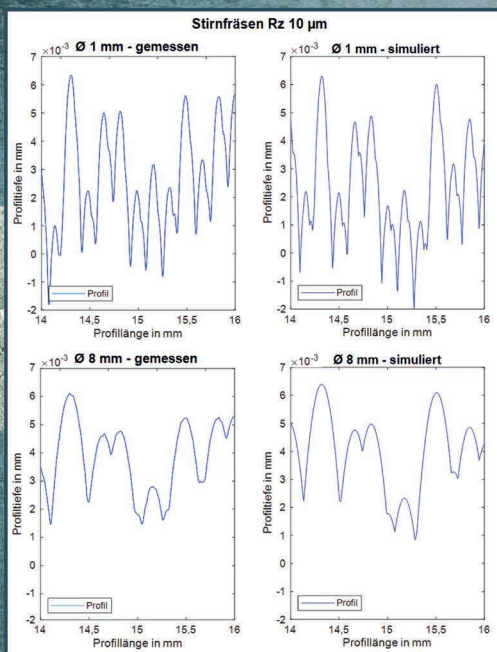




FAU Studien aus dem Maschinenbau 440

Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen
der Oberflächenform für die
Messunsicherheitsbestimmung von
taktile Koordinatenmessungen
durch Simulation

Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 440

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktile Koordinatenmessungen durch Simulation

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
(FMT)

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Erlangen

FAU University Press

2024

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.

Kontakt: Thomas Kistner, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ( <https://ror.org/oof7hpc57>)
thomas.kistner@kistnermetroserv.de
<https://orcid.org/0009-0008-5045-6811>

Bitte zitieren als

Kistner, Thomas. 2024. *Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 440. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-736-4.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-735-7 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-736-4 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-736-4

**Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für
die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen
Koordinatenmessungen durch Simulation**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Thomas Kistner, M.Sc.

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 04.10.2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
Prof. Dr. Ing. habil. Eberhard Manske,
TU Ilmenau

Vorwort

Die Idee zu diesem Thema entstand während der intensiven Arbeit an der Weiterentwicklung des virtuellen Koordinatenmessgeräts zum Zeitpunkt meiner Anstellung bei ZEISS Industrial Quality Solutions. Die tiefen Einblicke in die Programmstruktur ermöglichten mir einen Blick auf die Potentiale des virtuellen Koordinatenmessgeräts zur Optimierung von Messabläufen abseits der typischen Messunsicherheitsermittlung. Der Gedanke, die tatsächlich vorhandenen Werkstückoberflächen für die bisher wenig beachtete Funktion der Ermittlung der Unterabtastung zur Verfügung zu stellen, folgt dem stetigen Optimierungsgedanken der Weiterentwicklung des virtuellen Koordinatenmessgeräts. An diesen schlossen sich auch weitere Ideen, wie die Installation der Programme in den Arbeitsspeicher um die Simulationszeiten zu verkürzen oder die Versuche des VCMM durch praktische Messroutinen anwendungsfreundlicher zu gestalten, an.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte vom Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, für die Betreuung sämtlicher Abschlussarbeiten einschließlich Promotion und den stets konstruktiven Austausch über die Jahre. Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein herzlicher Dank gebührt Dr.-Ing. Dietrich Imkamp von ZEISS Industrial Quality Solutions für den hervorragenden Austausch zu messtechnischen Themen während der vielen Jahre der Zusammenarbeit und dem mir gewährten Raum zum wertvollen Sammeln von Erfahrungen im Bereich hochgenauer Koordinatenmessungen.

Ebenso möchte ich mich bei Dr. rer. nat. Daniel Heißelmann, Matthias Franke und Carsten Schwehn für den Austausch im Rahmen der Weiterentwicklung des virtuellen Koordinatenmessgeräts bedanken, dieser war sehr wertvoll und die Zeit im Projektteam hat mir sehr viel Spaß bereitet.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, durch die ich schon in jungen Jahren mit Messtechnik konfrontiert wurde und die mir auf meinem Weg stets den Rücken gestärkt und freigehalten hat. Nun sorgen besonders Caro und Leonie dafür, dass ich mich nicht ausschließlich mit Messtechnik befasse. Auch das hat sein Gutes.

Weikersheim, 10. Oktober 2023

Thomas Kistner

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Technische Oberflächen und ihre Herstellung	3
	2.1 Beschreibung technischer Oberflächeneigenschaften.....	3
	2.2 Fertigungsverfahren und resultierende Oberflächeneigenschaften	6
	2.3 Bestehende Modelle für verschiedene Fertigungsverfahren	9
3	Messtechnik.....	13
	3.1 Profilmessung mit Tastschnittgeräten	16
	3.2 Koordinatenmesstechnik	18
4	Messunsicherheit	23
	4.1 Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen	23
	4.2 Das virtuelle Koordinatenmessgerät	25
	4.2.1 Funktionsweise	25
	4.2.2 Oberflächeneinfluss: Unterabtastung und Bewertung der Messstrategie.....	34
5	Modellierung der Oberflächeneinflüsse in der Koordinatenmesstechnik	37
	5.1 Funktionalität zur Berücksichtigung von Oberflächeneinflüssen	37
	5.2 Das VCMM-Oberflächenwellenmodell	39
	5.3 Potentiale zur Verbesserung der Oberflächenmodelle.....	41
6	Untersuchung und Weiterentwicklung des VCMM- Oberflächenwellenmodells	43
	6.1 Vergleich des Oberflächenwellenmodells mit der Struktur realer Werkstückoberflächen.....	44
	6.2 Erstellung theoretischer Modelle durch Fertigungsparameter	53
	6.3 Erstellung theoretischer Modelle basierend auf Tastschnittmessungen	55

6.4	Abplattung und mechanische Filterung.....	57
6.5	Einbindung in die VCMM-Struktur.....	64
6.6	Übersicht über die verschiedenen Modellierungsarten	65
7	Experimentelle Untersuchung an verschiedenen Oberflächenbeispielen	67
7.1	Auswahl der zu messenden Oberflächen und Werkstücke.....	67
7.2	Vergleich der gemessenen und gefilterten Oberflächen mit dem Profil aus dem simulierten Abtastvorgang.....	69
7.2.1	Allgemeines Vorgehen für Messung und Simulation	69
7.2.2	Korrelationsanalyse	74
7.2.3	Statistische Kenngrößen Rsm und Rc	79
7.2.4	Kenngrößen Pt, Wt und Rt	82
7.2.5	Zusammenfassung.....	85
7.3	Anwendung der erzeugten Oberflächenwellenmodelle im VCMM.....	85
7.4	Weitere Untersuchungen.....	89
7.4.1	Messung von Welligkeit auf Koordinatenmessgeräten ..	89
7.4.2	Vergleich mit der ersten Version des VCMM.....	92
7.4.3	Wirkung des Oberflächenmodells auf Ausgleichselemente.....	92
8	Zusammenfassung und Ausblick	95
9	Summary and outlook	99
Anhang		103
	Umfassendere Darstellung der betrachteten Werkstückprofile.....	103
	Beispiel eines Datensatzes mit Informationen zu Amplitude, Phasenlage und Frequenz	108
	Werkstückkoordinatensystem bei der Messung der Oberflächenvergleichsnormale.....	109
	Entfernung der Nennform	110
	Auswertung der Parameter Rsm und Rc	118
	Auswertung der Parameter Pt, Wt und Rt	120
	Literaturverzeichnis	123

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Vollständige Bezeichnung
a	mm	Radius der Kontaktfläche
$A_{\text{abgeplattet},i}$	mm	Abgeplattete Amplitude an der Stelle i
$A_{\text{initial},i}$	mm	Amplitudenwert an der Stelle i
C	mm	Konstante Verschiebung (Offset)
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
E_1	N/m ²	Elastizitätsmodul von Material 1
E_2	N/m ²	Elastizitätsmodul von Material 2
F	N	Antastkraft
k		Erweiterungsfaktor
k_{ges}	N/m	Gesamtfedersteifigkeit
k_i	N/m	Federsteifigkeit an der Stelle i
P	N/m ²	Druck
P_t	μm	Gesamthöhe des Primärprofils (DIN EN ISO 21920-2)
r	mm	Tastkugelradius
R_c	μm	mittlere Höhe der Profilelemente (DIN EN ISO 21920-2)
R_t	μm	Gesamthöhe des Rauheitsprofils (DIN EN ISO 21920-2)
R_{sm}	μm	mittlere Rillenbreite der Profilelemente (DIN EN ISO 21920-2)
U	mm	erweiterte Messunsicherheit
$u(y)$	mm	Standardunsicherheit
$u_{z,i}$	mm	elastische Verformung
W_t	μm	Gesamthöhe des Welligkeitsprofils (DIN EN ISO 21920-2)
x	mm	Messposition
λ_i	mm	Wellenlänge an der Stelle i
ν		Querkontraktionszahl
π		Kreiszahl
ψ_a		Verhältnis von Amplitude zu Wellenlänge
ψ		Verhältnis von Messposition zu Wellenlänge

Abkürzungsverzeichnis

<i>Zeichen</i>	<i>Vollständige Bezeichnung</i>
ADU	Analog-Digital-Umsetzer
CMM	coordinate measuring machine
CNC	computerized numerical control
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ISO	International Organisation of Standardization
kbit	Kilobit
KMG	Koordinatenmessgerät
MPE	maximum permissible error
ppm	parts per million
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
VCMM	virtual coordinate measuring machine
VDE	Verein Deutscher Elektrotechniker
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Virtual	virtual coordinate measuring machine
CMM CUT	Cracow University of Technology
XML	extensible Mark-up Language

1 Einleitung

Stetige Fortschritte bei den Fertigungsverfahren und der daran angeschlossenen Qualitätsprüfung führen dazu, dass die Herstellung von qualitativ immer hochwertigeren Teilen gewährleistet wird. Die Koordinatenmesstechnik ist seit vielen Jahrzehnten ein fester Bestandteil dieser Qualitätsprüfung. Durch verlässliche Messergebnisse kann die Fertigung überprüft und stetig verbessert werden. Das Messergebnis entspricht aufgrund von Messabweichungen dabei nicht dem „wahren Wert“ einer Messgröße; die Messung ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Bei einem verlässlichen Messergebnis ist die Messunsicherheit im Verhältnis zur spezifizierten Toleranz gering.

Die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen lässt sich unter anderem durch ein spezielles Verfahren mit einer Monte-Carlo-Simulation berechnen, das unter dem Begriff ‘virtuelles Koordinatenmessgerät’ (gebräuchliche englische Abkürzung: VCMM = Virtual Coordinate Measuring Machine) bekannt ist. Dieses Verfahren steht seit geraumer Zeit in verschiedenen Anwendersoftwarepaketen zur Verfügung und wurde in den letzten Jahren an den Stand der Technik angepasst [1]. Bei der Messunsicherheitsermittlung durch Simulation werden verschiedene Einflussgrößen zur Berechnung der Messunsicherheit herangezogen. Diese beschreiben üblicherweise die auf die Messung wirkenden Einflüsse und variieren während der Simulation innerhalb ihres zu erwartenden Wertebereichs.

Im Rahmen der Anpassung an den Stand der Technik wurde das virtuelle Koordinatenmessgerät im Funktionsumfang erweitert. Nun kann optional die Ermittlung der Unterabtastung erfolgen und darauf aufbauend die Messstrategie bewertet und optimiert werden. Durch die Unterabtastung wird der Informationsverlust bei der Messung der jeweiligen Werkstückoberfläche durch die endliche Zahl aufgenommener Koordinatenpunkte beschrieben. Dafür wird ein Modell der zu messenden Werkstückoberfläche bereitgestellt. Bei der aktuellen Version des VCMM handelt es sich hierbei um ein einfaches Modell, bestehend aus wenigen sich überlagernden Sinuswellen. Dieses Modell wird anhand der zu erwartenden Fertigungsqualität angepasst und entsprechend skaliert.

In dieser Arbeit wird diese Methode zur Erstellung eines solchen Modells näher beschrieben. Weitere Modelle zur Beschreibung der Oberflächenform werden dargestellt. Diese Modelle basieren auf idealen Fertigungsparametern oder auf Messungen mit Tastschnittgeräten. Dabei werden die

weit verbreiteten Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen und Schleifen berücksichtigt. Die Oberflächenmodelle werden in einer eigenständigen Berechnungssoftware erzeugt. Dabei werden die Antastkraft und die mechanische Filterung des Antastelements berücksichtigt. Die so entstehenden Oberflächenwellenmodelle können in den virtuellen Koordinatenmessgeräten verschiedener Anwendersoftwarepakete verwendet werden.

Im nachfolgenden Bild 1 ist das Ablaufdiagramm für die Erstellung und Verwendung der Oberflächenwellenmodelle dargestellt. Dabei ist der typische Ablauf bei einer Messung mit dem Koordinatenmessgerät und anschließender Berechnung der Messunsicherheit mit dem VCMM grau hinterlegt. Die Erstellung der Oberflächenwellenmodelle und die optionale Ermittlung der Unterabtastung sind blau hinterlegt. Das VCMM kann während der Simulation auf diese Oberflächenwellenmodelle zugreifen. An die Berechnung der Messunsicherheit schließt sich, orange hinterlegt, die nachträgliche Bewertung der Messstrategie an. Die Bewertung wird von den jeweiligen Anwendern durchgeführt und orientiert sich an deren Qualitätskriterien.

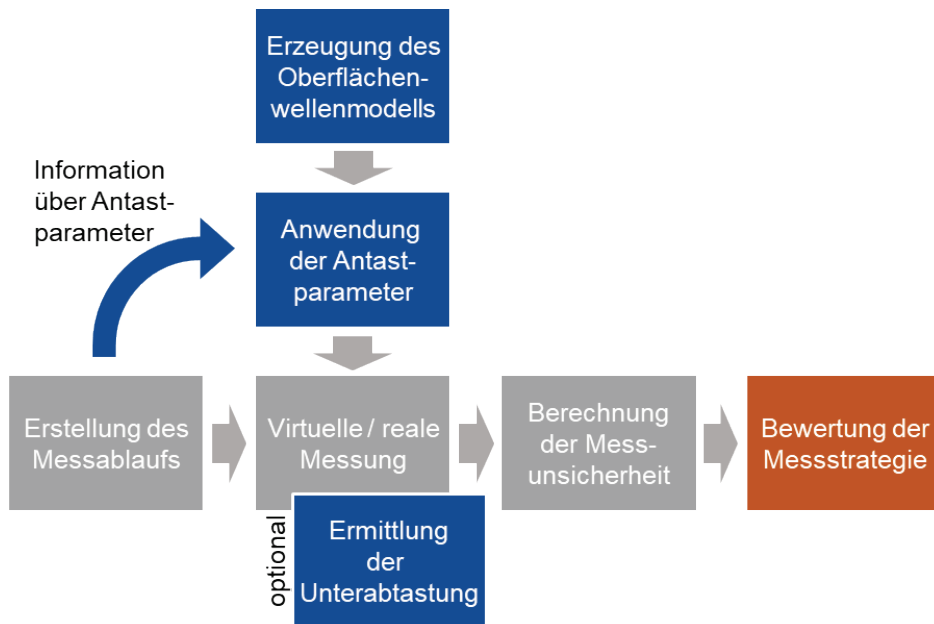


Bild 1: Ablaufdiagramm für die Verwendung der Oberflächenmodelle

Die für das VCMM bereitgestellten Modelle zur Simulation einer Messung werden in dieser Arbeit abschließend mit realen Werkstückoberflächen verglichen, um die Unterschiede zwischen Simulation und Messung aufzuzeigen.

2 Technische Oberflächen und ihre Herstellung

2.1 Beschreibung technischer Oberflächeneigenschaften

Die technischen Eigenschaften der Werkstückoberfläche spielen bei vielen Anwendungen von mechanischen Produkten eine wichtige Rolle. Das wird deutlich, wenn sich zwei Produktkomponenten, die direkten mechanischen Kontakt miteinander haben, relativ zueinander bewegen. Die dabei entstehende Reibung wird wesentlich von der Gestalt und den Gestaltabweichungen beider Komponenten beeinflusst. Mit Gestaltabweichungen wird nach der Norm DIN 4760 [2] die Gesamtheit aller Abweichungen der wirklichen Oberfläche vom theoretisch exakten Geometrieelement bezeichnet. Die Abweichungen werden dort in sechs Ordnungen unterteilt. Die Ordnungsreihenfolge ergibt sich aus der lateralen Ausdehnung der Merkmalsbestandteile. Bild 2 stellt die Bestandteile der Gestaltabweichung einer Oberfläche nach [2] dar.

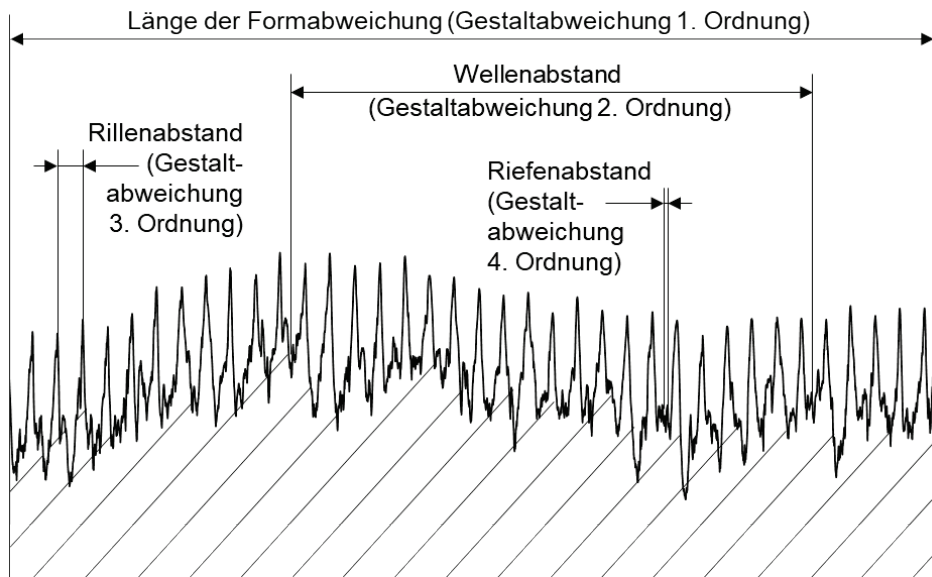


Bild 2: Bestandteile der Gestaltabweichung einer Oberfläche nach [2]

Gestaltabweichungen erster Ordnung erstrecken sich über die gesamte wirkliche Oberfläche eines Formelements und werden daher Formabweichungen genannt. Gestaltabweichungen zweiter und dritter Ordnung unterscheiden sich durch das Verhältnis der Wellenabstände zur Wellentiefe.

Relativ große Verhältnisse zwischen 100:1 und 1000:1 ordnet man der zweiten Ordnung zu und bezeichnet diese aufgrund der überwiegend periodisch aufkommenden Abweichung als Welligkeit [2], diese ist Bestandteil der Form [3]. Bei mechanisch bearbeiteten Teilen entspricht die Welligkeit typischerweise einer Wellenlänge von 0,5 mm bis 2,5 mm (obere Grenzwellenlänge der Rauheit nach [4]). Jedoch werden Welligkeiten bekanntermaßen nach [5] auch bei deutlich kleineren Wellenlängen gesehen, ([4, 6]) legen als untere Grenze 0,08 mm fest. In [7] liegt die untere Grenze bei 0,02 mm. Die Grenzwellenlänge λ_c (=Einzelmessstrecke) wird gemäß [6] anhand von ermittelten Kennwerten (eventuell Iteration erforderlich) bzw. spezifizierten Kennwerten mit den möglichen Werten 0,08 mm, 0,25 mm, 0,8 mm, 2,5 mm oder 8 mm festgelegt. Für die betrachteten Oberflächen würde man üblicherweise nach [6] 0,8 mm als Grenze wählen. Aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsweisen wird die untere Grenze für die Welligkeit in dieser Arbeit auf 0,5 mm festgelegt.

Bei kleineren Verhältnissen von Wellenabstand zu Wellentiefe spricht man von Rauheit als Gestaltabweichung dritter Ordnung. Abweichungen vierter und fünfter Ordnung werden ebenfalls der Rauheit zugeordnet. Rauheiten sind periodische oder aperiodische Gestaltabweichungen in dem Verhältnis 100:1 bis 5:1 [2].

In Bild 3 sind die Bereiche von Rauheit und Welligkeit doppeltlogarithmisch dargestellt. Die kürzeste Wellenlänge der Rauheit (1) ergibt sich aus der Grenzwellenlänge λ_s der Rauheit nach [5] und beträgt 2,5 μm . Die größte Wellenlänge der Rauheit (3,4) beträgt nach [4] 800 μm und 2500 μm . Nach oben und unten wird der Bereich durch die Verhältnisse 5:1 (6) und 100:1 (7) begrenzt [2]. Eine zusätzliche Begrenzung (5) entsteht durch den größten Wert der gemittelten Rautiefe R_z nach [4] mit 200 μm . Die Welligkeit wird nach oben und unten durch die Verhältnisse 100:1 (8) und 1000:1 (9) begrenzt [2]. Die untere Wellenlänge (2) der dominanten Welligkeit beträgt nach [7] 20 μm bzw. 80 μm nach [4, 6]. Die weiteren Werte aus der Vorzugsreihe nach [5] für die Grenzwellenlänge λ_c neben (2) und (3) sind 80 μm (10), 250 μm (11) und 8000 μm (12). Der Bereich der Form schließt direkt an die Welligkeit an. Eine exakt definierte Grenze zwischen Welligkeit und Form wird in [8] zwar mit der Grenzwellenlänge λ_f benannt, aber wird in der Praxis nicht angewendet; da die erforderliche Filterlänge zu groß wäre, erfolgt in der profilhaften Oberflächenmessung nur der Abzug einer Nennform [5].

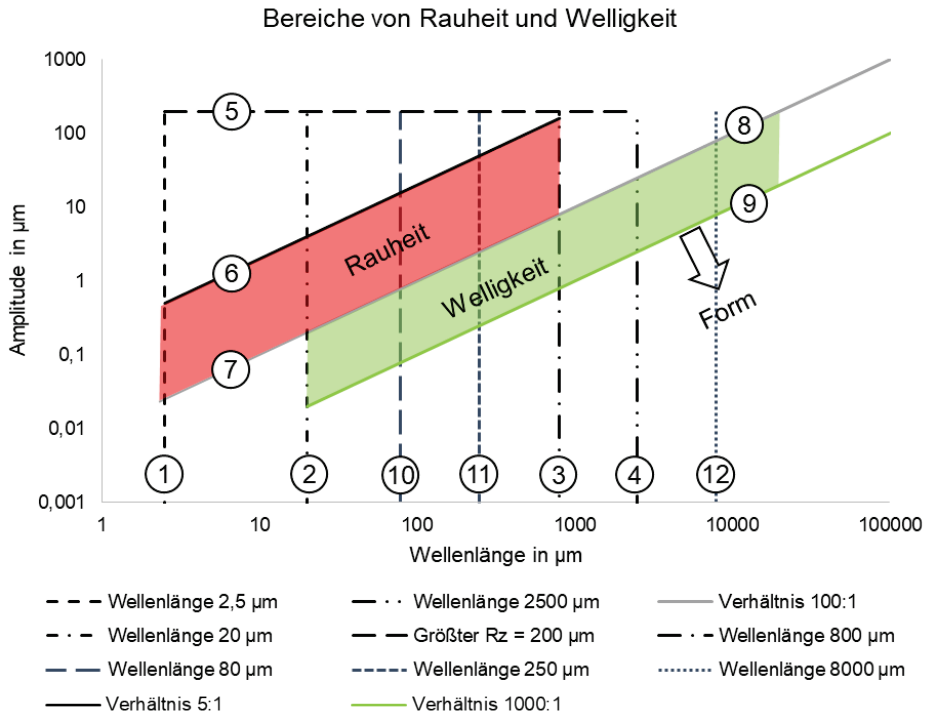


Bild 3: Bereiche von Rauheit und Welligkeit

Zur Analyse der durch Messgeräte aufgenommenen Oberflächenpunkte werden Filter der Normenreihe ISO 16610 (Übersicht in [9]) genutzt, um die Informationen zu den verschiedenen Ordnungen zu trennen. Die Gauß-Filter werden durch eine Grenzwellenlänge gekennzeichnet, bei der ein bestimmtes Übertragungsverhältnis von 50 % zwischen Eingangssignal (Amplitude der Oberflächenstruktur) und Ausgangssignal definiert ist. Für die Betrachtung der Gestaltabweichungen gibt es vorgeschlagene Grenzwellenlängen für die Filterung, zum Beispiel für die Formbetrachtung bei der Messung der Geradheit [10] oder für die Messung von Rauheitskenngrößen [6]. Die Grenzwellenlängen sind nach [5] mit Vorzugswerten nach gewissen Regeln zu wählen.

Die Gestaltabweichungen der Werkstückoberflächen mit unterschiedlichen Wellenlängen beeinflussen ihre Funktion auf verschiedene Weise [11]. Daher kann es notwendig sein, Welligkeit und Rauheit getrennt voneinander zu betrachten. Es ist neben einem geeigneten Vorgehen zur Abtrennung der Formabweichung auch ein Verfahren zur Trennung von Welligkeit und Rauheit erforderlich.

Für die nähere Betrachtung der einzelnen Anteile von Oberflächen unterschiedlicher Wellenlängen, werden diese durch die Wahl geeigneter Profilfilter voneinander separiert [8]. Ausgehend von der grafischen Filterung [12] sind weitere Filtertypen entwickelt worden ([13, 14]). Die verschiedenen Filtertypen weisen verschiedene Eigenschaften auf und beeinflussen somit das Messergebnis [15]. Die Filtertypen sind unter anderem durch die Normenreihe ISO 16610 [9] für Flächen in den Teilen 60-89 und für Profile in den Teilen 20-49 definiert.

2.2 Fertigungsverfahren und resultierende Oberflächeneigenschaften

Fertigungsverfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten, festen Körpern sind in sechs verschiedene Hauptgruppen unterteilt [16]. Die Hauptgruppen unterscheiden nach verschiedenen Merkmalen: Schaffen der Form, Ändern der Form und Ändern der Stoffeigenschaften. In Tabelle 1 sind die Hauptgruppen nach ([16], S. 7) dargestellt.

Tabelle 1: Merkmale für die Hauptgruppen, nach ([16], S.7)

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt behalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaft ändern

Hauptgruppe 3 ist in weitere sechs Gruppen unterteilt, in diesen werden die jeweiligen Fertigungsverfahren zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit werden Fertigungsverfahren aus Gruppe 3.2, Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden, und aus Gruppe 3.3, Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden, näher betrachtet. Werkstücke zur Messung mit Koordinatenmessgeräten sind häufig mit Fertigungsverfahren aus diesen beiden Gruppen hergestellt.

Zu den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Untergruppen der Fertigungsverfahren zählen:

- Untergruppe 3.2.1: Drehen [17]
- Untergruppe 3.2.3: Fräsen [18]
- Untergruppe 3.3.1: Schleifen mit rotierendem Werkzeug [19].

Die Form der Schneidwerkzeuge und der Relativbewegung zwischen Schneidwerkzeug und Werkstück erzeugen für jedes betrachtete Fertigungsverfahren charakteristische Oberflächen. Beim Drehen und Fräsen werden wenige Schneiden mit bekannter Schneidengeometrie verwendet. Die Vorschubgeschwindigkeit ist konstant und die Relativbewegung zwischen Schneidwerkzeug und Werkstück ist linear. Dadurch entstehen beim Fertigungsverfahren periodische Profile. Beim Schleifen hingegen wird eine Vielzahl von Schneiden mit unbekannter Schneidengeometrie verwendet. Dabei wird ein zufälliges Profil erzeugt.

Bild 4 zeigt die Prinzipskizzen des Fertigungsverfahrens Längs-Runddrehen [17]. Das Werkzeug bewegt sich dabei parallel zur Rotationsachse des Werkstücks.

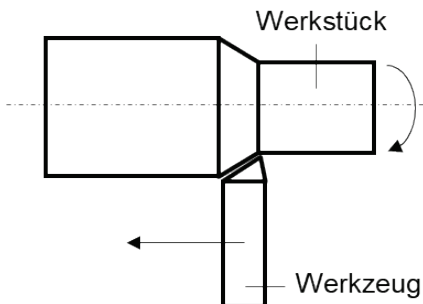


Bild 4: Prinzipskizze des Fertigungsverfahrens Längs-Runddrehen nach DIN 8589-1

In Bild 5 ist eine Prinzipskizze der Fertigungsverfahren Plan- und Rundschleifen dargestellt. Beim Längs-Umfangs-Planschleifen [19], in Bild 5 a) dargestellt, wird das Werkstück um die rotierende Schleifscheibe bewegt. Beim Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifen [19], Bild 5 b), bewegt sich die rotierende Schleifscheibe parallel zur Rotationsachse des Werkstücks.

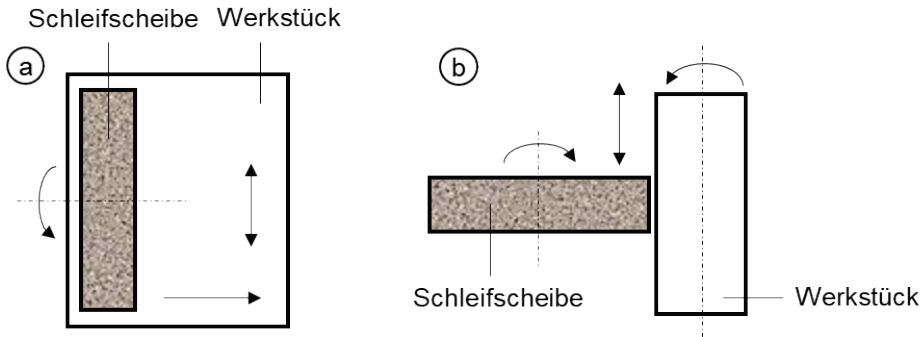


Bild 5: Prinzipskizzen der Fertigungsverfahren a) Plan- und b) Rundschleifen nach DIN 8589-11

Achsabweichungen oder Schwingungen der Fertigungsmaschine erzeugen zusätzliche Abweichungen in Gestalt von Welligkeiten oder Formabweichungen ([20], S. 87-89). Diese überlagern die charakteristische Oberflächengestalt und erzeugen gemeinsam die Werkstückoberfläche. Diese Eigenschaften können bei der Auswertung eines Profilschnitts nur eindeutig erfasst werden, wenn deren Ausprägung senkrecht zur Profilebene ist.

Die Betrachtung von Profilschnitten der Oberfläche ermöglicht es, das Profil als zweidimensionale Wellenerscheinung zu beschreiben und entsprechende mathematische Methoden zur Analyse zu verwenden. Durch die kurzperiodischen Profilverformungen kann das Messergebnis bei der Messung von Oberflächenkenngrößen im Bereich der Rauheit bereits bei minimaler Veränderung der Profilposition stark variieren. Daher wird selbst bei der Kalibrierung von Raunormalen deren statistische Natur berücksichtigt [21].

Die Ausprägung der Oberflächenmerkmale variiert nach Fertigungsverfahren und verwendetem Werkzeug. Auch innerhalb eines Fertigungsverfahrens sind durch die entsprechende Parameterwahl verschiedene Oberflächenqualitäten erreichbar. Ein Werkstück durchläuft daher meist verschiedene Fertigungsschritte, bis es fertig bearbeitet ist. Als Beispiel dient ein Motorblock: Der Grundkörper wird als Gussteil hergestellt. Die einzelnen Funktionsflächen werden im Laufe des Fertigungsverfahrens mit verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt. Dies beinhaltet unter anderem das Fräsen der Stirnfläche zur Schaffung einer ausreichend ebenen Dichtfläche als auch das Honen der Kolbenlaufflächen der Zylinder zur Minimierung von Reibung durch Schaffung definierter Schmiereigenschaften.

Eine Übersicht über die Größenordnungen in Form der erreichbaren Mittenrauwerte verschiedener Fertigungsverfahren nach [22] ist in Bild 6 dargestellt. Je nach Parameterwahl können mit den einzelnen Fertigungsverfahren verschiedene Mittenrauwerte und dadurch verschiedene Oberflächeneigenschaften erreicht werden. Diese Parameter werden im anschließenden Kapitel vorgestellt.

Mittenrauwert R_a in μm		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Rauheitskennzahl		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Urformen	Sandformgießen												
	Druckgießen												
Umformen	Gesenkschmieden												
	Blechtiefziehen												
	Walzen												
Trennen	Schneiden												
	Drehen												
	Bohren												
	Fräsen												
	Schleifen												

Bild 6: Erreichbare Mittenrauwerte verschiedener Fertigungsverfahren nach [22]

2.3 Bestehende Modelle für verschiedene Fertigungsverfahren

Die Modellierung von Fertigungsverfahren befasst sich häufig mit der Simulation der Bearbeitung und der damit verbundenen Entstehung der resultierenden Werkstückoberfläche. Die Modellierung des Fertigungsprozesses dient beispielsweise der frühzeitigen Erkennung von Werkzeugverschleiß und damit zur Effizienzsteigerung der Fertigungsmaschinen [23]. Diese Modellierungsart wird zur Berechnung von Fertigungsparametern und zur Bestimmung ihrer Auswirkung auf das Fertigungssystem genutzt. Weitere Ansätze verfolgen das Ziel, die mechanisch bedingten Abweichungen von Fertigungsmaschinen auf das entstehende Werkstück abzubilden [24], um den Bezug zwischen Maschinenparameter und resultierender Oberfläche herzustellen [25] oder um die Qualität der resultierenden Oberfläche zu beurteilen [26]. Diese Arten der Modellierung dienen der Verbesserung von Standzeit, Minimierung von Werkzeugverschleiß und somit der Prozessoptimierung.

Die Modellierung der resultierenden Werkstückoberfläche zur Generierung von relevanten Informationen für die Oberflächenmesstechnik findet

hauptsächlich über theoretische, den Fertigungsprozess im Idealfall beschreibende Formeln statt ([27, 28]). Dabei wird jeweils von einer sinusförmigen Oberfläche gekennzeichnet durch eine Amplitude und Wellenlänge ausgegangen und so die Ausprägungen einer Werkstückoberfläche hinsichtlich Welligkeit und Rauheit beschrieben.

Für die weiteren Untersuchungen zur Ausprägung von Welligkeit und Rauheit ist aufgrund der entstehenden verschiedenen Oberflächenstruktur die Unterscheidung der Modellierungsart nach Fertigungsverfahren relevant.

Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide erzeugen eine zufällige Oberflächenstruktur. Zudem sind neben den langwelligen Führungsabweichungen der Fertigungsmaschine (vgl. [20], S. 87-89) die hochfrequenten Schwingungen des oftmals rotierenden Schneidwerkzeugs ([29], S. 347-355) entscheidend für die entstehende Oberflächencharakteristik. Weiterhin entstehen fremd- und selbsterregte Schwingungen bei der Schleifbearbeitung, die in der Werkstückoberfläche abgebildet werden [30]. Eine Vorhersage über die tatsächliche Ausprägung einzelner reproduzierbar erzeugbarer Oberflächencharakteristika über Prozessparameter ist daher unmöglich. Damit einher geht, dass die idealisierte Werkstückoberfläche anhand theoretischer Parameter nicht modelliert werden kann.

Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide erzeugen aufgrund der Relativbewegung zwischen Werkzeugschneide und Vorschubeinheit eine regelmäßige Struktur auf der Werkstückoberfläche [30]. Dies ermöglicht die Modellierung der resultierenden Werkstückoberfläche über einfache mathematische Formeln in Abhängigkeit verschiedener Werkzeugparameter. In Formel 2.1 ist der Zusammenhang zwischen erzielbarer theoretischer Rautiefe R_{th} und den Fertigungsparametern Eckenradius r des Werkzeugs und Vorschub f für den Drehprozess dargestellt [31]. Die theoretische Rautiefe entspricht ohne Berücksichtigung von Filtern einer Gesamtprofilhöhe R_t nach DIN EN ISO 21920-2 [32].

$$R_{th} = \frac{f^2}{8r} \quad (2.1)$$

Unter Verwendung von Formel 2.1 lassen sich beliebige Drehoberflächen simulieren. Die Größenordnung der das Oberflächenprofil bestimmenden Parameter Eckenradius und Vorschub werden aus Prozessangaben der Schneidwerkzeughersteller gewonnen [33]. Diese können herstellerspezifisch verschieden sein und erzeugen entsprechend der Parameterwahl verschiedene Oberflächen. Bild 7 zeigt ein typisches Drehprofil. Aus dem

Eckenradius $r = 0,25 \text{ mm}$ und Vorschub $f = 0,15 \text{ mm/U}$ resultiert ein Profil mit der theoretischen Rautiefe $R_{th} = 11,3 \text{ }\mu\text{m}$.

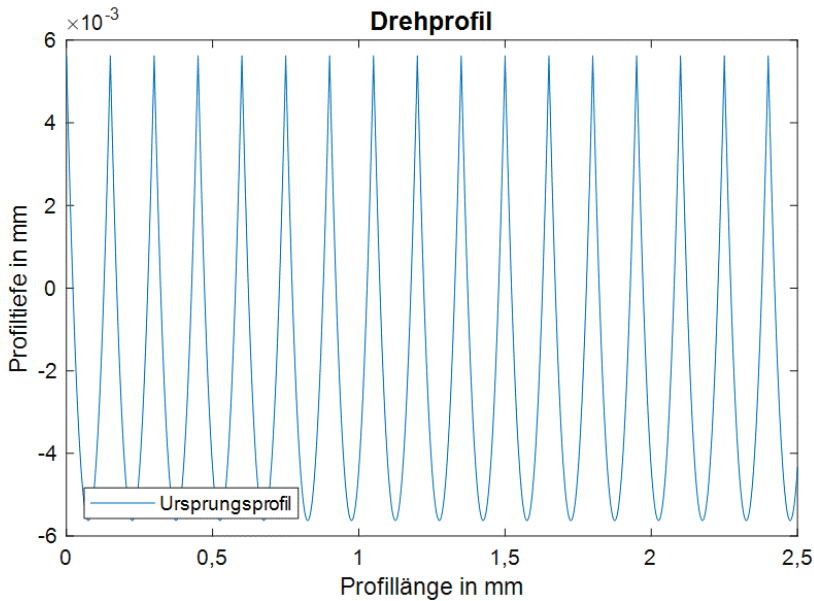


Bild 7: Typisches Drehprofil

Analog zu Drehprofilen können gefräste Werkstückoberflächen anhand von Fertigungsparametern simuliert werden. Man unterscheidet zwischen Umfangs- und Stirnfräsen. Bild 8 stellt die Prinzipskizze dieser Fertigungsverfahren nach [18] dar. Beim Umfangsfräsen, Darstellung in Bild 8 a), bewegt sich das rotierende Werkzeug achsparallel zum Werkstück. Beim Stirnfräsen, dargestellt in Bild 8 b), bewegt sich die Rotationsachse des Werkzeugs senkrecht zum Werkstück.

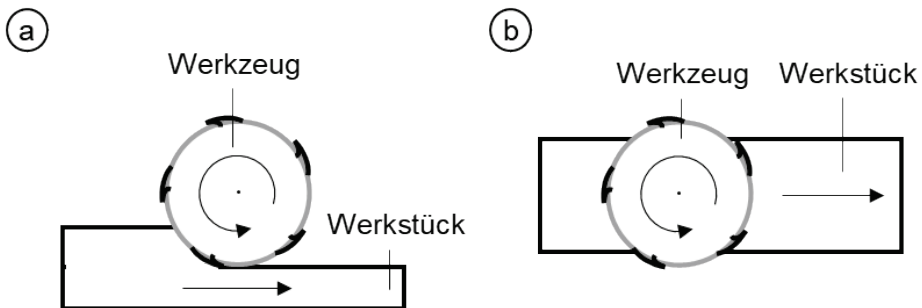


Bild 8: Prinzipskizze der Fertigungsverfahren Umfangs- und Stirnfräsen nach [18]

Beim Umfangsfräsen ist die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug gleich wie beim Fertigungsverfahren Drehen. Die theoretische

Rautiefe des Umfangsfräsens wird somit analog zu Formel 2.1 bestimmt [34]. Beim Stirnfräsen ist die Schneidrichtung quer zur Werkstückoberfläche. Daraus ergibt sich ein anderes Oberflächenbild. Die beim Stirnfräsen entstehende theoretische Rautiefe wird durch Formel 2.2 beschrieben. Die theoretische Rautiefe wird dabei unter Zuhilfenahme der Parameter Vorschub pro Zahn f_z und Schiefstellung der Zähne ϑ bestimmt [34].

$$R_{th} = f_z \tan \vartheta \quad (2.2)$$

Bild 9 zeigt ein typisches Fräsprofil des Stirnfräsens. Aus dem Vorschub pro Zahn $f_z = 0,1 \text{ mm/s}$ und der Schiefstellung der Zähne $\vartheta = 1,5^\circ$ resultiert ein Profil mit der theoretischen Rautiefe $R_{th} = 2,6 \text{ }\mu\text{m}$ [31].

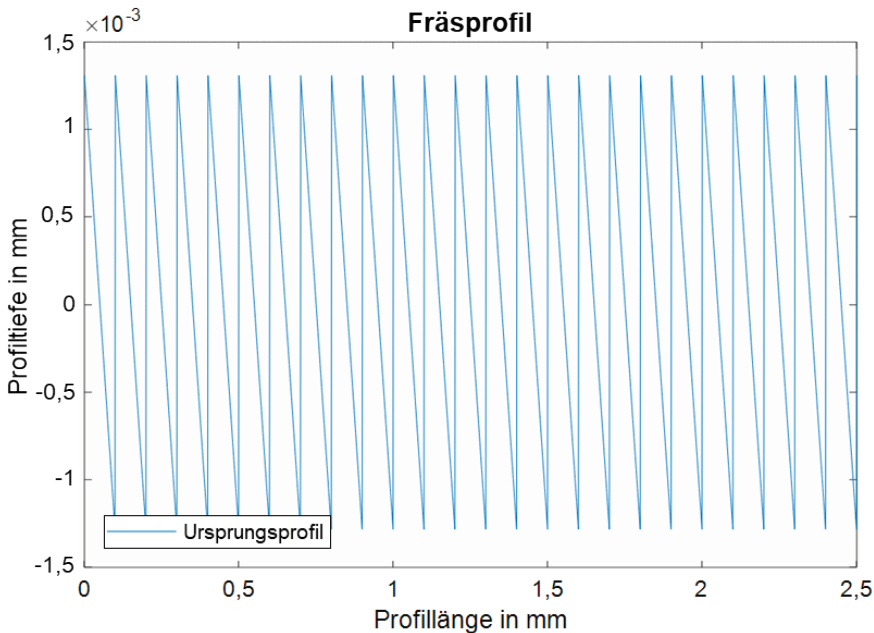


Bild 9: Typisches Fräsprofil des Stirnfräsens

Die so erzeugten Profile weisen eine ideale Oberflächenstruktur auf. Die durch den Fertigungsprozess eingebrachten Abweichungen aus der Unvollkommenheit der Werkzeugmaschinen sind in diesen Modellen nicht berücksichtigt.

