0,0011	0,0051	0,0693	0,0803	-0,0228
145	0,0038	0,0024	-0,0003	0,0021	0,0005	-0,0012	-0,0258	0,0481	0,0048
146	0,0054	0,0032	-0,0037	0,0029	0,0009	0,0025	0,0260	-0,0106	0,0081
147	0,0060	0,0039	-0,0040	0,0058	0,0010	0,0055	0,0660	-0,1027	0,0339
148	0,0039	0,0023	0,0010	0,0045	0,0006	-0,0031	-0,0663	-0,1434	0,0500
149	0,0040	0,0021	0,0017	0,0033	0,0006	-0,0030	-0,0651	0,0003	-0,0027
150	0,0058	0,0040	-0,0002	0,0055	0,0017	0,0023	-0,0229	-0,2430	0,0236
151	0,0055	0,0036	-0,0008	0,0035	0,0007	0,0026	0,0195	-0,0184	0,0045
152	0,0055	0,0036	-0,0011	0,0044	0,0009	0,0027	0,0205	-0,1860	0,0590
153	0,0073	0,0036	0,0056	0,0033	0,0008	-0,0021	-0,0673	-0,0318	0,0054
154	0,0068	0,0046	-0,0039	0,0057	0,0011	0,0053	0,0570	0,0519	-0,0144
155	0,0057	0,0039	-0,0012	0,0037	0,0009	0,0028	0,0194	-0,0052	0,0194
156	0,0082	0,0056	-0,0054	0,0070	0,0017	0,0064	0,0648	-0,1151	0,0206

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile (Fortsetzung).

Qass-Nr.	F_{α} [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_{β} [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
157	0,0069	0,0034	0,0056	0,0032	0,0008	-0,0025	-0,0678	-0,0102	0,0078
158	0,0078	0,0041	0,0060	0,0036	0,0009	-0,0023	-0,0679	0,1232	0,0060
159	0,0072	0,0037	0,0057	0,0042	0,0010	-0,0022	-0,0681	-0,0670	0,0442
160	0,0059	0,0044	-0,0001	0,0042	0,0011	0,0020	0,0100	-0,1183	0,0534
161	0,0060	0,0042	-0,0004	0,0034	0,0009	0,0022	0,0129	-0,0365	0,0104
162	0,0068	0,0034	0,0057	0,0030	0,0007	-0,0022	-0,0673	-0,0124	0,0193
163	0,0058	0,0042	0,0001	0,0036	0,0011	0,0020	0,0112	-0,1592	0,0367
164	0,0061	0,0048	0,0000	0,0037	0,0012	0,0021	0,0132	-0,0369	0,0100
165	0,0073	0,0035	0,0055	0,0033	0,0008	-0,0023	-0,0664	0,0290	0,0077
166	0,0066	0,0040	0,0027	0,0029	0,0008	-0,0003	-0,0225	-0,0080	0,0104
167	0,0058	0,0041	-0,0002	0,0032	0,0009	0,0020	0,0113	0,0609	0,0049
168	0,0061	0,0043	-0,0004	0,0037	0,0011	0,0016	0,0114	-0,0937	0,0328
169	0,0074	0,0039	0,0059	0,0036	0,0009	-0,0026	-0,0681	-0,0382	0,0338
170	0,0069	0,0046	0,0028	0,0043	0,0011	0,0001	-0,0255	-0,0095	0,0322
171	0,0073	0,0036	0,0056	0,0034	0,0009	-0,0025	-0,0683	-0,0611	0,0159
172	0,0070	0,0035	0,0053	0,0033	0,0008	-0,0020	-0,0664	0,0344	0,0337
173	0,0068	0,0045	-0,0037	0,0051	0,0011	0,0047	0,0582	-0,0145	-0,0074
174	0,0067	0,0034	0,0055	0,0032	0,0008	-0,0023	-0,0673	-0,0599	0,0172
175	0,0071	0,0049	-0,0039	0,0057	0,0014	0,0054	0,0552	-0,1323	0,0088
176	0,0074	0,0049	-0,0041	0,0064	0,0015	0,0061	0,0635	0,2580	0,0149
177	0,0070	0,0042	0,0036	0,0030	0,0010	-0,0004	-0,0319	0,0309	-0,0110
178	0,0071	0,0038	0,0056	0,0036	0,0010	-0,0021	-0,0677	-0,0341	0,0406
179	0,0073	0,0049	-0,0043	0,0057	0,0015	0,0053	0,0626	-0,0416	0,0151
180	0,0071	0,0046	-0,0043	0,0059	0,0013	0,0058	0,0646	-0,0372	0,0096
181	0,0069	0,0043	0,0031	0,0036	0,0009	-0,0001	-0,0257	-0,1034	0,0302
182	0,0062	0,0044	-0,0009	0,0041	0,0011	0,0026	0,0192	-0,1668	0,0340
183	0,0059	0,0042	-0,0007	0,0035	0,0010	0,0025	0,0176	0,0081	0,0132
184	0,0065	0,0042	-0,0039	0,0056	0,0012	0,0054	0,0642	-0,1560	0,0243
185	0,0072	0,0035	0,0055	0,0032	0,0008	-0,0027	-0,0668	0,0991	0,0104
186	0,0072	0,0035	0,0059	0,0042	0,0009	-0,0025	-0,0687	-0,0590	0,0483
187	0,0073	0,0037	0,0057	0,0034	0,0010	-0,0024	-0,0674	0,0639	0,0050
188	0,0072	0,0036	0,0058	0,0039	0,0009	-0,0026	-0,0666	-0,0398	0,0372
189	0,0062	0,0045	-0,0005	0,0038	0,0011	0,0026	0,0115	0,0294	0,0068
190	0,0069	0,0049	-0,0036	0,0053	0,0013	0,0049	0,0550	-0,0178	-0,0070
191	0,0064	0,0038	0,0031	0,0030	0,0008	0,0002	-0,0241	-0,0459	0,0183
192	0,0064	0,0038	0,0035	0,0027	0,0007	-0,0002	-0,0304	0,1144	0,0066
193	0,0068	0,0034	0,0053	0,0042	0,0009	-0,0024	-0,0673	-0,0012	0,0632
194	0,0067	0,0040	0,0034	0,0025	0,0008	-0,0003	-0,0300	-0,0129	0,0052
195	0,0064	0,0036	0,0029	0,0032	0,0008	-0,0001	-0,0265	-0,1444	0,0168
196	0,0067	0,0040	0,0037	0,0038	0,0009	-0,0006	-0,0296	-0,1225	0,0490
197	0,0068	0,0034	0,0055	0,0037	0,0008	-0,0023	-0,0653	-0,0863	0,0431
198	0,0058	0,0045	-0,0006	0,0064	0,0011	0,0062	0,0530	-0,3805	0,0128
199	0,0067	0,0034	0,0056	0,0044	0,0008	-0,0019	-0,0622	0,1823	0,0719
200	0,0074	0,0050	-0,0036	0,0061	0,0015	0,0051	0,0554	-0,0225	-0,0121

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A2.2: Gemittelte Qualitätskennwerte der untersuchten DoE-Versuchsbauteile (Fortsetzung).