3 Messtechnik

Die unter anderem durch den Fertigungsprozess entstehenden geometrischen Eigenschaften der Werkstückoberfläche lassen sich durch Messung digitalisieren. Bei der Digitalisierung durch Messung werden in dieser Arbeit die Profile entlang einer Linie betrachtet. Die Information über die gemessene Werkstückoberfläche liegt nur für diesen Profilschnitt vor und kann entsprechend der Oberflächenbeschaffenheit für benachbarte Profilschnitte unterschiedlich sein (vgl. [21]).

Um bei der Digitalisierung durch Messung alle im Profilschnitt verfügbaren relevanten Oberflächeneigenschaften zu erfassen, muss die Messstrategie entsprechend der Werkstückoberfläche angepasst werden. Dazu gehört auch die Wahl des geeigneten Messgeräts. Zu Betrachtung der Welligkeits- und Rauheitsabweichungen dient ein Tastschnittgerät [35]. Tastschnittgeräte werden in Rauheits- und Konturmessgeräte unterschieden. Konturmessgeräte sind in der Lage, neben der Rauheit auch größere Wellenlängen und Amplituden und die Form zu erfassen. Bei der Messung mit Koordinatenmessgeräten werden Form- und Welligkeit erfasst [36]. Aus den erfassten Oberflächeneigenschaften lassen sich Aussagen zur Konformität mit der Produktspezifikation ableiten [37].

In Bild 10 ist der Messbereich von taktilen Tastschnitt- und Koordinatenmessgeräten in einem Stedman-Diagramm [38] dargestellt. Es unterscheidet sich von der Ursprungsversion des Stedman-Diagramms dadurch, dass in Bild 10 die Amplitude als komplette Wellentiefe (peak-to-peak) betrachtet wird. Die dargestellte Größenordnung entspricht somit der vorhandenen Formabweichung, üblicherweise entspricht in einem Stedman-Diagramm die Amplitude der halben Wellentiefe.

Die Bereiche für Rauheit (1) und Welligkeit (2) aus Bild 3 sind ebenfalls dargestellt. Der Bereich der Welligkeit stellt die Schnittmenge der Messgeräte dar, darauf wird in Abschnitt 7.4.1 näher eingegangen. Die Begrenzungen der erfassbaren Bereiche eines Messsystems im Stedman-Diagramm ergeben sich aus der Baugröße bzw. den lateralen und vertikalen Messbereichen des Messsystems, der lateralen und vertikalen Orts- bzw. Skalenauflösung, den Führungsabweichungen und der Strukturauflösung bzw. bei taktiler Antastung aus der Größe der kleinstmöglichen Antastelemente. Die eingezeichneten Übertragungsgrenzen (Grenzlinien) begrenzen den erfassbaren Bereich für das jeweils kleinstmögliche Antastelement für die jeweilige Amplitude bei einer Geradheitsmessung nach ([39, 28]).

Die größte erfassbare Spitze-zu-Spitze Auslenkung wird bei Koordinatenmessgeräten durch die Baugröße bestimmt und kann bis zu 4 m [40] betragen. Dies trifft ebenfalls auf die größte erfassbare Wellenlänge zu, hier können bis zu 10 m [41] gemessen werden. Die kleinste erfassbare Amplitude ergibt sich aus der vorhandenen Geradheitsabweichung [38] und dem Rauschen am Koordinatenmessgerät, sie beträgt erfahrungsgemäß bei hochgenauen Koordinatenmessgeräten etwa 50 nm. Hochgenaue konventionelle Koordinatenmessgeräte besitzen üblicherweise einen Messbereich von etwa 1,2 m [42]. Daher wird der dargestellte Messbereich der Koordinatenmessgeräte für die Wellenlängen zwischen 1,2 m und 10 m extrapoliert.

Der erfassbare Bereich eines Rauheitsmessgerätes ist nach unten durch die Auflösung und das Rauschen begrenzt, diese betragen bei hochgenauen Geräten etwa 0,1 nm [43]. Die größtmögliche Messstrecke (und somit erfassbare Wellenlänge) hängt von der max. Bewegungsstrecke der Vorschubeinheit ab. Aufgrund der maximalen Default-Werte von 8 mm der Einzelmessstrecke und von 5 Einzelmessstrecken zzgl. der Vor- und Nachlaufstrecke [6], sollte diese gleich oder größer als 48 mm sein. Bedingt durch die Länge des Tasters (Abstand von der Tastspitze zum mechanisch-elektrischen Wandler) und der Ausführung des mechanisch-elektrischen Wandlers mit induktiver Auslenkungsmessung kann eine maximale Spitze-zu-Spitze von 5 mm bei Rauheitsmessgeräten erfasst werden ([5, 44]). Aufgrund der nahezu konstanten relativen Auflösung (Verhältnis von Auflösung zum Messbereich) der induktiven Auslenkungsmessung verschlechtert sich bei einem großen vertikalen Messbereich die absolute Ortsauflösung in vertikaler Richtung. Bei Rauheits- als auch bei Konturmessgeräten wird die maximal messbare örtliche Profilsteigung durch den Kegelwinkel des Tastelements begrenzt. Konturmessgeräte können mit der inkrementellen Auslenkungsmessung durch ein Interferometer oder optischen Encoder und somit wesentlich größeren relativen Auflösung von Spitze-zu-Spitze bis zu 60 mm erfassen [44]. Der laterale Messbereich beträgt bis zu 200 mm und stellt somit die größte erfassbare Wellenlänge dar. Die absolute Auflösung ist nur von der Länge des Tasters und der Ortsauflösung der inkrementellen Auslenkungsmessung abhängig und kann bei Konturmessgeräten 0,31 nm betragen [45].

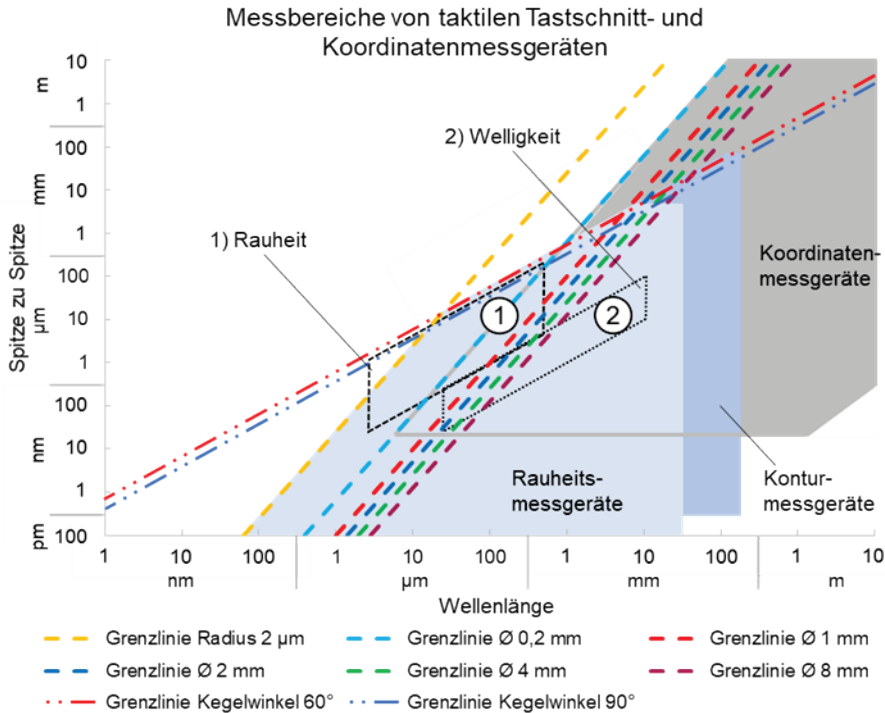


Bild 10: Erfassbare Bereiche von Tastschnitt- und Koordinatenmessgeräten nach [38]

Bei der Digitalisierung durch Messung werden Messpunkte erzeugt. Die Anzahl und der Abstand der Messpunkte muss bei der Messung so gewählt werden, dass alle signifikanten Oberflächeneigenschaften mit dem entsprechenden Messgerät erfasst werden können. Die erforderliche Punktedichte zur vollständigen Erfassung der Oberfläche wird dabei durch die kürzeste zu erfassende Wellenlänge des Oberflächenprofils bestimmt. Die Mindestpunktanzahl zu Erfassung der Abweichungen bei der Grenzwellenlänge basiert auf der Signaltherorie. Erstmals für die Signalübertragung bei Telegraphen [46] entwickelt, ist beim Nyquist-Shannon-Abtasttheorem das absolute Minimum der Abtastfrequenz $f_a > 2f_{\max}$ bzw. das absolute Maximum des Abtastabstands $x_a < \lambda_{\min}/2$ [10]. Zur vollständigen Erfassung einer periodischen Abweichung sollten mindestens sieben gleichmäßig verteilte Messpunkte entlang eines Wellendurchgangs erfasst werden [39].

Für die praktische Umsetzung bedeutet dies: Bei nahezu idealen Werkstücken ist eine hohe Nachbarschaftsähnlichkeit der Oberfläche vorhanden. Daher erfolgt die Kalibrierung von Normalen oft mit einer geringen Anzahl an Messpunkten, da damit die Eigenschaften ausreichend erfasst werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine Veränderung der Position der Messpunkte keine signifikante Änderung des Messergebnisses hervorruft.

Durch die Nachbarschaftsähnlichkeit besitzt das Messergebnis eine Allgemeingültigkeit. Bei abweichungsbehafteten Werkstückoberflächen muss die Messpunktzahl entsprechend der festgelegten Kriterien [10] erhöht werden, um die Eigenschaften der Oberfläche zu erfassen.

3.1 Profilmessung mit Tastschnittgeräten

Oberflächenprofile werden für die Ermittlung von Rauheits- und Welligkeitskennwerten typischerweise mit Tastschnittgeräten gemessen. Das grundlegende Prinzip des Tastschnittverfahrens besteht darin, eine Tastspitze über das zu messende Oberflächenprofil zu ziehen und dessen vertikale Auslenkung an lateral äquidistanten Punkten zur erfassen. In Bild 11 ist der prinzipielle Aufbau eines Tastschnittgeräts gemäß [47] dargestellt.

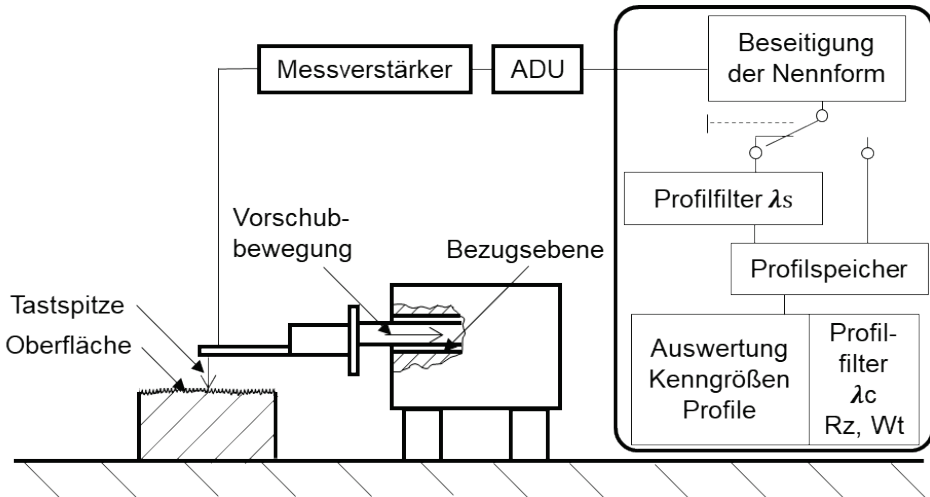


Bild 11: Prinzipieller Aufbau eines Tastschnittgeräts nach [47]

Die Merkmale von berührend messenden Tastschnittgeräten werden in [48] dargestellt. Die Werkstückoberfläche wird mit einem Taster gemessen, welcher durch eine Vorschubeinheit über das zu messende Profil gezogen wird. Die Tastspitze liegt mit definierter Kraft auf der Messobjektoberfläche auf und bleibt bei ausreichend geringen Trägheitsmoment während der Vorschubbewegung in Kontakt mit der Oberfläche. Die Länge der Messstrecke und der Messpunktastand variiert entsprechend der Oberflächenbeschaffenheit des betrachteten Werkstücks [6].

Die vertikale Auslenkung der Tastspitze wird bei Tastschnittgeräten über die Winkelauslenkung des Tasters gemessen. Die Messung erfolgt entwe-

der absolut mit einem Freitastsystem oder relativ mit einem Gleitkufensystem. Beim Freitastsystem – oder Bezugsflächen-Tastsystem [47] – wird der Tastkopf auf einer nahezu ideal geometrischen Bezugsachse geführt. Die Bezugsfläche stellt auch die Referenz für Messungen dar. Es findet lediglich eine Berührung zwischen Tastspitze und Oberfläche statt. Somit wird das Oberflächenprofil bis auf den Einfluss der Tastspitzengeometrie [49] unverfälscht übertragen.

Bei den Gleitkufensystemen handelt es sich vorwiegend um Einkufen-Tastsysteme [47]. Das Tastsystem ist mit einem Gelenk mit der Vorschubeinheit verbunden. Bei der Messung stützt es sich mit einer Gleitkufe auf der Werkstückoberfläche ab. Die Auslenkungsmessung erfolgt relativ zur Auslenkung der Kufe, welche durch den größeren Radius im Vergleich zur Tastspitze die Topografie stärker morphologisch filtert. Abhängig vom Kufenradius der Gleitkufe und vom Verhältnis zwischen dem Abstand von Tastspitze zu Gleitkufe und Profilwellenlänge können Messergebnisse verfälscht wiedergegeben und nur die Rauheitsanteile erfasst werden ([47, 50]).

Die Tastspitzen eines Tastschnittgeräts sind kegelförmig mit abgerundeter Spitze. Als Material wird aufgrund seiner Härte und der daraus resultierenden Haltbarkeit Diamant verwendet. Der Radius von Tastspitzen für Messungen von sehr fein strukturierten Oberflächen beträgt $2\text{ }\mu\text{m}$. Der Kegelwinkel der Tastspitze beträgt 60° oder 90° . Der prinzipielle Aufbau eines Tastsystems nach [47] ist in Bild 12 dargestellt.

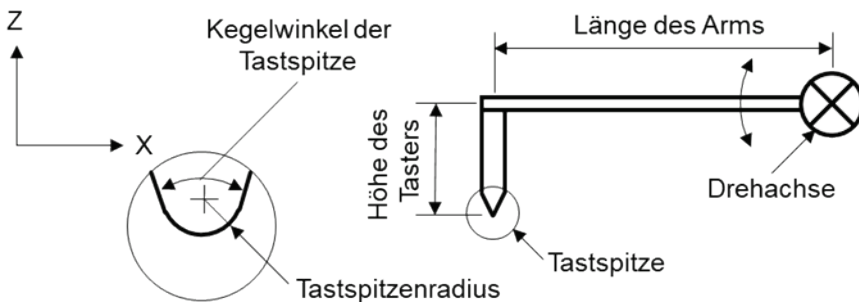


Bild 12: Beschreibung eines typischen Tasters nach [47]

3.2 Koordinatenmesstechnik

Auf Koordinatenmessgeräten werden Form- und Welligkeitsabweichungen von Werkstücken aus verschiedenen Herstellungsverfahren gemessen. Deren Oberflächeneigenschaften zeigen charakteristische Merkmale, die man dem Herstellungsprozess zuordnen kann. Die Oberflächeneigenschaften sind seit Beginn der industriellen Massenfertigung Gegenstand von Untersuchungen [51]. Die dabei entstandenen Bewertungskriterien sind zum Teil heute noch gültig.

Unter dem Begriff Koordinatenmesstechnik werden Messverfahren zusammengefasst, bei denen Koordinaten von Punkten im Raum erfasst werden. Dabei beziehen sich die erfassten Koordinaten vorwiegend auf ein globales kartesisches Koordinatensystem. Die Koordinatensysteme werden durch die hier betrachteten Koordinatenmessgeräte verkörpert. Die Achsausrichtung der Koordinatensysteme orientiert sich dabei an der Achsausrichtung des jeweiligen Koordinatenmessgeräts. Dieses kann auch als Gerätekoordinatensystem bezeichnet werden. Zur Vereinfachung der Messung definiert man ein lokales Koordinatensystem am zu messenden Werkstück. Damit ermöglicht man die normgerechte Ausrichtung anhand von Bezugselementen der technischen Zeichnung des zu messenden Werkstücks [52] und vereinfacht die Orientierung für den Bediener.

Die Definition der Nenngeometrie eines Elements stellt die Grundlage zur Erfassung der geometrischen Merkmale dar. Diese Merkmale entstehen durch die Verknüpfung einzelner Punkte im Koordinatensystem. Um Eigenschaften der Werkstückoberfläche abbilden zu können, werden die einzelnen Punkte gemessen. Dabei werden die festgelegten Messpunkte durch das Antasten der wirklichen Oberfläche des Werkstücks durch ein Tastelement erfasst. Aus diesen Messpunkten wird ein primäres mathematisches Modell der wirklichen Oberfläche des Werkstücks erstellt und zur erfassten Primäroberfläche verarbeitet [53]. Die Gestaltabweichungen des Werkstücks werden durch einen Vergleich zwischen Nenngeometrie und erfasseter Primäroberfläche gemäß [53, 54] berechnet.

Die Erfassung der Messpunkte dient als Grundlage zur Überprüfung der Merkmale des betrachteten Werkstücks. Die geometrischen Anforderungen an Werkstücke in technischen Spezifikationen und die Anforderungen an ihre Verifikation werden entsprechend festgelegt [55]. Bild 13 zeigt das grundsätzliche Vorgehen beim Prüfen prismatischer Werkstücke durch Messen von Einzelpunkten am Werkstück und der Berechnung von zugeordneten Elementen nach ([52], S. 49). Dieses Prinzip wird unabhängig von der Bauart des Koordinatenmessgeräts angewandt.

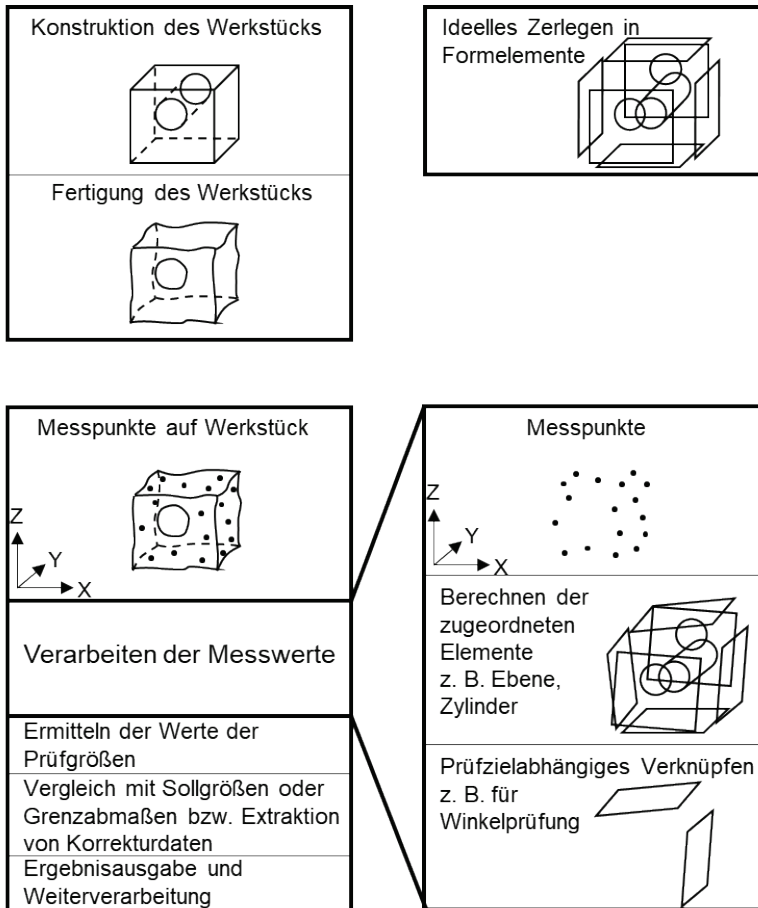


Bild 13: Grundsätzliches Vorgehen beim Prüfen prismatischer Werkstücke durch Messen von Einzelpunkten am Werkstück und der Berechnung von zugeordneten Elementen nach ([52], S. 49)

Die am weitesten verbreiteten Bauarten von KMG sind die Auslegerbauweise mit festem Tisch und die Portalbauweise mit beweglichem Portal. Die Portalbauweise ermöglicht eine starre Konstruktion des Geräts. Damit können geringere Messabweichungen als bei der Auslegerbauweise erreicht werden. In Bild 14 ist der prinzipielle Aufbau eines konventionellen kartesischen Koordinatenmessgeräts in der Portalbauweise dargestellt [52]. Die dabei dargestellten kinematischen und steuerungstechnischen Grundlagen sind zum Teil auch auf andere Bauweisen übertragbar. Neben der vorgestellten Bauweise existieren weitere Bauweisen mit verschiedenster Sensorik (vgl. [56], S. 17-19).

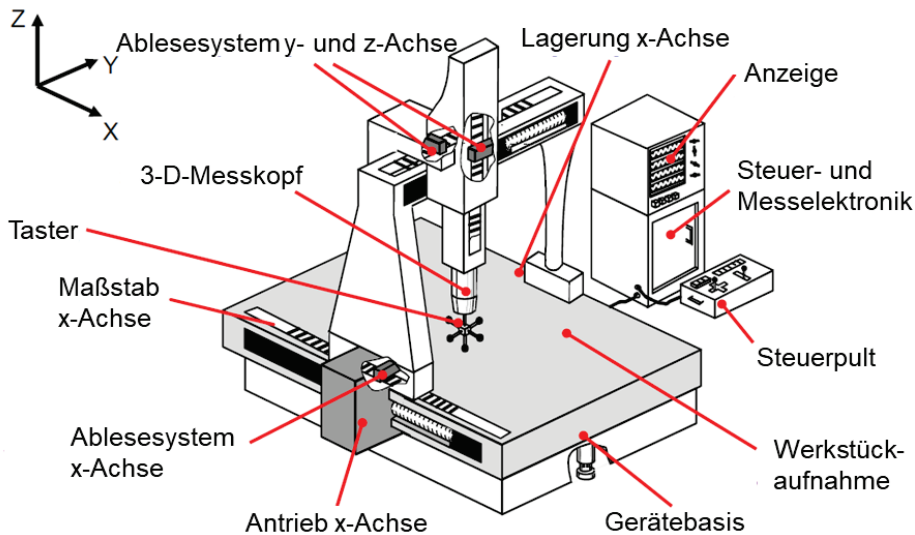


Bild 14: Prinzipieller Aufbau eines konventionellen kartesischen Koordinatenmessgeräts in Portalbauweise [52]

Im Rahmen dieser Arbeit werden Messungen miteinander verglichen. Die Messpunkte werden dabei durch die taktile Antastung der Werkstückoberfläche durch ein Antastelement erfasst. Taktile bedeutet hierbei, dass ein Kontakt zwischen Taster und Messobjekt hergestellt wird. Der Kontakt erfolgt mit einer definierten Messkraft. Die Wahl der geeigneten Messkraft ist von verschiedenen Faktoren abhängig, zum Beispiel der Größe des Antastelements und den Werkstoffeigenschaften des Messobjekts [57]. Durch die gewählten Antastkräfte wird während der Antastung die Werkstückoberfläche elastisch verformt [58]. Die Wahl falscher Messgeschwindigkeiten und Antastkräfte kann *Stick-Slip*-Effekte oder ein Abheben der Tastkugel oder auch plastische Verformungen verursachen. Das Messergebnis wird dadurch verfälscht bzw. das Messobjekt beschädigt. Angaben nach [59] über die Oberflächenbeschaffenheit helfen hierbei, um die Messstrategie an die zu messende Oberfläche anzupassen.

Das Koordinatenmessgerät ist mit einem Tastsystem ausgestattet, um die Koordinaten im Raum zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Messung mit einem messenden Tastsystem. Das betrachtete messende Tastsystem besteht aus drei Federparallelogrammen mit induktiven Längenmesssystemen für jede Koordinatenachse. Die Koordinate des Messpunkts wird aus den Gerätekoordinaten und der jeweiligen Tasterauslenkung bei der Antastung berechnet. Dieses Prinzip ermöglicht neben der Einzelpunktantastung auch die Scanningmessung. Dabei werden, unter

kontinuierlichem Kontakt zwischen Mess- und Tastobjekt, fortlaufend Messpunkte aufgenommen. Eine gleichmäßige Relativbewegung des Tastelements über die Messobjektoberfläche mit definierter Messkraft wird dabei vorausgesetzt. In Bild 15 ist ein vereinfachtes messendes Tastsystem nach [54] dargestellt. Dabei wird das induktive Längenmesssystem in X-Richtung mit der durch die Antastung induzierten Wegänderung δx dargestellt.

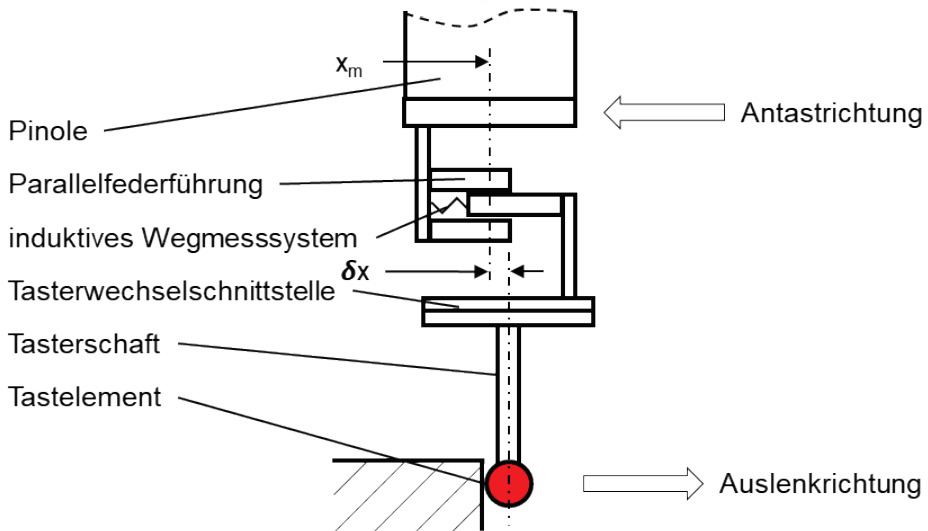


Bild 15: Vereinfachtes messendes Tastsystem nach [54]

Das Tastelement ist bei Koordinatenmessungen meist kugelförmig und besteht aus synthetischem Rubin. Die Kugel wird auf einen vorwiegend metallischen Schaft geklebt. Durch definierte Anlagepunkte ohne Kleber oder durch die Verwendung schrumpfender Kleber wird eine statisch bestimmte Auflage erreicht, bei der die Klebeschicht keinen Einfluss auf die Messung hat, da sie sich außerhalb des Messkreises befindet. Je nach Beschaffenheit des Werkstücks oder bei besonderen Anforderungen der Messaufgabe verwendet man alternative Tastkugelwerkstoffe, zum Beispiel Diamant, Siliziumnitrid oder Kugeln mit Diamantbeschichtung. Ebenso kann eine veränderte Tastergeometrie durch die Messaufgabe nötig sein.

Als Schnittstelle zwischen Koordinatenmessgerät und Bediener fungiert die Oberfläche der herstellereigenen Anwendersoftware. Diese ermöglicht dem Benutzer das Messen von Hand und im CNC-Betrieb. Die Programmierung des Messablaufs kann online oder auch offline erfolgen. Die Softwarepakete verfügen zudem vorwiegend über CAD-Schnittstellen, mit der die CAD-Modelle der zu messenden Werkstücke in die Messsoftware übernommen werden können.

4 Messunsicherheit

4.1 Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen

Die Basis zur Messunsicherheitsermittlung bildet der 1995, durch das Internationale Büro für Maß und Gewicht veröffentlichte ‚Guide to the expression of uncertainty in measurement‘, kurz GUM genannt [60]. Er dient der internationalen Vergleichbarkeit von Messergebnissen sowie der Bereitstellung von umfänglichen Informationen zur Ermittlung der Messunsicherheit. Das Messergebnis, bestehend aus Messwert und Messunsicherheit mit Erweiterungsfaktor, stellt die Grundlage zur Bewertung der Qualität eines geprüften Werkstücks dar.

Ein Messgerät liefert einen Messwert, der von dem wahren Wert mit den zufälligen und systematischen Messabweichungen abweicht [61]. Zufällige Abweichungen können nicht korrigiert werden, da diese bei mehrmaliger Beobachtung der Messgröße in Betrag und Vorzeichen variieren. Durch eine Vergrößerung der Beobachtungsanzahl können zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden, um den Einfluss zu verringern. Systematische Abweichungen sind hingegen quantifizierbar, da sie bei Wiederholmessungen stets gleich auftreten. Der Einfluss dieser Komponente auf den Messwert und damit das Messergebnis kann somit korrigiert werden.

Eine zuverlässige Aussage über die Qualität der Messung wird dann erzielt, wenn alle relevanten Einflussgrößen ausreichend erkannt sind. Eine Voraussetzung hierfür sind Informationen über den Messvorgang und die Ableitung der dabei wirkenden Einflussgrößen. Durch die Sammlung von Informationen und deren Auswertung kann das Messergebnis um seine Unsicherheit erweitert werden. Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge für die Messunsicherheitsberechnung können durch zwei Methoden ermittelt werden. Methode A beschreibt dabei die Ermittlung durch eine Reihe von Beobachtungen und der darauf aufbauenden statistischen Analyse. Methode B beschreibt die Ermittlung mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse von Beobachtungsreihen.

Beide Methoden können in einer Messunsicherheitsbilanz für die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge verwendet werden. Entsprechend dem Erkenntnisgewinn durch Methode A oder B werden dabei die merkmalspezifischen Unsicherheitsbeiträge betrachtet. Die Erstellung von Messunsicherheitsbilanzen bei Koordinatenmessungen wird durch eine entsprechende VDI-Richtlinie [62] unterstützt. Darin wird die allgemeine

Herangehensweise erläutert und die Messunsicherheitsermittlung für verschiedene Standardmessaufgaben (z. B. Abstand von zwei Ebenen) dargestellt. Die korrekte Modellierung einer solchen Bilanz ist dabei entscheidend. Eine falsche Modellierung führt grundsätzlich zu einem falschen Ergebnis.

Eine Erweiterung des GUM ([63], S. 3) wurde durch die Beschränkung aufgrund pauschalisierter Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen und der Linearität des Modells erforderlich. Durch die Veröffentlichung der Erweiterung des GUM, dem *GUM Supplement 1*, wird die Messunsicherheitsberechnung durch Simulation ermöglicht [64]. Diese ersetzt das erforderliche analytische Modell der Messaufgabe durch ein Simulationsmodell und die Definition der Variationsbereiche seiner Einflussgrößen.

In der simulationsbasierten Messunsicherheitsbestimmung wird die Messunsicherheit nach der Monte-Carlo-Methode basierend auf mathematisch-physikalischen Modellen berechnet. Die Simulation erfordert dabei Kenntnis über die Eigenschaften der betrachteten Einflussgrößen. Weiterhin müssen die Wahrscheinlichkeitsverteilung und die Bereiche der möglichen Abweichung der Einflussgrößen bekannt sein. Unter Zuhilfenahme von Zufallszahlen werden diese Werte in der Simulation innerhalb ihrer Bereiche variiert (vgl. [64], S. 9-11). Eine zuverlässige Aussage über die Messunsicherheit der betrachteten Geometrie ergibt sich durch eine ausreichend hohe Anzahl an Simulationsschritten. Damit wird erreicht, dass die durch Simulation ermittelte Messunsicherheit nicht mehr variiert und ausreichend konstant ist. Die Methodik wird in ‚GUM Supplement 1‘ detailliert beschrieben. Anwendungen dieser Methode im Bereich der Fertigungsmesstechnik werden in [65] vorgestellt. Eine davon ist das virtuelle Koordinatenmessgerät, das im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert wird. Es ermöglicht die Verwendung der Messunsicherheitsberechnung durch Simulation bei Koordinatenmessungen.

Die Messunsicherheitsbilanz als auch die Messunsicherheitsberechnung durch Simulation haben ihre Vor- und Nachteile. Für jedes betrachtete Merkmal muss eine separate Messunsicherheitsbilanz erstellt werden. Zudem kann es vorkommen, dass dabei einzelne Beiträge vereinfacht oder ohne Korrelationen dargestellt werden und somit eine Über- oder Unterschätzung der Messunsicherheit stattfindet. Die Messunsicherheitsbilanz kann durch eine einfache Tabellenkalkulation erstellt werden und ist somit einfach anzuwenden.

Hingegen wird das virtuelle Koordinatenmessgerät für jedes Koordinatenmessgerät separat installiert und parametrisiert. Damit verbunden ist ein erheblicher Kosten- und Zeitaufwand. Die berechnete Messunsicherheit ist durch die Verwendung exakt ermittelter und nicht abgeschätzter Einflussgrößen meist genauer [65] als bei der Messunsicherheitsbilanz. Die Rechendauer ist von verschiedenen Faktoren abhängig und nicht exakt vorhersehbar.

Alternativ kann die Messunsicherheitsermittlung durch die Messung eines kalibrierten Werkstücks erfolgen [66, 67, 68]. Die Messunsicherheit wird durch Mehrfachmessungen am Werkstück ermittelt. Unter der Voraussetzung, dass ähnliche Umgebungsbedingungen bei der Messung herrschen (vgl. [52], S. 372-373) und das kalibrierte Werkstück in seiner Form der Messaufgabe entspricht, kann bei dieser praktischen Herangehensweise die Messunsicherheit auf die normale Messaufgabe übertragen werden.

Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit erfolgt unabhängig von der zugrundeliegenden Ermittlungsmethode. Die erweiterte Messunsicherheit wird nach [69] bei ausreichend hohem effektiven Freiheitsgrad ($v_{\text{eff}} > 50$) mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ berechnet. Dies entspricht einem Vertrauensbereich von 95 % bei einer Gaußverteilung. Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit erfolgt nach der in Formel 4.1 dargestellten Form:

$$U = k \cdot u(y) \quad (4.1)$$

4.2 Das virtuelle Koordinatenmessgerät

4.2.1 Funktionsweise

Das virtuelle Koordinatenmessgerät, das im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird und hier nach der englischen Benennung als PTB-VCMM (Virtual Coordinate Measuring Machine) bezeichnet wird, wurde von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zur Ermittlung der Messunsicherheit bei taktilen Messungen mit Koordinatenmessgeräten entwickelt [65]. Diese Vorgehensweise wurde entsprechend in die Normung aufgenommen [70, 71]. Die Berechnungsweise durch die Monte-Carlo-Simulation basiert, wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, auf [64].

Neben dem PTB-VCMM auf dem Gebiet der taktilen Koordinatenmesstechnik, sind weitere Ansätze zur Verwendung der Messunsicherheitsermittlung durch Simulation bekannt. Das Virtual CMM CUT [72, 73] arbeitet nach demselben Prinzip. Die Anzahl an Simulationen und betrachteten

Szenarien ist jedoch deutlich geringer. Darauf aufbauend ist das virtuelle Koordinatenmessgerät mit künstlichen neuronalen Netzen erstellt worden [74]. Beide Ansätze konnten sich nicht durchsetzen und sind relativ unbekannt. Für die Messunsicherheitsermittlung bei der Messung asphärischer Linsenparameter wurde für die Anwendung auf Mikro- und Nanokoordinatenmessgeräten ebenfalls ein virtuelles Koordinatenmessgerät entwickelt [75]. Ein weiterer Ansatz ist das Pundit-CMM [76]. Im Gegensatz zur vorwiegend expliziten Beschreibung der Einflussgrößen der Simulation bei den zuvor vorgestellten Varianten werden beim Pundit-CMM die Einflussgrößen in ihren etwaigen Ausprägungen abgeschätzt. Dieser praxisnahe Ansatz dient zur groben Abschätzung der Messunsicherheit.

Neben der taktilen Koordinatenmesstechnik wird die Messunsicherheitsberechnung durch Simulation auch in anderen Bereichen der Oberflächen- und Koordinatenmesstechnik, wie zum Beispiel der Computertomographie, untersucht bzw. eingesetzt. Dabei werden digitale Zwillinge für die Messunsicherheitsermittlung durch Simulation entwickelt [77], für die Modellierung der Parameter des digitalen Zwillings werden die verschiedenen Varianten momentan noch erprobt [78]. Bei der Messung von Oberflächenstrukturen im Nanobereich mit fünfsichtigen Nano-Koordinatenmessgeräten kann die Messunsicherheit ebenfalls mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden [79].

Der in dieser Arbeit verwendete Begriff VCMM bezieht sich nachfolgend explizit auf das modular aufgebaute PTB-VCMM in der aktuellen Version. Je nach Verwendungszweck können dabei verschiedene Module für die Messunsicherheitsberechnung herangezogen werden, wie zum Beispiel das beim VCMM-Gear [80] bereits verwendete Drehtischmodul [81] oder die Verwendung bei der Messung mit Lasertrackern [82]. Kernkomponenten wie das Statistikmodul zur Berechnung der Zufallszahlen und Variation der Messpunkte werden bei allen VCMM-Versionen verwendet. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse gegeben. In Bild 16 sind diese Module in einer Prinzipskizze dargestellt [1]:

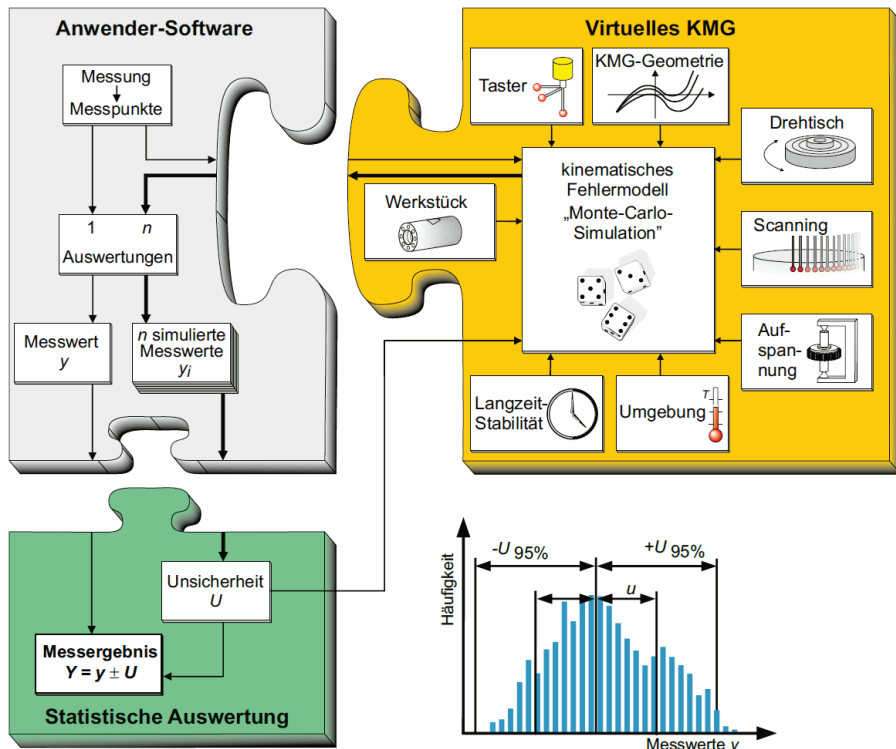


Bild 16: Prinzipskizze des virtuellen Koordinatenmessgerätes VCMM [1].

Aufgrund der zahlreichen Eingangsparameter für die Simulation werden für dieses Verfahren umfangreiche Kenntnisse über das Verhalten von Koordinatenmessgeräten vorausgesetzt [83]. Die Qualität der Messunsicherheitsermittlung ist unmittelbar von der Qualität der Bestimmung der Einflussgrößen abhängig. Für das VCMM werden verschiedene Einflussgrößen berücksichtigt. Diese sind in Bild 17 in fünf Hauptgruppen untergliedert dargestellt. In den Untergruppen sind einzelne bei der Messunsicherheitsimulation verwendete Komponenten beschrieben. Die geräteabhängigen Einflussgrößen finden sich in den Hauptgruppen ‚Koordinatenmessgerät‘ und ‚Tastsystem‘ wieder. Zur Erfassung der statischen Geometrieabweichungen des Koordinatenmessgeräts stehen erprobte Verfahren zur Verfügung [84, 85, 86].

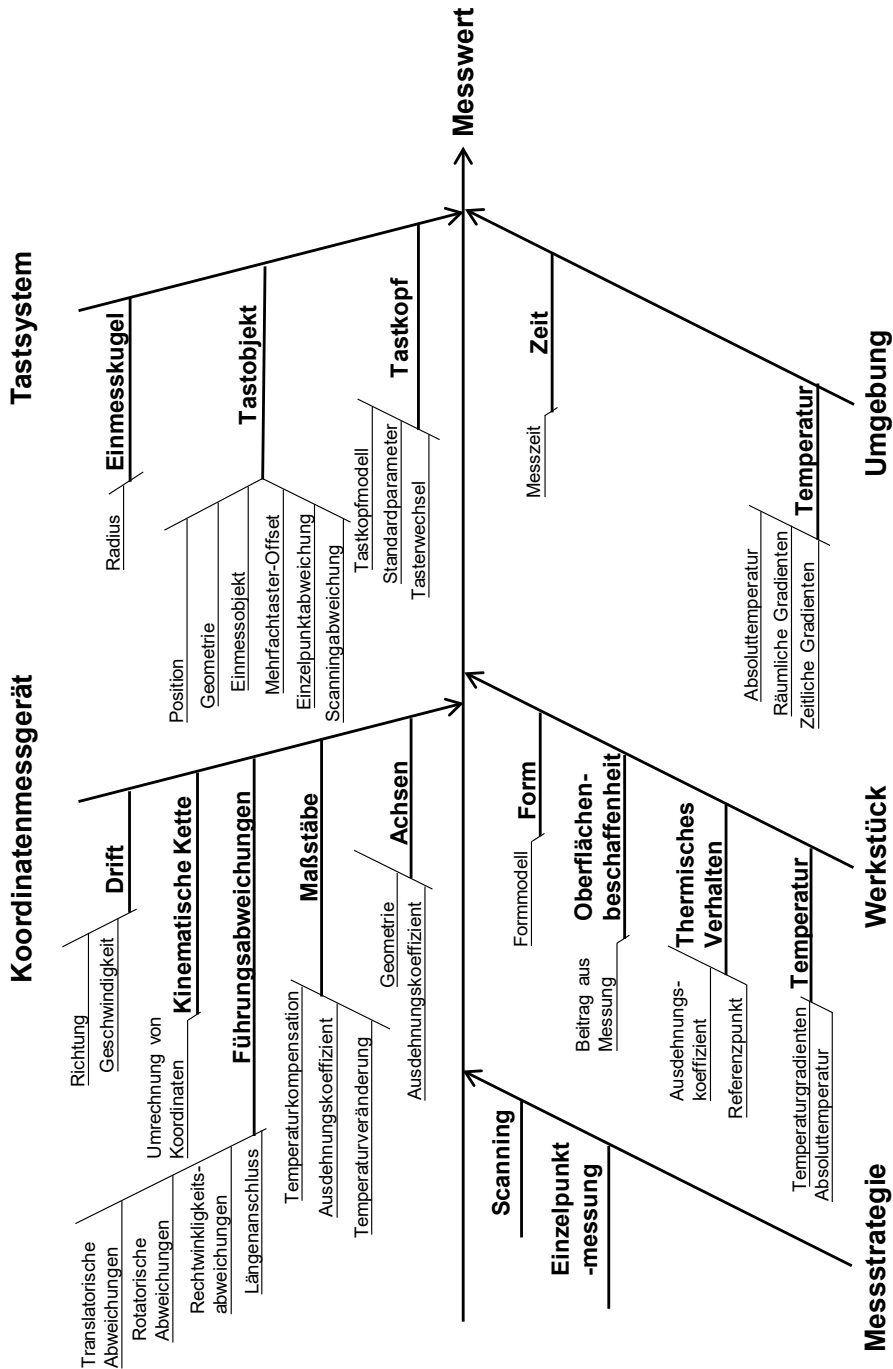


Bild 17: Berücksichtigte Einflussgrößen und Einflüsse des virtuellen Koordinatenmessgeräts

Von weiteren Faktoren sind die Komponenten der Hauptgruppen ‚Werkstück‘ und ‚Umgebung‘ abhängig. Besonders die in der unmittelbaren Umgebung herrschenden Temperaturbedingungen haben einen großen Einfluss auf diese beiden Gruppen. Hierbei werden jedoch nicht alle herrschenden Einflussgrößen abgebildet [57]. Als fünfte und letzte Hauptgruppe wird ‚Messstrategie‘ aufgeführt.