Qass-Nr.	F_{α} [mm]	$f_{f\alpha}$ [mm]	$f_{H\alpha}$ [mm]	F_{β} [mm]	$f_{f\beta}$ [mm]	$f_{H\beta}$ [mm]	Δt [mm]	F_p [°]	r_e [mm]
201	0,0071	0,0034	0,0057	0,0031	0,0008	-0,0026	-0,0674	0,0516	0,0071
202	0,0071	0,0034	0,0059	0,0030	0,0007	-0,0021	-0,0679	0,0811	0,0184
203	0,0070	0,0035	0,0056	0,0029	0,0007	-0,0020	-0,0670	0,0309	0,0050
204	0,0060	0,0043	0,0000	0,0038	0,0010	0,0021	0,0104	-0,1145	0,0319
205	0,0070	0,0034	0,0059	0,0031	0,0008	-0,0024	-0,0684	-0,0416	0,0103
206	0,0066	0,0031	0,0055	0,0031	0,0008	-0,0022	-0,0677	0,0069	0,0253
207	0,0067	0,0042	0,0029	0,0045	0,0010	0,0002	-0,0254	-0,1470	0,0603
208	0,0071	0,0036	0,0056	0,0036	0,0008	-0,0023	-0,0678	-0,0053	0,0265
209	0,0074	0,0036	0,0058	0,0032	0,0009	-0,0021	-0,0670	0,0592	0,0067
210	0,0066	0,0047	-0,0032	0,0053	0,0012	0,0048	0,0592	0,0001	0,0092
211	0,0069	0,0035	0,0052	0,0042	0,0008	-0,0023	-0,0676	-0,0258	0,0616
212	0,0070	0,0034	0,0058	0,0037	0,0010	-0,0018	-0,0679	0,0242	0,0279
213	0,0057	0,0041	0,0000	0,0041	0,0011	0,0019	0,0114	-0,1633	0,0550
214	0,0072	0,0044	0,0040	0,0033	0,0010	-0,0007	-0,0363	0,0486	0,0100
215	0,0072	0,0038	0,0055	0,0031	0,0009	-0,0022	-0,0679	0,1487	0,0113
216	0,0067	0,0047	-0,0031	0,0056	0,0012	0,0048	0,0559	0,0044	-0,0154
217	0,0068	0,0041	0,0035	0,0036	0,0010	-0,0006	-0,0328	-0,0084	0,0349
218	0,0077	0,0050	0,0036	0,0035	0,0012	-0,0004	-0,0327	0,0117	0,0095
219	0,0062	0,0041	-0,0030	0,0053	0,0011	0,0048	0,0552	0,0252	-0,0190
220	0,0067	0,0038	0,0040	0,0027	0,0008	-0,0008	-0,0343	-0,0446	0,0092
221	0,0067	0,0048	-0,0004	0,0041	0,0013	0,0030	0,0179	-0,0990	0,0078
222	0,0066	0,0043	-0,0041	0,0058	0,0012	0,0053	0,0618	-0,1352	0,0565
223	0,0072	0,0037	0,0059	0,0044	0,0009	-0,0026	-0,0666	-0,0304	0,0580
224	0,0077	0,0044	0,0051	0,0036	0,0011	-0,0023	-0,0671	0,0299	0,0070
225	0,0074	0,0048	0,0027	0,0038	0,0011	-0,0007	-0,0293	-0,0428	0,0242

A2.3 Ausführliche Modelldaten

A2.3.1 Gesamttabelle Modelle

Im Folgenden ist die ganzheitliche Auswertung der Modelle aufgeführt, die auf Basis von Körperschallmerkmalen sowohl Maschinenparameter, als auch resultierende Qualitätsabweichungen der Bauteile vorhersagen:

Tabelle A2.3: Modell- und Feature-Selektionskombinationen zur Prädiktion der Prozessparameter.

Modell	Merkmal	Selektion	CV-R ²	Test-R ²	RMSE	MAE	Einheit
Maschinenparameter							
Linear Regression	Taumel	All	0,993	0,995	0,225	0,184	[μm]
Random Forest	Taumel	All	0,989	0,994	0,249	0,103	[μm]
SVR	Taumel	All	0,925	0,938	0,769	0,522	[μm]
Linear Regression	Taumel	PCA	0,955	0,994	0,231	0,191	[μm]
Random Forest	Taumel	PCA	0,859	0,926	0,841	0,483	[μm]
SVR	Taumel	PCA	0,048	0,364	2,461	2,131	[μm]
Linear Regression	Taumel	F-reg	0,995	0,997	0,173	0,130	[μm]
Random Forest	Taumel	F-reg	0,993	0,997	0,156	0,072	[μm]
SVR	Taumel	F-reg	0,953	0,965	0,577	0,391	[μm]
Linear Regression	Δx	All	-0,170	-0,231	0,080	0,066	[mm]
Random Forest	Δx	All	-0,017	-0,105	0,075	0,065	[mm]
SVR	Δx	All	-0,014	-0,015	0,072	0,062	[mm]
Linear Regression	Δx	PCA	-10,743	-0,148	0,077	0,063	[mm]
Random Forest	Δx	PCA	-0,018	-0,031	0,073	0,063	[mm]
SVR	Δx	PCA	-0,014	-0,015	0,072	0,062	[mm]
Linear Regression	Δx	F-reg	0,244	-0,052	0,074	0,058	[mm]
Random Forest	Δx	F-reg	0,016	-0,138	0,077	0,063	[mm]
SVR	Δx	F-reg	-0,014	-0,015	0,072	0,062	[mm]
Linear Regression	Δz	All	0,930	0,883	0,024	0,016	[mm]
Random Forest	Δz	All	0,881	0,820	0,030	0,022	[mm]
SVR	Δz	All	-0,063	-0,064	0,072	0,062	[mm]
Linear Regression	Δz	PCA	0,798	0,882	0,024	0,016	[mm]
Random Forest	Δz	PCA	0,490	0,621	0,043	0,036	[mm]

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Modell	Merkmal	Selektion	CV-R ²	Test-R ²	RMSE	MAE	Einheit
SVR	Δz	PCA	−0,063	−0,064	0,072	0,062	[mm]
Linear Regression	Δz	F-reg	0,968	0,924	0,019	0,012	[mm]
Random Forest	Δz	F-reg	0,902	0,850	0,027	0,019	[mm]
SVR	Δz	F-reg	−0,063	−0,064	0,072	0,062	[mm]
Profilmerkmale							
Linear Regression	F_α	All	0,579	0,603	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	F_α	All	0,644	0,667	0,001	0,000	[mm]
SVR	F_α	All	−0,009	0,000	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	F_α	PCA	−4,661	0,611	0,001	0,000	[mm]
Random Forest	F_α	PCA	0,597	0,658	0,001	0,000	[mm]
SVR	F_α	PCA	−0,009	0,000	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	F_α	F-reg	0,570	0,558	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	F_α	F-reg	0,651	0,671	0,001	0,000	[mm]
SVR	F_α	F-reg	−0,009	0,000	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	$f_{f\alpha}$	All	0,644	0,658	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\alpha}$	All	0,589	0,650	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\alpha}$	All	−0,032	−0,005	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	$f_{f\alpha}$	PCA	−2,892	0,663	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\alpha}$	PCA	0,541	0,587	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\alpha}$	PCA	−0,032	−0,005	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	$f_{f\alpha}$	F-reg	0,679	0,636	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\alpha}$	F-reg	0,597	0,670	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\alpha}$	F-reg	−0,032	−0,005	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	$f_{H\alpha}$	All	0,826	0,774	0,002	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\alpha}$	All	0,889	0,872	0,001	0,001	[mm]
SVR	$f_{H\alpha}$	All	−0,051	−0,079	0,004	0,003	[mm]
Linear Regression	$f_{H\alpha}$	PCA	−0,140	0,763	0,002	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\alpha}$	PCA	0,492	0,622	0,002	0,002	[mm]
SVR	$f_{H\alpha}$	PCA	−0,051	−0,079	0,004	0,003	[mm]
Linear Regression	$f_{H\alpha}$	F-reg	0,849	0,854	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\alpha}$	F-reg	0,903	0,886	0,001	0,001	[mm]
SVR	$f_{H\alpha}$	F-reg	−0,051	−0,079	0,004	0,003	[mm]