Die gerätebezogenen Einflussgrößen werden bei der Installation des VCMM ermittelt und sollten regelmäßig aktualisiert werden. Messaufgabenbezogene Größen werden durch den Anwender direkt vor der Durchführung der Messaufgabe durch standardisierte Messabläufe ermittelt. Nur so kann ein genaues Ergebnis in der Simulation erzielt werden [P1]. Dazu gehören die Messung der Eigenschaften des Tastsystems und die Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit.

Die Werte der Einflussgrößen der Oberflächenbeschaffenheit werden durch speziell dafür entwickelte Messverfahren erfasst [87, 88]. Bei der Einzelpunktmessung wird der anzutastende Punkt auf der Werkstückoberfläche wiederholt gemessen. Um die vorherige Bewegung des Messgeräts aus einer beliebigen Achsrichtung zu berücksichtigen, wird das Koordinatenmessgerät zwischen den einzelnen Wiederholmessungen in allen drei Koordinatenachsen verfahren. Damit wird die Wiederholgenauigkeit der Antastung an einem vorher definierten Messpunkt bestimmt. Ist die Werkstückoberfläche dabei glatt, variiert das Ergebnis kaum. Bei rauen Oberflächen werden typischerweise größere Streuungen ermittelt, da die laterale Messposition im Rahmen der Antaststreuung variiert und die ortsabhängige Profilerhebung erfasst wird. Die ermittelte Standardabweichung der Messwerte an der Werkstückoberfläche wird um die Standardabweichung, welche bei der Messung einer quasiidealen Oberfläche an einer glatten Keramikkugel auftritt, als Summe der Quadrate verringert. Der resultierende Wert geht als Einflussgröße in die Messunsicherheitsberechnung ein.

Bei Scanningmessungen wird die Einflussgröße durch die Messung einer Messbahn im Vor- und Rücklauf erfasst. Die erfassten Messpunkte werden um Messausreißer reduziert und anschließend mit der Grenzwellenlänge 0,3 mm hochpassgefiltert (siehe [88], S. 63). Diese Grenzwellenlänge ergibt sich aus der Festlegung von 150 W/U als typische Filterwahl für eine Messung an einem Einmessnormal mit dem Durchmesser von 30 mm. Wie bei der Einzelpunktmessung wird die Differenz der Summe der Quadrate zur (Scanning-)Messung an einer glatten Keramikkugel betrachtet, um aus dem Sensor kommende Antasteffekte nicht doppelt zu berücksichtigen.

Die resultierende Abweichung geht als Einflussgröße der Oberfläche für die Scanningmessung in die Messunsicherheitsberechnung ein. Je nach betrachteter Werkstückoberfläche verändert sich das Messergebnis bei der Änderung einzelner Messparameter. Die Einflussgröße der Oberfläche sollte für jede vorhandene Kombination aus Werkstückoberfläche, Messgeschwindigkeit, Antastkraft und Größe des Antastelements neu ermittelt werden.

Sämtliche Werte der Einflussgrößen des VCMM sind in einer XML-Struktur gespeichert. Neben einem konstanten Wert bekommt jeder Wert einen Wert für seine zufällige Variation bei der Simulation mit der entsprechenden Verteilung zugeordnet. Das virtuelle Koordinatenmessgerät unterstützt die Verwendung von Rechteck-, Gauß- und Dreiecksverteilungen [88]. Jedem Wert der Einflussgröße wird eine ermittelte Verteilung zugewiesen. Je nach Datenquelle kann die Verteilung für eine Einflussgröße verschieden sein. Beispielhaft ist an dieser Stelle die Beschreibung der im Messraum herrschenden Durchschnittstemperatur aufgeführt: Wird ein Messraum anhand von Datenblättern klassifiziert, ist dieser anhand der Messraumklasse [89] zu beschreiben. Ein Messraum der höchsten Klasse 1 mit der Solltemperatur Klasse A wird anhand der Vorgaben der Richtlinie wie folgt beschrieben:

```
<AverageTemperature>
<Value>20</ Value>
<Distribution>

    <EQUAL Range="0.4" />

</Distribution >
</AverageTemperature >
```

Die Solltemperatur wird als Wert in der Einheit Grad Celsius hinterlegt. Die Variation um die Solltemperatur findet mit einer Rechteckverteilung und der zulässigen Grenzabweichung von $\pm 0,4$ K statt. Findet im Rahmen der Einflussgrößenaufnahme eine Messung des Temperaturverhaltens statt, wird die Verteilung mit ihren Kenngrößen entsprechend angepasst.

Bild 18 veranschaulicht das Funktionsprinzip des virtuellen Koordinatenmessgeräts [90]. Die vom Koordinatenmessgerät aufgenommenen Messpunkte werden in der herstellereigenen Messsoftware ihren assoziierten Elementen zugeordnet und hinsichtlich der betrachteten Merkmale ausgewertet (Abschnitt 4.4.3 in [37]). Das VCMM verwendet die aufgenommenen Messpunkte und simuliert weitere Messungen.

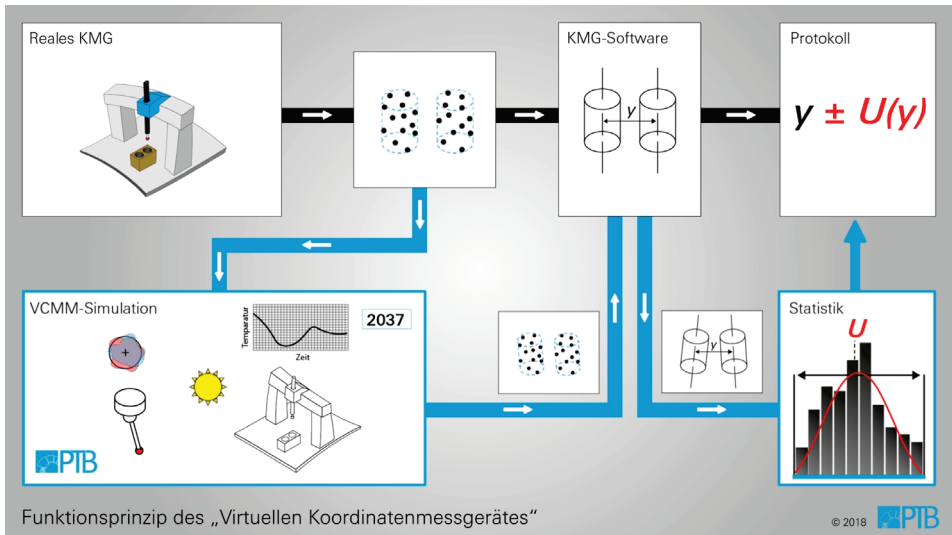


Bild 18: Funktionsprinzip des virtuellen Koordinatenmessgeräts [90]

Bei einem Simulationsschritt wird jeder Messpunkt entsprechend seiner Position im Gerätekoordinatensystem bzw. Messvolumen variiert. Dabei wirken die an dieser Stelle simulierten systematischen Abweichungsanteile in Kombination mit den zufälligen Abweichungsanteilen. Im Anschluss an diese ‚Punkteverrauschung‘ findet durch die Messsoftware die Auswertung der verrauschten Messpunkte statt. Das Ergebnis wird in das Statistikmodul des VCMM übertragen. Für jeden Simulationsschritt werden die zufälligen Anteile durch die Generierung von Zufallszahlen neu ermittelt. Die Messunsicherheitssimulation findet so oft statt, bis eine statistisch ausreichend stabile Messunsicherheit berechnet werden kann oder die Messunsicherheit vom Anwender vorab definierte Kriterien erfüllt. Neben der Überprüfung eines Stabilitätskriteriums kann ein Verhältnis von Messunsicherheit zur merkmalsbezogenen Toleranz oder aber die maximale Anzahl an Iterationen für die Beendigung der Messunsicherheitssimulation festgelegt werden.

Die Simulation ist so in die Anwendersoftware integriert, dass bestehende Messprogramme zu einem beliebigen Zeitpunkt mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät ausgewertet werden können. Weiterhin kann die Simulation mit synthetischen Daten durchgeführt werden. Dafür muss virtuell im Gerätekoordinatensystem bzw. Messvolumen der Ort der Messung definiert werden.

Das virtuelle Koordinatenmessgerät (VCMM) ist seit 2004 in einer ersten Version im industriellen Einsatz [91]. Anwendung findet es hauptsächlich

in akkreditierten Kalibrierlaboratorien. Durch die 2018 fertiggestellte Weiterentwicklung des virtuellen Koordinatenmessgeräts wurde dessen Funktionsumfang unter anderem durch Adaption von Scanningmessungen und Tasterwechsel an den Stand der Technik angepasst [P2]. Erweiterungen des VCMM durch Berücksichtigung des Einflusses der Unterabtastung und Verbesserungen in der Performance ermöglichen den Einsatz jenseits von Kalibrierlaboratorien.

Im Gegensatz zur ersten Version des VCMM wurde ein Stabilitätskriterium eingeführt, um die Stabilität der errechneten Messunsicherheit zu gewährleisten. Ein Merkmal gilt als stabil, wenn beim Simulationsschritt der Quotient aus der mittleren Änderung der Varianz und der Varianz eines Simulationsschritts kleiner als das vom Anwender definierte Stabilitätskriterium ist. Dann wird die Messunsicherheitssimulation beendet [P3]. Wenn der systematische Anteil der Messunsicherheit, der aus systematischen Einflüssen entsteht, gering ist, entspricht die Standardabweichung des Mittelwerts $s(x)$ der Standardunsicherheit. Die Standardabweichung der Standardunsicherheit ist in der Regel ‚ähnlich groß‘ wie die Standardabweichung des Mittelwerts der Simulation x . Aus diesem Grund wird der relative Stabilitätswert als Maß für die Güte der Messunsicherheit angesehen [92].

Nach Beendigung der Simulation wird die Messunsicherheit berechnet. Der aus der Verteilung entstammende tatsächliche Erweiterungsfaktor ist bekannt [81]. Er beträgt entsprechend den Simulationsergebnissen nahezu zwei. Um konsistente Angaben im Kalibrierschein zu ermöglichen, wird in der kommerziell verfügbaren Version die Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ berechnet und angegeben.

Für die praktische Anwendung des VCMM wird eine maximale Simulationsanzahl definiert, um unverhältnismäßig hohe Simulationszeiten zu vermeiden, wenn die Stabilitätskriterien nicht erreicht werden. Das Simulationsminimum geht aus empirischen Beobachtungen über die sich mit der Anzahl an Simulationen einstellenden Stabilität der Messunsicherheitsberechnung hervor. Das erforderliche Simulationsminimum beträgt 200 Simulationen.

Bild 19 stellt die errechnete Messunsicherheit (blaue Linie) der relativen Stabilität einer Messunsicherheitssimulation (orange Linie) gegenüber. Der festgelegte Grenzwert eines stabilen Simulationsergebnisses (=Stabilitätskriterium) ist durch die gestrichelte Linie bei 0,001 ppm eingezeichnet. Im gezeigten Beispiel wird das Stabilitätskriterium dabei nach dem 1122. Simulationsschritt erreicht. Anhand des Verlaufs der Messunsicherheit wird

die Relevanz einer Mindestanzahl an Simulationen ersichtlich. Erst ab etwa 150 Iterationen stabilisiert sich die Messunsicherheit merklich und führt zu reproduzierbaren Ergebnissen.

Gegenüberstellung von Messunsicherheit und relativem Stabilitätswert einer Messunsicherheitssimulation

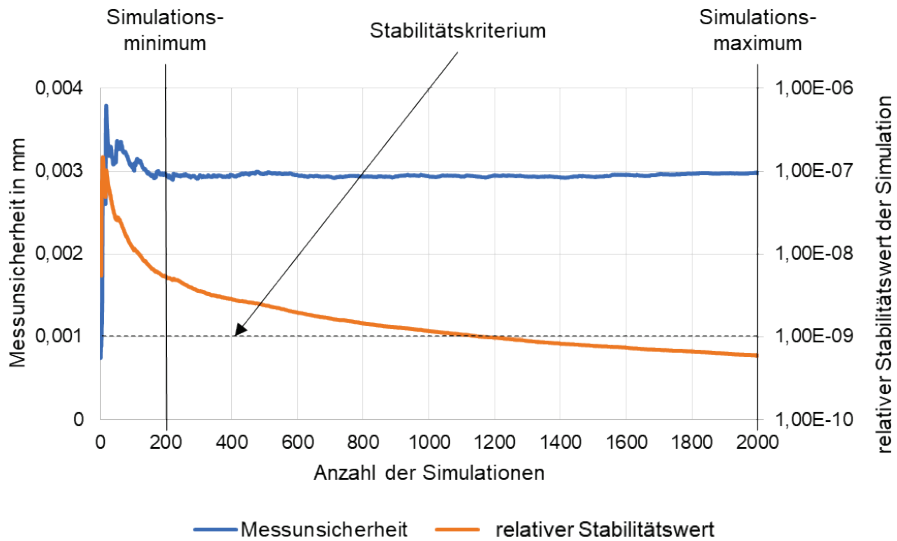


Bild 19: Gegenüberstellung von Messunsicherheit und relativer Stabilität einer Messunsicherheitssimulation über die Anzahl der Simulationen

Die Messunsicherheit schwankt in den ersten 200 Simulationsschritten zwischen $0,746 \mu\text{m}$ und $3,781 \mu\text{m}$ und somit um $3,035 \mu\text{m}$. Zwischen Simulationsminimum und dem Erreichen des Stabilitätskriteriums beträgt die Messunsicherheit zwischen $2,897 \mu\text{m}$ und $2,994 \mu\text{m}$ mit einer Spannweite von $0,097 \mu\text{m}$. Um die Auswirkung des Stabilitätskriteriums auf die berechnete Messunsicherheit zu betrachten, wird der Bereich nach Erreichen des Stabilitätskriteriums bis zum Simulationsmaximum ebenfalls betrachtet. Üblicherweise ist bei der normalen Anwendung des VCMM die Unsicherheitsermittlung an dieser Stelle bereits beendet. In diesem Bereich beträgt die Messunsicherheit zwischen $2,921 \mu\text{m}$ und $2,981 \mu\text{m}$. Die Spannweite reduziert sich dabei auf $0,060 \mu\text{m}$. Dies verdeutlicht, dass das Stabilitätskriterium erst dann greift und die Messunsicherheitssimulation beendet, wenn die Messunsicherheit ausreichend stabil ist. Es führt dazu, dass die Messunsicherheitsberechnung bei wiederholter Simulation mit identischen Randbedingungen zu einem annähernd gleichen Resultat führt. Bei mehreren Messgrößen wird erst nach dem Erreichen des Stabilitätskriteriums der letzten Messgröße die Simulation abgebrochen.

4.2.2 Oberflächeneinfluss: Unterabtastung und Bewertung der Messstrategie

Eine besondere Rolle für diese Arbeit spielt der Einfluss der Messstrategie auf die Messunsicherheit im Zusammenhang mit der Oberflächentextur des Werkstücks und die Simulation dieses Einflusses im VCMM. Dafür wird der Grad der Erfassung der Oberflächentextur bewertet. Die Oberflächentextur mit Form, Welligkeit und Rauheit ist letztlich nur durch eine unendliche Zahl von Messpunkten vollständig erfassbar. Häufig wird durch die punktgenaue Festlegung der Messstrategie als Teil der Messaufgabendefinition der Einfluss der Oberflächentextur begrenzt. Dieses Vorgehen ist beim Kalibrieren von Normalen zweckmäßig. Bei der Messung von Werkstücken, bei denen die unvollständige Erfassung der Oberfläche durch eine begrenzte Messpunktzahl („Unterabtastung“) zur Messunsicherheit beiträgt, ist das nicht zielführend.

Durch die Analyse des Einflusses der Unterabtastung wird der Beitrag der Messstrategie (Messpunktverteilung) zur Unsicherheit abgeschätzt und im VCMM berücksichtigt [P4]. Dazu werden Messungen mit verschiedenen Messstrategien miteinander verglichen. Die vom Anwender als Standard für die Messung definierte Punktverteilung wird mit dem Oberflächenwellenmodell des Werkstücks für eine Simulation der Messung mit dem VCMM verwendet und die Form inklusive der Welligkeit mit dem Koordinatenmessgerät gemessen. Im Anschluss daran findet eine Simulation der Messung mit einer vielfachen Anzahl an Messpunkten statt. Diese Anzahl sollte so gewählt werden, dass die kürzeste, mit einem Koordinatenmessgerät erfassbare, Wellenlänge der Oberflächenstruktur mit mindestens sieben Punkten [39] erfasst wird. Die Messung mit dem geringeren Messpunktabstand mit dem Koordinatenmessgerät dient zur Erfassung der Oberflächenabweichung bei optimaler Antastung und wird als Referenz betrachtet.

Der Unterschied der erfassten Oberflächenabweichung beider Messungen stellt den zusätzlichen Beitrag der Unterabtastung dar und fließt in die Berechnung der Messunsicherheit mit ein.

Wird die Referenzstrategie an die Standardstrategie gekoppelt, beispielsweise durch eine Vervielfachung der Messpunkte, kommt es vor, dass hochfrequente Oberflächenstrukturen auch bei der Referenzmessung nicht mehr vollständig erfasst werden, da die Kopplung der Messstrategien und die Vervielfachung der Messpunkte für eine vollständige Erfassung nicht immer ausreichend sein muss. Dies tritt dann auf, wenn die Stan-

Standardstrategie einen zu großen Messpunktabstand vorsieht. Die Referenzmessung bildet dann die tatsächlich vorhandene Oberflächenstruktur nicht mehr vollständig ab, dient aber dennoch als Vergleichsgröße um die Unterabtastung der Standardmessung zu erfassen. Die Berechnung der Unterabtastung dient nur der Ermittlung des zusätzlichen Beitrags für die Messunsicherheit.

Bild 20 zeigt die Berechnung der Unterabtastung eines sinusförmigen Oberflächenwellenmodells [P5]. Dabei wird der Verlust an Oberflächeninformation auf die bei der Messung erfasste Oberfläche dargestellt, indem verschiedene Abtastraten nebeneinander platziert werden. Die Messpunkte von Referenz- und Standardstrategie sind dabei hervorgehoben. Beim ursprünglichen Oberflächenmodell handelt es sich in diesem Beispiel um eine Sinusfunktion, bei der Amplitude und Wellenlänge jeweils $6\text{ }\mu\text{m}$ betragen, diese Festlegung wurde von der Entwicklerseite getroffen. Die Amplitude ist dabei an die Wellenlänge gekoppelt. Der Wert der Amplitude wird vom Anwender aus Vorwissen bestimmt. Das kann eine Toleranzangabe in der technischen Zeichnung oder aber Wissen über die entstehenden Oberflächenqualitäten aus dem Fertigungsprozess sein.

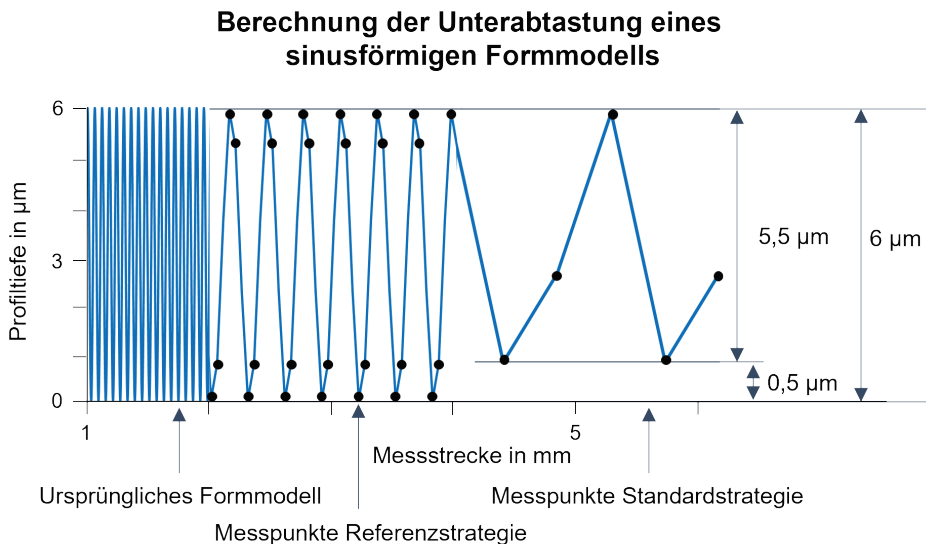


Bild 20: Berechnung der Unterabtastung eines sinusförmigen Oberflächenmodells [P5]

Der beispielhafte Vergleich der verschiedenen Abtastraten zeigt, dass bei der Messung mit der Referenzstrategie zwar nicht mehr jede einzelne Welle wiedergegeben wird, die Amplitude wird dennoch vollständig erfasst. Bei der Messung mit der Ausgangsstrategie wird eine Oberflächenab-

weichung von $5,5 \mu\text{m}$ erfasst. Die Unterabtastung durch die nicht ausreichende Messstrategie beträgt somit in diesem Fall $0,5 \mu\text{m}$ und fließt als zusätzlicher systematischer Beitrag in die Messunsicherheitsberechnung durch das VCMM ein.

5 Modellierung der Oberflächeneinflüsse in der Koordinatenmesstechnik

5.1 Funktionalität zur Berücksichtigung von Oberflächeneinflüssen

In der Koordinatenmesstechnik werden Simulationen nicht nur bei der Messunsicherheitsermittlung, sondern auch zur Visualisierung von Messabläufen verwendet. Diese Simulationen beschränken sich meist auf die Durchführbarkeit von Messabläufen. Dabei werden die Abläufe auf Kollisionen zwischen Sensorik und Werkstück überprüft, um die Zugänglichkeit zu allen Messstellen zu garantieren und Beschädigungen zu vermeiden [93].

Einzelne Messsoftwareprodukte bieten zudem die Möglichkeit in einer Simulation die zu messenden Oberflächenpunkte des Werkstückmodells zu ‚verrauschen‘. Damit werden Messergebnisse simuliert, um die Auswertelgorithmen und die Verknüpfung einzelner Elemente im Messablauf zu überprüfen. Für diese Simulation liegen keine aus den Fertigungsverfahren abgeleitete Einflussgrößen zugrunde, sondern die Messpunkte werden stochastisch variiert ([94], S. 34, Kapitel 1). Die Grenzwerte der Verrauschung werden vom Anwender in der Messsoftware festgelegt.

In den Standardmesssoftwareprodukten gibt es heute praktisch keine spezifische Funktionalität den Werkstückoberflächeneinfluss zu berücksichtigen. Mit Hilfe von a-Priori Annahmen zur Form der Oberflächen und der eingesetzten Antastelemente werden gemäß [27, 39] manuell Antastpunktverteilungen und Filter bestimmt, wie bereits in Abschnitt 2.1 erläutert. Dieser Vorgehensweise liegt das Modell zugrunde, dass die Werkstückoberfläche durch eine Sinusfunktion mit Wellenlänge und Amplitude vollständig beschrieben wird.

Bei der Messunsicherheitsbestimmung mit dem VCMM wird die Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Antastelement erfasst und für die anschließende Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags modelliert. Zur Erfassung dieser Wechselwirkung dient eine repräsentative Messung mit dem Koordinatenmessgerät vor der Durchführung der eigentlichen Messaufgabe. Da der Einfluss der Werkstückoberfläche vom Durchmesser der verwendeten Tastkugel abhängig ist, muss der Unsicherheitsbeitrag für jede bei der Messung vorkommende Paarung aus Werkstückoberfläche und

Tastkugel durch den Anwender bestimmt werden [88]. Dieses Verfahren ist in Abschnitt 4.2.1 ausführlich beschrieben.

Dabei wirken verschiedene Einflüsse auf das Messergebnis und somit auf die in der Messunsicherheitsermittlung berücksichtigten Einflussgrößen. Die Einzelpunktmessung zeigt eine Abhängigkeit der verwendeten Messkraft. Bei der Scanningmessung kommt noch die verwendete Mess- bzw. Scangeschwindigkeit hinzu. Diese Einflüsse überlagern sich mit dem tatsächlichen Einfluss der Werkstückoberfläche. Dadurch, dass der Beitrag für das VCMM für jede Paarung von Tastkugeldurchmesser, gewählten Messparametern und Werkstückoberfläche ermittelt wird, muss keine weitere Trennung der Einflussgrößen erfolgen. Der praktische Ansatz des Vorgehens erleichtert Anwendern den Umgang mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät.

Die Berücksichtigung des Werkstückeinflusses folgt bei der Messunsicherheitsbilanz nach [62] und (Abschnitt 4.1) einem ähnlichen Prinzip. Hierfür wird der Beitrag aus der Standardabweichung des Ausgleichselements berechnet [62, 95]. Eine weitere Trennung der Einflussgrößen findet nicht statt und steht auch dem praktischen Einsatz der Methode im Weg.

Das virtuelle Koordinatenmessgerät in seiner ersten Umsetzung und die Messunsicherheitsbilanz betrachten den Oberflächeneinfluss, der an den definierten Messpunkten erfasst wird. Dies setzt voraus, dass die Messpunkte repräsentativ für die komplette Oberfläche gewählt sind und bei einer erneuten Messung der Ablauf erneut nahezu identisch an den gleichen Messpunkten misst. Durch die Definition der Messaufgabe wird der Form-, Welligkeits- und Rauheitseinfluss an anderen Stellen des Messobjekts ausgeschlossen. Das zu messende Objekt wird dadurch nur über die gemessenen Stellen an den Messpunkten definiert.

Ein etwas anderer Ansatz wird durch eine bei der Weiterentwicklung des VCMM realisierten Methode im virtuellen Koordinatenmessgerät verfolgt. Dabei wird, wie bereits in den Grundzügen in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, die Unterabtastung einer Werkstückoberfläche durch die vom Anwender definierte Messstrategie berücksichtigt. Die Voraussetzung dafür ist die Abbildung der Werkstückoberfläche durch Sinuswellen in einem Oberflächenmodell. Dieses Oberflächenwellenmodell basiert auf mehreren sich überlagernder Sinuswellen und ist als Standardmodell im VCMM verfügbar. Im Rahmen der Messunsicherheitsermittlung wird es entsprechend der Messpunktverteilung abgetastet.

5.2 Das VCMM-Oberflächenwellenmodell

In der Voreinstellung des kommerziell verfügbaren VCMM werden drei Wellen mit unterschiedlichen Parametern (Wellenlängen und Amplituden) überlagert. Zur vereinfachten Definition der Wellenparameter durch den Anwender (Abschnitt 4.2.2) wird nur eine Amplitude abgefragt, die aus Vorwissen oder aus Angaben zur Form aus der Produktspezifikation abzuleiten ist. Die Wellenlänge des entstehenden Modells ist dabei durch das Verhältnis 1:1 an die Amplitude (Gesamtprofiltiefe) gekoppelt. Die Parameter der beiden anderen Wellen stehen ebenfalls in einem festen Verhältnis zu der ersten Welle und modellieren mit kleineren Amplituden und kürzeren Wellenlängen eine hochfrequente Überlagerung. Bei der Simulation werden Amplitude, Wellenlänge und Phasenlage der Wellen jeweils auf Basis der Angabe eines Zufallsparameters variiert. Die Amplitude und Wellenlänge variieren dabei zufällig um einen Bruchteil ihres jeweiligen Wertes. Die Phasenlage wird für jeden Simulationsdurchlauf zufällig an einer beliebigen Stelle entlang der Messstrecke definiert. Sofern detaillierte Informationen zur Oberfläche vorliegen, können individuelle Festlegungen für eine beliebig hohe Zahl überlagerter Wellen mit verschiedenen Amplituden und Wellenlängen konfiguriert werden. Das Konfigurieren der Werte erfordert Eingriffe in die XML-Datenstruktur (Abschnitt 4.2.1), die durch ihre Komplexität über die Möglichkeiten des typischen Anwenders hinausgehen.

Bild 21 verdeutlicht auf nachfolgender Seite exemplarisch den Simulationsablauf am Beispiel des allgemeinen Oberflächenwellenmodells mit drei sich überlagernden Sinuswellen. Weiterhin wird das Verhalten für einzelne Simulationsschritte gezeigt. Die maximale Oberflächenabweichung beträgt in diesem Beispiel $11,3\text{ }\mu\text{m}$ (Profiltiefe), der Schrittabstand bei der Abtastung mit der Standardstrategie beträgt $50\text{ }\mu\text{m}$, für die Referenzmessung mit dem Koordinatenmessgerät und dem gleichen Tastelement beträgt der Schrittabstand ein Zehntel und somit $5\text{ }\mu\text{m}$. Die Wellenlänge ist durch die Kopplung an die Amplitude mit einem Verhältnis von 1:1 festgelegt. Das initial erstellte Oberflächenmodell (Bild 21 a) bzw. b)) wird für die Standardmessung mit dem Schrittabstand $50\text{ }\mu\text{m}$ erfasst. Das daraus resultierende Profil (Bild 21 c)) hat eine Tiefe von $10,8\text{ }\mu\text{m}$ und entspricht somit nicht der kompletten theoretischen Profiltiefe. Zudem lässt es in seiner hier beobachteten Ausprägung keine Rückschlüsse auf das zugrundeliegende Oberflächenmodell zu. Bei der Abtastung mit der Referenzstrategie (Bild 21 d)) wird eine tiefere Profiltiefe von $10,94\text{ }\mu\text{m}$ erfasst. Der Unterschied der

erfassten Profiltiefe von Standard- und Referenzmessung von $0,14 \mu\text{m}$ geht als Beitrag der Unterabtastung in die Messunsicherheitsberechnung ein.

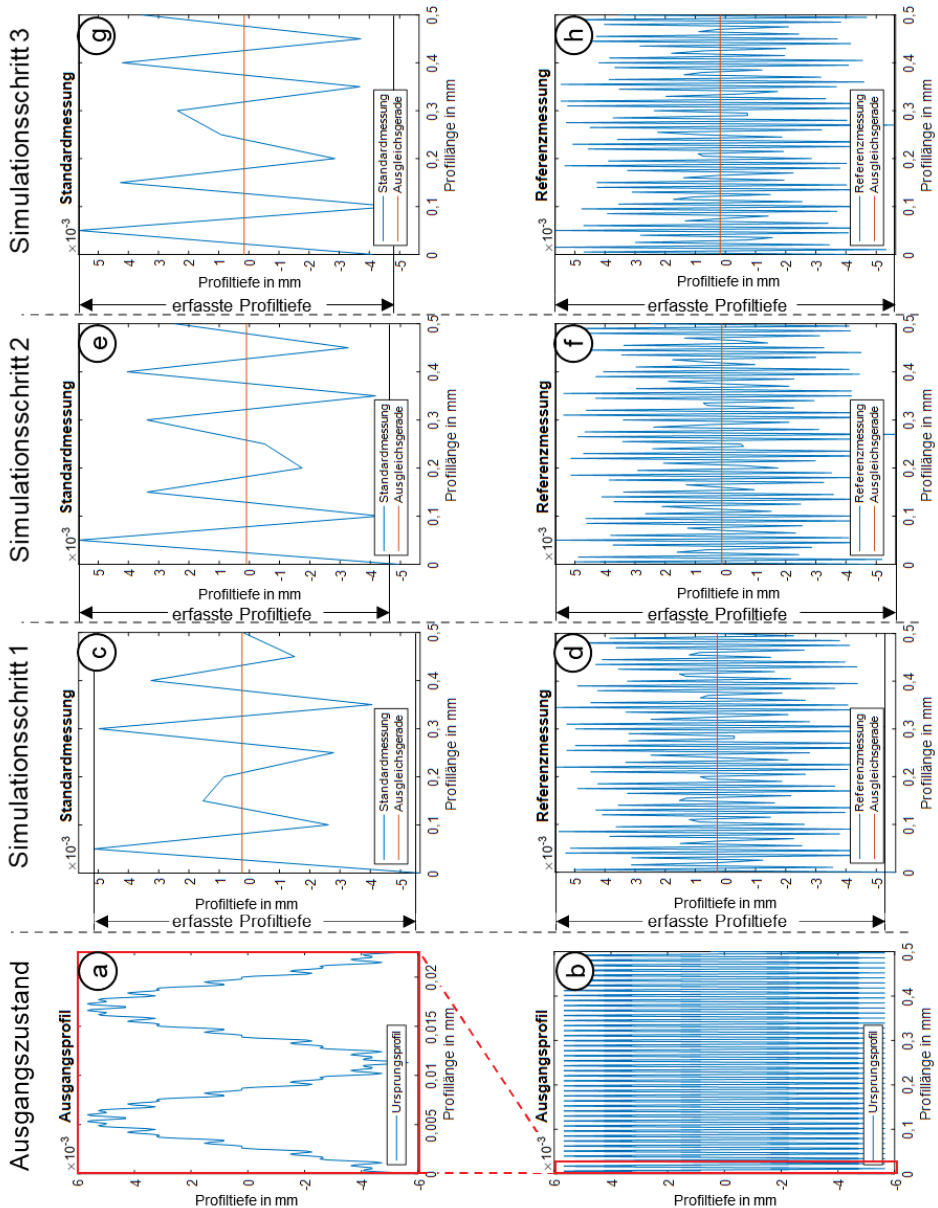


Bild 21: Exemplarischer Simulationsablauf

Für jeden weiteren Simulationsschritt wird das Oberflächenwellenmodell im VCMM nun entsprechend der zufälligen Beiträge variiert. Die in Simulationsschritt 2 erfassten Messpunkte sind in Bild 21 e) und f) dargestellt.

Die in Schritt 3 erfassten Messpunkte sind in Bild 21 g) und h) dargestellt. Für jeden Simulationsschritt wird die Differenz zwischen den ermittelten Profiltiefen beider Strategien verglichen. Der Beitrag der Unterabtastung wird bei jedem Simulationsschritt neu berechnet. Für das gezeigte Beispiel ergibt sich für Simulationsschritt 2 ein Beitrag zur Unterabtastung von $0,95\text{ }\mu\text{m}$ und für Simulationsschritt 3 ein Beitrag von $0,85\text{ }\mu\text{m}$. Die ermittelten Beiträge fließen als zusätzlicher Beitrag (Abschnitt 4.2.2) für den jeweiligen Simulationsdurchlauf in die Messunsicherheitsermittlung ein.

Bei der in Bild 21 gezeigten Abtastung handelt es sich um eine Abtastung ohne die Geometrie des verwendeten Tastelements zu berücksichtigen. Die Messpunkte werden im vordefinierten Messpunktabstand von der simulierten Werkstückoberfläche extrahiert, unabhängig davon, ob der Ort der Antastung unter Verwendung eines physischen Tastelements im Rahmen einer tatsächlichen Messung überhaupt erreichbar ist. Diese Vorgehensweise berücksichtigt nicht das später bei der Messung verwendete Tastelement und dessen mechanische Filterwirkung.

5.3 Potentiale zur Verbesserung der Oberflächenmodelle

Das gezeigte Oberflächenwellenmodell stellt einen Ansatz zur Betrachtung der Unterabtastung und damit zum Einfluss der Messstrategie auf die Messunsicherheitsermittlung durch Simulation dar. Durch die Nichtberücksichtigung der tatsächlichen Messkonfiguration werden unvollständige Annahmen zur Werkstückoberfläche getroffen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die bestehende Simulationsmethodik soweit angepasst, dass die Messung realer Werkstückoberflächen realitätsnah durch eine Simulation abgebildet werden kann. Dafür wird das Oberflächenwellenmodell durch verschiedene Vorgehensweisen an die reale Werkstückoberfläche angepasst. Die Abtastung der Werkstückoberfläche mit der entsprechenden Antastkonfiguration wird simuliert, um die resultierende Werkstückoberfläche als Oberflächenwellenmodell für die Messunsicherheitsermittlung mit dem VCMM zu Verfügung zu stellen.

6 Untersuchung und Weiterentwicklung des VCMM-Oberflächenwellenmodells

Die Untersuchung und Weiterentwicklung des VCMM-Oberflächenwellenmodells dient dazu, an die Messaufgabe angepasste Oberflächenwellenmodelle für die Verwendung im VCMM zu erstellen. Dieses Ziel kann durch verschiedene Ansätze verfolgt werden. Diese Ansätze sind in Bild 22 dargestellt.

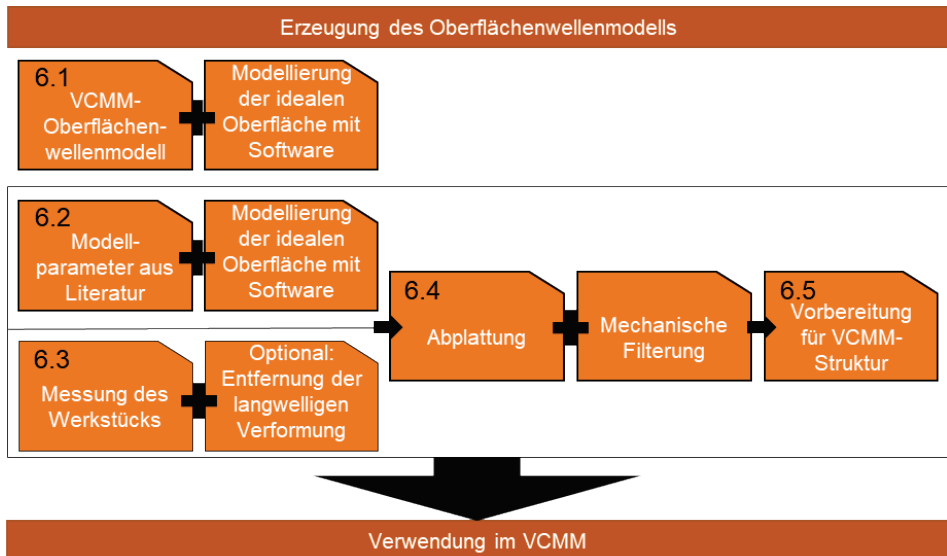


Bild 22: Ansätze zur Erzeugung des Oberflächenmodells

Im nächsten Abschnitt 6.1 wird auf die Anpassung des VCMM-Oberflächenwellenmodells an Parameter der Werkstückoberfläche eingegangen. In Abschnitt 6.2 werden Modellparameter aus der Literatur betrachtet und wie diese dabei helfen können, die Werkstückoberfläche abzubilden. Der daran anschließende Abschnitt 6.3 beschreibt den Modellierungsprozess ausgehend von einer Messung der Werkstückoberfläche. Die beiden zuletzt genannten Modelle werden in einem weiteren Schritt in Abschnitt 6.4 abgeplattet und die mechanische Filterung durch das Antastelement wird simuliert. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 6.5 die entsprechende Einbettung in die VCMM-Struktur beschrieben.

6.1 Vergleich des Oberflächenwellenmodells mit der Struktur realer Werkstückoberflächen

Das bereits in Abschnitt 5.2 gezeigte Oberflächenwellenmodell dient als Vorlage für weitere Untersuchungen. Durch die Skalierung des Oberflächenwellenmodells aus Vorwissen, beispielsweise durch die Kenntnis über die aus dem Fertigungsprozess entstehende tatsächliche Werkstückoberfläche, gelangt man zu realistischen Angaben über die zu modellierende Amplitude. Diese Information kann durch eine Messung mit einem Tastschnittgerät oder einer die Oberfläche ausreichend erfassenden kleinen Tastkugel gewonnen werden.

Für die weitere Analyse wird das VCMM-Oberflächenwellenmodell mit einer realen Werkstückoberfläche verglichen. Dafür wird das in Bild 21 gezeigte Oberflächenwellenmodell neben einem Drehprofil mit ähnlicher Amplitude dargestellt. Im nachfolgenden Bild 23 sind Oberflächenwellenmodell und Drehprofil abgebildet.

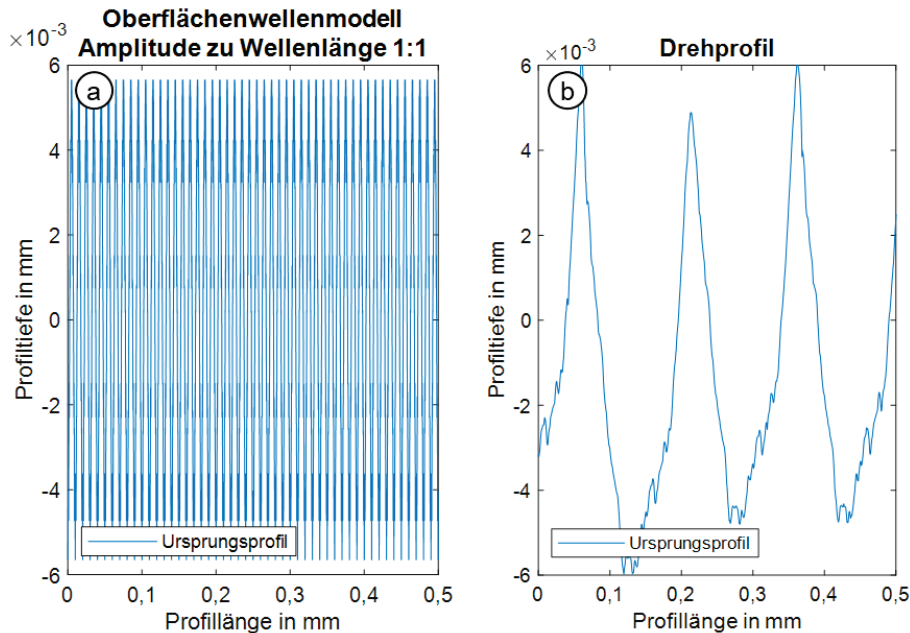


Bild 23: Vergleich von gekoppeltem Oberflächenwellenmodell (VCMM) a) und einem mittels Tastschnittgerät gemessenen Drehprofil mit weitgehend gleicher Amplitude b)

Zur initialen Erfassung der Profilinformatoren wird ein Profilschnitt der gedrehten Werkstückoberfläche mit einem Tastschnittgerät gemessen. Die Messrichtung auf der gedrehten Werkstückoberfläche liegt quer zur Bear-

beitungsrichtung. Der Messpunktabstand beträgt $0,5\text{ }\mu\text{m}$. Dabei wird davon ausgegangen, dass jede relevante Profilspitze erfasst wird. Der Tastspitzenradius beträgt $2\text{ }\mu\text{m}$. Die beispielhaft gemessene Profiltiefe der Oberfläche beträgt $11,3\text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Bild 23 b)).

Der Unterschied beider Profile ist in Bild 23 klar zu erkennen. Die Kopplung der Wellenlänge an die gemessene Amplitude beim VCMM Modell führt dazu, dass das Oberflächenwellenmodell hinsichtlich der Wellenlänge keinerlei Ähnlichkeit mit der zugrundeliegenden Werkstückoberfläche aufweist. Dass reale Wellenlängen von technischen Oberflächen häufig wesentlich größer als ihre Amplituden sind, wird auch in DIN 4760 [2] beschrieben (siehe auch Bild 3).

Das im VCMM verwendete Oberflächenwellenmodell dient nicht zur exakten Beschreibung der realen Werkstückform, sondern liefert variierende Punkte für die Simulation. Dadurch werden lediglich Oberflächenabweichungen des Werkstücks in der Größenordnung der Amplitude der realen Oberflächenabweichungen abgebildet. Diese Vorgehensweise ermöglicht zwar die Beurteilung der Messstrategie durch die Berücksichtigung der Unterabtastung, kann dadurch jedoch nicht das später bei der Messung verwendete Tastelement und dessen mechanische Filterwirkung berücksichtigen. Der erfasste Beitrag durch Unterabtastung ist somit unabhängig vom Antastvorgang bei der späteren Messung und stellt somit nur eine erste Näherung dar.

Um das Modell an die reale Werkstückoberfläche anzupassen, muss die Kopplung von Wellenlänge und Amplitude mit dem Verhältnis 1:1 aufgehoben werden. Das ist durch eine Parameteränderung in der Datenstruktur des VCMMs möglich.

Im nachfolgenden Beispiel ist das aus Vorwissen generierte Oberflächenwellenmodell aus Bild 23 an die gedrehte Werkstückoberfläche angepasst worden. Der Ausgangspunkt ist die Messung des Drehteils mit dem Tastschnittgerät. Die gemessene Amplitude aus der Tastschnittmessung bestimmt die Amplitude des Sinusmodells. Der gemessene Abstand der Drehriefen beträgt ca. $0,15\text{ mm}$. Dieser bestimmt die Wellenlänge des Modells.

Bild 24 stellt das aus diesen Parametern erstellte Oberflächenwellenmodell neben dem als Vorlage dienenden Drehprofil dar. Das Modell ist entsprechend der Vorgehensweise aus dem durch die Messung gewonnenen Vorwissen generiert und besteht aus drei sich überlagernden Sinuswellen. Die Phase der zwei Oberwellen wurde so gewählt, dass jede Oberwelle zehn

Mal je Hauptwelle vorkommt. Dieses Vorgehen ist analog zu den ersten PTB-Ansätzen zur Generierung eines Modells aus Sinuswellen.

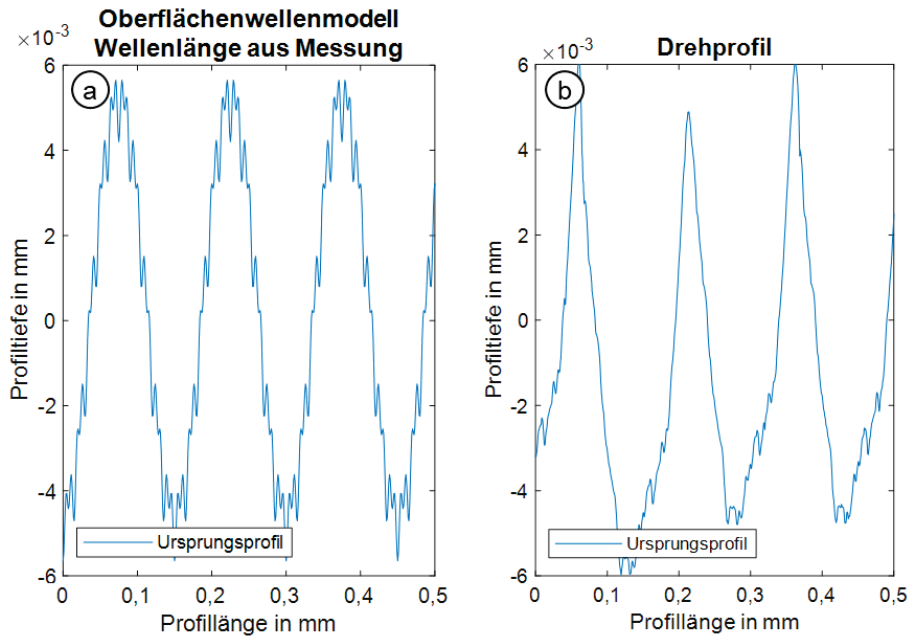


Bild 24: Vergleich von angepasstem Oberflächenwellenmodell a) und Drehprofil b)

Geht man davon aus, dass die Werkstückoberfläche bei der späteren Messung mit einem Koordinatenmessgerät gemessen wird, muss die mechanische Filterwirkung der Tastkugel berücksichtigt werden. Die mechanische Filterwirkung führt dazu, dass Bereiche einer Werkstückoberfläche, deren Öffnungswinkel und Krümmungsradien geringer als der Radius des Tastelements sind, nicht mehr vollständig erfasst werden [52]. Das hat zur Konsequenz, dass ein Oberflächenmodell, das anhand einer Messung mit einem Tastschnittgerät erstellt wird, immer nur bei Berücksichtigung der mechanischen Filterwirkung der Tastkugel genutzt werden kann. Ohne Berücksichtigung der mechanischen Filterwirkung wird die in der Messunsicherheitssimulation verwendete maximale Oberflächenabweichung aus der Tastschnittmessung durch tatsächliche Messungen auf dem Koordinatenmessgerät nicht erfasst und entsprechend werden zu große Beiträge für die Ermittlung der Messunsicherheit verwendet.

Bild 25 zeigt schematisch die Abtastung des simulierten Oberflächenwellenmodells aus Bild 24 mit fünf verschiedenen Tastkugeln. Die Größenordnung der Tastkugeln entspricht den bei typischen Koordinatenmessungen verwendeten Tastkugeln. Die Tastkugeln sind entsprechend der unterschiedlichen Skalierung der beiden Achsen in die Grafik verzerrt eingezeichnet [P6]. Erkennbar ist, dass das Profil nicht mit allen Tastkugeln vollständig erfasst werden kann.

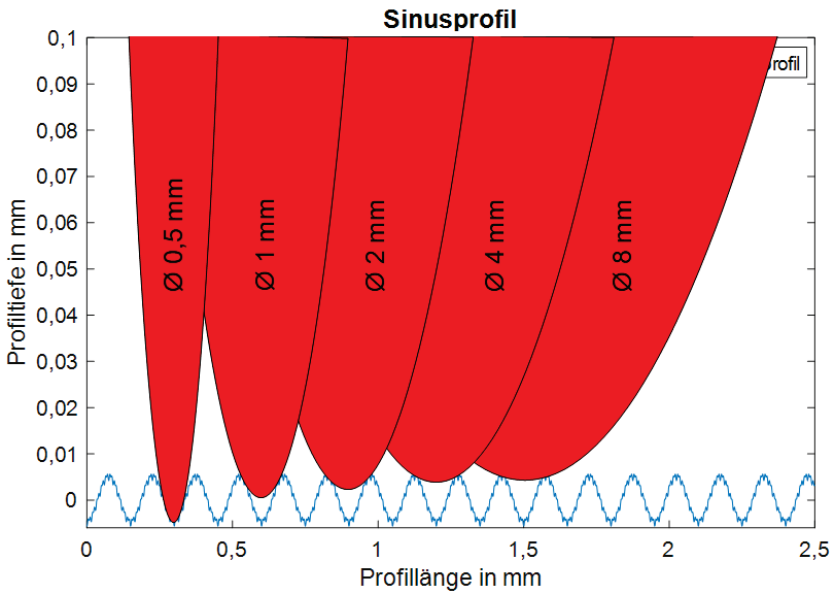


Bild 25: Mechanische Abtastung des Oberflächenwellenmodells

Zur Quantifizierung der mechanischen Filterwirkung führt man eine Frequenzanalyse der jeweiligen Profile durch. Die Frequenzanalyse untergliedert das Profil in die folgenden Bestandteile: Wellenlänge, Amplitude und Phase [96, 97]. Misst man ein Profil mit verschiedengroßen Tastkugeln und analysiert das Messergebnis jeweils mit einer Frequenzanalyse, sind in Abhängigkeit der Werkstückoberfläche Informationsverluste durch die größeren Tastkugeln erkennbar. In der Formmesstechnik wird dieses Verfahren in Verbindung mit speziellen Mehrwellennormalen verwendet, um die korrekte Übertragung einzelner Frequenzen zu prüfen [98, 99]. Mehrwellennormale bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper mit zusätzlichen definierten Überlagerungen rein sinusförmiger Wellen [27]. Die Messung der Mehrwellennormale wird auch bei für die Formmessung eingesetzten Koordinatenmessgeräten durchgeführt [36].

Die Zerlegung des Oberflächenwellenmodells aus Bild 24 in seine Bestandteile ist in Bild 26 dargestellt. Die Amplitude der dominierenden Welle mit der Wellenlänge ca. 0,15 mm beträgt 9,4 μm . Die Amplitude der Wellen mit den Wellenlängen 0,015 mm und 0,0075 mm beträgt jeweils 0,94 μm . Die Profiltiefe von 11,3 μm wird durch die Überlagerung der drei Wellen erreicht.

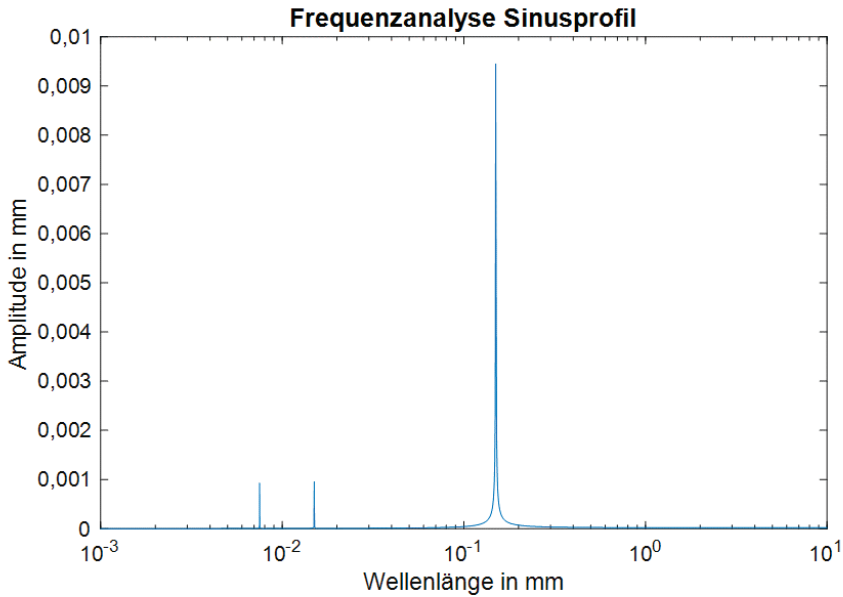


Bild 26: Frequenzanalyse ursprüngliches Oberflächenwellenmodell

Bild 27 zeigt das Oberflächenwellenmodell und das bei der mechanischen Abtastung mit einem Tastkugeldurchmesser von 1 mm abgetastete Profil. Weiterhin ist das Ergebnis der Frequenzanalyse des abgetasteten Profils dargestellt. Die bei der Abtastung erfasste Profiltiefe beträgt 4,6 μm . Die Amplitude der dominierenden Wellenlänge 0,15 mm beträgt 3,1 μm . Die beiden anderen Wellen werden nicht mehr erfasst.

Das durch die Abtastung entstehende Profil weist eine deutlich geringere Profiltiefe auf. Im Frequenzspektrum zeigt sich zudem, dass Wellenlängen mit einem Bruchteil der ursprünglich dominierenden Wellenlänge ($1/2$, $1/3$, ... $1/n$) erfasst werden, diese Oberwellen können aus der nichtlinearen Übertragung des Filters entstehen.

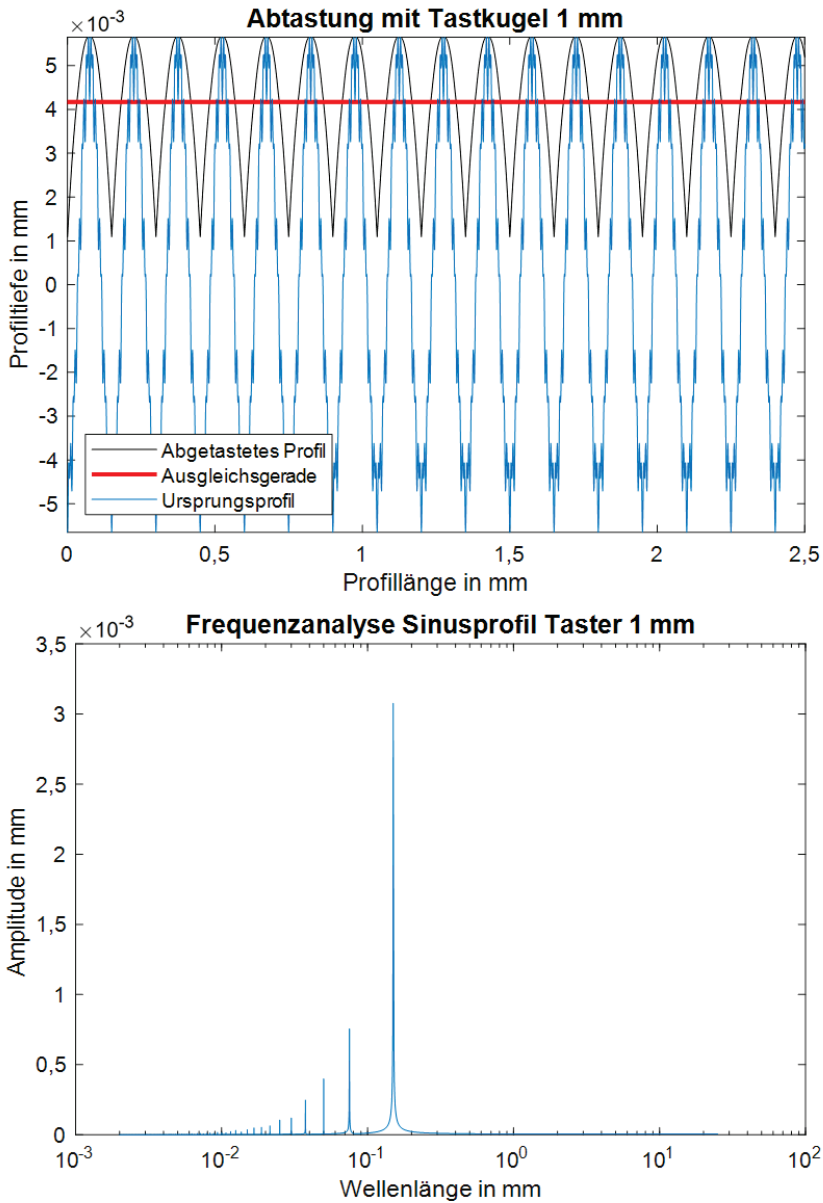


Bild 27: Abtastung mit Tastkugel 1 mm

Bild 28 a) zeigt das Oberflächenwellenmodell und das bei der mechanischen Abtastung mit einem Tastkugeldurchmesser von 8 mm abgetastete Profil. Weiterhin ist in b) die Frequenzanalyse des abgetasteten Profils dargestellt.

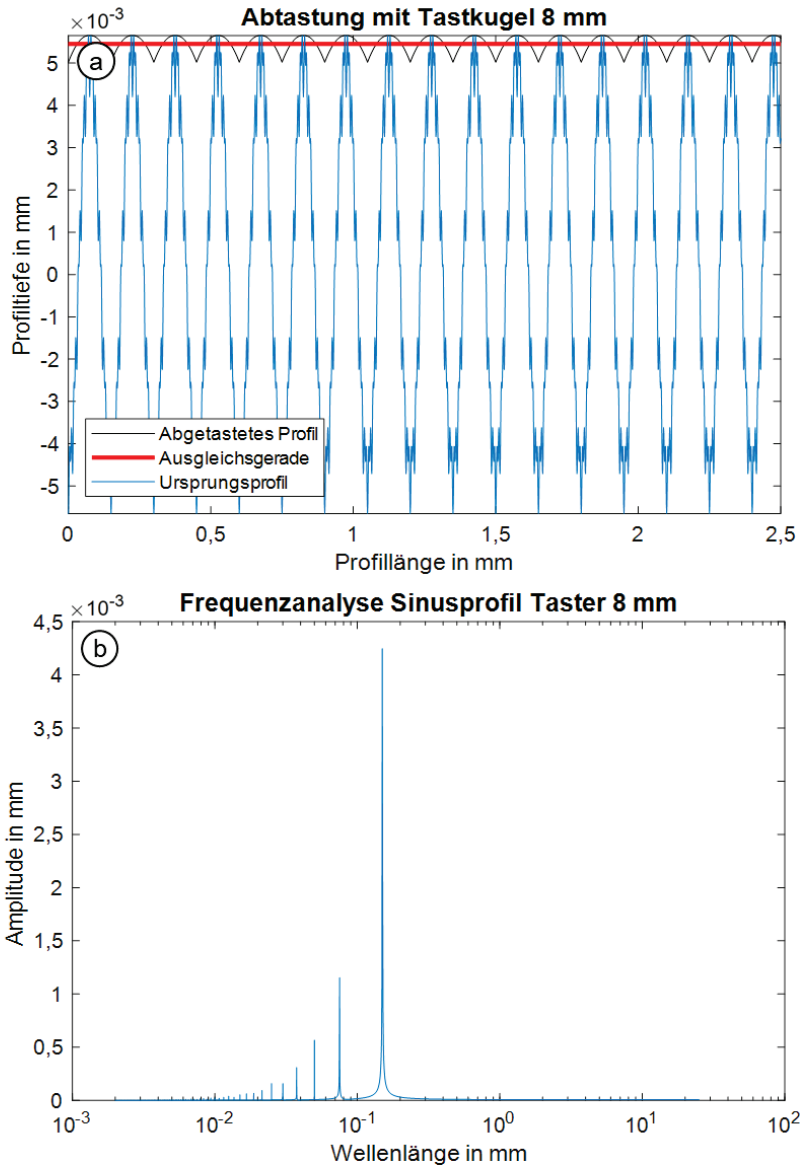


Bild 28: Abtastung mit Tastkugel 8 mm

Die bei der Abtastung erfasste Profiltiefe beträgt $0,63 \mu\text{m}$ und ist somit deutlich geringer als beim Ursprungsprofil. Die Amplitude der dominierenden Wellenlänge $0,15 \text{ mm}$ beträgt nur noch $0,42 \mu\text{m}$ und beträgt weniger als ein Zwanzigstel des Ausgangswerts. Die beiden anderen Wellen werden nicht mehr erfasst. Es sind ebenfalls Oberwellen erkennbar.

Wird der Wert für die Skalierung des Formmodells durch eine Messung mit dem Koordinatenmessgerät erfasst, sollte die in der Messung verwendete Tastkugelgröße ebenfalls für die spätere Messung mit dem Koordinatenmessgerät verwendet werden. Dabei werden Formabweichung und Welligkeit in der mit dieser Tasterkonfiguration messbaren Größenordnung erfasst. Die Verwendung einer abweichenden Tastkugelgröße führt dies dazu, dass der Beitrag der Unterabtastung zur Messunsicherheit zu groß oder zu klein abgeschätzt wird.

Im Gegensatz zum gezeigten Drehprofil weist nicht jede gefertigte Werkstückoberfläche eine regelmäßige Wellenstruktur auf. In Abhängigkeit des Fertigungsprozesses können verschiedenste Oberflächen entstehen, viele davon mit unregelmäßigen Wellenlängen. Die Übertragung in ein Oberflächenwellenmodell basierend auf einer begrenzten Anzahl sich überlagernder Sinuswellen wird dadurch erschwert. Um einen Überblick über weitere Fertigungsverfahren und die daraus resultierenden Oberflächenprofile zu erlangen, werden einige davon gegenübergestellt.

Zur Charakterisierung der Werkstückoberflächen eignet sich der Materialanteil und dessen Darstellung in der Materialanteilskurve [32]. Der Materialanteil eines Profils ist der Quotient aus der Summe der Materiallängen der Profilelemente $MI(c)$ in der vorgegebenen Schnitthöhe c und der Messstrecke. Die Materialanteilskurve des Profils, auch Abbott-Firestone-Kurve genannt, stellt den Materialanteil des Profils als Funktion der Schnitthöhe dar [32]. Damit wird die Tiefe des Rauheitskernprofils R_k , die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und die reduzierte Riefentiefe R_{vk} ermittelt.

In Bild 29 sind Oberflächenprofil (jeweils ein Ausschnitt aus dem Gesamtprofil) und Materialanteilskurve verschiedener Oberflächen angelehnt an [100] dargestellt und dem Sinuswellenoberflächenmodell gegenübergestellt (Bild 29 a)). Eine detailliertere Darstellung der einzelnen Oberflächenprofile findet sich im Anhang ab S. 101. Die Profile wurden durch die Messung mit einem Tastschnittgerät erfasst. Stellt man den Materialanteil des gezeigten Oberflächenwellenmodells als Funktion der Schnitthöhe dar, wird ersichtlich, dass die Oberflächenpunkte des Modells durch die zugrundeliegende Sinusfunktionen regelmäßig verteilt sind. Aus Fertigungsprozessen entstehende Oberflächenprofile weisen diese Ausprägung nicht auf und unterscheiden sich auch untereinander durch beispielsweise spitzkämmige bzw. unregelmäßige Profile [100].

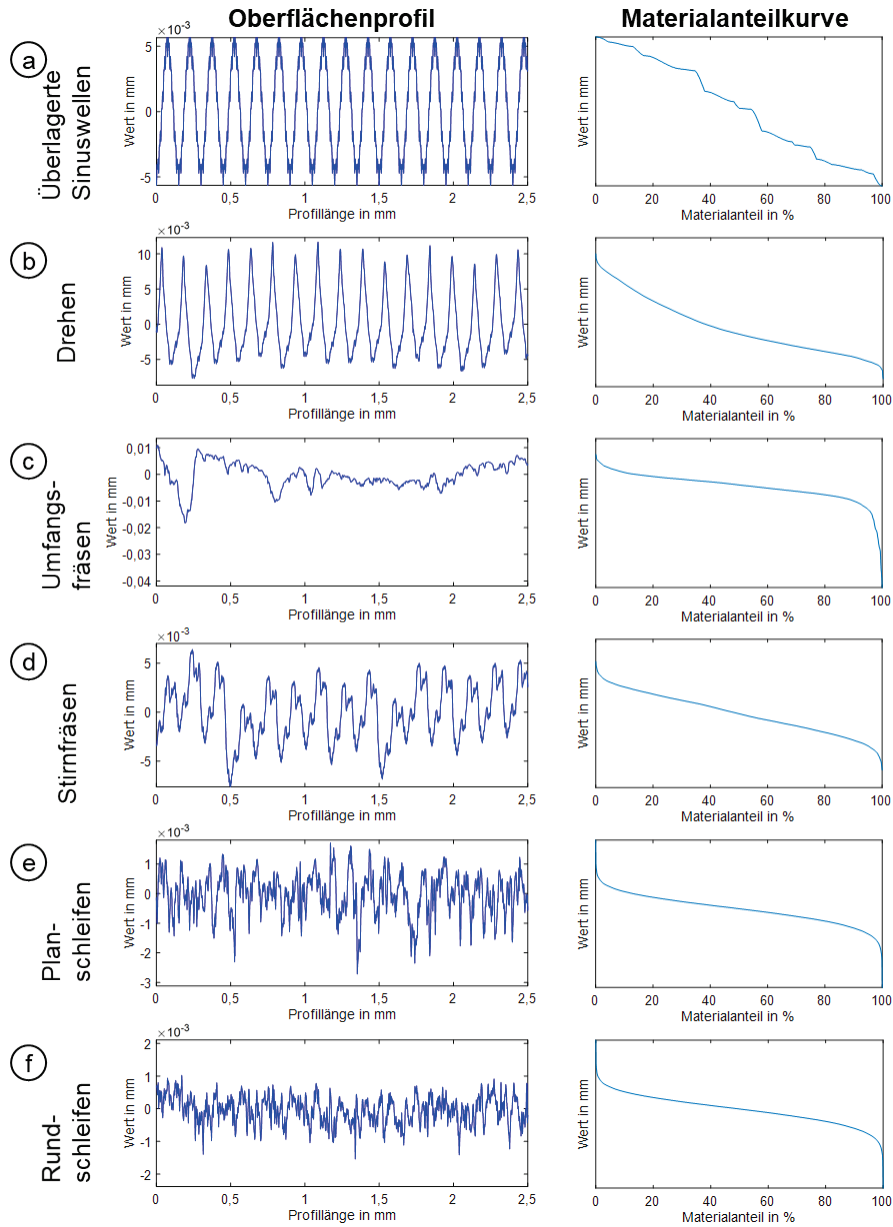


Bild 29: Oberflächenprofile und Materialanteilkurven nach [100]

Aus Fertigungsprozessen mit definierter Schneide, Drehen und Fräsen, entstehen üblicherweise periodische Oberflächenprofile. Werden diese durch Abweichungen aus dem Fertigungsprozess überlagert, ist die Periodizität kaum mehr erkennbar. Die in Bild 29 b) und d) dargestellten Oberflächen von Drehen und Stirnfräsen sind periodisch ausgeprägt. Das in Bild

29 c) gezeigte Oberflächenprofil wird durch weitere Abweichungen überlagert, so dass die Periodizität nicht mehr sichtbar ist. Die aus dem Schleifprozess resultierenden Werkstückoberflächen in Bild 29 e) und f) weisen einen normalverteilten Zufallscharakter auf. Periodische Profileigenschaften sind nicht erkennbar. Die Skalierung des Oberflächenwellenmodells aus Vorwissen ist nur dann sinnvoll anwendbar, wenn eine periodische Struktur auf der Werkstückoberfläche erkennbar ist und diese annähernd einem Sinusprofil entspricht. Aperiodische und mit Abweichungen aus dem Fertigungsprozess überlagerte Profile sind nur mit ihrer maximalen Oberflächenabweichung abbildbar. Informationen über die Wellenlänge und damit einhergehend der Riefenbreite, sind nicht darstellbar.

6.2 Erstellung theoretischer Modelle durch Fertigungsparameter

Alternativ zu dem bisher gezeigten Vorgehen zur Erstellung von Texturmodellen unter Verwendung von verschiedenen Oberflächenwellen kann die Werkstückoberfläche in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens erstellt werden. Möglich ist dies bei Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Die entstehende Werkstückoberfläche dieser Fertigungsverfahren ist bekannt und in der Literatur ausreichend beschrieben.

Für Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide ist diese Art der Modellierung nicht möglich. Die Bestimmung der im Eingriff befindlichen Schneiden wird durch die äußerst komplexe Mikrostruktur der Werkzeuge erschwert, bei der die Schneiden eine regellose Form mit mehr oder weniger scharfen Ecken und Kanten besitzen ([30], S. 3-4). Die resultierende Werkstückoberfläche kann somit nicht in der erforderlichen Detailtiefe berechnet werden (Abschnitt 2.3).

Für die Erzeugung eines im VCMM verwendbaren Texturmodells aus Fertigungsparameter sind verschiedene, aufeinanderfolgende Schritte notwendig. Das Ursprungsmodell wird entsprechend der bereits gezeigten Vorgehensweise für die Erstellung von Oberflächenprofilen erstellt. Möglich ist dies aus den genannten Gründen nur für Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Die Modellierung dieses idealen Ausgangsprofils wird, ebenso wie sämtliche weitere Berechnungen, mit einer Mathematiksoftware realisiert. Dafür werden die aus der Literatur bekannten Formeln verwendet (Abschnitt 2.3). Alle in dieser Arbeit simulierten Oberflächenprofile werden mit einer Länge von 25 mm simuliert. Dieser Wert entspricht dem doppelten Wert der Messstrecke nach [6] für eine

Grenzwellenlänge von 2,5 mm. Damit wird sichergestellt, dass die relevanten Oberflächencharakteristika auch mit Wellenlängen im Bereich mehrerer Millimeter abgebildet werden.

Durch die Umsetzung der Modellparameter aus der Literatur in eine ideale Oberfläche entsteht ein Oberflächenprofil mit den charakteristischen Eigenschaften des jeweiligen Fertigungsprozesses. Zwei ideal modellierte Drehprofile sind in Bild 30 dargestellt. Die Mittenrauwerte R_a in diesen Beispielen betragen $1,5\text{ }\mu\text{m}$ und $10\text{ }\mu\text{m}$. Die Profile dienen als Ausgangspunkt für die weitere Modellierung und sind ausschließlich durch die Anpassung der Parameter Vorschub und Schneidkantenradius variiert worden. Der Schneidkantenradius r beträgt $0,3\text{ mm}$ beim feineren Drehprofil und $0,5\text{ mm}$ beim gröberen Profil. Der Vorschub f beträgt analog dazu $0,12\text{ mm/s}$ und $0,32\text{ mm/s}$. Dabei handelt es sich um typische Größenordnungen [33].

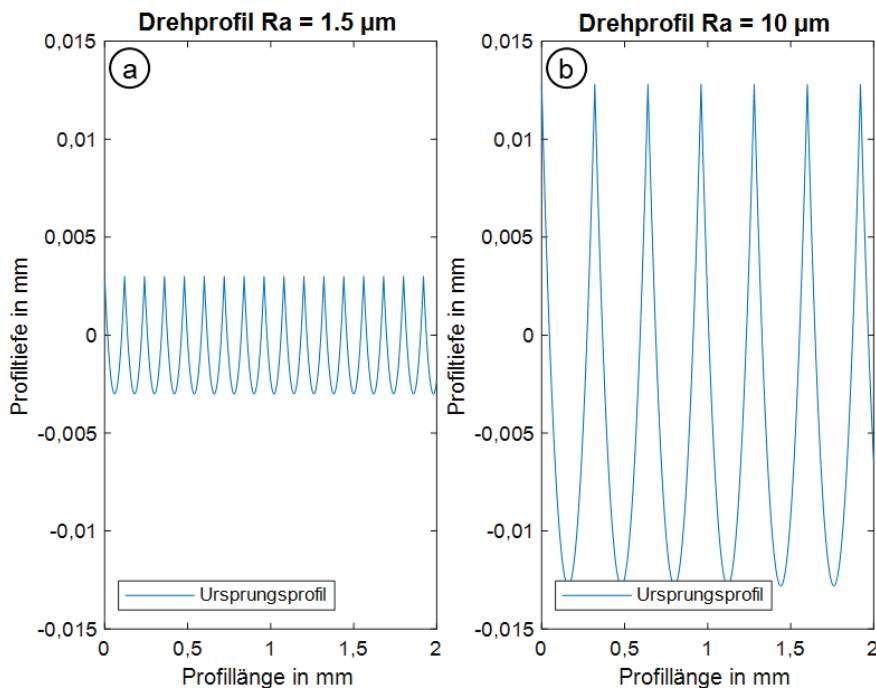


Bild 30: Ideal modellierte Drehprofile aus den Fertigungsparametern Vorschub und Schneidkantenradius

Durch die theoretische Modellierung anhand von Fertigungsparametern lassen sich die entsprechenden Oberflächenprofile relativ einfach modellieren. Dieser Modellierungsansatz eignet sich dann, wenn vorab oder ohne

Zugriff auf das entsprechende bearbeitete Werkstück, Abschätzungen hinsichtlich der resultierenden Werkstückoberfläche getroffen werden sollen. Die Modelle bilden, ähnlich wie die Sinusmodelle, ideale mathematische Funktionen ab und sind frei von anderen Abweichungen der Werkstückoberfläche

6.3 Erstellung theoretischer Modelle basierend auf Tastschnittmessungen

Neben der Generierung von Oberflächenmodellen aus Fertigungsparametern kann das Oberflächenmodell auch anhand von Messungen mit einem Tastschnittgerät erzeugt werden. Diese Vorgehensweise ist unabhängig von der Fertigungsart der betrachteten Werkstücke anwendbar. Es können auch durch neuartige Fertigungsverfahren hergestellte, beispielsweise gedruckte, Werkstückoberflächen erfasst werden. Bei diesen Werkstücken sind hinsichtlich der metrologisch relevanten Oberflächeneigenschaften im Vergleich zu den klassischen Fertigungsverfahren kaum Erfahrungswerte vorhanden.

Die Messstrecke für die Erfassung der Oberflächeneigenschaften wird je nach Anforderung angepasst. Bei der Wahl kurzer Messstrecken wird hauptsächlich die Ausprägung von Welligkeit und Rauheit der gemessenen Werkstückoberfläche erfasst. Langwellige Formabweichungen können nur entsprechend ihrer Ausprägung entlang der Messstrecke erfasst werden. Für die Bewertung der Ausprägung von Welligkeit und Rauheit sind kurze Messstrecken, wie sie bei der Messung von Rauheit üblich sind, ausreichend. Eine längere Messstrecke ist hingegen zu empfehlen, da die Aussagefähigkeit über die Oberflächenbeschaffenheit mit der Länge der Messstrecke ansteigt.

Bei der Messung längerer Messstrecken werden zusätzlich die langwelligen Formabweichungen erfasst. Diese Formabweichungen können nicht durch Gleichungen aus dem Fertigungsprozess generiert werden, da diese Art der Abweichung durch Unvollkommenheiten aus dem Fertigungsprozess entstehen. Die langwelligen Verformungen können bewusst in dem Modell abgebildet werden, wenn man davon ausgeht, dass diese Verformungen in Abhängigkeit des gewählten Messpunktabstands für die Unterabtastung relevant sind. Um die gemessenen Oberflächenprofile jedoch mit den theoretischen Modellen zu vergleichen, kann die langwellige Formabweichung entfernt werden. Dies geschieht entweder durch die Anwendung von Profilfiltern (Hochpaßfilterung) oder durch die Entfernung der Nennform durch ein assoziiertes Geometrieelement.

Bei der Messung ist die Wahl einer repräsentativen Messstelle auf dem Werkstück obligatorisch. Die Messung mit einem Tastschnittgerät sollte mit einer Schrittweite kleiner einem Mikrometer erfolgen. Durch den geringen Punktabstand und die geringen Tastspitzenradien wird sichergestellt, dass bei einer typischen Koordinatenmessung die relevante Oberflächencharakteristik erfasst wird [5]. Manche Werkstücke weisen aufgrund ihrer speziellen Bauart eine langwellige Verformung auf. Diese langwellige Verformung wird entfernt. Im Abschnitt 7.1 wird auf diesen Punkt näher eingegangen.

Durch eine Messung mit dem Tastschnittgerät erfasste Drehprofile sind in Bild 31 dargestellt. Um die durch die Abtastung aufgebrachten Verfälschungen des Profils zu entfernen, wird es mit einem λ_s -Filter mit der Grenzwellenlänge $2,5\ \mu\text{m}$ gefiltert [47]. Ein λ_c -Filter wird nicht verwendet, da die langwelligen Bestandteile des Profils von Interesse sind.

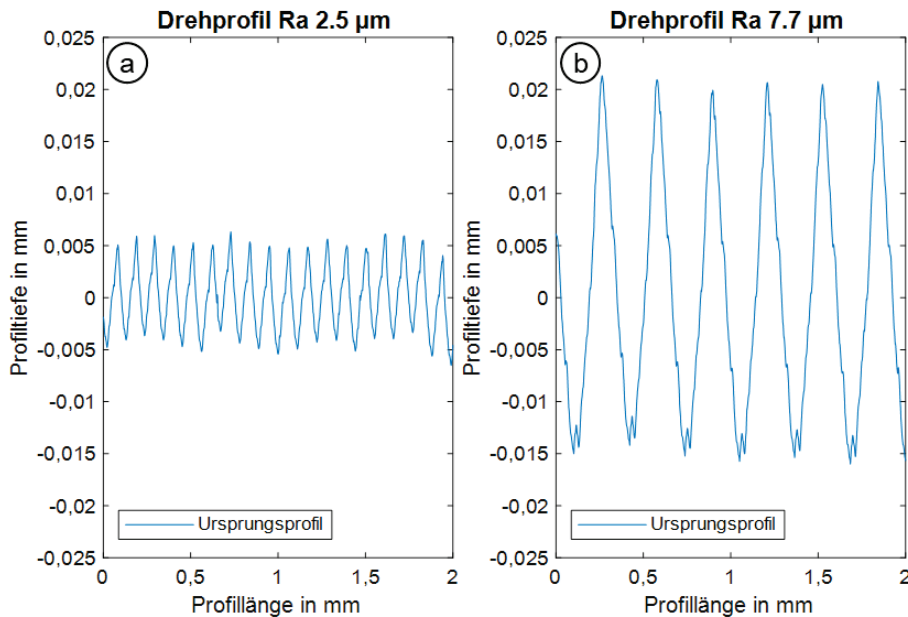


Bild 31: Durch Messung mit dem Tastschnittgerät erfasste Drehprofile mit fertigungsbedingten Abweichungen

Die gemessenen Drehprofile zeigen die für diese Fertigungsart typische Riefenstruktur. Eine Überlagerung des Profils durch langwellige Anteile ist ebenso wie weitere Abweichungen aus dem Fertigungsprozess erkennbar. Die Abweichungen treten zufällig auf und lassen sich anhand theoretischer Fertigungsparameter nicht modellieren. Beim Vergleich mit Bild 30 sind die Unterschiede zum ideal modellierten Drehprofil erkennbar. Neben den

bei der Fertigung auftretenden Abweichungen sind die Profiltäler in der Realität spitz zulaufend. Die bei der theoretischen Modellierung ausgeprägten Rundungen im Bereich der Profiltäler sind nicht erkennbar, dies ist vermutlich auf Abweichungen aus dem Fertigungsprozess zurückzuführen.

Durch die Messung wird somit die reale Werkstückoberfläche abgebildet. Entfernt man zusätzlich die langwellige Verformung, wird der tatsächliche Fertigungsprozess unabhängig von der Bauteilgeometrie oder weiteren besonderen Eigenschaften abgebildet. Um die Eigenschaften aus dem Fertigungsprozess vollständig zu erfassen, muss die Messstrecke quer zur Bearbeitungsrichtung verlaufen. Verläuft die Messung mit dem Koordinatenmessgerät nicht quer zur Bearbeitungsrichtung, muss die Tastschnittgerätmessung ebenfalls in dieser Orientierung erfolgen, nur so können durch das Profil korrekte Werte für die Berücksichtigung der Unterabtastung berechnet werden.

6.4 Abplattung und mechanische Filterung

Durch den mechanischen Kontakt zwischen Tastkugel und Werkstückoberfläche wird das Oberflächenprofil abgeplattet und gleichzeitig mechanisch gefiltert. Dieser Vorgang muss zwingend in der Simulation abgebildet werden, wenn man die erfassbare Werkstückoberfläche abbilden möchte. Die Abplattung ist abhängig von der Tastkugelgeometrie, der entsprechenden Materialpaarung und der Antastkraft. Im Anschluss an deren Berechnung wird die mechanische Filterung und die daraus resultierende Werkstückoberfläche ermittelt. Die mechanische Filterung ist ausschließlich von der Tastkugelgeometrie abhängig. Für die Bereitstellung der Modelle für das VCMM wird stets zuerst die Abplattung der Werkstückoberfläche berechnet und im Anschluss daran die mechanische Filterung. Da beide Schritte unmittelbar zusammenhängend zu betrachten sind, findet eine Bewertung der Methodik immer nach der Kombination beider Schritte statt.

Die Abplattung der Werkstückoberfläche durch das Tastobjekt resultiert in einer reduzierten Spitzenhöhe des Profils. Deren Berechnung erfolgt durch verschiedene Methoden. Der am weitesten verbreitete Ansatz ist hierbei die Theorie der Flächenpressung nach Hertz [101]. Die Methode betrachtet den Kontakt zwischen zwei idealen Objekten. Diese Voraussetzung ist für Koordinatenmessungen an abweichungsbehafteten Werkstückoberflächen nicht gegeben [102], da durch die Oberflächentextur der Kontakt nicht zwischen zwei idealisierten Körpern, wie zum Beispiel zwei Kreisen, sondern

zwischen Objekten mit sich ändernden Krümmungen stattfindet. Daher ist die Methode nach Hertz nicht zur Berechnung der Abplattung zwischen Antastelement und bearbeiteter Werkstückoberfläche geeignet.

Weitere Untersuchungen hinsichtlich des Antastverhaltens zeigen, dass beim Auftreffen des Tastelements auf das Werkstück höhere Kräfte herrschen als bei der späteren Messung [103]. Diese entstehen durch eine, verglichen mit der bei der Messung wirkenden Antastkraft, kurzzeitige starke Kraftüberhöhung. Diese kommt durch einen Impuls beim initialen Kontakt der Tastkugel mit der Werkstückoberfläche und der damit verbundenen lokalen Kraftüberhöhung durch das abrupte Abbremsen zustande [103]. Dies ist vor allem bei Einzelpunktmessungen relevant, da durch die wirkenden hohen Kräfte eine makroskopische plastische Verformung des Werkstücks nicht auszuschließen ist. Bei Scanningmessungen findet die Erfassung der Messpunkte kontinuierlich während des permanenten Kontakts statt. Die Messkraft bleibt dabei weitestgehend konstant. Hier tritt nur am Anfang der Scanningbahn die Kraftspitze bei der Kontaktaufnahme des Tastelements mit der Oberfläche auf, die Verformung als Auswirkung der lokalen Kraftüberhöhung wird als plastische Verformung am Werkstück und bei der Berücksichtigung aller erfassten Messpunkte in den Messdaten sichtbar sein. Üblicherweise werden die Anfangspunkte einer Scanningbahn jedoch nicht für die Auswertung berücksichtigt, die plastisch verformten Messpunkte werden somit rechnerisch entfernt. Durch die Begrenzung der Antastkräfte und der Antastgeschwindigkeit lässt sich aber sicherstellen, dass nur eine elastische Verformung auftritt [104]. Dieser Argumentation folgend wird im weiteren Verlauf der Arbeit nur von einer elastischen Verformung ausgegangen.

Um die elastische Verformung der Werkstückoberfläche zu berechnen, wird das Modell durch eine Fourier-Transformation in die einzelnen Wellenanteile separiert. Bei der Betrachtung der lokalen Abplattung wird für den Berührungsfall eine Vereinfachung vorgenommen. Das große Verhältnis von Tastkugeldurchmesser zur Wellenstruktur lässt es zu, dass das Antastelement in diesem Fall als Ebene betrachtet wird. Somit kann nach [105] die elastische Verformung für den Kontakt mit regelmäßigen Wellenstrukturen berechnet werden. Der elastische Kontakt zwischen einer Welle und dem Tastobjekt resultiert in der Verringerung der Amplitude. Die Abplattung einer einzelnen Welle ist dabei durch die Höhe der doppelten Amplitude begrenzt. Der abgeplattete Amplitudenwert kann keinen negativen Wert annehmen und besitzt daher den unteren Grenzwert null. Die nachfolgende Berechnung der elastischen Abplattung wird auch in [P7] ausführlich dargestellt.