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Modell	Merkmal	Selektion	CV-R ²	Test-R ²	RMSE	MAE	Einheit
Flankenmerkmale							
Linear Regression	F_β	All	0,221	0,008	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	F_β	All	0,468	0,484	0,001	0,001	[mm]
SVR	F_β	All	−0,240	−0,093	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	F_β	PCA	−4,485	0,034	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	F_β	PCA	0,139	−0,077	0,001	0,001	[mm]
SVR	F_β	PCA	−0,240	−0,093	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	F_β	F-reg	−1,162	−0,930	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	F_β	F-reg	0,528	0,511	0,001	0,001	[mm]
SVR	F_β	F-reg	−0,240	−0,093	0,001	0,001	[mm]
Linear Regression	$f_{f\beta}$	All	0,539	0,318	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\beta}$	All	0,453	0,395	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\beta}$	All	−1,321	−0,932	0,000	0,000	[mm]
Linear Regression	$f_{f\beta}$	PCA	−3,589	0,304	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\beta}$	PCA	0,327	0,280	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\beta}$	PCA	−1,321	−0,932	0,000	0,000	[mm]
Linear Regression	$f_{f\beta}$	F-reg	0,500	0,334	0,000	0,000	[mm]
Random Forest	$f_{f\beta}$	F-reg	0,488	0,375	0,000	0,000	[mm]
SVR	$f_{f\beta}$	F-reg	−1,321	−0,932	0,000	0,000	[mm]
Linear Regression	$f_{H\beta}$	All	0,830	0,783	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\beta}$	All	0,866	0,850	0,001	0,001	[mm]
SVR	$f_{H\beta}$	All	−0,066	−0,217	0,003	0,003	[mm]
Linear Regression	$f_{H\beta}$	PCA	−0,096	0,768	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\beta}$	PCA	0,454	0,579	0,002	0,002	[mm]
SVR	$f_{H\beta}$	PCA	−0,066	−0,217	0,003	0,003	[mm]
Linear Regression	$f_{H\beta}$	F-reg	0,887	0,770	0,001	0,001	[mm]
Random Forest	$f_{H\beta}$	F-reg	0,887	0,871	0,001	0,001	[mm]
SVR	$f_{H\beta}$	F-reg	−0,066	−0,217	0,003	0,003	[mm]
Funktionale Merkmale							
Linear Regression	Δt	All	0,863	0,844	0,020	0,018	[mm]
Random Forest	Δt	All	0,901	0,856	0,020	0,015	[mm]
SVR	Δt	All	−0,138	−0,390	0,061	0,056	[mm]

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Modell	Merkmal	Selektion	CV-R ²	Test-R ²	RMSE	MAE	Einheit
Linear Regression	Δt	PCA	0,155	0,831	0,021	0,018	[mm]
Random Forest	Δt	PCA	0,482	0,550	0,034	0,027	[mm]
SVR	Δt	PCA	−0,138	−0,390	0,061	0,056	[mm]
Linear Regression	Δt	F-reg	0,912	0,906	0,016	0,012	[mm]
Random Forest	Δt	F-reg	0,916	0,859	0,019	0,014	[mm]
SVR	Δt	F-reg	−0,138	−0,390	0,061	0,056	[mm]
Linear Regression	F_p	All	−0,128	−0,381	0,082	0,066	[°]
Random Forest	F_p	All	0,044	−0,015	0,070	0,059	[°]
SVR	F_p	All	−0,013	−0,052	0,071	0,061	[°]
Linear Regression	F_p	PCA	−11,908	−0,204	0,076	0,061	[°]
Random Forest	F_p	PCA	−0,064	0,011	0,069	0,058	[°]
SVR	F_p	PCA	−0,035	−0,078	0,072	0,059	[°]
Linear Regression	F_p	F-reg	−0,207	−0,429	0,083	0,067	[°]
Random Forest	F_p	F-reg	0,065	−0,136	0,074	0,061	[°]
SVR	F_p	F-reg	0,111	−0,612	0,088	0,073	[°]
Linear Regression	r_e	All	−0,248	−0,066	0,028	0,022	[mm]
Random Forest	r_e	All	−0,081	−0,039	0,027	0,022	[mm]
SVR	r_e	All	−0,046	−0,050	0,027	0,022	[mm]
Linear Regression	r_e	PCA	−11,240	−0,003	0,027	0,021	[mm]
Random Forest	r_e	PCA	−0,100	−0,032	0,027	0,021	[mm]
SVR	r_e	PCA	−0,046	−0,050	0,027	0,022	[mm]
Linear Regression	r_e	F-reg	−0,061	−0,039	0,027	0,020	[mm]
Random Forest	r_e	F-reg	0,062	−0,171	0,029	0,023	[mm]
SVR	r_e	F-reg	−0,046	−0,050	0,027	0,022	[mm]