Die elastische Verformung wird nach ([105], S. 399) in Formel 6.1 berechnet

$$u_{z,i}(x) = \frac{(1 - \nu^2) \cdot p \cdot \lambda_i}{\pi \cdot E \cdot \sin^2 \psi_a} \cos 2\psi + C \quad (6.1)$$

wobei ν die Querkontraktionszahl ist und für den betrachteten Kontakt zwischen Rubin (Tastkugel) und Stahl (Werkstückoberfläche) mit 0,3 angenommen wird. Der auf die Kontaktoberfläche wirkende Druck p berechnet sich nach Hertz ([106], S. C33) und bestimmt sich nach Formel 6.2 aus der auf die Kontaktfläche wirkende Messkraft.

$$p = \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad (6.2)$$

Dabei wird der Radius der Kontaktfläche a in Formel 6.3 nach ([106], S. C33) unter Berücksichtigung des Tastkugelradius r , der Antastkraft F und dem resultierenden Elastizitätsmodul E aus Formel 6.4 mit den beiden E-Modulen für Rubin (E_1) und Stahl (E_2) berechnet.

$$a = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot (1 - \nu^2) \cdot F \cdot r}{E}} \quad (6.3)$$

mit:

resultierendes E-Modul

$$E = 2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (6.4)$$

Die Wellenlänge λ_i für die Berechnung der elastischen Abplattung ergibt sich aus der betrachteten Wellenlänge der jeweiligen Welle i . Die Koeffizienten ψ_a und ψ ergeben sich aus den Verhältnissen von Radius der Kontaktfläche $a(\psi_a)$ bzw. Messposition $x(\psi)$ und Wellenlänge und sind in Formel 6.5 und Formel 6.6 dargestellt:

$$\psi_a = \frac{\pi \cdot a}{\lambda_i} \quad (6.5)$$

$$\psi = \frac{\pi \cdot x}{\lambda_i} = 0 \quad (6.6)$$

Aus Formel 6.1 resultiert die elastische Verformung $u_{z,i}(x)$ für die jeweilig betrachtete Welle. Diese ergibt sich durch eine Verschiebung in negative z -Richtung des Profils in Abhängigkeit von der Position x . Dabei erfolgt die

Berechnung stets an der Stelle $x = 0$, somit wird die Abplattung an der höchsten Stelle des Profils berechnet.

Da die Profile aus mehreren sich überlagernden Wellen bestehen, muss für die Berechnung der resultierenden Verformung das Verhältnis der Verformung einer einzelnen Welle zur Gesamtverformung berechnet werden. Dafür wird Überlagerung der einzelnen Ortswellenlängen als Reihenschaltung einzelner Federkonstanten betrachtet. Im Antastfall wird die Kraft auf mehrere Wellen gleichzeitig ausgeübt. Die einzelne Federkonstante wird durch die resultierende Verformung berechnet. Dabei wird für jede Welle die Federsteifigkeit, wie in Formel 6.7 gezeigt, nach ([106], S. T3) ermittelt. Die Längenänderung ΔL ergibt sich dabei aus der nach Formel 6.1 ermittelten Abplattung.

$$k = \frac{F}{\Delta L} \quad (6.7)$$

Die Gesamtfedersteifigkeit des Systems ergibt sich mit folgender Gleichung 6.8 nach ([107], S. K51) wie folgt:

$$\frac{1}{k_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (6.8)$$

Dabei wird die berechnete elastische Verformung der einzelnen Welle durch den jeweiligen Anteil der Federsteifigkeit k_i an der Gesamtfedersteifigkeit k_{ges} durch die Addition der Kehrwerte berücksichtigt. Die Berechnung der abgeplatteten Amplitude $A_{\text{abgeplattet},i}$ erfolgt dadurch, dass der Eingangswert der betrachteten Amplitude $A_{\text{initial},i}$ um den errechneten Anteil der elastischen Abplattung verringert wird. Das Profil besteht aus mehreren sich überlagernden Wellen, daher wird die in Formel 6.9 gezeigte Rechnung für sämtliche im Profil vorhandenen Wellenlängen durchgeführt. Dabei wird der zweite Term mit 0,5 multipliziert, da $u_{z,i}$ die Änderung der negativen und positiven Halbwelle beinhaltet.

$$A_{\text{abgeplattet},i} = A_{\text{initial},i} - 0,5 * \left(\frac{k_{\text{ges}}}{k_i} * u_{z,i} \right) \quad (6.9)$$

Im Anschluss an die Verringerung um den elastischen Anteil werden die einzelnen Bestandteile wieder zu einem Oberflächenprofil zusammengefügt. Die Berechnung der Abplattung erfolgt dabei automatisiert in der Berechnungssoftware und kann durch Anpassung der Parameter an sämtliche Kombinationen aus Antastkraft und Größe des Antastelements angepasst

werden. Die Berechnung der Abplattung erfolgt unabhängig von der vorangehenden Modellierungsart.

In Bild 32 ist die abgeplattete Profilspitze eines Drehprofils dargestellt. Das gezeigte Drehprofil ist aus einer Messung mit einem Tastschnittgerät entstanden (siehe Bild 31 b)). Es wird die Abplattung für eine Messung mit einer Antastkraft von 0,1 N und einem Tastkugeldurchmesser von 8 mm berechnet. Durch die reduzierten Amplituden der jeweiligen Wellen ergibt sich eine Reduktion der Profilspitze in Richtung Profilmitte um $0,06\text{ }\mu\text{m}$, was einer Reduktion der Profilhöhe von etwa 0,2 % entspricht.

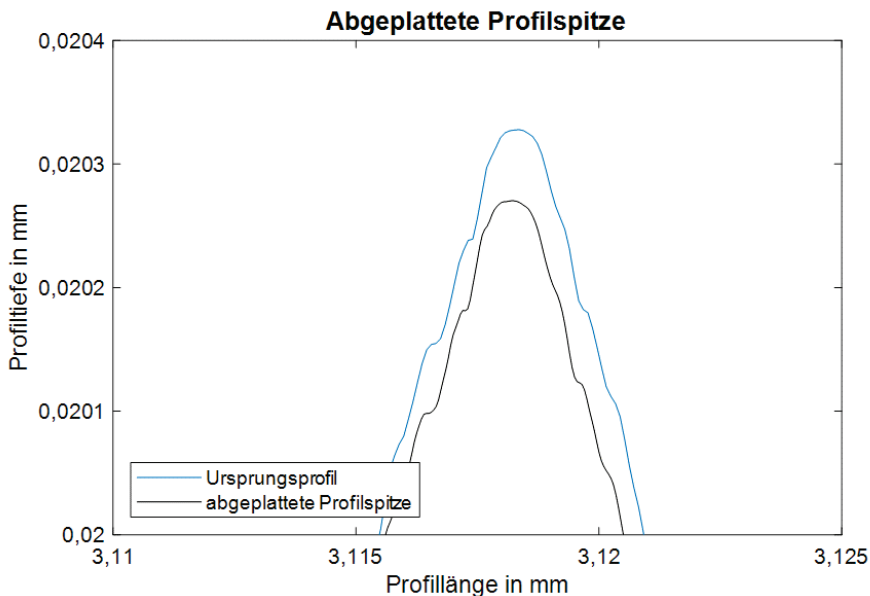


Bild 32: Drehprofil vor und nach der Abplattung

Die nach dem beschriebenen Vorgehen abgeplatteten Werkstückoberflächen werden im Anschluss daran für die Simulation der morphologischen Filterwirkung (Closing) der gesamten Messung durch eine Dilatation und Erosion gefiltert [108]. Diese Filterung bildet den mechanischen Antastprozess mittels einer Kreisscheibe (Dilatation) ab, unabhängig von den Krümmungsradien des nicht abgeplatteten Originalprofils ([15], S. 149) und stellt die morphologische Operation der Dilatation dar. Die Profilspitzen werden dabei von der Kreisscheibe berührt. Dabei ist der Mittelpunkt der Kreisscheibe bekannt und wird als Messpunkt erfasst. Die um den Kreisscheibenradius in Antastrichtung korrigierten Messpunkte (Erosion; vgl. Taselementkorrektur [56]) ergeben die Oberflächenpunkte des gemessenen Profils [15]. Da sowohl durch die Messung als auch durch die rein rechnerische

rische Modellierung anhand der Fertigungsparameter nur zweidimensionale Informationen über den Profilschnitt vorhanden sind, ist die zweidimensionale Betrachtung der mechanischen Filterwirkung der Tastkugel ausreichend.

Das nach Abplattung und mechanischer Filterung und Tastelementkorrektur resultierende Profil eines Drehprofils ist in Bild 33 dargestellt. Hierbei handelt es sich um das in Bild 32 gezeigte Profil basierend auf einer Messung mit dem Tastschnittgerät. Die mechanische Filterung erfolgt nach der Abplattung des Profils und wird für einen Tastkugeldurchmesser von 8 mm berechnet. Die resultierende Veränderung des Profils durch die Abplattung und mechanische Filterung ist dabei enorm, wobei der maßgebliche Anteil (größer 90 %) von der mechanischen Filterung des Profils kommt. Die theoretische Profiltiefe P_t des simulierten Messprofils beträgt nur noch 17 % der ursprünglichen erfassten Profiltiefe.

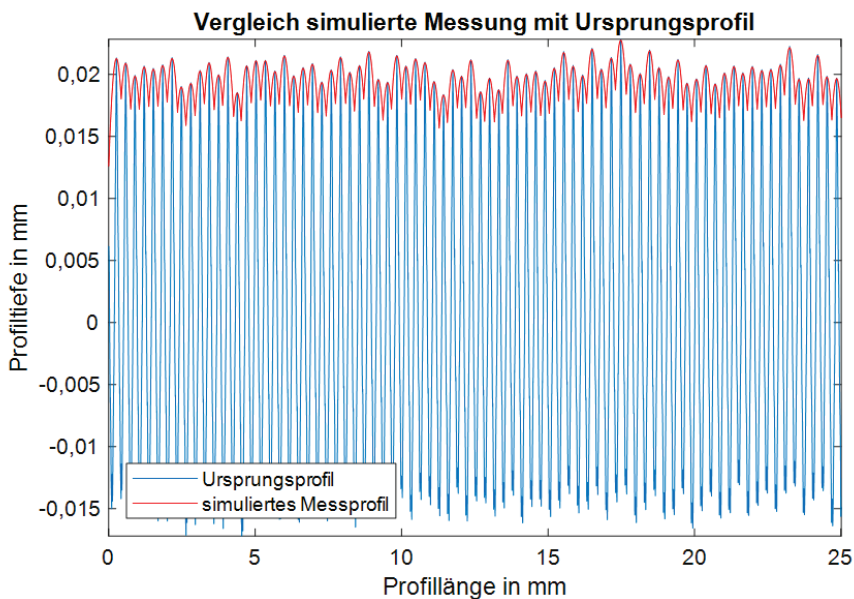


Bild 33: Resultierendes Profil nach Abplattung und mechanischer Filterung

Bei der Messung mit Koordinatenmessgeräten werden üblicherweise Tastkugeln mit einem Minstdurchmesser von 0,2 mm verwendet. Diese sind meist größer als die auf den Werkstückoberflächen auftretenden Strukturen. Die Profiltäler werden somit durch die mechanische Abtastung stark unterdrückt. Durch das große Verhältnis von Antastelement und dem Abstand der Profilspitzen zueinander ist die mechanische Filterung strukturgebend.

Bild 34 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus dem Bereich der Profilspitzen aus Bild 33. Diese Vergrößerung macht den Effekt der Abplattung und mechanischen Filterung sichtbar. Die Spitzenhöhe wird durch die Abplattung um ungefähr 100 nm reduziert. Durch die mechanische Filterung wird nur ein Bruchteil der vorhandenen Profiltiefe erfasst. Das simulierte Messprofil zeigt nun sehr spitze, v-förmige Profiltäler. Die Profilspitzen werden abgerundet wiedergegeben und sind deutlich stumpfer als zuvor.

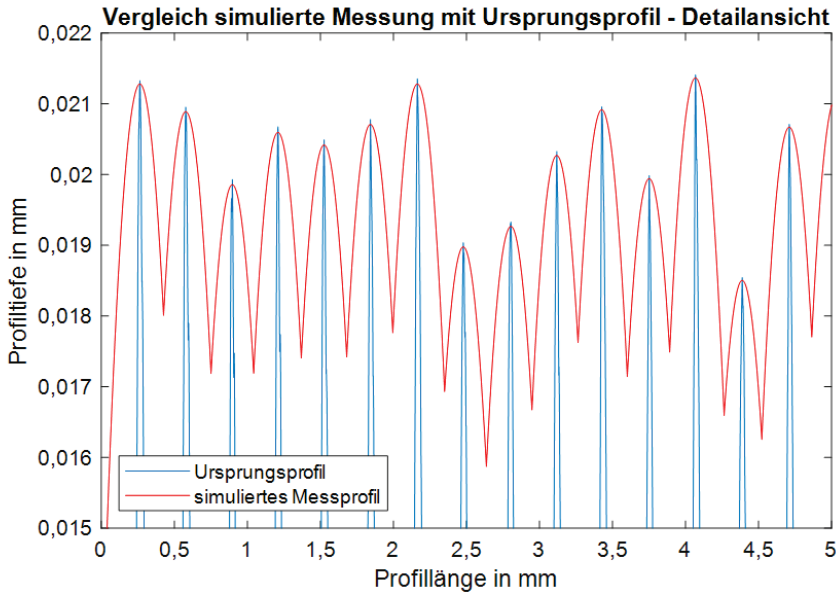


Bild 34: Vergrößerter Ausschnitt mit sichtbaren Profilspitzen

Die Simulation der mechanischen Filterung in Kombination mit der Abplattung verändert das Profil stark. Rückschlüsse auf die Profiltiefe des Ursprungsprofils lassen sich nach dieser Berechnung meist nicht mehr ziehen. Bei der Messung mit Koordinatenmessgeräten wird das tatsächliche abweichungsbehaftete Werkstückoberflächenprofil in Abhängigkeit der Antastparameter stark verändert wiedergegeben. Das bei der Messung entstehende Profil wird maßgeblich von den hier gezeigten Effekten beeinflusst, wobei die Abplattung eine geringe Reduktion der Spitzen hervorruft und die mechanische Filterung eine große Reduktion der Profiltiefe. Bei kleiner werdenden Antastelementen zeigt der Effekt der Abplattung eine größere Wirkung, da die mechanische Filterung abnimmt und die Abplattung jedoch nahezu gleich bleibt. Für Standardmessaufgaben in der Koordinatenmesstechnik mit Tastkugeldurchmesser größer 0,2 mm besitzt der Effekt der Abplattung im Gegensatz zur mechanischen Filterwirkung keine Signifikanz.

6.5 Einbindung in die VCMM-Struktur

Die aus den vorangegangenen Schritten entstehenden Profildaten werden zur weiteren Verwendung für das VCMM aufbereitet. Dafür teilt man die Profildaten durch eine Fourier-Transformation in Wellen unterschiedlicher Wellenlänge, Amplitude und Phasenlage auf. Die Werte werden im XML-Format für die Verwendung im VCMM bereitgestellt. Aus der Fouriertransformation ergeben sich in Abhängigkeit der Werkstückoberfläche unterschiedliche Kombinationen aus Amplitude, Wellenlänge und Phasenlage. Das Profil der Werkstückoberflächen wird dabei maßgeblich durch eine begrenzte Anzahl von Wellenlängen bestimmt. Um die Datenbasis übersichtlich zu halten werden Wellen mit Amplituden kleiner 10 nm nicht in das Format übertragen. Durch diese Beschränkung werden die Werkstückoberflächen nicht signifikant geändert; die Dateien sind dadurch kleiner als 400 kbit und können ohne große Ladezeiten in das VCMM übertragen werden. Ein für das VCMM bereitgestelltes Formmodell beinhaltet durch diese Reduktion einen Umfang von bis zu 500 verschiedenen Datensätzen mit den Informationen zu Amplitude, Wellenlänge und Phasenlage. Der Auszug eines Datensatzes mit Amplitude, Wellenlänge (Frequenz) und Phasenlage findet sich in Anhang auf S. 106.

Das VCMM verwendet bekannterweise die Formmodelle im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation. Dabei betrachtet man das Formmodell üblicherweise als variablen Einfluss, der mit jedem Simulationsschritt in seinen Grenzen variiert werden kann (Abschnitt 4.2.1). Wird das Formmodell aus Fertigungsparameter gewonnen, ist eine Variation nicht zielführend, da die Fertigungsparameter den tatsächlich vorliegenden Zustand beschreiben. Zusätzlich sind die Grenzen der möglichen Variation nicht bekannt. Daher wird das Formmodell aus Fertigungsparametern ohne Variationsgrenzen für das VCMM aufbereitet. Es ist dann jedoch nur für diesen Profilschnitt verwendbar.

Durch Messungen an verschiedenen Stellen auf der Werkstückoberfläche kann die hier gezeigte Vorgehensweise auch allgemeingültiger verwendet werden. Dabei werden die gemessenen Profile nach der Fouriertransformation hinsichtlich ihrer Bestandteile ausgewertet. Die Schwankungen der Bestandteile werden als variabler Einfluss in die Monte-Carlo-Simulation überführt. Daraus ergeben sich die Variationsgrenzen für die Simulation. Somit kann eine Werkstückoberfläche durch mehrere Stichprobenmessungen charakterisiert werden und ist dadurch für verschiedene Messpositionen gültig. Dieses Vorgehen erfordert tiefergehende Kenntnisse über die einzelnen Fertigungsprozesse und die daraus resultierenden Oberflächeneigenschaften einzelner Werkstückoberflächen. Bei der Betrachtung von in

großer Stückzahl gefertigten Werkstücken ist dieses Vorgehen vorstellbar. Dabei wird die Messung an einer Stichprobe von gleich gefertigten Werkstückoberflächen mit den üblichen Fertigungsschwankungen durchgeführt.

6.6 Übersicht über die verschiedenen Modellierungsarten

Die verschiedenen Vorgehensweisen zur Erstellung eines Formmodells für die Verwendung im VCMM unterscheiden sich bereits in der Herangehensweise. Das standardmäßig im VCMM verwendete Oberflächenwellenmodell muss, genauso wie das aus dem idealen Fertigungsprozess entstehende Modell, aus Vorwissen generiert werden. Im Gegensatz dazu steht das Oberflächenwellenmodell, welchem eine Tastschnittmessung zu Grunde liegt.

Die Modellierung des Messprozesses mit Berücksichtigung der Abplattung und mechanischen Filterwirkung ist nur für Modelle sinnvoll, deren Verhältnis von Amplitude zu Wellenlänge der realen Werkstückoberfläche entspricht. Dies trifft auf das standardmäßig im VCMM verwendete Oberflächenwellenmodell nicht zu. Die Abbildung aller Werkstückoberflächen, unabhängig vom Herstellungsprozess, kann nur durch die auf Tastschnittmessungen basierenden Modelle erfolgen. Unabhängig von der Modellierungsart können die Oberflächenmodelle für die Verwendung im VCMM bereitgestellt werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Oberflächenwellenmodelle und ihre Besonderheiten ist in Bild 35 dargestellt [P6].

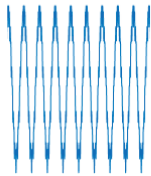
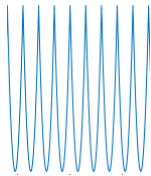
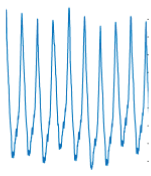
	Oberflächenwellenmodell:		
	standardmäßig im VCMM verwendet	basierend auf theor. Fertigungsinformationen	basierend auf Tastschnittmessung
			
Vorwissen erforderlich	✓	✓	✗
Messung erforderlich	✗	✗	✓
Modellierung des Messprozesses	✗	✓	✓
Abbildung aller Werkstückoberflächen	✗	✗	✓
Darstellbar im VCMM	✓	✓	✓

Bild 35: Vergleich der verschiedenen Modellierungsarten [P6]

7 Experimentelle Untersuchung an verschiedenen Oberflächenbeispielen

7.1 Auswahl der zu messenden Oberflächen und Werkstücke

Die verschiedenen Modellierungsarten führen jeweils zu einem im VCMM verwendbaren Modell. Dabei bildet das Oberflächenwellenmodell basierend auf Tastschnittmessungen die Werkstückoberfläche am realistischsten ab. Um zu prüfen, ob die modellierte Werkstückoberfläche auch tatsächlich der mit einem Koordinatenmessgerät gemessenen Werkstückoberfläche entspricht, werden nachfolgend simulierte Oberflächenwellenmodelle mit real an Koordinatenmessgeräten gemessenen Profilen verglichen. Als Messobjekte wurden Oberflächenvergleichsnormale [109] verwendet. Diese repräsentieren typische Werkstückoberflächen unterschiedlicher Herstellungsverfahren. Die für das jeweilige Verfahren verwendeten Fertigungsparameter sind bekannt. In Tabelle 2 sind die betrachteten Oberflächenvergleichsnormale zusammen mit den Nominalwerten für die jeweiligen Oberflächenkenngrößen dargestellt. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen und Schleifen. Beim Fräsen wird zusätzlich zwischen Stirnfräsen und Walzfräsen unterschieden. Die Nominalwerte des arithmetischen Mittenrauwerths R_a und der gemittelten Rautiefe R_z sind für jedes Oberflächenvergleichsnormal bekannt.

Tabelle 2: Betrachtete Oberflächenvergleichsnormale

Fertigungsprozess	Nominalwert R_a in μm	Nominalwert R_z in μm
Drehen	2,5; 4; 6,3; 10	-
Stirnfräsen	-	6,3; 10; 20; 40; 80
Walzfräsen	-	6,3; 10; 20
Planschleifen	0,25; 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5	0,8; 3,2; 6,3; 10; 20

Zur vollständigen Erfassung der Oberfläche, insbesondere zur Ermittlung der Wellenlänge, wurden die Oberflächenvergleichsnormale zunächst mit einem Tastschnittgerät gemessen, die Messung dient als Basis des Oberflächenwellenmodells. Der Messpunktabstand wurde auf $0,1 \mu\text{m}$ festgelegt.

Der Tastspitzenradius beträgt $2\text{ }\mu\text{m}$. Es ist davon auszugehen, dass mit diesen Messparametern sämtliche für den Vergleich mit der taktilen Koordinatenmessung relevanten Oberflächencharakteristika erfasst werden können [5]. Die Messung erfolgte senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Die Länge der Messstrecke beträgt 25 mm . Insgesamt wurden drei Messbahnen erfasst. Die mittlere Messbahn befindet sich mittig auf dem Oberflächenvergleichsnormal. Die beiden anderen Messbahnen sind um jeweils 2 mm parallel zur dieser Messbahn versetzt. Bild 36 zeigt ein stirngefrästes Oberflächenvergleichsnormal mit dem Nominalwert $R_z = 80\text{ }\mu\text{m}$. Die Messbahnen sind schematisch eingezeichnet. Die Ausrichtung bei der Messung mit dem Tastschnittgerät erfolgte manuell.



Bild 36: Oberflächenvergleichsnormal Stirnfräsen $R_z = 80\text{ }\mu\text{m}$

Zur Prüfung, ob die gemessenen Oberflächenvergleichsnormale einen repräsentativen Bereich der erreichbaren Mittenrauwerte (Abschnitt 2.2, Bild 6) abdecken, werden die bei der Messung ermittelten Mittenrauwerte gegen die theoretisch durch das Fertigungsverfahren erreichbaren Mittenrauwerte aufgetragen. Die ermittelten Mittenrauwerte sind in Bild 37 farbig eingezeichnet. Es wird ersichtlich, dass der Bereich der Rauheitskennzahlen [59] für Drehen, Fräsen und Schleifen nach [22] entsprechend abgedeckt wird. Insgesamt werden durch alle Oberflächenvergleichsnormale

Mittenrauwerte R_a von $0,1 \mu\text{m}$ bis $7,69 \mu\text{m}$ repräsentiert. Diese entsprechen den Rauheitskennzahlen N_3 bis N_{10} .

Mittenrauwert R_a in μm	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Rauheitskennzahl	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}
Drehen												
2,44 μm – 7,69 μm												
Fräsen												
0,79 μm – 6,16 μm												
Schleifen												
0,1 μm – 2,16 μm												

Bild 37: Ermittelte Mittenrauwerte der Profile

7.2 Vergleich der gemessenen und gefilterten Oberflächen mit dem Profil aus dem simulierten Abtastvorgang

7.2.1 Allgemeines Vorgehen für Messung und Simulation

Die Messdaten für den Vergleich mit den simulierten Werten werden durch Messungen auf einem Koordinatenmessgerät erzeugt. Die Messgeschwindigkeit betrug 3 mm/s . Bei dieser Messgeschwindigkeit ist kein Abheben des Antastelements zu erwarten [110]. Die Messkraft wurde auf 100 mN festgelegt. Die dabei auftretenden Abplattungen sind ausschließlich elastisch (Abschnitt 6.4). Antastobjekt und Werkstück werden bei dieser Parameterwahl durch die Messung nicht beschädigt.

Die im Rahmen dieses Vergleichs gezeigten Messergebnisse stammen von einem hochgenauen Koordinatenmessgerät mit der Spezifikation $\text{MPE} = (0,3 + L/1000 \text{ mm}) \mu\text{m}$ nach [111]. Die Messung wurde mit den Tastkugeldurchmessern 1 mm , 2 mm , 4 mm und 8 mm durchgeführt. Diese Größen werden bei typischen Koordinatenmessungen eingesetzt. Bild 38 zeigt die Messung eines Oberflächenvergleichsnormals mit dem Koordinatenmessgerät unter Verwendung des Tastkugeldurchmessers 1 mm .

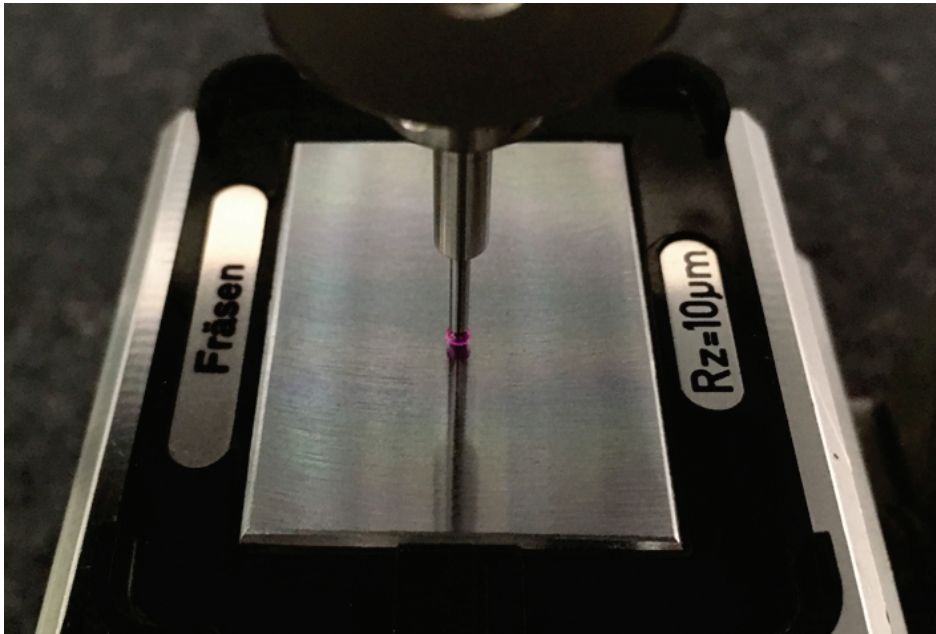


Bild 38: Messung eines Oberflächenvergleichsnormals mit dem Koordinatenmessgerät

Die Messung mit dem Koordinatenmessgerät findet an derselben Stelle statt, wie die Messung mit dem Tastschnittgerät zur Generierung der Ausgangsdaten für die Simulation. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung und Auswertestrategie der zugrundeliegenden Messung kann die Neigung der erfassten Profile dabei unterschiedlich sein. Die Koordinaten der durch die Messung mit dem Tastschnittgerät erfassten Messpunkte sind auf eine Ausgleichsgeraden nach Gauß bezogen. Die durch die Koordinatenmessung erfassten Messpunkte sind auf ein Basissystem in Bezug zum Kunststoffrahmen ausgerichtet, eine Skizze dazu ist im Anhang auf Seite 105 dargestellt. Durch den Kunststoffrahmen kann es zu Verformungen auf der Werkstückoberfläche kommen. Daher wird die Nennform entfernt. Dies ist ausführlich im Anhang ab S. 108 beschrieben. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass durch die Messung an nahezu identischen Messstellen auch die Ergebnisse beider Messgeräte miteinander vergleichbar sind. Das ermöglicht den Vergleich zwischen realen Messungen am Koordinatenmessgerät und den simulierten Messungen auf Basis der Messung mit dem Tastschnittgerät.

Die Erzeugung der Oberflächenmodelle (Abschnitt 6.3) erfolgt basierend auf Tastschnittmessungen mit der Mathematiksoftware MATLAB [112]. Dabei können neben der Berechnung von Abplattung und mechanischer Fil-

terung weitere Analysen getätigt werden. Die Modellierung in der Berechnungssoftware erfolgt mithilfe verschiedener Module. Diese Module werden in der hier dargestellten Reihenfolge durchlaufen und beinhalten sämtliche in Bild 22 in Kapitel 6 gezeigten Schritte:

Die einzelnen Module sind:

1. Erzeugung/Einlesen von Daten,
 - Einlesen vorhandener Datensätze (Tastschnittmessung),
 - Erzeugung synthetischer Daten (VCMM-Modell, Fertigungsparameter),
2. Berechnung der Abplattung,
3. mechanische Filterung,
4. Rückübersetzung in VCMM-Struktur (Anhang S. 106),
5. Auswertung (getrennt vom VCMM),
 - Berechnung der Unterabtastung,
 - Filterung des Profils,
 - Berechnung des Ausgleichelements.

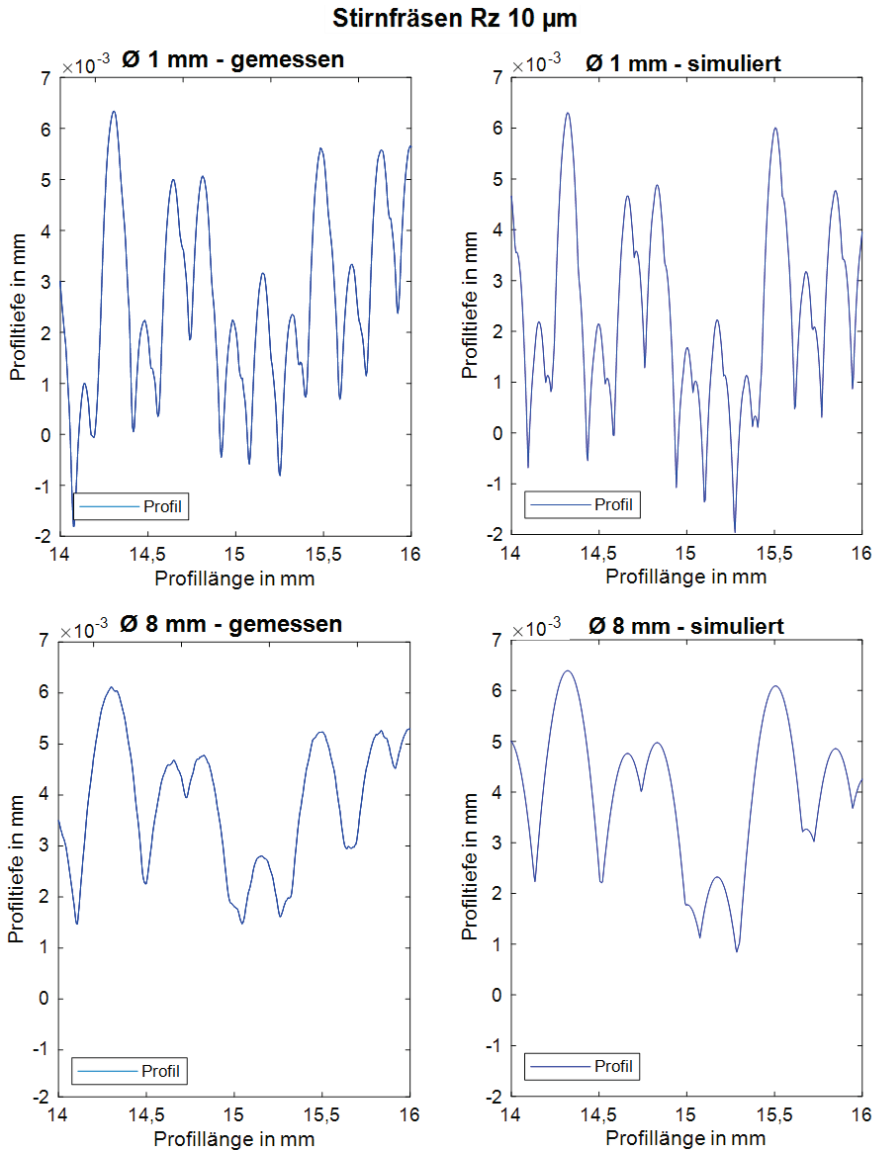
In einem ersten Schritt werden die Daten für die weitere Berechnung bereitgestellt. Die mit einem Tastschnittgerät gemessenen Profildaten werden aus einer Datei geladen. Die synthetischen Daten werden anhand der zugrundeliegenden Daten durch die Berechnungssoftware erzeugt. Dazu gehören die Modelle des als Standard im VCMM verwendeten Oberflächenwellenmodells (Abschnitt 6.1) und die Oberflächenwellenmodelle aus idealen Fertigungsprozessen (Abschnitt 6.2). Die Profildaten der zugrundeliegenden Tastschnittmessungen werden in den entsprechenden Datenformaten mit der Software des Tastschnittgerätes erzeugt und können für die Simulation verwendet werden. Ebenso ist es möglich, bereits bestehende VCMM-Formmodelle für die Simulation zu verwenden. Dazu werden die Daten im XML-Format (Anhang S. 106) in die Berechnungssoftware eingelesen. In diesem Fall wird aus den Informationen zu Wellenlänge, Amplitude und Phasenlage das entsprechende Profil generiert.

Die Profillänge der erstellten Modelle wird im Rahmen der weiteren Untersuchung auf 25 mm festgelegt. Der Punktabstand beträgt bei den theoretischen Profilen jeweils $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Dadurch ist bei der Weiterverarbeitung die Erfassung sämtlicher relevanter Profileigenschaften sichergestellt (Abschnitt 6.3). Die vorhandenen Daten werden entsprechend der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Vorgehensweise abgeplattet und mechanisch gefiltert. Die Messkraft ist dabei frei wählbar. In dieser Untersuchung entspricht sie dem bei der Messung auf dem Koordinatenmessgerät gewählten Wert.

Das abgeplattete und mechanisch gefilterte Profil wird im Anschluss in das vom VCMM lesbare XML-Format (Anhang S. 106) übersetzt. Dafür wird das vorliegende X-Z-Profil durch eine Fouriertransformation in die Beschreibung durch Wellenlänge, Amplitude und Phasenlage überführt und in das entsprechende XML-Format geschrieben. Für jede Konfiguration aus Antastkraft und Tastkugeldurchmesser wird ein separates Modell erstellt. Diese Modelle müssen bei der Verwendung im VCMM dann entsprechend angewählt werden. Die derzeitige Herangehensweise lässt nur eine korrekte Verwendung von Modellen zu, welche für zweidimensionale Messlinien verwendet werden. Darauf wird in Abschnitt 7.3 näher eingegangen.

Zusätzlich zur Bereitstellung der Formmodelle für das VCMM kann die Berechnung der Unterabtastung (Abschnitt 4.2.2) direkt in der Mathematiksoftware erfolgen. Im Gegensatz zur Berechnung im VCMM werden dabei keine weiteren Einflüsse für die Messunsicherheitsberechnung berücksichtigt. Bei der Berechnung der Unterabtastung wird das Profil mit zwei verschiedenen Abtastraten abgetastet. Die Standardmessung erfolgt mit der bei der fiktiven oder realen Messung verwendeten Abtastrate. Die höhere Abtastrate für die Referenzmessung ist beliebig einstellbar. In dieser Arbeit wird die zehnfache Punktemenge gewählt. Dieses Vorgehen ist analog zu der derzeit in der Anwendersoftware des VCMM umgesetzten Strategie. Durch diese Implementierung können Effekte aus der Oberflächenmodellierung unabhängig vom VCMM untersucht werden. Hierbei wird neben der Formabweichung die Lageänderung des Ausgleichselements berücksichtigt. Aufgrund der in dieser Arbeit verwendeten linienförmigen Modelle wird hierbei nur die Lage der nach Gauß berechneten Ausgleichsgerade betrachtet.

Für den konkreten Vergleich mit an einem Koordinatenmessgerät durchgeführten Messungen dienen die mit dem Tastschnittgerät erfassten Messbahnen der in Tabelle 2 gezeigten Oberflächenvergleichsnormale als Grundlage für die Simulation. Daraus ergeben sich insgesamt 69 Profile. Die Messung dieser Profile wird mit den Tastkugeldurchmesser 1 mm, 2 mm, 4 mm und 8 mm simuliert. Die simulierten Oberflächenprofile werden mit den tatsächlich durchgeführten Messungen verglichen. Bild 39 stellt den Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel des Oberflächenvergleichsnormals Stirnfräsen $R_z = 10 \mu\text{m}$ dar.



Der gezeigte Profilausschnitt verdeutlicht die Ähnlichkeit zwischen Messung und Simulation. Die beim Antasten auftretenden Effekte der Abplattung und mechanischen Filterwirkung werden durch die Simulation reali-

tätsnah abgebildet. Der visuelle Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Profilen wird mangels Quantifizierbarkeit jedoch nicht als Teil der nachfolgenden systematischen Untersuchung dargestellt.

Die nachfolgende Untersuchung prüft die These, dass durch die Simulation die Messung eines Profils korrekt wiedergegeben werden kann und somit an die Messung angepasste Oberflächenwellenmodelle für das VCMM erstellt werden können. Dafür werden die aus Simulation und Messung entstehenden Profile hinsichtlich der Kriterien Korrelation (Abschnitt 7.2.2), statistische Kenngrößen (Abschnitt 7.2.3) und Profilparameter (Abschnitt 7.2.4) miteinander verglichen. Aus den nachfolgenden Untersuchungen wurden insgesamt 12 mit dem Koordinatenmessgerät gemessene Messbahnen ausgeschlossen. Diese Messbahnen sind mit Ausreißern behaftet und können somit nicht zielführend mit den simulierten Werten verglichen werden.

7.2.2 Korrelationsanalyse

Bei der Korrelationsanalyse wird die Korrelation zwischen gemessenen und simulierten Profilen ermittelt. Der dabei ermittelte Korrelationskoeffizient zeigt, ob die Profile einen starken linearen Zusammenhang (Korrelationskoeffizient = 1) oder keinen Zusammenhang (Korrelationskoeffizient = 0) haben. Bei einem Korrelationskoeffizienten von -1 besteht ein starker negativer linearer Zusammenhang. Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten erfolgt in der Mathematiksoftware MATLAB [112].

Zur Berechnung der Korrelationskoeffizienten werden die X-Z-Profile von Simulation und zugehöriger Messung miteinander verglichen. Dafür müssen die Profile gleich lang sein und denselben Anfangspunkt besitzen. Durch die unterschiedliche Herangehensweise bei der Messung, automatisierte Ausrichtung bei der Messung mit dem Koordinatenmessgerät und manuelle Ausrichtung bei der Messung mit dem Tastschnittgerät, können die Anfangspunkte verschieden sein. Daher wird das simulierte Profil an Profilanfang und Profilende um jeweils 5 mm gekürzt und schrittweise über das gemessene Profil ‚geschoben‘. Der Korrelationskoeffizient wird für jede Position der Verschiebung ermittelt. Für die finale Bewertung wird nur der größte Korrelationskoeffizient berücksichtigt. Zusätzlich wird die Lage der Profile vereinheitlicht, dadurch werden diese um den Wert der jeweiligen Ausgleichsgerade reduziert. Somit können diese nahezu deckungsgleich überlagert dargestellt werden. Es wird jeweils nur der Bereich der Profilüberlappung beider Profile betrachtet, die Auswertelänge beträgt dadurch 15 mm.

Das nachfolgende Bild 40 zeigt die Überlagerung der in vorangegangener Abbildung gezeigten stirngefrästen Profile. Der ermittelte Korrelationskoeffizient beträgt 0,76. Durch die Reduktion um die jeweilige Ausgleichsgerade beträgt die mittlere Profiltiefe jeweils 0 mm und unterscheidet sich dadurch von Bild 39.

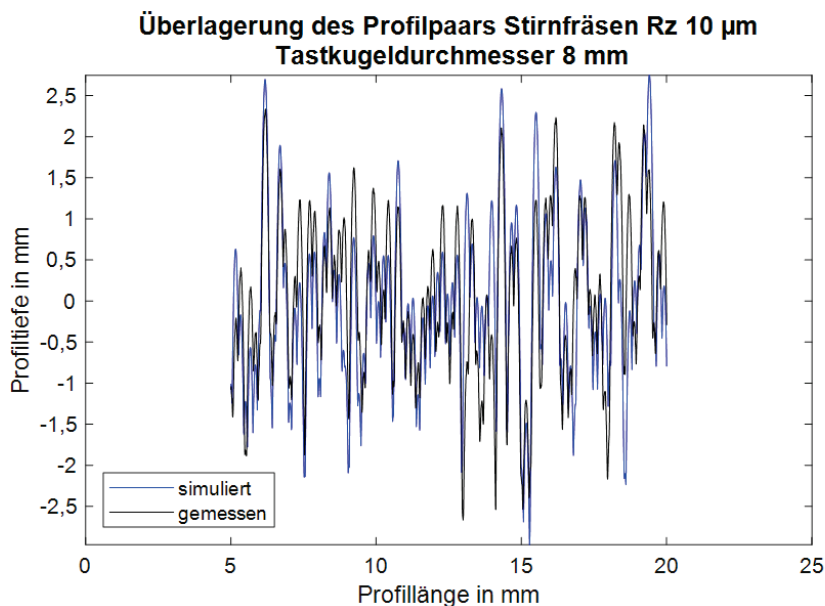


Bild 40: Überlagerung des Profilpaars Stirnfräsen Rz = 10 μ m, $\varnothing$ = 8 mm

Die Korrelationskoeffizienten werden für jeden einzelnen Schritt der Überlagerung berechnet. Sämtliche für die gezeigte Profilpaarung ermittelte Korrelationskoeffizienten sind in Bild 41 dargestellt. Der maximale Korrelationskoeffizient von 0,76 ist dabei deutlich erkennbar. Durch die unregelmäßige Struktur der Profile ist es einfach die korrekte Lage der Profile zueinander zu bestimmen. Die weiteren Positionen bei der Verschiebung der Profile zueinander weisen keinen Zusammenhang auf.

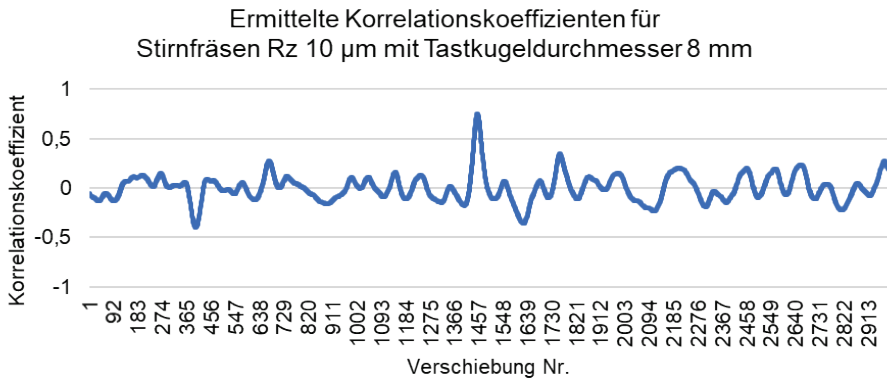


Bild 41: Ermittelte Korrelationskoeffizienten für Stirnfräsen Rz = 10 µm mit Ø 8 mm

Bei der Betrachtung der maximalen Korrelationskoeffizienten aller betrachteten Oberflächenvergleichsnormale zeigt sich insgesamt eine hohe Korrelation zwischen Simulation und Messung. Die Ergebnisse sind in einer Histogrammdarstellung in Bild 42 zu sehen. Während nur 1,9 % der ermittelten Korrelationskoeffizienten im Bereich von 0 bis 0,25 liegen und damit keinen Zusammenhang aufweisen, besitzen nahezu 90 % der ermittelten Korrelationskoeffizienten einen Wert größer 0,5. Insgesamt 63 % (167 von 264) der betrachteten Oberflächenpaare weisen mit einem Korrelationskoeffizienten größer 0,75 eine hohe Korrelation auf.

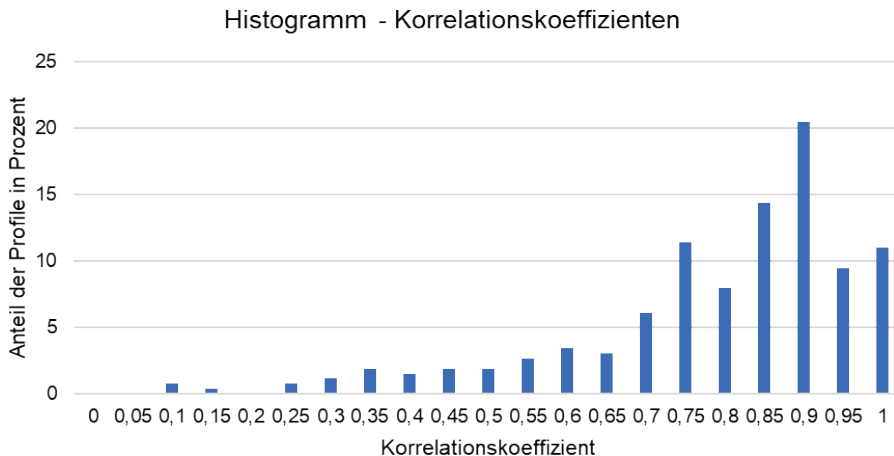


Bild 42: Histogramm der Korrelationskoeffizienten

Anhand von zwei Beispielen mit einem sehr niedrigen und einem sehr hohen Korrelationskoeffizienten wird gezeigt, wie es zu den unterschiedli-

chen Ergebnissen kommt. Beispielhaft für einen Profilvergleich mit niedrigem Korrelationskoeffizienten zeigt Bild 43 ein plangeschliffenes Profil mit dem Kennwert $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ zusammen mit sämtlichen ermittelten Korrelationskoeffizienten während der Verschiebung. Die simulierte Messung zur Erzeugung des Oberflächenmodells erfolgt mit dem Tastkugeldurchmesser 2 mm. Der ermittelte Korrelationskoeffizient beträgt 0,22. Beide Profile weisen eine vergleichbare Profiltiefe auf. Aber eine Korrelation lässt sich aufgrund der zufälligen Struktur der durch einen Schleifprozess erzeugten Oberfläche (Abschnitt 2.2) kaum ausmachen.

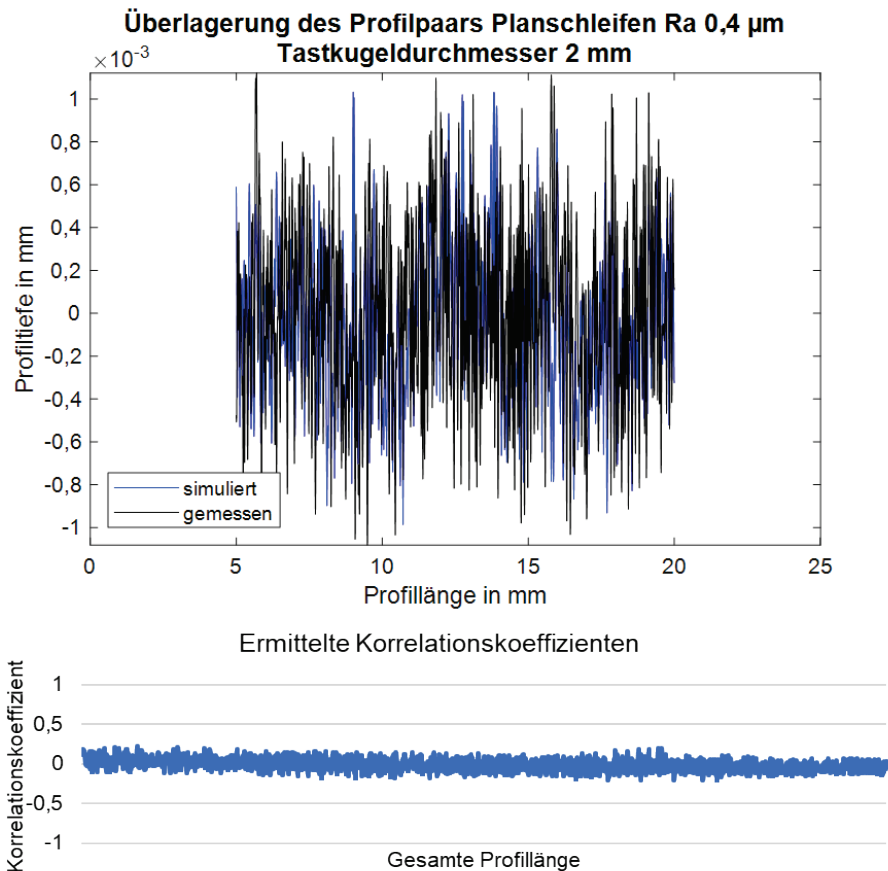


Bild 43: Überlagerung des Profilpaars Planschleifen $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, $\varnothing = 2 \text{ mm}$

Als Gegenbeispiel dazu dient ein Drehprofil mit $R_a = 10 \mu\text{m}$. Dieses wird in der simulierten Messung mit einem Tastkugeldurchmesser von 2 mm abgetastet. Der maximale ermittelte Korrelationskoeffizient beträgt 0,98 und liegt damit im Bereich sehr hoher Korrelation. Die Überlagerung beider

Profile zeigt ein nahezu identisches Bild und ist in Bild 44 dargestellt. Bei der Betrachtung sämtlicher ermittelter Korrelationskoeffizienten zeigt sich die ausgeprägte Regelmäßigkeit der Profile und die daraus entstehende regelmäßige hohe Korrelation in Zusammenspiel mit der regelmäßigen hohen negativen Korrelation. Diese entsteht, wenn beim Verschieben der Profile die Profilspitze des einen Profils mit dem Profiltal des anderen Profils überlagert wird.

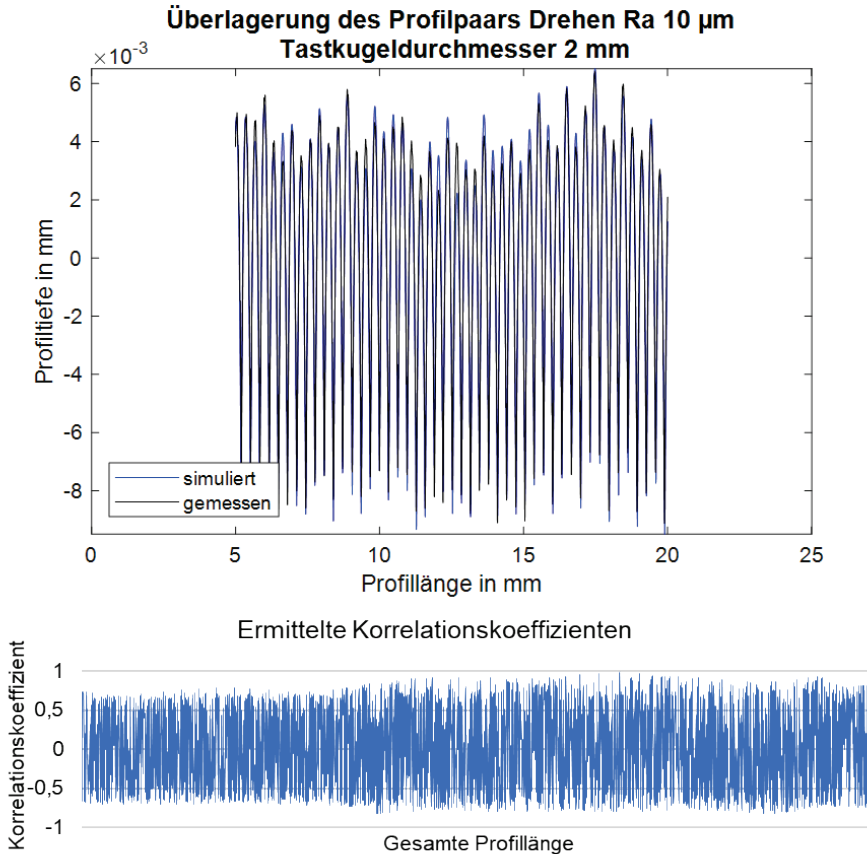


Bild 44: Überlagerung des Profils Paares Drehen Ra = 10 μm , $\varnothing = 2 \text{ mm}$

Die Korrelationsanalyse liefert zwei unterschiedliche Resultate: Bei ausgeprägten periodischen Strukturen ergeben sich hohe Korrelationskoeffizienten, was die Methode zur Erzeugung der Oberflächenmodelle bestätigt. Zufällige Strukturen zeigen jedoch nur kleine Korrelationskoeffizienten. Neben der Korrelationsanalyse werden daher weitere Kenngrößen herangezogen, um die aus Simulation und Messung entstehenden Profile miteinander zu vergleichen.

7.2.3 Statistische Kenngrößen Rsm und Rc

Neben der Korrelation wird die mittlere Rillenbreite Rsm und die mittlere Höhe der Profilelemente Rc betrachtet. Diese Kenngrößen dienen als Werkzeug, um das Erscheinungsbild der entstehenden Oberflächenprofile zu bewerten. Die Berechnung dieser statistischen Kenngrößen erfolgt durch die Software Omnisurf [113]. Die Grenzwellenlänge des verwendeten Gauß-Filters [114], [115] für λ_c beträgt 0,5 mm (siehe Abschnitt 2.1).

Die statistischen Kenngrößen der in den vorangegangenen Bildern 7.5, 7.8 und 7.9 gezeigten Profilpaare sind nachfolgend in Tabelle 3 dargestellt. Zusätzlich ist der maximale Korrelationskoeffizient angegeben. Die Unterschiede zwischen Simulation und Messung sind bei Betrachtung der statistischen Kenngrößen ebenfalls sichtbar. Bei dem plangeschliffenen Profilpaar lässt sich durch die großen Unterschiede bei der berechneten mittleren Rillenbreite und der mittleren Höhe der Profilelemente kein Zusammenhang zwischen beiden Profilen ableiten. Beim stirngefrästen Profilpaar sind die Abweichungen deutlich geringer und liegen im einstelligen Prozentbereich. Beim gedrehten Profilpaar sind nur noch geringe Abweichungen bei Rc vorhanden; der Wert für Rsm ist identisch. Die ermittelten Differenzen sind konsistent zu den ermittelten Korrelationskoeffizienten.

Tabelle 3: Vergleich der statistischen Kenngrößen der in 7.2.2 gezeigten Profilpaare

Profilpaar	Planschleifen Ra = 0,4 µm, Ø = 2 mm		Stirnfräsen Rz = 10 µm, Ø = 8 mm		Drehen Ra = 10 µm, Ø = 2 mm	
	Rsm	Rc	Rsm	Rc	Rsm	Rc
Messung in µm	95	0,893	275	1,167	319	10,012
Simulation in µm	143	0,682	268	1,219	319	9,775
Differenz in %	50,5	-23,6	-2,6	4,5	0	-2,4
Maximaler Korrelationskoeffizient	0,22		0,76		0,98	

Weitet man die Betrachtung auf alle Profilpaare auf, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten. Die meisten Profilpaare zeigen Abweichungen im einstelligen Prozentbereich. Eine Übersicht über die Häufung der Abweichungen zwischen Simulation und Messung in den entsprechenden Bereichen ist in Tabelle 4 dargestellt.

Mehr als 80 % der ermittelten Differenzen zwischen den Profilpaaren liegt im Bereich von -10 % bis 10 % des ermittelten Wertes. Bei der ermittelten Höhe der mittleren Profilelemente zeigt sich eine etwas größere Streuung. Hier liegen knappe 2/3 der Profilpaare im genannten Bereich. Bei 27,5 % der Profilpaare wird bei der Simulation ein mehr als 10 % höherer Wert als bei der tatsächlichen Messung ermittelt.

Tabelle 4: Rsm und Rc - Abweichungen pro Bereich

Rsm und Rc - Abweichungen pro Bereich in %									
	-100 % bis -50 %	-50 % bis -20 %	-20 % bis -10 %	-10 % bis -5 %	-5 % bis 5 %	5 % bis 10 %	10 % bis 20 %	20 % bis 50 %	50 % bis >100 %
Rsm	0	0	1	3,8	52,1	24,7	9,4	6,9	2,1
Rc	0	1,7	4,5	2,1	41,7	22,6	21,9	5,6	0
rundungsbedingt kann es zu einer Summe ungleich 100 % kommen									

Die gezeigten Abweichungen zwischen Simulation und Messung treten unabhängig von der Fertigungsart auf. In Bild 45 werden die ermittelten Abweichungen zwischen den Profilpaaren für Rc getrennt nach regelmäßigen und unregelmäßigen Profilen betrachtet. Die aus dem Stirnfräsen und Drehen entstehenden Profile werden aufgrund der dabei auftretenden regelmäßigen Strukturen den regelmäßigen Profilen zugeordnet. Profile aus Walzfräsen und Planschleifen werden den unregelmäßigen Profilen zugeordnet. Exemplarische Profile sind in Anhang ab S. 101 dargestellt. Bei den unregelmäßigen Profilen zeigt sich eine größere Streuung der Ergebnisse. Bei regelmäßigen Profilen ist hingegen eine geringere Streuung zu beobachten. Die Abweichungen beider Profiltypen treten hauptsächlich im Bereich -5 % bis 5 % auf. Bei unregelmäßigen Profilen zeigt sich zudem eine Häufung bei Abweichungen im Bereich 5 % bis 10 %.

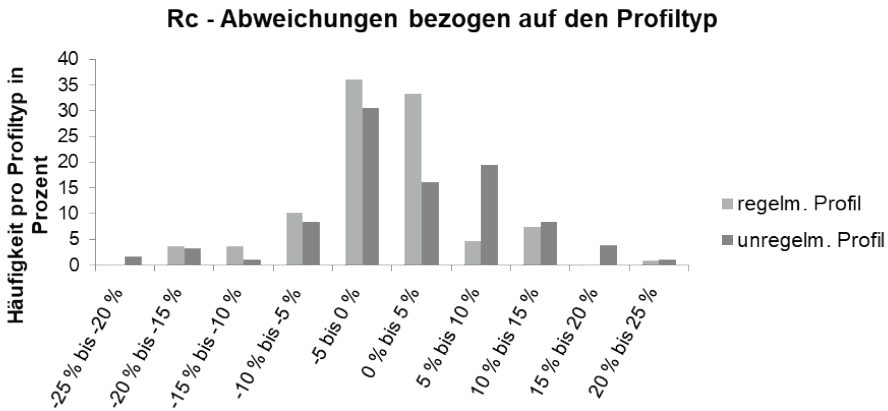


Bild 45: Abweichungen bezogen auf die Fertigungsart

Bezogen auf das Antastelement zeigen die Abweichungen ebenfalls ein homogenes Bild. Diese Abweichungen sind in Bild 46 dargestellt. Unabhängig von der Größe des Antastelements tritt eine klare Häufung der Werte im Bereich zwischen -5 % und 5 % auf. Treten Abweichungen außerhalb dieses Bereichs auf, ist oftmals der bei der Simulation ermittelte Wert für Rc größer als der bei der Messung ermittelte Wert. Eine vollständige Darstellung der Abweichungen für Rsm und Rc jeweils bezogen auf Fertigungsverfahren, Profiltyp und Antastelement (Tastkugeldurchmesser) findet sich im Anhang ab S. 116.

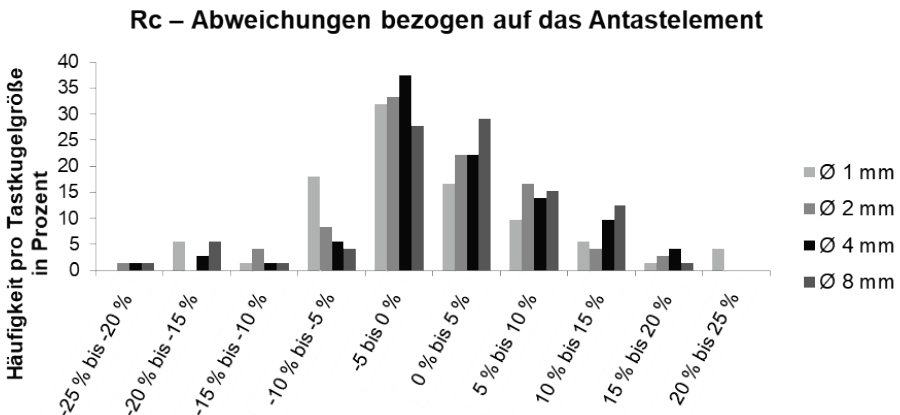


Bild 46: Abweichungen bezogen auf das Antastelement

Zusammengefasst bestätigen die statistischen Kenngrößen weitgehend den Zusammenhang zwischen Simulation und Messung. Es zeigt sich, wie bei der Korrelationsuntersuchung, dass die Vergleichbarkeit mit zunehmend stochastischer Oberfläche abnimmt. Wesentlich für die Vergleichbarkeit

ist die Gesamtprofiltiefe, deren Kenngrößen Pt, Wt und Rt im folgenden Abschnitt untersucht werden.

7.2.4 Kenngrößen Pt, Wt und Rt

Bei der Ermittlung der Werte für Pt, Wt und Rt werden ebenfalls die Abweichungen zwischen Simulation und Messung der einzelnen Profilpaare betrachtet. Analog zum vorangegangenen Abschnitt findet sich die vollständige grafische Auswertung der Parameter im Anhang ab S. 118. Für die Berechnung wird ein λ s-Filter mit der Grenzwellenlänge $2,5 \mu\text{m}$ und ein λ c-Filter von $0,5 \text{ mm}$ verwendet. Betrachtet man die in den vorangegangenen Abschnitten (7.2.2 und 7.2.3) gezeigten Profilpaare, ergeben sich dabei die in Tabelle 5 gezeigten Werte:

Tabelle 5: Vergleich der Kenngrößen Pt, Wt und Rt der in 7.2.2 und 7.2.3 gezeigten Profilpaare

Profilpaar	Planschleifen Ra = $0,4 \mu\text{m}$, $\varnothing = 2 \text{ mm}$			Stirnfräsen Rz = $10 \mu\text{m}$, $\varnothing = 8 \text{ mm}$			Drehen Ra = $10 \mu\text{m}$, $\varnothing = 2 \text{ mm}$		
	Pt	Wt	Rt	Pt	Wt	Rt	Pt	Wt	Rt
Messung in μm	2,78	0,96	2,23	5,85	2,93	4,28	15,38	5,11	10,65
Simulation in μm	2,04	0,98	1,81	6,52	3,11	4,25	15,67	5,9	10,4
Differenz in %	-26,5	1,1	-19,1	11,4	6,6	-0,8	1,9	14,5	-2,3

Entgegen den Vergleichen mit den Korrelationskoeffizienten oder den statistischen Kenngrößen ist eine größere Streuung bei den ermittelten Kenngrößen zu beobachten. Die Werte weichen sogar bei dem gezeigten Drehprofil um bis zu 15 % ab. Das lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Betrachtung von Pt, Wt und Rt gezielt einzelne Wellenlängenbereiche der Profile betrachtet werden und keine rechnerische Mittelung stattfindet. Kleinere Abweichungen zwischen Simulation und Messung werden entsprechend der Berechnung der Parameter erfasst. Betrachtet man in Bild 47

exemplarisch die Abweichung der Wellentiefe W_t der unterschiedlichen Profiltypen, sieht man im Vergleich zu Bild 46 die dabei größere Streuung. Die auftretenden Abweichungen größer 50 % sind auf ausreißerbehaftete Messungen zurückzuführen. Diese 12 Profilpaare werden für die weitere Ergebnisdiskussion nicht beachtet (vgl. Abschnitt 7.2.1).

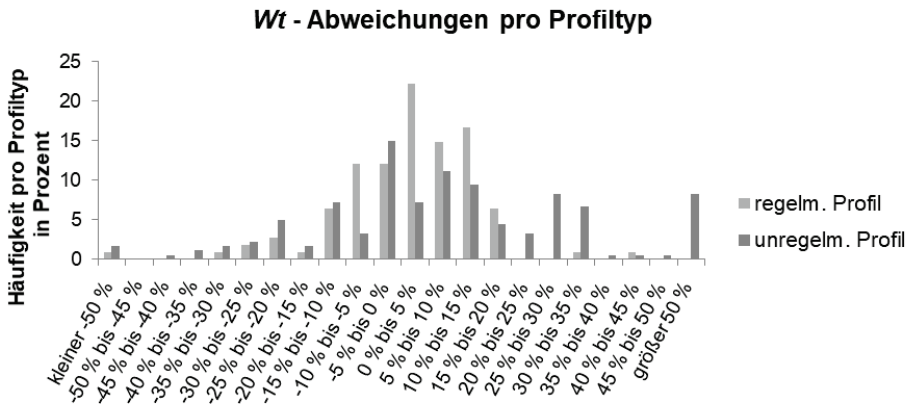


Bild 47: W_t - Abweichungen pro Profiltyp

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen Simulation und Messung sind von außen eingebrachte Einflüsse, die sich auf das Messergebnis auswirken. Hochfrequente Effekte werden in der Koordinatenmesstechnik durch den Einsatz von räumlichen Tiefpassfiltern üblicherweise nicht beachtet. Die Auswertung der Kenngrößen P_t , W_t und R_t zeigt, dass bei der Betrachtung dieser Wellenlängenbereiche Abweichungen auftreten.

Zur näheren Betrachtung wird dieser Effekt durch die detaillierte Darstellung einzelner Wellenlängen im Amplitudenspektrum sichtbar gemacht. Bild 48 zeigt das Amplitudenspektrum der simulierten Messung an dem bereits gezeigten Drehprofil mit $R_a = 10 \mu\text{m}$. Die Abbildung zeigt die bei der Messung mit dem Tastschnittgerät erfassten Amplituden des gezeigten Wellenlängenbereichs. Zusätzlich sind die Amplitudenspektren der auf der Tastschnittmessung basierenden Simulation für die verschiedenen großen Tastelemente eingezeichnet. Die Grenzlinien für die Übertragung der Wellenlängeninformationen in Abhängigkeit von dem Durchmesser des Tastelements nach [28] sind für sämtliche Tastelemente eingezeichnet. Diese Grenzlinien werden durch die Simulationsergebnisse bestätigt.

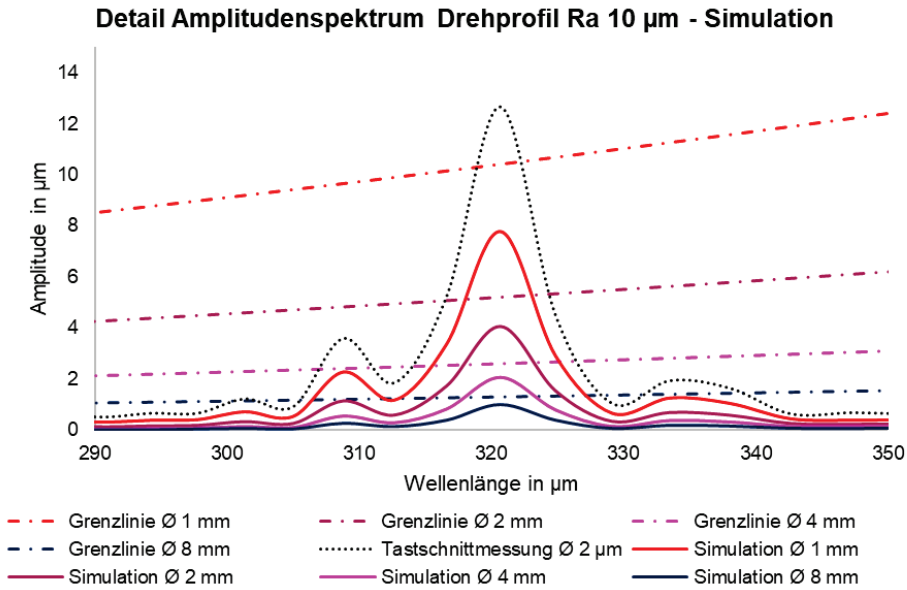


Bild 48: Auszug aus dem Amplitudenspektrum der Simulationen

Die Ergebnisse der realen Messung am Koordinatenmessgerät weichen von den idealen Werten der Simulation ab. In Bild 49 wird der soeben gezeigte Ausschnitt aus dem Amplitudenspektrum von realen Messungen gezeigt.

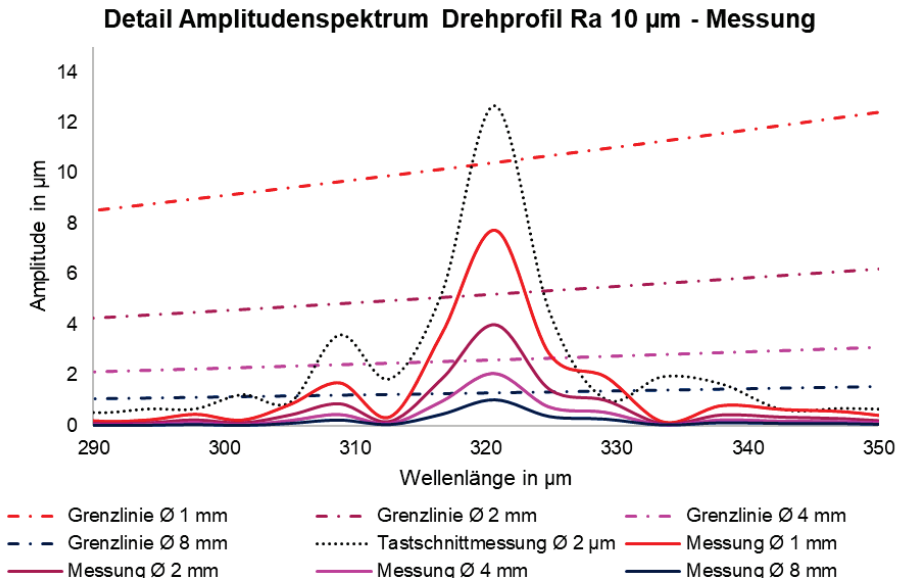


Bild 49: Auszug aus dem Amplitudenspektrum der Messung

Die Verringerung der Profilhöhe durch die jeweiligen Taster ist ebenfalls durch die verringerten Amplituden bei größer werdendem Tastkugeldurchmesser ausgeprägt. Ein größerer Ausschnitt mit dem Wellenlängenbereich $25\text{ }\mu\text{m}$ bis $2,5\text{ mm}$ findet sich in Abschnitt 7.4.1 in einem Stedman-Diagramm [38]. Im Vergleich zur Messung mit dem Tastschnittgerät werden einzelne Amplituden verändert wiedergegeben, die Grenzlinien für die Übertragung der Welleninformationen nach [28] werden auch bei der Koordinatenmessung bestätigt. Die dominierende Welle wird noch annähernd wie in der Simulation wiedergegeben. Kleinere Amplituden werden stärker verändert, beispielsweise liegt das lokale Minimum bei $334\text{ }\mu\text{m}$, bei der Simulation in Bild 48 bei $330\text{ }\mu\text{m}$. Aus der veränderten Wiedergabe der Amplituden ergeben sich abweichende Ergebnisse bei der Berechnung der in diesem Wellenlängenbereich liegenden Kenngrößen. Da sich zufällige Profile aus vielen Wellen mit ähnlich geringer Amplitude zusammensetzen, ist dort die Differenz zwischen Simulation und Messung im Gegensatz zu regelmäßigen Profilen stärker ausgeprägt. Dieser Effekt spielt bei der Formmessungen durch Koordinatenmessgeräte eine untergeordnete Rolle, da die Größenordnung der beobachteten Amplitudenunterschiede im Vergleich zu weiteren Einflüssen bei der Formmessung gering sind [36].

7.2.5 Zusammenfassung

Die gezeigten Auswertungen der verschiedenen Kenngrößen zeigen, dass die Simulation von Messungen auf dem Koordinatenmessgerät grundsätzlich möglich ist. Die erzeugten Profilpaare aus Messung und Simulation weisen besonders bei regelmäßigen Strukturen eine hohe Korrelation auf und auch die statistischen Kenngrößen ergeben geringe Abweichungen zwischen Simulation und Messung.

7.3 Anwendung der erzeugten Oberflächenwellenmodelle im VCMM

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise kann dafür verwendet werden, Oberflächenwellenmodelle für das VCMM zur Verfügung zu stellen. Basiert das Oberflächenwellenmodell dabei auf einer Messung mit einem Tastschnittgerät (Abschnitt 6.3), können sämtliche Werkstückoberflächen abgebildet werden. Angepasst an das im VCMM verwendete Format (Anhang S. 106) wird das Modell durch die Parameter des Wellenspektrums der Oberfläche: Wellenlängen, Amplituden und Phasenlagen beschrieben. Das Modell wird in der Anwendersoftware des Koordinaten-

messgeräts mit der realen Werkstückoberfläche verknüpft. Bei der Unsicherheitsberechnung wird das Modell dann mit den entsprechenden Abstraten erfasst. In dieser Arbeit wird die Erfassung der fertigungsbedingten Werkstückeigenschaften entlang eines Profilschnitts beschrieben. Die Messung quer zur Bearbeitungsrichtung bietet sich an, wenn die fertigungsbedingten Abweichungen dargestellt werden sollen. Die korrekte Verwendung des Modells gelingt dann, wenn die Messung mit dem Tastschnittgerät entlang des gleichen Profilschnitts erfolgt, wie die spätere Koordinatenmessung. Somit können Messungen in beliebiger Richtung abgebildet werden.

Die Verwendung der Oberflächenwellenmodelle basierend auf Tastschnittmessungen oder theoretischen Fertigungsangaben ist im VCMM nach dem derzeitigen Entwicklungsstand nur eingeschränkt möglich. Die Funktion zur Anwendung der Modelle im VCMM erzeugt die Oberflächenwellenmodelle entlang der Koordinatenachsen des jeweiligen Elementkoordinatensystems. Liegt eine Messbahn auf einer Koordinatenachse, wird das Modell genau wiedergegeben. Liegt eine Messbahn nicht auf einer Achse des Elementkoordinatensystems, überlagern sich die an den Achsen aufgebrachten Wellen. Das überlagerte Profil entspricht nicht dem auf fertigungsbedingten Werkstückeigenschaften basierendem Oberflächenwellenmodell.

Bild 50 zeigt die Geometrieelemente Gerade, Kreis und Zylinder mit ihren jeweiligen Koordinatensystemen, zusätzlich sind typische Messbahnen zur Erfassung des Geometrieelements eingezeichnet. Das Geometrieelement Gerade wird entlang einer Achse des Elementkoordinatensystems gemessen. Die Sollpunkte der Messbahn liegen in Richtung der Koordinatenachse. Das Oberflächenwellenmodell wird auf jeder Achse des Elementkoordinatensystems erzeugt. Für die Ermittlung der Unterabtastung werden die Sollpunkte mit dem an dieser Stelle im Raum resultierenden Oberflächenwellen überlagert. Bei der Messung entlang einer Achse des Elementkoordinatensystems wird das Modell korrekt abgebildet.

Bei der Messung von Kreisbahnen kann das Oberflächenwellenmodell derzeit nicht korrekt abgebildet werden. Dabei müsste im VCMM das Modell entlang der Sollgeometrie abgewickelt werden und nicht pauschal für jede Achse des Elementkoordinatensystems erzeugt werden. Durch die Abwicklung entlang der Messbahn kann das Modell auch bei Zylindern oder ähnlich komplexen Elementen angewendet werden. Die ursprüngliche Idee der Verwendung von Oberflächenwellenmodellen im VCMM zielt darauf ab,

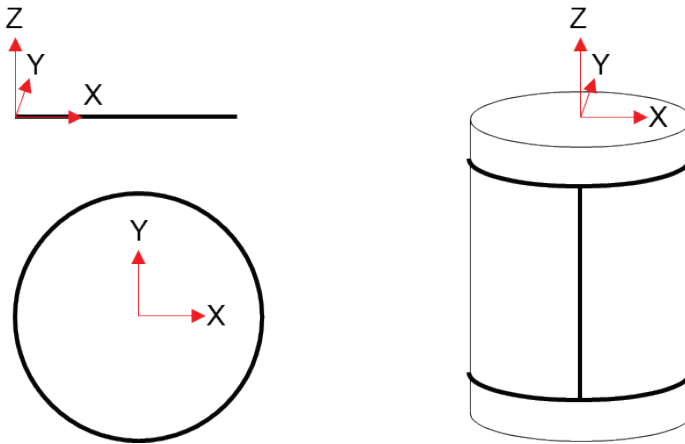


Bild 50: Verschiedene Geometrieelemente mit ihren jeweiligen Koordinatensystemen

eine ungefähre Abschätzung der Unterabtastung anhand langwelliger Abweichungen zu erstellen. Dafür müssen die Abweichungen nicht zwingend entlang der Messbahnen simuliert werden. Durch die Präzisierung der Modelle durch Anpassung an die jeweilige Werkstückoberfläche mithilfe der Simulation müsste dafür die Anwendungsmöglichkeit im VCMM erweitert werden.

Somit ist die bisher mögliche Verwendung der Oberflächenmodelle basierend auf Tastschnittmessung oder theoretischen Fertigungsangaben derzeit nur für Geraden möglich. Dafür werden die erstellten Oberflächenwellenmodelle in der Anwendersoftware mit dem jeweils zugehörigen Element (Gerade) verknüpft. Die Modelle werden in Abhängigkeit des verwendeten Tastkugeldurchmessers erstellt. Die dabei erfassbare Profiltiefe stellt die maximal erfassbare Formabweichung bei der Messung mit einem Koordinatenmessgerät aufgrund der morphologischen Tiefpassfilterung dar.

Als Anwendungsbeispiel dient ein Drehprofil mit $R_a = 10 \mu\text{m}$. Es wird der Abstand zweier gegenüberliegender Geraden und die Formabweichung einer der Geraden betrachtet. Für beide Geraden wird das berechnete Oberflächenwellenmodell für einen Tastkugeldurchmesser von 1 mm verwendet. Die Standardmessung wird dabei mit einer Punktedichte von 0,5 mm durchgeführt. Dieser Wert ist bei Einzelpunktmessungen nicht unüblich. Bei der Referenzstrategie wird die zehnfache Punktemenge verwendet. Die Punktedichte beträgt 0,05 mm. Die Länge der Geraden beträgt jeweils 25 mm. Somit werden bei der Standardmessung 51 Punkte gemessen und bei der Referenzmessung 501 Punkte.

Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt durch die Anwendersoftware. Sämtliche weiteren Parameter für die Messunsicherheitsermittlung entsprechen einem hochgenauen Koordinatenmessgerät und dessen Umgebung. Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt einmal mit dem standardmäßig im VCMM verwendeten Oberflächenwellenmodell, basierend auf drei sich überlagernden Sinuswellen, und einmal mit dem durch Tastschnittmessungen simulierten Oberflächenwellenmodell. Das standardmäßig im VCMM verwendete Modell wird entsprechend der bei der Messung maximal erfassbaren Formabweichung skaliert. Dieses Vorwissen kommt in diesem Fall durch eine vorangegangene Koordinatenmessung zustande und wird nicht aus Toleranzen oder ähnlichem abgeleitet, wie es sonst üblich wäre. Das Modell dafür wird basierend auf einer Tastschnittmessung durch das in Abschnitt 6.3 gezeigte Vorgehen erstellt. Die ermittelten Messunsicherheiten bei Verwendung des jeweiligen Oberflächenwellenmodells sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ermittelte Messunsicherheiten bei Verwendung des jeweiligen Oberflächenwellenmodells

	Standard VCMM-Oberflächenwellenmodell	Auf Tastschnittmessung basierendes Oberflächenwellenmodell
U Abstand in mm	0,00081	0,00080
U Geradheit in mm	0,00051	0,00047

Die im vorgestellten Beispiel ermittelten Messunsicherheiten unterscheiden sich kaum. Die Messunsicherheiten durch das auf der Tastschnittmessung basierendem Oberflächenwellenmodell sind etwas geringer als die des anderen Modells. Die Ursache hierfür kann sein, dass das standardmäßig im VCMM verwendete Oberflächenwellenmodell einen variablen Anteil besitzt. Dieser Anteil wird in jedem Simulationsdurchlauf variiert. Daher ändert sich der Referenzwert der erfassbaren Formabweichung bei jedem Simulationsdurchlauf. Das auf der Tastschnittmessung basierende Modell wird in den einzelnen Simulationsdurchläufen nicht verändert, da es feste Werte für Amplituden, Wellenlängen und Phasenlagen besitzt. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Simulationsschritten sind daher geringer. Dies wirkt sich auf die ermittelte Messunsicherheit aus. Diese wird dadurch ebenfalls geringer.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenwellenmodellen gering sind. Wichtig ist jedoch, dass die

Skalierung der Oberflächenwellenmodelle an die vorhandenen Messparameter (Antastkraft und Tastkugeldurchmesser) angepasst ist. Dieser Wert wird, wenn er aus Toleranzen oder dem Wissen über die erwartete Werkstückoberfläche abgeleitet wird, die mit dem Koordinatenmessgerät erfassbare Formabweichung überschätzen, da die Effekte aus Abplattung und mechanischer Filterung nicht berücksichtigt werden. Bei der Generierung des Oberflächenwellenmodells aus Tastschnittmessungen können die Messparameter bei der Erstellung berücksichtigt werden und die korrekte Berechnung der Unterabtastung unterstützen.

7.4 Weitere Untersuchungen

7.4.1 Messung von Welligkeit auf Koordinatenmessgeräten

Alle gemessenen Oberflächenvergleichsnormale weisen Abweichungen im Bereich der Welligkeit auf. Die Welligkeit wird maßgeblich durch Wellenlängen im Bereich von 0,5 mm bis 2,5 mm bestimmt (Abschnitt 2.1). Die höchsten Amplitudenwerte sind über alle betrachteten Profile hinweg jedoch bei Wellenlängen kleiner 500 μm zu finden. Bei realen Werkstückoberflächen ergibt sich die Welligkeit aus der Überlagerung der sich im Profil befindlichen Wellen. Um die Messung von Welligkeit auf Koordinatenmessgeräten zu beurteilen, wird die Übertragung einzelner Wellenanteile bei der Messung mit unterschiedlich großen Antastelementen betrachtet. Bei der Messung mit dem Koordinatenmessgerät ergeben sich im Vergleich zu der Messung mit dem Tastschnittgerät die in Tabelle 7 gezeigten Werte für W_t für das Drehprofil $R_a = 10 \mu\text{m}$.

Schon bei einem Tastkugelradius von 0,5 mm wird die Welligkeit bei der Messung mit dem Koordinatenmessgerät verringert wiedergegeben. Mit steigender Größe des Antastelements sinkt entsprechend die erfasste Welligkeit. Um festzustellen, welcher Tastkugelradius für eine Messung der Welligkeit ohne Dämpfungseffekte geeignet ist, wurden Simulationen mit verschiedenen Tastkugelradien durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei einem Tastkugelradius von 0,25 mm die Welligkeit mit dem Koordinatenmessgerät ohne Dämpfungseffekte gemessen werden könnte. Nach ([28, 39]) ergibt sich für eine Wellenlänge von 319 μm (R_{sm} aus Tabelle 3) und eine Wellentiefe 15,4 μm (Amplitude, P_t aus Tabelle 5) als größter zulässiger Tastkugelradius 0,3 mm.

Tabelle 7: Vergleich der gemessenen Werte für W_t für das Drehprofil $R_a = 10 \mu\text{m}$

Messgerät	Radius des Antastelements	Ermittelter Wert für W_t in μm	Abweichung zur Tastschnittmessung in Prozent
Tastschnittmessgerät	2 μm	10,191	-
KMG (Messung)	0,5 mm	7,097	-30,36%
	1 mm	5,097	-49,99%
	2 mm	4,193	-58,86%
	4 mm	3,687	-63,82%
KMG (Simulation)	0,25 mm	10,540	+3,42%

Um die Dämpfungseffekte der verschiedengroßen Antastelemente zu zeigen, sind in Bild 51 die Frequenzspektren der in Tabelle 7 gezeigten Messungen in einem Amplituden-Wellenlängen-Diagramm (angelehnt an ein Stedman-Diagramm nach [38]) dargestellt. Die Achsen sind dabei logarithmisch skaliert. Es ist der Bereich der Welligkeit nach ([2, 4, 6]) eingezeichnet und die Übertragungsgrenzen für die jeweilige Amplitude in Abhängigkeit der Größe des verwendeten Antastelements nach ([28, 39]).

Die durch die Messung erfassten Amplituden der einzelnen Wellenlängen unterscheiden sich stark zwischen den verschiedengroßen Antastelementen. Im hier verwendeten Definitionsbereich der Welligkeit (0,5 mm bis 2,5 mm) sind die Unterschiede zwischen den betrachteten Messungen in dem Beispiel nicht signifikant ausgeprägt. Allerdings liegen dort auch keine der hohen Amplituden.

Neben der Größe des Antastelements sind die Abweichung zwischen Koordinatenmessung und Tastschnittmessung abhängig vom vorhandenen Frequenzspektrum der Werkstückoberfläche. Wenn die Welligkeit maßgeblich durch dominierende Wellen bestimmt wird, ergeben sich bei einer Koordinatenmessung mit einem Tastkugelradius kleiner 0,5 mm geringe Abweichungen zur Tastschnittmessung. Bei größeren Tastkugelradien werden die dominierenden Wellen gedämpft übertragen.

Bei zufälligen Profilen setzt sich die Welligkeit aus vielen Wellen mit geringer Amplitude zusammen. Diese werden bei Koordinatenmessungen in

Abhängigkeit von der Größe des Antastelements meist verändert wiedergegeben. Allgemeingültige Aussagen lassen sich für zufällige Profile nicht treffen.