A2.3.2 Beste Modelle

Beste Modelle nach R^2 Werten:

Tabelle A2.4: Bestes Regressionsmodell pro Merkmal basierend auf dem Test- R^2 .

Merkmal	Modell	Selektion	CV- R^2	Test- R^2	RMSE	MAE	Einheit
Taumel	Random Forest	F-reg	0,993	0,997	0,156	0,072	[μm]
Δz	Linear Regression	F-reg	0,968	0,924	0,019	0,012	[mm]
Δt	Linear Regression	F-reg	0,912	0,906	0,016	0,012	[mm]
$f_{H\alpha}$	Random Forest	F-reg	0,903	0,886	0,001	0,001	[mm]
$f_{H\beta}$	Random Forest	F-reg	0,887	0,871	0,001	0,001	[mm]
F_α	Random Forest	F-reg	0,651	0,671	0,001	0,000	[mm]
$f_{f\alpha}$	Random Forest	F-reg	0,597	0,670	0,000	0,000	[mm]
F_β	Random Forest	F-reg	0,528	0,511	0,001	0,001	[mm]
$f_{f\beta}$	Random Forest	All	0,453	0,395	0,000	0,000	[mm]
F_p	Random Forest	PCA	-0,064	0,011	0,069	0,058	[°]
r_e	Linear Regression	PCA	-11,240	-0,003	0,027	0,021	[mm]
Δx	SVR	All	-0,014	-0,015	0,072	0,062	[mm]

A3 Anhang Unsicherheitsbewertung

A3.1 Unsicherheitsverteilung der Qualitätsmerkmale

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilungen der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ (vgl. Gleichung 8.25) für alle betrachteten Zielgrößen. Jedes Histogramm stellt die Häufigkeitsverteilung der aus der Monte-Carlo-Simulation resultierenden Unsicherheiten über alle Bauteile des Trainingsdatensatzes dar. Das 95 %-Perzentil dieser Verteilungen definiert die in Tabelle 8.6 angegebene globale Unsicherheit u_{ges} des jeweiligen Vorhersagemodells.