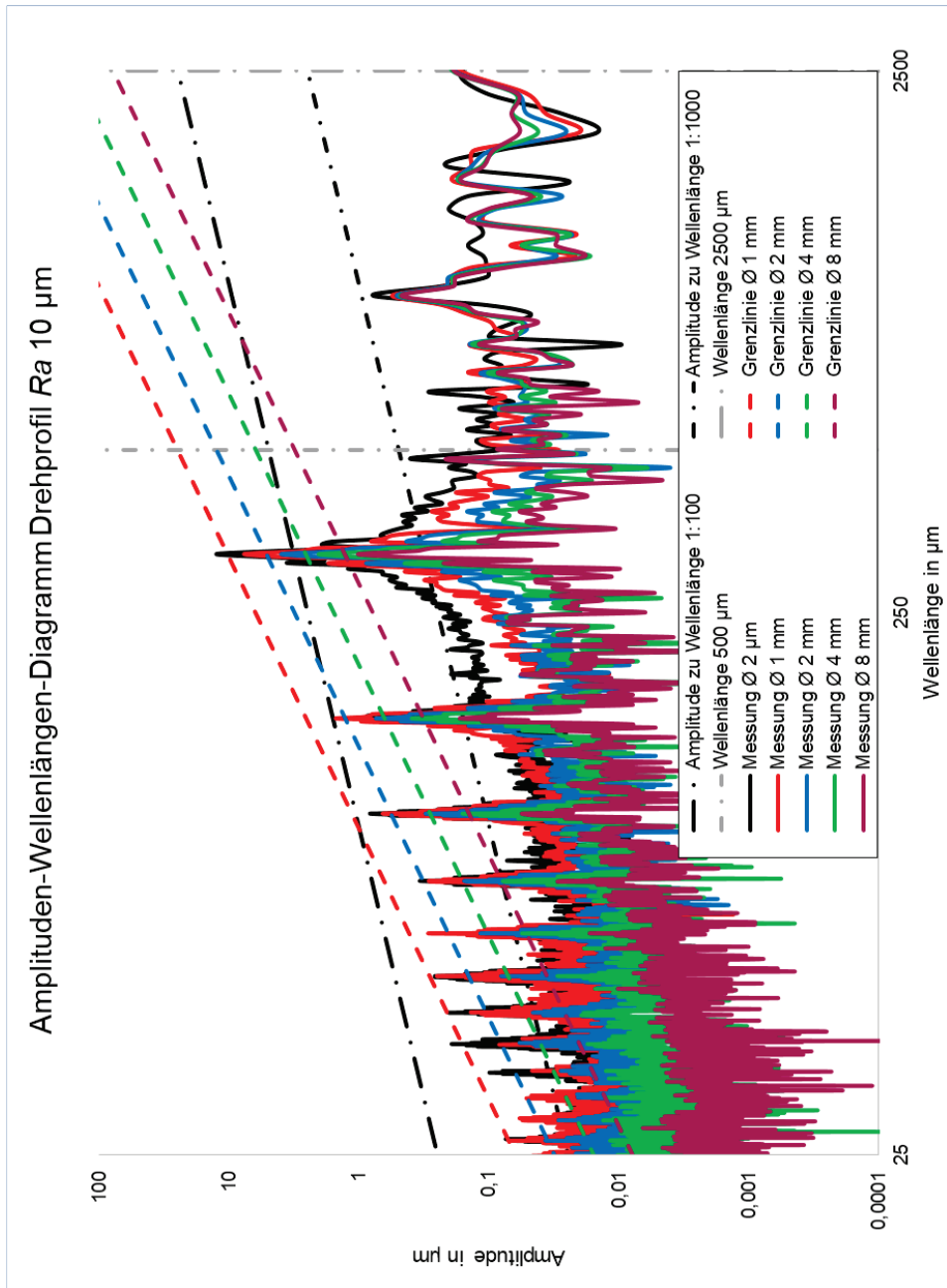


Bild 51: Amplituden-Wellenlängen-Diagramm Drehprofil Ra = 10 µm

7.4.2 Vergleich mit der ersten Version des VCMM

Das in dieser Arbeit gezeigte Vorgehen zur Berücksichtigung der Unterabtastung zeigt einen der Fortschritte bei der Weiterentwicklung des VCMMs. In der ersten Version des VCMM werden die Eigenschaften der Werkstückoberfläche ausschließlich durch die Betrachtung der Oberflächenrauheit berücksichtigt, obwohl schon damals weitere Ansätze vorhanden waren [117]. Die Werkstückoberfläche wird in der ersten Version ebenfalls mit einem Tastschnittgerät gemessen, als Parameter für die Messunsicherheitsberechnung wird allerdings nur die Rautiefe R_z berücksichtigt. Weitere Informationen über die Werkstückoberfläche, bis hin zum tatsächlichen Messprofil, werden nicht verwendet. Dieses Vorgehen war zu dem damaligen Zeitpunkt ausreichend, da ausschließlich die Messunsicherheitsermittlung von Einzelpunktmessungen betrachtet wurde und somit die Antastunsicherheit für einen einzelnen Messpunkt ermittelt wurde. Erfahrungsgemäß wird der Beitrag damit überschätzt, da das verhältnismäßig große Antastelement nur die Spitzen der Werkstückoberfläche bei der Antastung erfasst.

Die Erfassung der Oberflächeneigenschaften für die aktuelle Version des VCMM ist in Abschnitt 4.2.1 (S. 27-28) beschrieben. Durch die Messung der tatsächlichen Werkstückoberfläche ist das Verfahren an die Größe des verwendeten Antastelements angepasst und es findet keine Überschätzung des Beitrags mehr statt. Weiterhin werden sogar umfangreichere Informationen über die Werkstückoberfläche für die Berechnung der Unterabtastung verwendet. Diese Anpassung zeigt das Potential des VCMM. Durch den modularen Aufbau (Bild 16) ist es möglich, das VCMM für beliebige Weiterentwicklungen einzusetzen.

7.4.3 Wirkung des Oberflächenmodells auf Ausgleichselemente

Die hier vorgestellten Modellierungsansätze müssen nicht ausschließlich zur Bewertung der Unterabtastung verwendet werden. Durch die Simulation der Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der verwendeten Tastergeometrie kann auch die komplette Messaufgabe unter Verwendung der Oberflächenwellenmodelle simuliert werden, oder aber die passende Tastkonfiguration wird anhand der Simulation ermittelt. Dieser Ansatz geht über eine Verwendung im virtuellen Koordinatenmessgerät im Rahmen der derzeitigen Implementierung hinaus, ist jedoch zukünftig denkbar.

Bei Koordinatenmessungen wird aus den gemessenen Punkten ein Ausgleichselement gebildet. Das Ausgleichselement entspricht dem Geometrieelement. Im vorhandenen Fall der Messung von Oberflächenprofilen handelt es sich dabei um eine Gerade. Anhand dieser Geraden wird die Lage eines Elements bestimmt. Das Ausgleichselement wird ausgehend von den Messpunkten berechnet und variiert stark in Abhängigkeit des verwendeten Antastelements. In Bild 52 ist die Abtastung des Drehprofils $R_a = 10 \mu\text{m}$ mit zwei verschiedenen großen Antastelementen dargestellt. Weiterhin wird die jeweilige Ausgleichsgerade berechnet. Die Lage des Ausgleichselements unterscheidet sich bei beiden Oberflächenwellenmodellen. Bei der Abtastung mit dem Tastkugeldurchmesser 1 mm liegt das Ausgleichselement in etwa bei $Z = 11,5 \mu\text{m}$. Bei der Abtastung mit dem Tastkugeldurchmesser 8 mm bei $Z = 19 \mu\text{m}$. Die Lage ist somit um $7,5 \mu\text{m}$ verschieden. Verwendet man das Oberflächenwellenmodell nicht nur zu Erfassung der Unterabtastung, sondern nutzt die Modelle auch zur Berechnung von Messergebnissen, sind diese Unterschiede signifikant und verdeutlichen, dass stets ein passendes Oberflächenwellenmodell verwendet werden muss, um bei bidirektionalen Messungen keine systematischen Messabweichungen zu erzeugen. Die auf den Fertigungsverfahren basierenden Oberflächenwellenmodelle erlauben die Berechnung der Abplattung und mechanischen Filterung und somit die Berechnung der tatsächlichen Lage der Messpunkte.

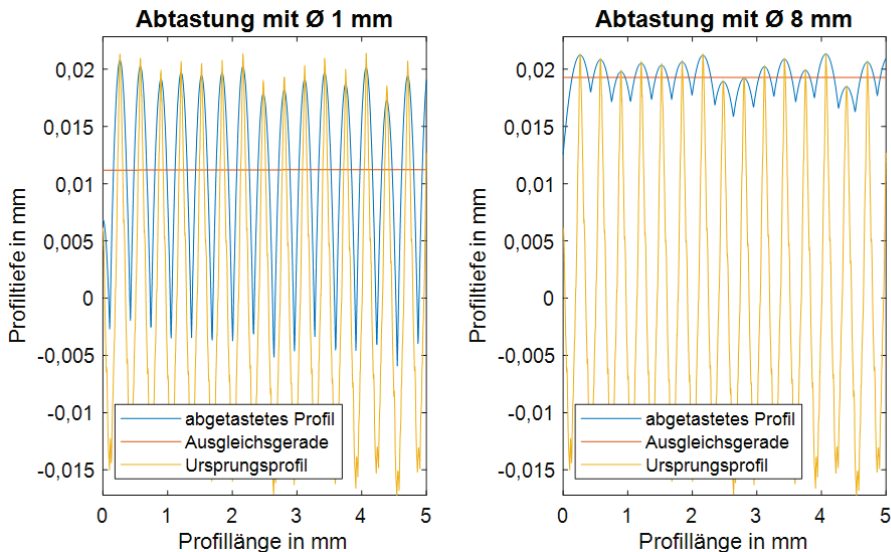


Bild 52: Abtastung des Drehprofils $R_a = 10 \mu\text{m}$ mit zwei Antastelementen

Die standardmäßig im bestehenden VCMM verwendeten Oberflächenwellenmodelle lassen sich hierfür nur schlecht verwenden. Bei deren Verwendung ohne weitere Berechnung der Abplattungseffekte und der mechanischen Filterung liegt das Ausgleichselement des symmetrischen Sinusprofils mittig zwischen Profilspitze und Profiltal. Verwendet man das bestehende VCMM-Modell als Basis für die Berechnung von Abplattung und mechanischer Filterung, ergibt sich durch die Kopplung von Amplitude an Wellenlänge im Verhältnis 1:1 ein Problem. Die durch die Kopplung resultierenden kurzen Wellenlängen ergeben ein Oberflächenprofil, welches bei der mechanischen Abtastung mit den gezeigten Antastelementen nur die Erfassung der Profilspitzen zulässt. Daraus resultiert in jedem Fall eine nahezu perfekte Gerade. Ausgehend von dieser idealen Oberfläche ergeben sich kaum Unterschiede zwischen Standard- und Referenzmessung. Sollte es zukünftig Ansätze geben, eine Messung abweichungsbehafteter Werkstückoberflächen zu simulieren, können die erweiterten Oberflächenwellenmodelle dafür verwendet werden. Durch die Anpassung an die Messparameter können sämtliche Messaufgaben modelliert werden. Optimierungen können nicht nur hinsichtlich der ausreichenden Messpunktzahl erfolgen, dafür ist das VCMM mit der Berechnung der Unterabtastung bereits geeignet, sondern es kann eine Optimierung hinsichtlich der optimalen Antastkonfiguration erfolgen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch immer schneller werdende Fertigungszyklen und immer höher werdende Anforderungen an die Werkstücküberwachung, zum Beispiel einer vollumfänglichen Kontrolle jedes gefertigten Bauteils in der Medizin- oder Luftfahrtbranche, steigen auch die Anforderungen an die Qualitätssicherung. Viele Anwender von Koordinatenmessgeräten optimieren daher die Messstrategie hinsichtlich Genauigkeit oder aber um eine kürzere Messzeit zu erzielen. Idealerweise wird die Messstrategie dahingehend optimiert, dass alle relevanten Oberflächeneigenschaften erfasst werden und die Messzeit verkürzt wird. Die Ermittlung der Unterabtastung durch das VCMM kann bei der Optimierung der Messstrategie unterstützend eingesetzt werden, da nur so viel gemessen wird, wie für eine ausreichende Information über die Oberfläche erforderlich ist. Werden die Oberflächenwellenmodelle dabei noch an die tatsächliche Werkstückoberfläche angepasst, kann die Messstrategie in Abhängigkeit der zu erwartenden Werkstückoberfläche optimiert werden.

Das VCMM ist historisch bedingt in Kalibrierlaboratorien verbreitet und findet langsam aber stetig seine Akzeptanz in der Industrie. In den Kalibrierlaboratorien sind geometrische Normale mit nahezu idealen Werkstückoberflächen anzutreffen. Bei nahezu idealen Werkstückoberflächen ist der Effekt der Unterabtastung zu vernachlässigen. Bei der Herstellung von Werkstücken in der Industrie entstehen aber auch abweichungsbehaftete Werkstückoberflächen. Diese Abweichungen sind typisch für verschiedene Fertigungsprozesse. Um eine zuverlässige Produktverifikation zu ermöglichen [37] ist eine bestimmte Mindestpunktzahl und Punkverteilung unter Berücksichtigung der Größe und Form der Abweichung sowie der zulässigen Unsicherheit zur Erfassung dieser Abweichungen erforderlich. Zusätzlich ist der Einfluss des Antastelements in Form seiner Filterwirkung zu berücksichtigen. Die Bewertung der Unterabtastung kann zukünftig ein wichtiges Werkzeug zur Bewertung der Messstrategie in Form von Messpunktverteilung und verwendetem Antastelement sein. Die Modellierung der Oberflächenwellenmodelle dient dazu, den Einfluss der Unterabtastung für jedes Fertigungsverfahren separat bestimmen zu können.

Die Erstellung der Oberflächenwellenmodelle erfolgt mithilfe einer Berechnungssoftware, entweder durch Vorwissen, basierend Informationen auf über den Fertigungsprozess (bei Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide) oder auf einer Tastschnittmessung. Die beiden letz-

teren können durch die Simulation des Antastvorgangs, inklusive elastischer Abplattung und mechanischer Filterwirkung des Antastelements, an die bei der Messung verwendeten Parameter angepasst werden. Dabei wird ein realistisches Modell der Werkstückoberfläche erzeugt. Dieses Modell weist geringfügige Abweichungen zu tatsächlichen Koordinatenmessungen auf. Die Abweichungen entstehen unter anderem durch externe Einflüsse, die während der Messung in das Messergebnis eingebracht werden. Üblicherweise haben die Störgrößen in diesen kurzwelligen Wellenlängenbereichen bei der Messung mit Koordinatenmessgeräten durch den Einsatz von räumlichen Tiefpassfilter keine Auswirkung auf das Messergebnis.

Bei der Verwendung der Oberflächenwellenmodelle im VCMM zeigt sich, dass die Unterabtastung sowohl bei der als Standard im VCMM verwendeten Oberflächenwellenmodelle als auch bei der auf Tastschnittmessungen basierenden Modellierungsart vergleichbar berechnet wird. Die bisherige Vorgehensweise zur Erstellung von Oberflächenwellenmodellen für die Berechnung der Unterabtastung, basierend auf Vorwissen, konnte damit durch eine praktische Herangehensweise erweitert werden. Denkbar ist zukünftig auch die Verwendung optischer Sensoren in Verbindung mit dem VCMM. Durch die Wechselwirkung von Beleuchtung und den Eigenschaften der Werkstückoberfläche wird die korrekte Abbildung der Werkstückoberfläche in der Simulation weiter an Bedeutung gewinnen.

Durch die große Bandbreite verschiedener Fertigungsverfahren und die noch größere Anzahl daraus resultierender Werkstückoberflächen ist es erstrebenswert, wenn der jeweilige Anwender selbst die Basis für ein solches Oberflächenmodell durch die Messung mit einem Tastschnittgerät schafft. Denkbar ist es, dass ein Programm zu Verfügung steht, welches aus dieser Messung das entsprechende Oberflächenmodell erstellt. Damit kann auf einfache und unkomplizierte Weise die jeweilige Oberfläche digitalisiert werden.

Zukünftig denkbar ist zudem, dass die komplette Koordinatenmessung unter Zuhilfenahme der Oberflächenwellenmodelle simuliert wird. Anders als die hier gezeigten Auswertungen zur Bestimmung der Unterabtastung kann dabei der komplette Messablauf simuliert werden. Ein digitaler Zwilling des Koordinatenmessgeräts könnte somit mithilfe der digitalen Werkstückoberfläche eine vollständige Messung simulieren. Ein wichtiger – noch fehlender – Baustein wäre hierbei unter anderem die Abbildung der bei der Messung wirkenden dynamischen Effekte und deren Auswirkungen auf das Messergebnis.

Die Arbeit mit CAD-Modellen ließe es auch zu, dass die Werkstücktopografie direkt im CAD-Modell hinterlegt wird. Der Detaillierungsgrad kann hierbei verschieden sein. Die idealisierte Oberfläche kann bei manchen Fertigungsverfahren bereitgestellt werden. Aus Tastschnittmessungen könnte auch eine typische Oberfläche hinterlegt werden. Die Werkstückoberfläche kann dann in der Fläche abgetastet werden. Aktuell verhindern die hohen Erfordernisse an Rechenleistung dieses Vorgehen. Vor allem mechanische Flächenfilter, angewandt auf komplette CAD-Modelle, benötigen viel Rechenleistung. Zukünftig ist es jedoch denkbar, dass die Information über die Oberflächenqualität nicht nur als Zahl, sondern als Funktion der Werkstückoberfläche im CAD-Modell hinterlegt ist.

9 Summary and outlook

Increasingly faster production cycles and ever higher demands on workpiece monitoring, for example a complete inspection of every manufactured component in the medical or aerospace industry, also increase the demands on quality assurance. Many users of coordinate measuring machines therefore optimize the measuring strategy in terms of accuracy or to achieve a shorter measuring time. Ideally, the measuring strategy is optimized to ensure that all relevant surface properties are recorded and the measuring time is shortened. The determination of the undersampling by the VCMM can be used to support the optimization of the measurement strategy, as only as much is measured as is required to obtain sufficient information about the surface. If the surface wave models are also adapted to the actual workpiece surface, the measurement strategy can be optimized depending on the expected workpiece surface.

The VCMM is historically widespread in calibration laboratories and is slowly but steadily gaining acceptance in industry. Geometric standards with almost ideal workpiece surfaces can be found in calibration laboratories. With almost ideal workpiece surfaces, the effect of undersampling is negligible. However, the production of workpieces in industry also results in surfaces with deviations. These deviations are typical for various manufacturing processes. To enable reliable product verification [37], a certain minimum number of points and point distribution is required, taking into account the size and shape of the deviation as well as the permissible uncertainty for detecting these deviations. In addition, the influence of the probing element in the form of its filter effect must be taken into account. In the future, the evaluation of the undersampling can be an important tool for evaluating the measurement strategy in the form of measuring point distribution and the probing element used. The modeling of the surface wave models serves to determine the influence of undersampling separately for each production process.

The surface wave models are created using calculation software, either through prior knowledge based on information about the manufacturing process (for manufacturing processes with a geometrically defined cutting edge) or on a stylus measurement. The latter two can be adapted to the parameters used in the measurement by simulating the probing process, including elastic flattening and the mechanical filter effect of the probing

element. This generates a realistic model of the workpiece surface. This model deviates slightly from the actual coordinate measurements. The deviations are caused, among other things, by external influences that are introduced into the measurement result during the measurement. Normally, the disturbance variables in these short-wave wavelength ranges have no effect on the measurement result when measuring with coordinate measuring machines due to the use of spatial low-pass filters.

When using the surface wave models in the VCMM, it can be seen that the undersampling is calculated in a comparable way both with the surface wave model used as standard in the VCMM and with the modeling type based on stylus measurements. The previous procedure for creating surface wave models for calculating the undersampling, based on previous knowledge, could thus be extended by a practical approach. The use of optical sensors in conjunction with the VCMM is also conceivable in the future. Due to the interaction of lighting and the properties of the workpiece surface, the correct mapping of the workpiece surface in the simulation will continue to gain in importance.

Due to the wide range of different manufacturing processes and the even greater number of resulting workpiece surfaces, it is desirable if the respective user himself creates the basis for such a surface model by measuring with a stylus device. It is conceivable that a program is available that creates the corresponding surface model from this measurement. This allows the respective surface to be digitized in a simple and uncomplicated way.

In the future, it is also conceivable that the complete coordinate measurement will be simulated with the aid of the surface wave models. Unlike the evaluations shown here for determining the undersampling, the complete measurement sequence can be simulated. A digital twin of the coordinate measuring machine could thus simulate a complete measurement using the digital workpiece surface. An important - still missing - component here would be, among other things, the mapping of the dynamic effects acting during the measurement and their impact on the measurement result.

Working with CAD models would also allow the workpiece topography to be stored directly in the CAD model. The level of detail can vary here. The idealized surface can be provided for some manufacturing processes. A typical surface could also be stored from stylus measurements. The surface of the workpiece can then be scanned. Currently, the high computing power requirements prevent this procedure. In particular, mechanical surface filters applied to complete CAD models require a lot of computing power. In

the future, however, it is conceivable that the information about the surface quality will be stored in the CAD model not only as a number, but also as a function of the workpiece surface.

Anhang

Umfassendere Darstellung der betrachteten Werkstückprofile

Auf den nachfolgenden Seiten werden die in Bild 29 gezeigten Werkstückoberflächen in ihren Eigenschaften dargestellt. Bild 53 zeigt eine gedrehte Werkstückoberfläche mit $R_a = 4 \mu\text{m}$. Weiterhin sind Materialanteil und das Resultat der Frequenzanalyse dargestellt. Das Profil wird von einigen wenigen Wellen dominiert.

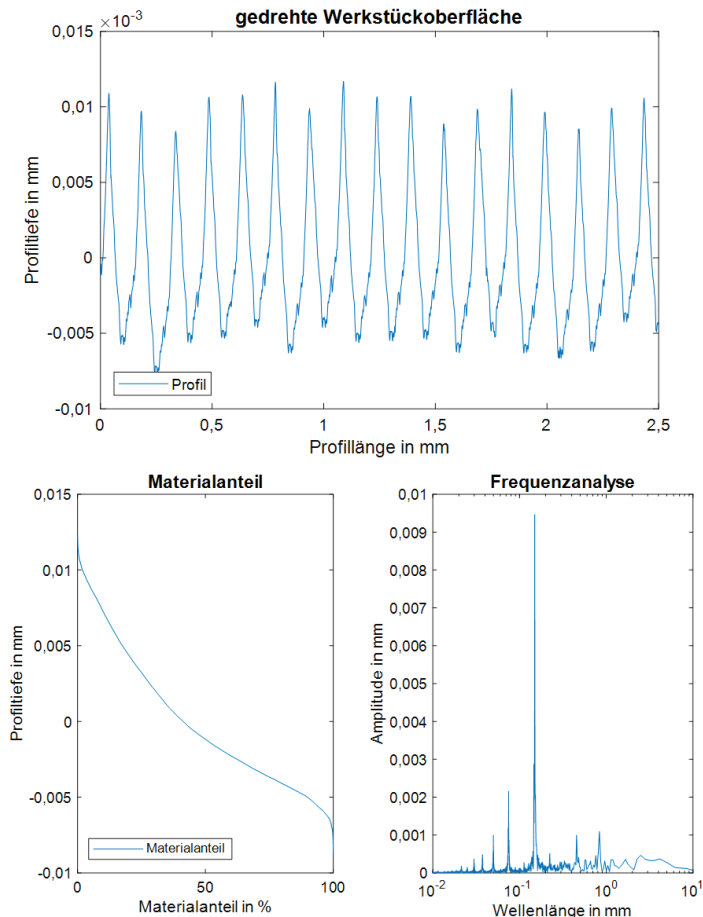


Bild 53: Gedrehte Werkstückoberfläche

In Bild 54 ist eine plangeschliffene Werkstückoberfläche mit $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ dargestellt. Weiterhin sind Materialanteil und das Resultat der Frequenzanalyse dargestellt. Das Profil zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit, welche von weiteren Wellen überlagert wird. Dies zeigt sich auch durch das auftretende Grundrauschen bei der Frequenzanalyse.

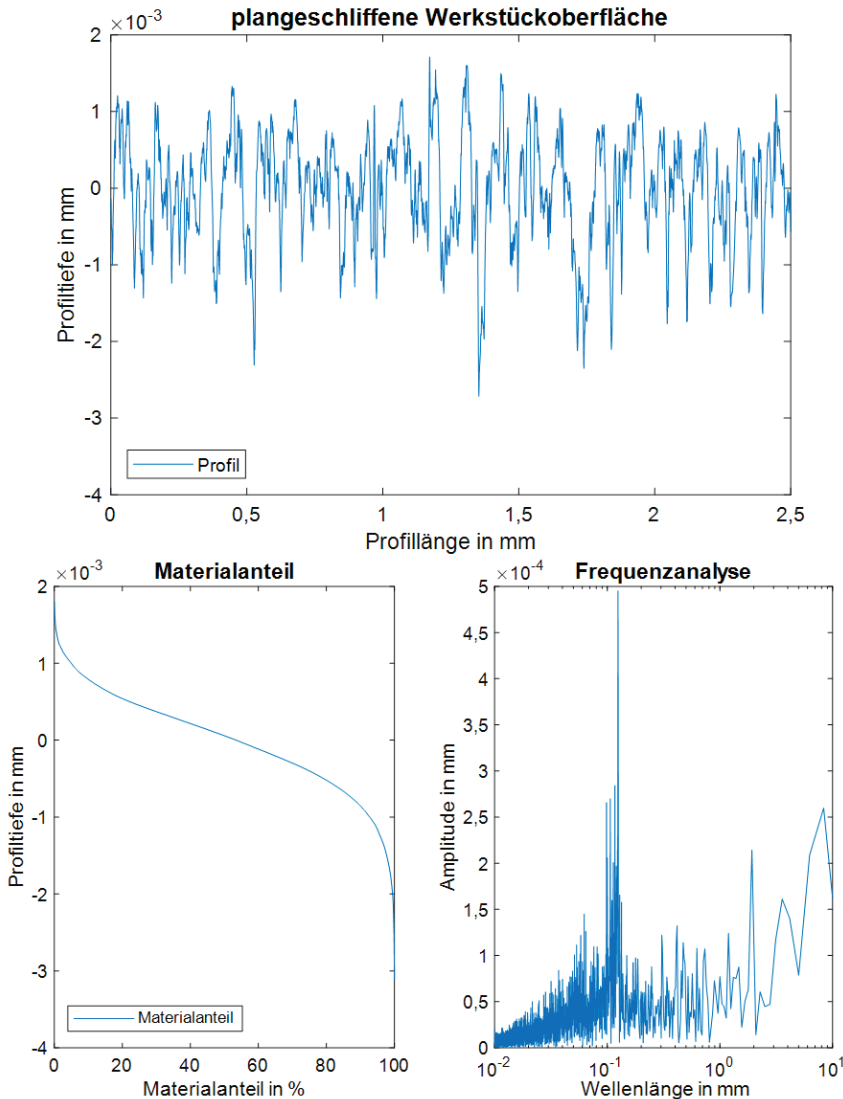


Bild 54: Plangeschliffene Werkstückoberfläche

In Bild 55 ist eine walzgefräste Werkstückoberfläche mit $R_z = 20 \mu\text{m}$ dargestellt. Weiterhin sind Materialanteil und das Resultat der Frequenzanalyse dargestellt. Die Werkstückoberfläche zeigt eine langwellige Abweichung. Weiterhin treten in unregelmäßigen Abständen Profilvertiefungen auf. Die Frequenzanalyse zeigt keine dominierenden Wellenlängen.

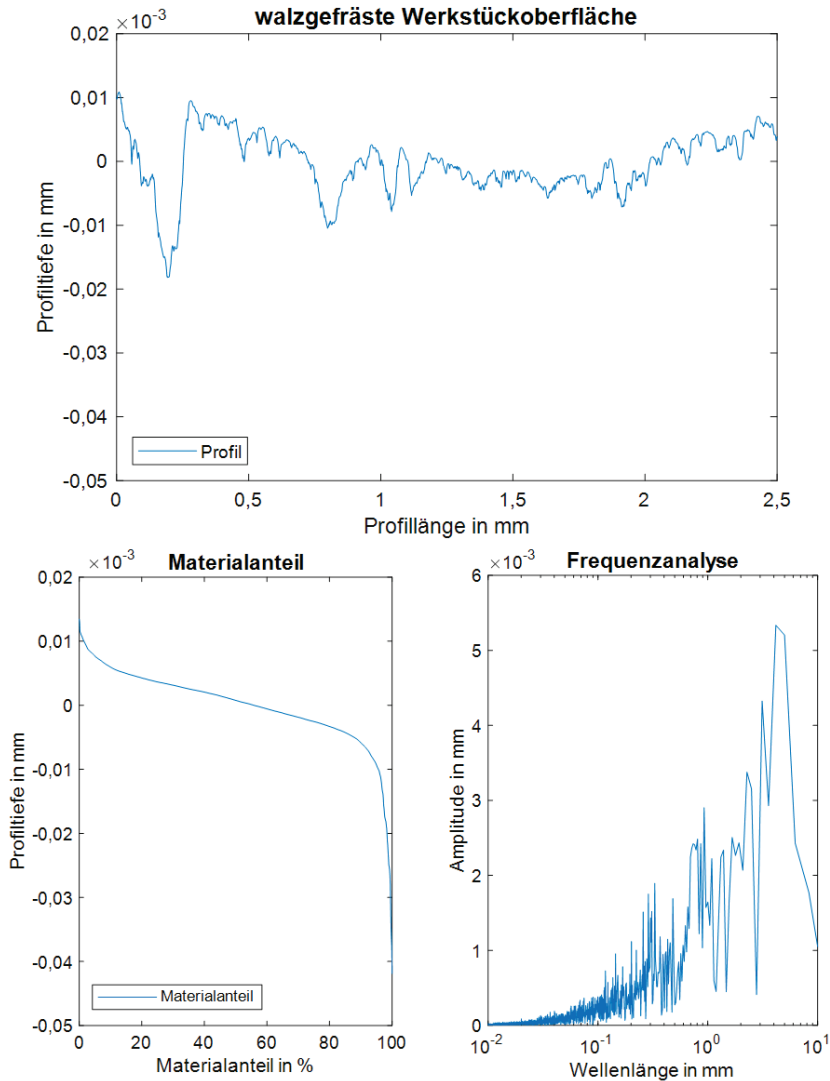


Bild 55: Walzgefräste Werkstückoberfläche

In Bild 56 ist eine stirngefräste Werkstückoberfläche mit $R_z = 10 \mu\text{m}$ dargestellt. Weiterhin sind Materialanteil und das Resultat der Frequenzanalyse dargestellt. Beim Stirnfräsen entsteht eine regelmäßige Struktur. Dies zeigt sich sowohl bei der Betrachtung der Werkstückoberfläche als auch bei der Frequenzanalyse. Das charakteristische Profil entsteht durch einige wenige dominierende Wellen.

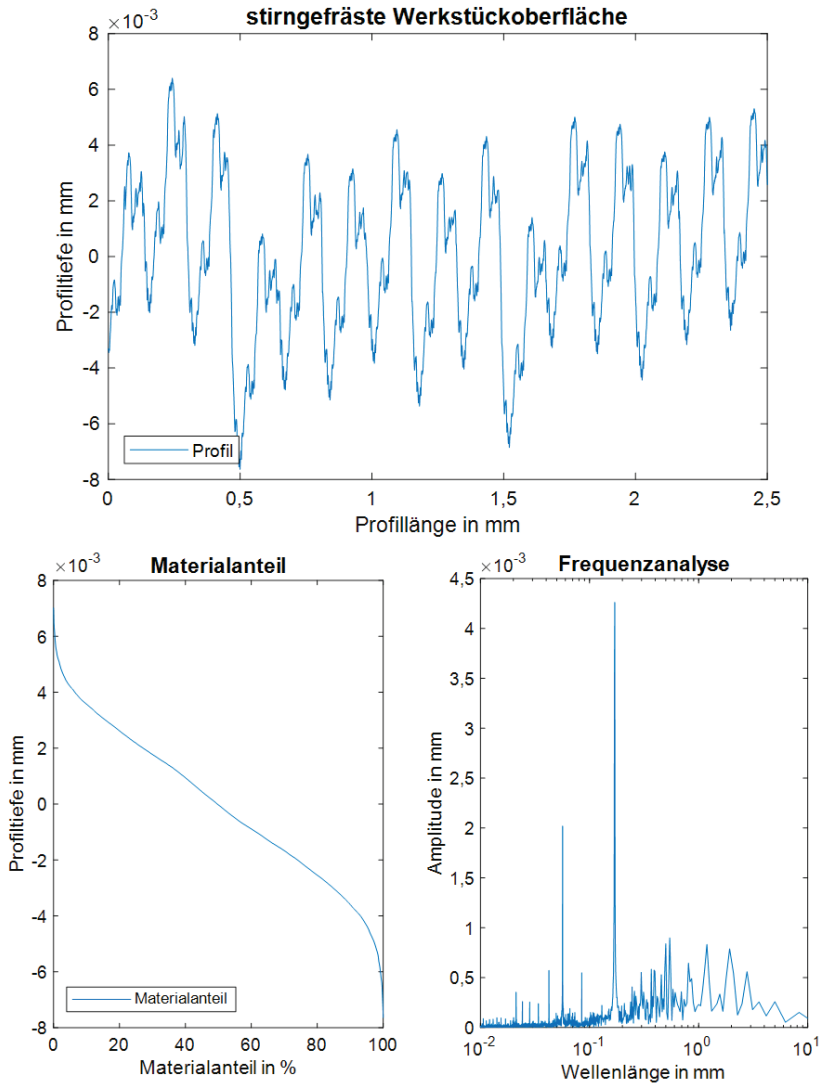


Bild 56: Stirngefräste Werkstückoberfläche

In Bild 57 ist eine selbst erstellte sinusbasierte Werkstückoberfläche mit $P_t = 11,3 \mu\text{m}$ dargestellt. Weiterhin sind Materialanteil und das Resultat der Frequenzanalyse dargestellt. Das Profil besteht aus drei sich überlagernden Sinuswellen. Die Werte können der Frequenzanalyse entnommen werden. Der Materialanteil unterscheidet sich durch seinen quasilinearen Verlauf stark von real gefertigten Oberflächen.

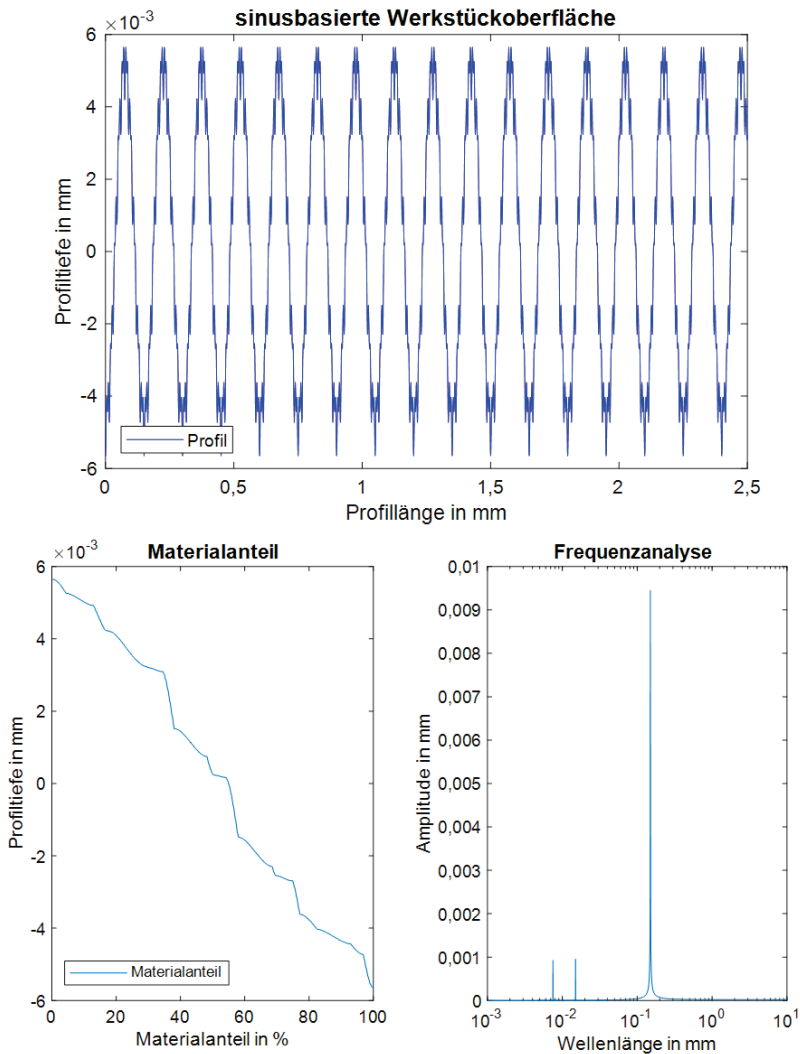


Bild 57: Sinusbasierte Werkstückoberfläche

Beispiel eines Datensatzes mit Informationen zu Amplitude, Phasenlage und Frequenz

Der Datensatz beschreibt eine Wellenlänge mit je einem Eintrag für die Amplitude, die Phasenlage und die Wellenlänge (=1/Ortsfrequenz). Jeder Eintrag besteht aus dem Wert und einer Information zur Verteilung der Werte, mit der Art der Verteilung und ihrem Variationsparameter. Hier wird eine Gleichverteilung (EQUAL) angenommen. Bei mehreren Messungen lässt sich die Variation der einzelnen Einträge für Amplitude, Phasenlage und Wellenlänge bestimmen.

```
<Amplitude>
<Value>0,00078259</Value>
<Distribution>
  <EQUAL Range="0"/>
</Distribution >
</Amplitude >
<Phase>
<Value>0,012034</Value>
<Distribution>
  <EQUAL Range="0"/>
</Distribution >
</Phase >
<Frequency>
<Value>0,039979</Value>
<Distribution>
  <EQUAL Range="0"/>
</Distribution >
</Frequency >
```

Werkstückkoordinatensystem bei der Messung der Oberflächenvergleichsnormale

In nachfolgendem Bild 58 ist die Antaststrategie zur Bildung des Werkstückkoordinatensystems dargestellt. Die Primärausrichtung wird dabei über eine Ebene aus vier Messpunkten (rot dargestellt) gebildet. Die Sekundärausrichtung ergibt sich aus der Symmetriegerade (gestrichelte Linie) einer jeweils an der Seitenfläche gemessenen Gerade (orange dargestellt). Der Nullpunkt des Koordinatensystems in X wird durch eine Gerade an der kurzen Seite des Oberflächenvergleichsnormals definiert (blaue Linie).

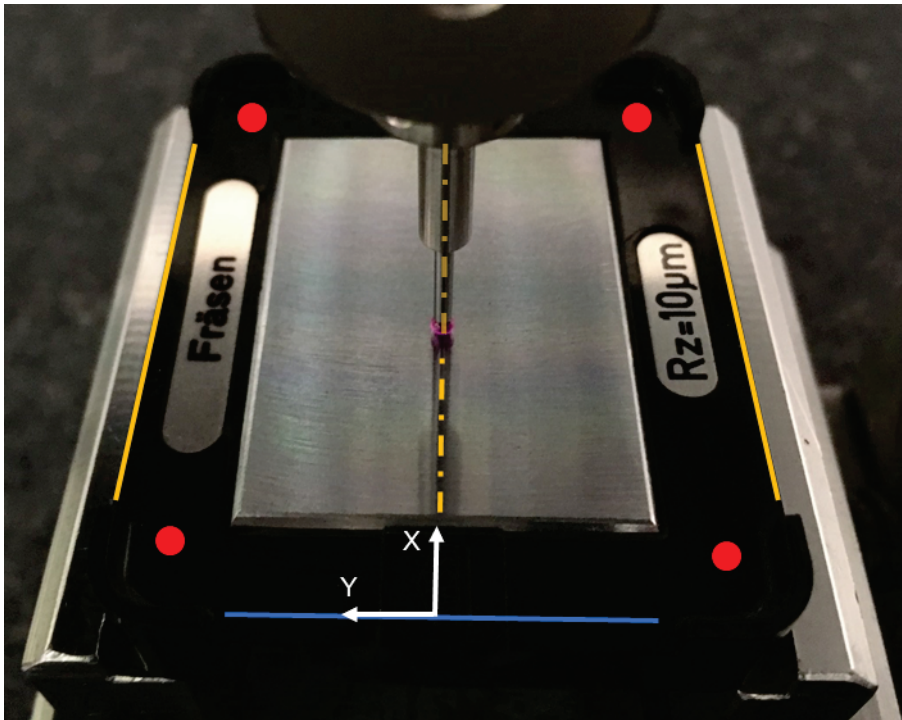


Bild 58: Antaststrategie zur Bildung des Werkstückkoordinatensystems

Entfernung der Nennform

Einige Oberflächenvergleichsnormale weisen eine langwellige Abweichung auf. Die Abweichung ist möglicherweise auf die Einspannung der bearbeiteten Fläche in den Kunststoffrahmen zurückzuführen. Diese langwellige Abweichung (Nennform) wird durch die Subtraktion eines Ausgleichspolynoms siebter Ordnung entfernt. Bild 59 zeigt das mit dem Tastschnittgerät gemessene Profil des Oberflächenvergleichsnormals Stirnfräsen $R_z = 6,3 \mu\text{m}$ und das Profil nach Entfernung der Nennform.

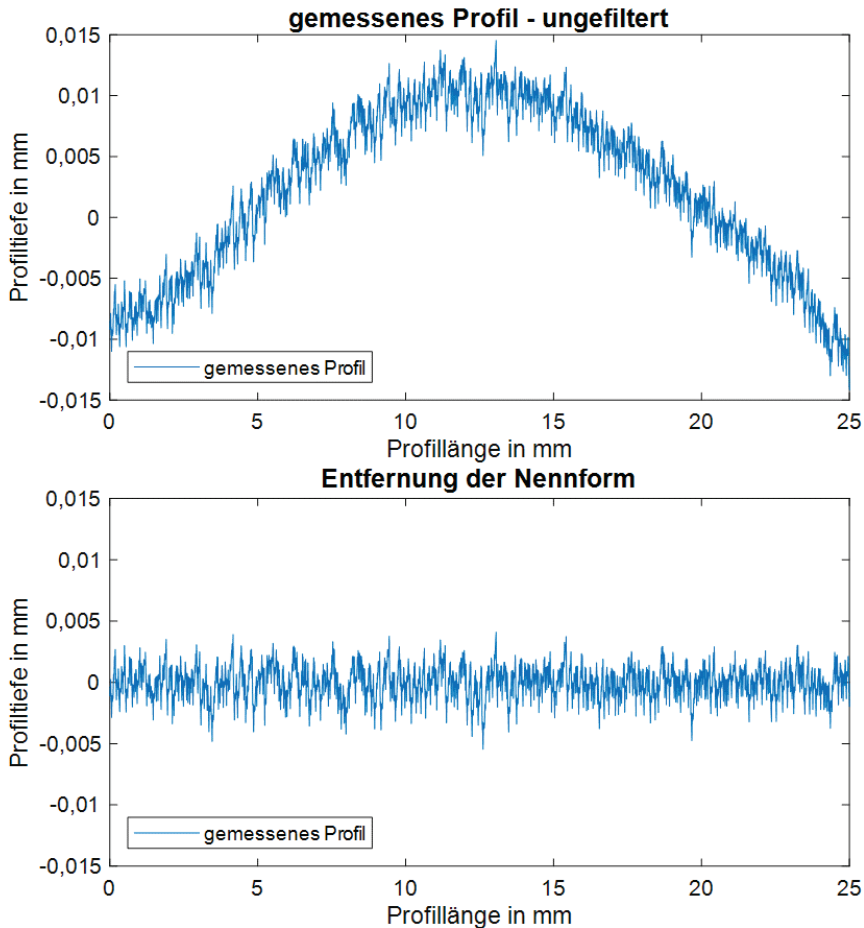


Bild 59: Entfernung der Nennform

Bei der Entfernung der Nennform muss sichergestellt werden, dass nur die Verformung und nicht für die spätere Auswertung relevante Oberflächenmerkmale entfernt werden. Daher werden die Profile vor und nach der Entfernung der Nennform visuell miteinander verglichen.