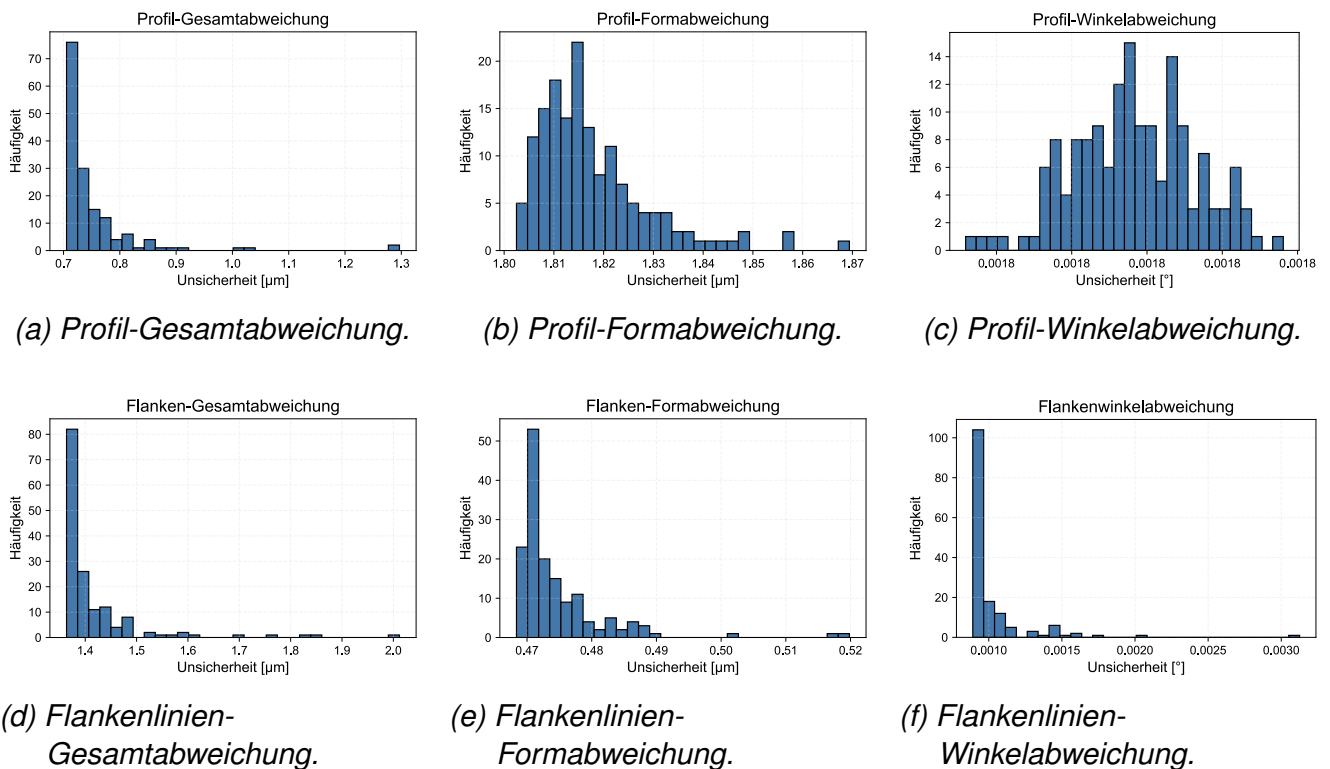
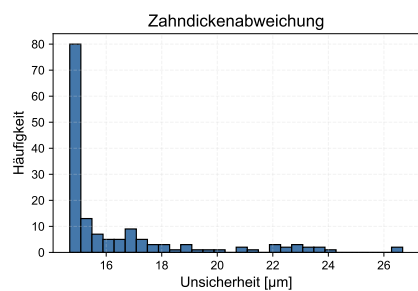
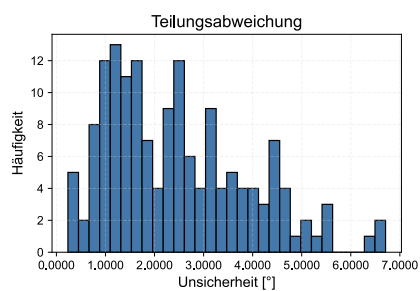


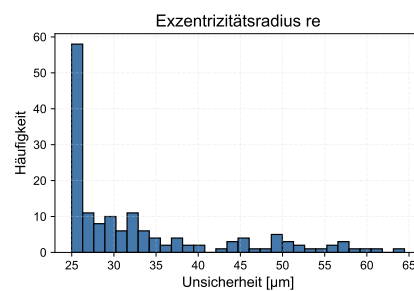
Abbildung A3.1: Verteilung der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ für die profil- und flankenbezogenen Qualitätsmerkmale.



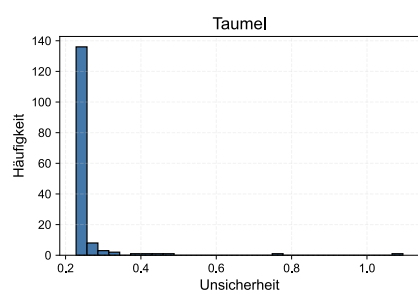
(a) Zahnplattenabweichung.



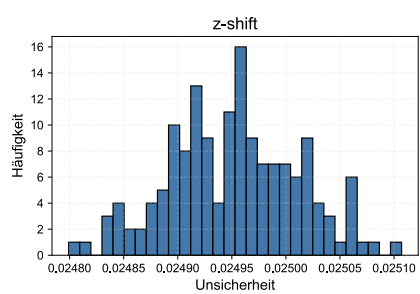
(b) Teilungsabweichung.



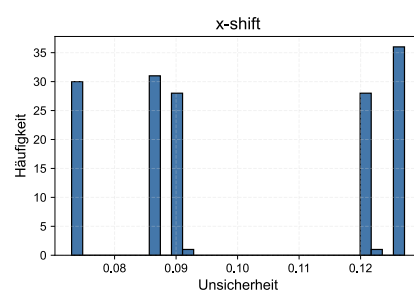
(c) Exzentrizitätsradius.



(d) Taumel.



(e) Z-Shift.



(f) X-Shift.

Abbildung A3.2: Verteilung der bauteilspezifischen kombinierten Unsicherheiten $u_{\text{tot},i}$ für die übrigen Qualitätsmerkmale und Prozessparameter.

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 fünffachsigen 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 bearbeitungselementorientiertes, 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 Mauerwerkabaus 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 Vossman

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

Entwicklungintegrierte 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 Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Managment-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

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 Gönzheimer

**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 Dienstleistungs-
organisationen: 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 Mikrobauteile

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 Ersatzteilbereitstellung 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

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen 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 µMIM-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 Kugelgewindetrieben

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-Antriebselementen

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 ressourcen-
effizienter 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 Kugelgewindetrieben

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

Wälzschälen 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 Schlagenhauf

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

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299

Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

Band 300

Dr.-Ing. Martin Benfer

Decision-Making in Production Network Configuration

A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks

Band 301

Dr.-Ing. Victor Lubkowitz

Keramikverstärkte Aluminiumwerkstoffe für das pulverbettbasierte selektive Laserschmelzen

Beschichtung, Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften von Mikro-B₄C- und Nano-TiC-verstärkten AlSi10Mg-Feedstocks, verarbeitet im PBF-LB-Prozess

Band 302

Dr.-Ing. Alex Frey

Datenbasierte Erstellung und Überprüfung von Modellen zur Produkt- und Prozesskonfiguration

Band 303

Dr.-Ing. Johannes Schubert

Werkstoff- und Prozessanalyse zur Herstellung keramischer Werkstoffverbunde mittels badbasierter Photopolymerisation (VPP-LED)

Band 304

Dr.-Ing. Tassilo Arndt

Simulative und experimentelle Untersuchung des Rotationsunrunddrehens zur hochproduktiven Herstellung unrunder Bauteilquerschnitte

Band 305

Dr.-Ing. Kamal Hussein

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

Band 306

Dr.-Ing. Marco Friedmann

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

Band 307

Dr.-Ing. Jannik Konstantin Schwalm

Hämmerndes Drehen

Entwicklung eines hybriden Prozesses zur hauptzeitparallelen mechanischen Oberflächenbehandlung und Oberflächentexturierung während der Zerspanung

Band 308

Dr.-Ing. Dominik Mayer

Analyse prozessübergreifender Wirkzusammenhänge zur Modellierung der Stapelbildung in der Batteriezellfertigung

Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

Band 309

Dr.-Ing. Markus Heim

Demontage von Magneten aus permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Ressourceneffizienz durch Werterhaltung

Band 310

Dr.-Ing. Ludwig Benedikt Hausmann

Kinematisches Twisten von Statoren mit Hairpin-Wicklung für elektrische Traktionsmotoren

Band 311

Dr.-Ing. Kai Uwe Drechsel

Verarbeitung von agglomerierendem 316L Pulver im pulverbettbasierten Schmelzen mittels Laserstrahl

Entwicklung eines ultraschallangeregten Beschichtungsprozesses und Untersuchung der Prozessstabilität

Band 312

Dr.-Ing. Ali Bilen

Datengetriebene Qualitätsregelung in der Fertigung von Mikro-Kronenrädern

Körperschallbasierte virtuelle Messung zur Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale mit Unsicherheitsquantifizierung