Für die Bewertung der Wellenmodelle werden Kenngrößen gebraucht, die diese Eigenschaften beschreiben. Daher werden neben den klassischen Extremwerten wie Profiltiefe P_t , Wellentiefe W_t und Rautiefe R_t auch statistische Kenngrößen betrachtet. Mit der Berechnung nach [32] der mittleren Rillenbreite der Profilelemente R_{sm} wird die Wellenlänge betrachtet und mit der mittleren Höhe der Profilelemente R_c wird die Amplitude betrachtet.

Für das im Hauptteil gezeigte Profil Stirnfräsen $R_z = 6,3 \mu\text{m}$ sind die berechneten Kenngrößen in Tabelle A.1 dargestellt. Als Profilfilter zur Berechnung der Kenngrößen wird ein Tiefpassfilter mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,5 \text{ mm}$ verwendet, somit werden nur die Bestandteile von Welligkeit und Form betrachtet (Abschnitt 2.1). Diese Bestandteile können bei Koordinatenmessungen wiedergegeben werden. Für die Bewertung von R_t wird ein λ_s -Filter mit der Grenzwellenlänge $2,5 \mu\text{m}$ verwendet.

Tabelle A.1: Kenngrößen Profil Stirnfräsen $R_z = 6,3 \mu\text{m}$

	R_{sm} in μm	R_c in μm	P_t in μm	W_t in μm	R_t in μm
Gemessenes Profil	0,104	3,177	29,015	23,468	6,996
Profil nach Entfernung der Nennform	0,104	3,178	9,511	3,265	6,998

Durch die statistischen Kenngrößen R_{sm} und R_c wird gezeigt, dass die Entfernung der Verformung das Erscheinungsbild der typischen Fertigungscharakteristika nicht verändert. Die Werte sind vor und nach Entfernung der Nennform nahezu identisch. Ebenso zeigt sich, dass die Rautiefe R_t nahezu unverändert ist. Die durch das Polynom entfernte Nennform ist langwellig und verändert somit nicht den erfassbaren Wert der Rautiefe. Die Werte der Profil- und Wellentiefe werden hingegen durch die Entfernung der Nennform signifikant verändert.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird die Nennform aller Profile unabhängig vom Grad der Ebenheitsabweichung mit einem Polynom 7. Grades entfernt. Profile ohne extern eingebrachte Ebenheitsabweichungen werden dadurch nicht signifikant verändert. Eine vollständige Übersicht über die

Ergebnisse der ursprünglichen Tastschnittmessung sowie nach der Entfernung der Nennform ist nachfolgend in Tabelle A.2 dargestellt.

Tabelle A.2: Kenngrößen vor und nach Entfernung der Nennform

Ferti- gungsart	Ra in μm		Mess- bahn	Rsm in μm		Rc in μm		Pt in μm		Wt in μm		Rt in μm	
	nomi- nal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7
Drehen	2,5	2,456	0	0,110	0,110	9,072	9,072	24,076	13,216	12,933	2,175	12,289	12,289
		2,445	2	0,110	0,110	9,031	9,031	17,275	12,929	6,548	1,975	12,116	12,118
		2,463	-2	0,110	0,110	9,063	9,063	27,739	13,405	16,937	2,133	11,710	11,712
	4	3,709	0	0,149	0,149	15,219	15,219	31,558	20,899	17,082	3,456	18,166	18,166
		3,709	2	0,149	0,149	15,2	15,200	35,700	20,917	18,999	3,551	18,520	18,520
		3,71	-2	0,149	0,149	15,27	15,270	29,632	21,520	14,767	3,844	20,238	20,239
	6,3	5,815	0	0,187	0,187	23,193	23,194	36,710	28,885	13,097	6,962	26,710	26,708
		5,817	2	0,187	0,187	23,222	23,222	35,579	28,605	10,808	5,638	26,842	26,842
		5,806	-2	0,187	0,187	23,066	23,066	40,561	29,336	15,919	6,887	26,630	26,636
	10	7,683	0	0,319	0,319	29,307	29,307	43,684	40,001	14,440	10,217	31,076	31,076
		7,683	2	0,319	0,319	29,357	29,357	42,469	39,768	13,809	10,118	31,101	31,101
		7,689	-2	0,319	0,319	29,285	29,285	43,770	39,666	15,047	9,767	31,134	31,133

Ferti- gungsart	Rz in µm		Mess- bahn	Rsm in µm		Rc in µm		Pt in µm		Wt in µm		Rt in µm	
	nomi- nal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7
Stirn- fräsen	6,3	5,106	0	0,115	0,115	3,380	3,390	25,327	8,852	20,999	3,193	7,285	7,285
		5,203	2	0,115	0,115	3,433	3,433	25,211	10,598	20,346	4,839	7,859	7,859
		4,928	-2	0,104	0,104	3,177	3,178	29,015	9,511	23,468	3,265	6,996	6,998
	10	9,337	0	0,170	0,170	7,921	7,921	17,308	14,572	8,407	4,535	11,490	11,486
		9,258	2	0,169	0,168	7,831	7,831	18,103	14,648	7,846	4,667	11,486	11,487
		9,274	-2	0,168	0,168	7,861	7,861	20,554	15,568	9,936	5,652	11,517	11,517
	20	16,665	0	0,301	0,301	16,234	16,234	32,744	22,170	17,443	6,750	18,365	18,366
		16,586	2	0,301	0,301	16,205	16,204	31,969	21,749	18,948	5,932	18,119	18,117
		16,619	-2	0,301	0,301	16,234	16,234	33,036	22,900	18,094	6,475	18,637	18,636
	40	31,210	0	0,465	0,465	31,185	31,185	70,835	42,875	44,657	15,939	34,423	34,421
		31,466	2	0,465	0,461	31,365	31,365	69,586	44,330	44,928	16,040	34,976	34,975
		31,257	-2	0,461	0,461	30,973	30,975	73,016	43,453	47,399	15,977	33,956	33,957

Ferti- gungsart	Rz in µm		Mess- bahn	Rsm in µm		Rc in µm		Pt in µm		Wt in µm		Rt in µm	
	nomi- nal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7
Stirn- fräsen	80	36,634	0	0,772	0,772	47,148	47,148	102,08	89,183	68,654	51,504	50,558	50,558
		37,048	2	0,773	0,773	47,887	47,887	108,08	91,150	71,109	52,573	52,991	52,990
		37,178	-2	0,750	0,750	46,420	46,420	103,37	90,532	64,138	53,972	54,420	54,411
Walz- fräsen	6,3	7,236	0	0,105	0,105	4,463	4,457	54,524	17,891	45,466	9,343	13,544	13,551
		7,485	2	0,112	0,112	4,602	4,600	57,393	17,551	46,901	9,944	15,685	15,684
		7,278	-2	0,105	0,105	4,485	4,478	53,318	21,658	44,398	9,375	15,510	15,510
	10	8,515	0	0,121	0,121	5,286	5,284	30,111	27,992	17,118	10,535	19,537	19,536
		8,589	2	0,125	0,125	5,395	5,387	26,250	24,588	17,468	10,940	18,766	18,766
	20	7,701	-2	0,108	0,109	4,748	4,762	26,298	20,021	15,351	9,447	14,872	14,896
		10,289	0	0,174	0,175	6,753	6,757	67,312	55,227	53,068	38,606	25,858	25,858
		9,782	2	0,176	0,176	6,554	6,562	65,599	52,078	55,833	41,190	22,678	22,689
		10,220	-2	0,174	0,174	6,806	6,741	45,287	49,552	27,177	28,031	34,226	34,225

Ferti- gungsart	Ra in µm		Mess- bahn	Rsm in µm		Rc in µm		Pt in µm		Wt in µm		Rt in µm	
	nomi- nal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom
Plan- schleifen	0,25	0,258	0	0,062	0,062	1,085	1,082	28,155	3,646	26,505	0,885	3,438	3,443
		0,268	2	0,068	0,068	1,155	1,153	39,207	10,036	31,371	1,495	8,96	8,960
		0,255	-2	0,068	0,068	1,133	1,136	22,845	3,614	20,997	1,254	2,945	2,943
	0,4	0,479	0	0,076	0,075	1,892	1,882	143,55	4,852	139,24	1,202	5,401	4,932
		0,444	2	0,074	0,074	1,803	1,802	136,83	5,234	132,66	0,992	5,099	4,633
		0,399	-2	0,068	0,067	1,591	1,585	147,01	4,522	143,61	0,923	4,512	4,444
	0,63	0,584	0	0,060	0,060	2,258	2,255	23,564	6,321	19,587	1,239	5,551	5,552
		0,548	2	0,057	0,057	2,111	2,108	21,31	5,633	18,106	1,361	5,46	5,460
		0,570	-2	0,061	0,061	2,246	2,244	25,048	6,183	21,250	1,263	5,663	5,663
	1	1,020	0	0,091	0,091	3,580	3,579	53,717	9,620	48,317	3,013	9,159	9,162
		1,034	2	0,097	0,097	3,722	3,722	50,232	10,130	43,779	2,777	9,167	9,169
		0,989	-2	0,089	0,089	3,517	3,516	56,755	9,980	50,887	2,888	8,855	8,855

Ferti- gungsart	Ra in µm		Mess- bahn	Rsm in µm		Rc in µm		Pt in µm		Wt in µm		Rt in µm	
	nomi- nal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7
Plan- schleifen	1,6	1,428	0	0,095	0,093	5,317	5,283	241,19	15,596	231,07	6,930	12,487	12,471
		1,466	2	0,095	0,095	5,309	5,304	262,99	16,625	253,97	6,884	13,435	13,431
		1,463	-2	0,101	0,101	5,326	5,300	211,05	16,765	201,26	6,275	13,394	13,401
	2,5	1,995	0	0,117	0,117	7,344	7,344	37,834	24,356	22,615	7,019	20,991	20,992
		2,079	2	0,119	0,119	7,554	7,554	38,954	22,788	22,871	9,052	20,142	20,139
		1,96	-2	0,120	0,120	7,159	7,159	39,435	23,820	23,612	10,510	19,406	19,396
	Rz in µm												
	0,8	1,028	0	0,043	0,043	0,469	0,468	49,659	5,667	49,004	0,716	5,633	5,653
		0,810	2	0,0432	0,032	0,399	0,400	48,544	1,757	47,615	0,676	1,787	1,502
		0,855	-2	0,034	0,034	0,412	0,411	51,971	2,317	50,956	0,897	2,305	2,304
	3,2	2,989	0	0,068	0,067	1,818	1,810	160,01	7,267	156,69	4,721	5,436	4,691
		3,013	2	0,060	0,059	1,690	1,678	164,17	6,999	160,15	3,349	5,562	5,550
		2,849	-2	0,059	0,059	1,640	1,641	151,34	6,104	147,84	1,842	5,345	5,177

Ferti- gungsart	Rz in µm		Mess- bahn	Rsm in µm		Rc in µm		Pt in µm		Wt in µm		Rt in µm	
	nominal	Mess- wert		Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7	Mes- sung	Poly- nom 7
Plan- schleifen	6,3	5,944	0	0,092	0,093	3,562	3,568	30,174	9,777	23,749	3,120	8,390	8,392
		5,851	2	0,095	0,095	3,613	3,608	38,213	10,753	31,789	2,356	9,889	9,891
		6,043	-2	0,101	0,101	3,719	3,721	23,843	10,665	16,533	2,954	9,342	9,344
	10	9,140	0	0,083	0,083	5,451	5,460	43,169	15,618	32,517	5,260	13,935	13,938
		9,178	2	0,090	0,089	5,569	5,538	49,410	18,374	40,265	5,640	14,195	14,196
		9,015	-2	0,086	0,086	5,363	5,363	43,016	17,807	33,934	5,587	14,938	14,945
	20	12,374	0	0,122	0,122	7,725	7,726	82,198	25,106	69,876	11,787	21,587	21,588
		11,400	2	0,112	0,112	7,086	7,092	71,790	20,686	58,746	9,888	17,196	17,195
		12,247	-2	0,127	0,127	7,569	7,591	88,479	23,019	77,401	9,890	20,806	20,804

Auswertung der Parameter Rsm und Rc

In Bild 60 sind Abweichungen von Rsm pro Fertigungsverfahren, Profiltyp und Tastkugeldurchmesser dargestellt. Systematische Abweichungen sind nicht erkennbar. Werte größer 50 % entstehen durch Ausreißer bei der KMG-Messung.

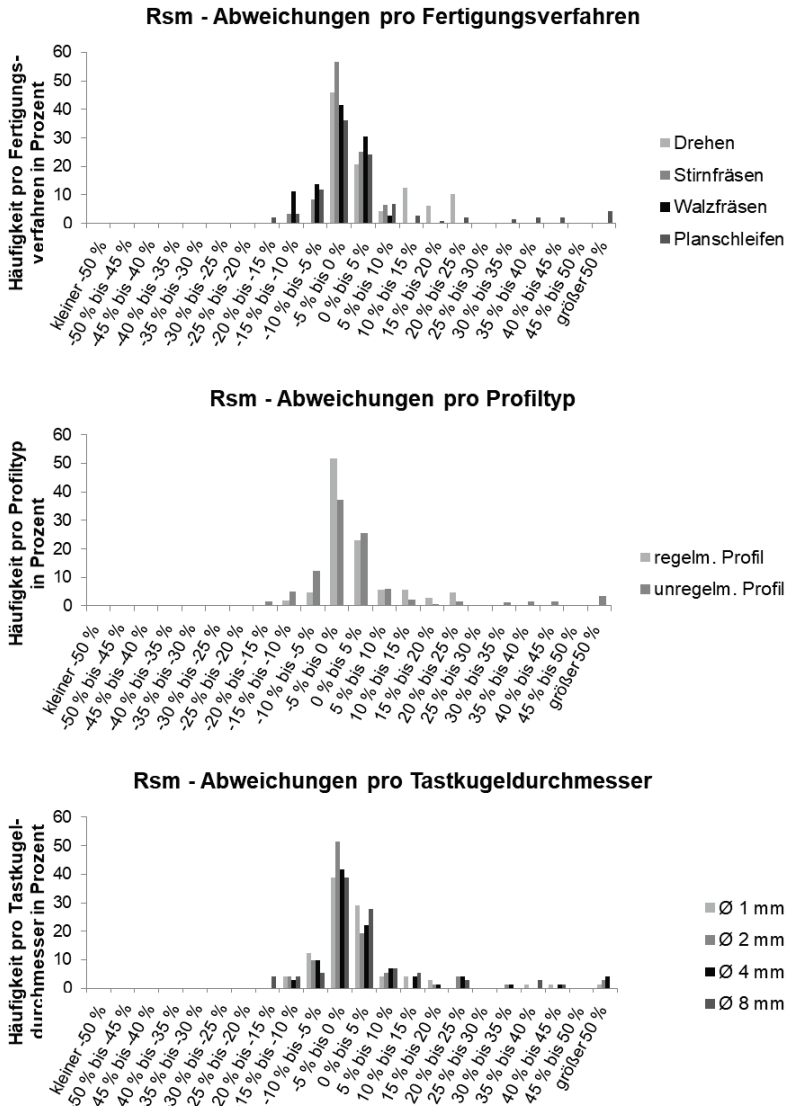


Bild 60: Auswertung des Parameters Rsm

In Bild 61 sind Abweichungen von Rc pro Fertigungsverfahren, Profiltyp und Tastkugeldurchmesser dargestellt. Bei unregelmäßigen Profilen treten größere Abweichungen auf als bei regelmäßigen Profilen. Die Abweichungen sind unabhängig vom Tastkugeldurchmesser.

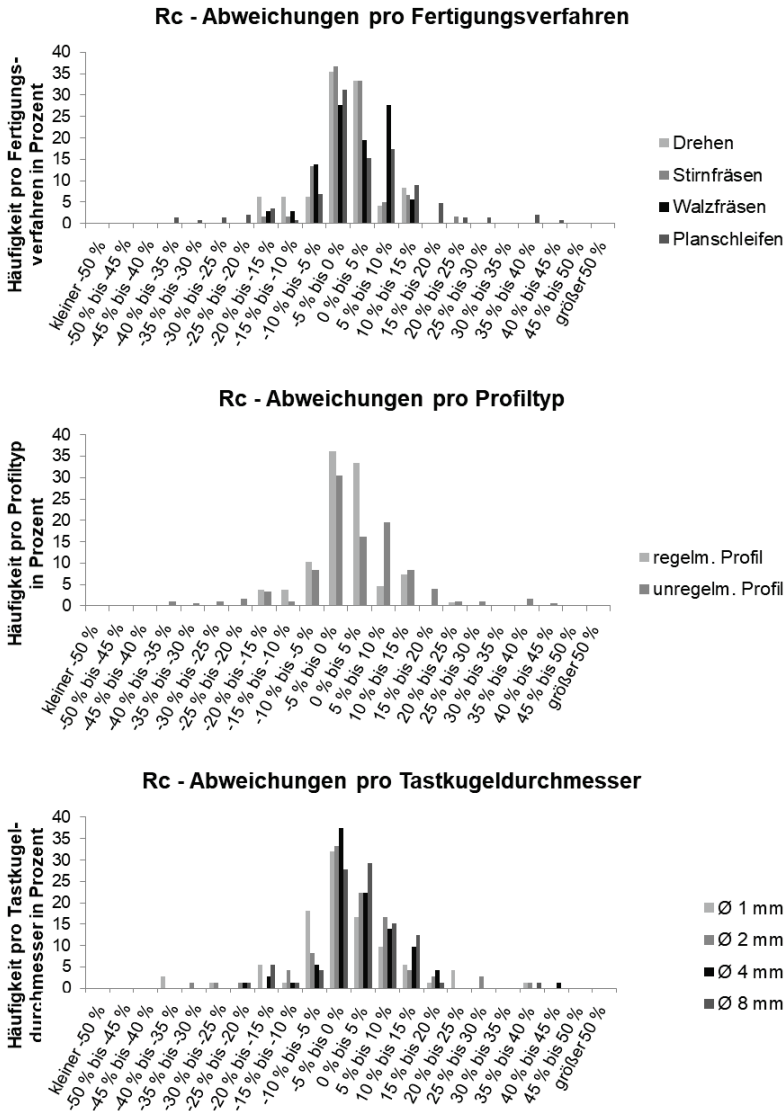


Bild 61: Auswertung des Parameters Rc

Auswertung der Parameter Pt, Wt und Rt

In Bild 62 sind Abweichungen von Pt pro Fertigungsverfahren, Profiltyp und Tastkugeldurchmesser dargestellt. Werte größer 50 % entstehen durch Ausreißer bei der KMG-Messung.

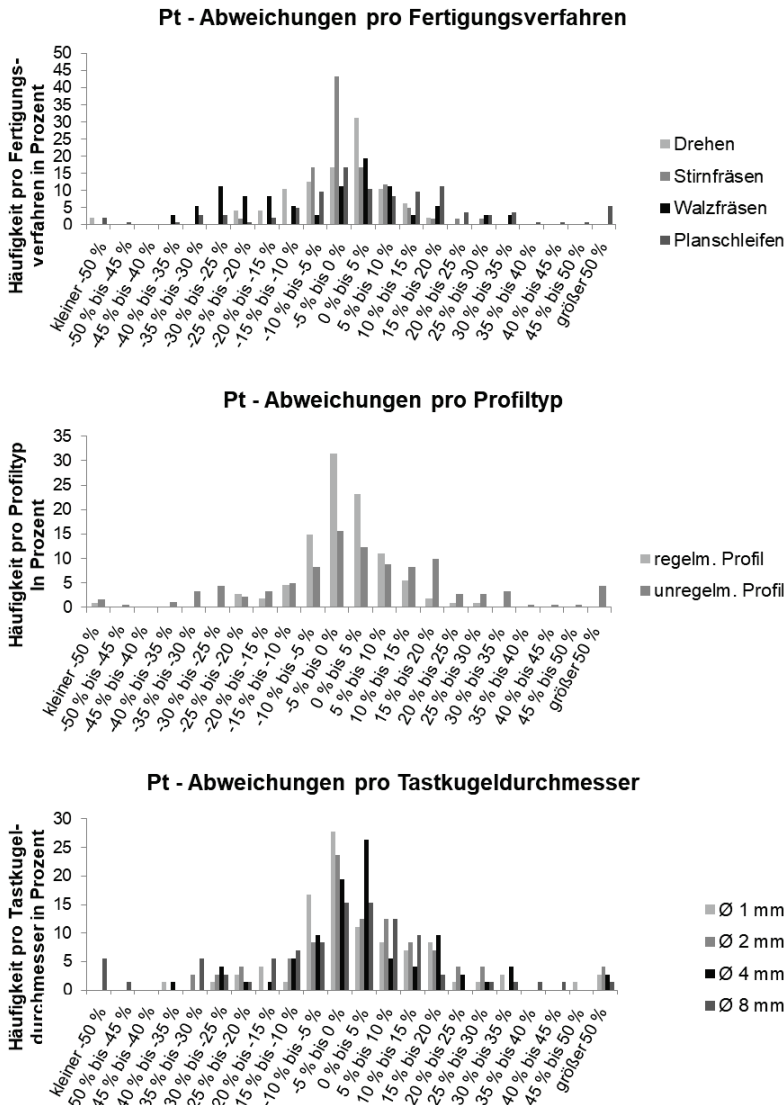


Bild 62: Auswertung des Parameters Pt

In Bild 63 sind Abweichungen von Wt pro Fertigungsverfahren, Profiltyp und Tastkugeldurchmesser dargestellt. Bei unregelmäßigen Profilen zeigt sich eine größere Streuung als bei regelmäßigen Profilen. Werte größer 50 % entstehen durch Ausreißer bei der KMG-Messung.

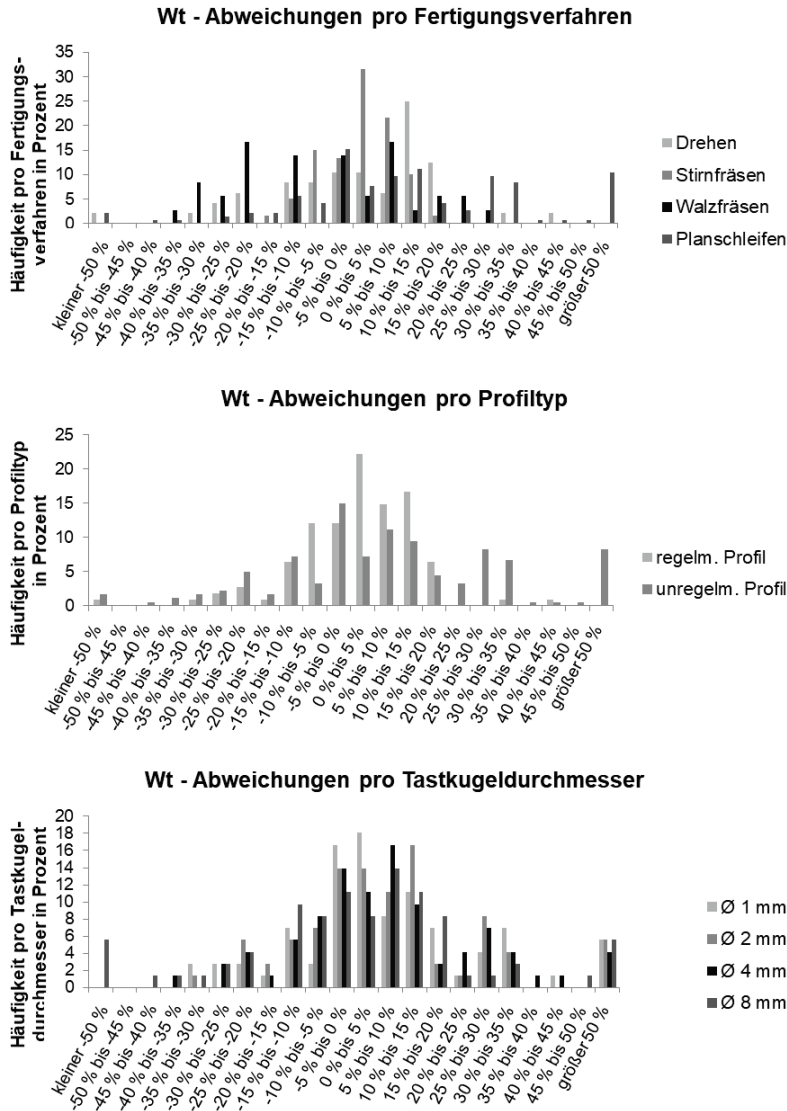


Bild 63: Auswertung des Parameters Wt

In Bild 64 sind Abweichungen von Rt pro Fertigungsverfahren, Profiltyp und Tastkugeldurchmesser dargestellt. Bei unregelmäßigen Profilen zeigt sich eine größere Streuung als bei regelmäßigen Profilen. Werte größer 50 % entstehen durch Ausreißer bei der KMG-Messung.

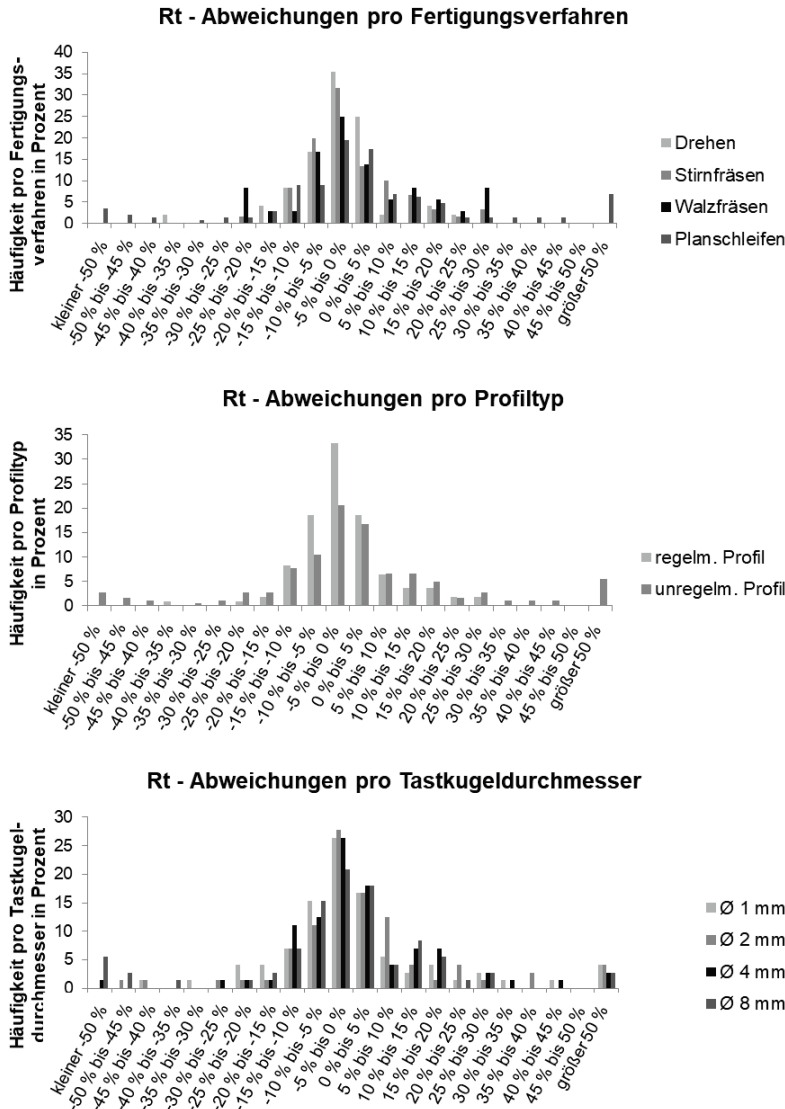


Bild 64: Auswertung des Parameters Rt

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-53/abg-forschungsvorhaben-530/verifikation-des-virtuellen-koordinaten-messgeraetes-vcmm.html>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [2] DIN 4760:1982-06, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem
- [3] VDI/VDE 2631 Blatt 1:2016-08, Formmesstechnik – Grundlagen
- [4] DIN EN ISO 4288:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996); Deutsche Fassung EN ISO 4288:1997 (zurückgezogen)
- [5] DIN EN ISO 3274:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenn-eigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996); Deutsche Fassung EN ISO 3274:1997
- [6] DIN EN ISO 21920-3:2022-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profile – Teil 3: Spezifikationsoperatoren (ISO 21920-3:2021); Deutsche Fassung EN ISO 21920-3:2022
- [7] VDA 2007:2007-02, Geometrische Produktspezifikation – Oberflächenbeschaffenheit – Definitionen der Kenngrößen der dominanten Welligkeit (zurückgezogen)
- [8] DIN EN ISO 4287:2010-07 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009 (zurückgezogen)
- [9] DIN EN ISO 16610-1:2015-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-1:2015
- [10] DIN EN ISO 12780-2:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geradheit – Teil 2: Spezifikationsoperatoren (ISO 12780-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 12780-2:2011

- [11] Whitehouse, D.J.: Handbook of Surface Metrology, Bristol, UK, Philadelphia, USA: Institute of Physics Publishing, (1994).
- [12] Whitehouse, D.J. and Reason, R.E.: The Equation of the Mean Line of Surface Texture Found by an Electric Wave Filter, Leicester, UK: Rank Taylor Hobson, (1965).
- [13] Whitehouse, D.J.: Improved type of wavefilter for use in surface-finish measurement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, **182**(3K), 306-318, (1967).
- [14] Raja, J., Muralikrishnan, B. and Fu, S.: Recent advantages in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, **26**(2), 222-235. (2002).
- [15] Krystek, M.: ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik, *tm - Technisches Messen*, **76**(3), 133-159, (2009).
- [16] DIN 8580:2022-12, Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
- [17] DIN 8589-1:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen – Teil 1: Drehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [18] DIN 8589-3:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen – Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [19] DIN 8589-11:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen – Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [20] Weck, M. und Brecher, C.: Werkzeugmaschinen – Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, (2006) – ISBN: 978-3-540-22505-8
- [21] Richtlinie DAkkS-DKD-R 4-2 Blatt 1 Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik, 2018
- [22] DIN 4766-2:1981-03, Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen – Erreichbare Mittenrauhwerte R_a nach DIN 4768 Teil 1 (zurückgezogen)
- [23] De Payrebrune Saint Sève, K. Baronin: Analyse und Modellierung der Prozess-Strukturwechselwirkungen beim Werkzeugschleifen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2013.
- [24] Miko, E. und Nowakowski, L.: Analysis and Verification of Surface Roughness Constitution Model After Machining Process. XIIIth International Scientific and Engineering Conference “HERVICON-2011”, *Procedia Engineering* **36**, 395-404, (2012).

- [25] Bo, L., Yanlong, C., Wenhua, C. und Jun, P.: Geometry simulation and evaluation of the surface topography in five-axis ball-end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **93**, 1651-1667, (2017).
- [26] Mair, N.: Erzielbare Oberflächenqualitäten beim Planfräsen mit einstellbarem Diamantfräs Werkzeug, Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, (2011). Verfügbar unter: https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/deliver/index/docId/1263/file/Diplomarbeit_MairNorbert.pdf, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [27] VDI/VDE 2631 Blatt 2:2021-07, Formmesstechnik – Ermittlung der Abweichung durch Sensorik und Signalübertragung
- [28] VDI/VDE 2617 Blatt 2.2:2018-07, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Formmessung mit Koordinatenmessgeräten
- [29] Weck, M. und Brecher, C.: Werkzeugmaschinen – Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, (2006). – ISBN 978-3-540-22506-5
- [30] Klocke, F. und König, W.: Fertigungsverfahren 2 – Schleifen, Honen, Läppen, 4. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, (2005). – ISBN 978-3-540-23496-8
- [31] Böge, A. (Hrsg.): Formeln und Tabellen Maschinenbau, 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg Verlag, (2007). – ISBN 978-3-8348-0032-9
- [32] DIN EN ISO 21920-2:2022-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Oberflächenbeschaffenheit: Profile – Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06); Deutsche Fassung EN ISO 21920-2:2022
- [33] <https://www.sandvik.coromant.com/de-de/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [34] Petropoulos, G., Pandazaras, C. und Davim, J.: Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining, In: *Surface Integrity in Machining*, XII, S.37-6, (2010). – ISBN 978-1-84882-873-5
- [35] Volk, R.: *Rauheitsmessung, Theorie und Praxis*, Beuth Verlag, Berlin 2018. – ISBN: 978-3410275497

- [36] Jusko, O., Reimann, H., und Bernhard, R.: Möglichkeiten und Grenzen des Formscanning auf Koordinatenmessgeräten im Drei- und Vierachsbetrieb, *VDI Berichte* **2205**, 189-204, VDI Verlag, (2016).
- [37] Gröger, S.: Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation, Habilitation, Technische Universität Chemnitz, (2013).
- [38] Stedman, M.: Mapping The Performance Of Surface-Measuring Instruments, *Proceedings of SPIE*, **803**, 138-142, (1987).
- [39] VDI/VDE-Richtlinie 2631 Blatt 3:2018-09, Formmesstechnik – Eigenschaften und Auswahl von Filtern
- [40] <https://hexagon.com/de/products/lambda-sp>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [41] <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/koordinatenmessgeraete/grossgeraete/m mz-g.html#technicaldata>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [42] <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/koordinatenmessgeraete/portalmessgeraete/xenos.html>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [43] <https://www.zeiss.at/messtechnik/produkte/systeme/form-und-oberflaechenmsstechnik/kontur-und-oberflaechenmessgeraete/surfcom-nex-serie.html>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [44] <https://www.accretech.eu/de/oberflaechenmessgeraete/konturmessgeraete/surfcom-nex-040-041/>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [45] <https://docplayer.org/26802522-Industrielle-messtechnik-von-carl-zeiss-kontur-und-oberflaechenmessgeraete.html>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [46] Nyquist, H.: Certain topics in telegraph transmission theory, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, **47**, 617-644, (1928).
- [47] VDI/VDE-Richtlinie 2602 Blatt 2:2018-04, Oberflächenprüfung – Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten – Tastschnittverfahren – Aufbau, Messbedingungen, Durchführung

- [48] DIN EN ISO 25178-601:2011-01, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster) (ISO 25178-601:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-601:2010
- [49] Gröger, S.: Beitrag zum ganzheitlichen Bewerten von geometrischen Strukturen mit Tastschnittgeräten bis in den Nanometerbereich, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, (2007).
- [50] Reason, R.E., Hopkins, M.R. and Garrod, R.I.: Report on the Measurement of Surface Finish by Stylus Methods. Leicester, England: Taylor, Taylor & Hobson Ltd, (1944).
- [51] Schmaltz, G.: Technische Oberflächenkunde – Feingestalt und Eigenschaften von Grenzflächen Technischer Körper Insbesondere der Maschinenteile. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, (1936). – ISBN 978-3-642-51820-1
- [52] Weckenmann, A. (Hrsg.): Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen. 2. Aufl. München: Hanser Verlag, (2012). – ISBN 978-3-446-40739-8
- [53] DIN EN ISO 14406:2011-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Erfassung (ISO 14406:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14406:2010
- [54] Pfeifer, T. und Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik. 3. Aufl. München: De Gruyter Oldenbourg, (2010). – ISBN 978-3-486-59202-3
- [55] DIN EN ISO 14638:2015-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix-Modell (ISO 14638:2018); Deutsche Fassung EN ISO 14638:2015,
- [56] DIN EN ISO 10360-1:2003-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 1: Begriffe (ISO 10360-1:2000 + Corr 1:2002) (enthält Berichtigung AC:2002); Deutsche Fassung EN ISO 10360-1:2000 + AC:2002
- [57] Keck, C., Franke, M., und Schwenke, H.: Werkstückeinflüsse in der Koordinatenmesstechnik (Workpiece Influence in Coordinate Metrology). *tm – technisches Messen*, **71**(2), 81-92, (2004).
- [58] Bos, E., Schellekens, P. und Dietzel, A.: Aspects of tactile probing on a micro scale. *Proceedings of the euspen International Conference*, San Sebastian, Spain, June (2009).

- [59] DIN EN ISO 21920-1:2022-12, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profile – Teil 1: Angabe der Oberflächenbeschaffenheit(ISO 21920-1:2021); Deutsche Fassung EN ISO 21920-1:2022
- [60] JGCM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JGCM (Joint Committee for Guides in Metrology), 2008, <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [61] DIN 1319-1:1995-01 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Januar 1995
- [62] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Blatt 11 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen, März 2011
- [63] Wübbeler, G.: Das Monte-Carlo-Verfahren nach GUM Supplement 1 – Chancen und Risiken. 260. PTB-Seminar, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, (2011).
- [64] JGCM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. JGCM (Joint Committee for Guides in Metrology), 2008, <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>, (aufgerufen am : 23.12.2022).
- [65] Schwenke, H.: Abschätzung von Meßunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmeßtechnik. PTB Berichte, PTB-F-36, Braunschweig, (1999). – ISBN 3-89701-373-8
- [66] DIN EN ISO 15530-3:2018-09, Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO 15530-3:2011); Deutsche Fassung EN ISO 15530-3:2011
- [67] VDI/VDE 2617 Blatt 8:2018-10, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten

- [68] Weckenmann, A., Lorz, J.: Monitoring coordinate measuring machines by calibrated parts. 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics: Conference Series 13, S. 190-193, (2005).
- [69] EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, 2022
- [70] ISO/TS 15530-4:2008-06, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Koordinatenmessmaschinen (CMM): Technik für die Bestimmung der Messunsicherheit – Teil 4: Auswertung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten mit Hilfe von Simulationen
- [71] VDI/VDE 2617 Blatt 7:2008-09, Genauigkeit von Koordinaten-messgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation
- [72] Kowalski, M.: Analysis of measurements done with the use of coordinate measuring machines affected by form errors. Dissertation, Cracow University of Technology, (1993).
- [73] Nawara, L., Kowalski, M. und Śladek, J.: Metrology tests of measuring machines and devices with special include of geometrical accuracy, positioning and measurement strategy. Subtopic 1, Works of ZMiKT PK under CPBP 02.20, (1985-1989).
- [74] Śladek, J.: Modeling and accuracy assessment of coordinate measuring machines and measurements. Cracow University of Technology Scientific Books, Mechanika, **87**, (2001).
- [75] Küng, A., Meli, F., Nicolet, A. und Thalmann, R.: Application of a virtual coordinate measuring machine for measurement uncertainty estimation of aspherical lens parameters. *Measurement Science and Technology*, **25**, 094011, (2014).
- [76] Baldwin, J.M., Summerhays, K.D., Campbell, D.A. und Henke, R.P.: Application of Simulation Software to Coordinate Measurement Uncertainty Evaluations. *NCSLI – Measure*, **2**(4), 40-52, (2007).
- [77] Reuter, T., Plotzki, D., Borges de Oliveira, F., Wohlgemuth, F., Bauer, F., Ballach, F., Kimmig, W., Wagner, G., Watzl, C., Weiß, D., und Hausotte, T.: Numerical measurement uncertainty evaluation for X-ray computed tomography using simulations – A first approach to build a digital twin. *tm – technisches Messen*, **89**(10), 671-686, (2022)

- [78] Binder, F., Bircher, B., Laquai, R., Küng, A., Bellon, C., Meli, F., Deresch, A., Neuschaefer-Rube, U., und Hausotte, T.: Methodologies for model parameterization of virtual CTs for measurement uncertainty evaluation. *Measurement Science and Technology*, **33**, 104002, (2022).
- [79] Fern, F., Füßl, R., Manske, E., Schienbein, R., Theska, R., Ortlepp, I., und Leinweber, J.: Messunsicherheitsbetrachtungen an einem fünfachsigen Nano-Koordinatenmessgerät *NMM-5D* nach einem vektoriellen Ansatz. *tm – technisches Messen*, **88**(2), 61-70, (2021)
- [80] Rost, K., Wendt, K. und Härtig, K.: Evaluating a task-specific measurement uncertainty for gear measuring instruments via Monte Carlo simulation. *Precision Engineering*, **44**, 220-230, (2016).
- [81] Rost, K.: Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit für Verzahnungsmessungen – Übertragung des virtuellen Koordinatenmessgerätes auf Verzahnungsmessgeräte; Dissertation, Universität Bremen, (2017).
- [82] Abschlussbericht zum Projekt „Messung großer Bauteile mit Lasertrackern – Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit“, technischer Bericht, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (2009).
- [83] Schwenke, H. und Wäldele, F.: Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis. *tm – technisches Messen*, **69**(12), 550-557, (2002).
- [84] Kunzmann, H., Trapet, E. und Wäldele, F.: A uniform concept for calibration, acceptance test, and periodic inspection of coordinate measuring machines using reference objects. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **39**(1), 561-564, (1990).
- [85] Trapet, E., und Wäldele, F.: A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools. *Measurement*, **9**(1), 17-22, (1991).
- [86] Schwenke, H., Franke, M., Hannaford, J., und Kunzmann, H.: Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **54**(1), 475-478, (2005).

- [87] Schwenke, H., Wendt, K., Bartscher, M., und Busch, K.: Rückführbarkeit von Koordinatenmessgeräten, Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben TR 350/1-2, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (2000).
- [88] Modellbeschreibung des Virtuellen Koordinatenmessgerätes (VCMM), Handbuch, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (2019).
- [89] VDI/VDE 2627 Blatt 1:2015-12, Messräume – Klassifizierung und Kenngrößen – Planung und Ausführung
- [90] Auszug aus Animation zur Beschreibung der Funktionsweise des VCMM, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, (2018).
- [91] Wanner, J., Balle, B.: OVCMM. Merkmalspezifische Messunsicherheitsangabe mit Calypso. *Innovation Messtechnik Spezial Nr. 5*, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen, (2004).
- [92] Rost, K.: Statistikmodul VCMM, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (2016).
- [93] <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/software/calypso-uebersicht/calypso-planner.html>, (aufgerufen am: 23.12.2022).
- [94] Handbuch CALYPSO, ZEISS Industrial Quality Solutions, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen (2020).
- [95] Hernla, M.: *Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen – Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durch Unsicherheitsbilanzen*, 3. Aufl., Renningen: expert Verlag, (2016). – ISBN 978-3-8169-3373-1
- [96] Wendemuth, A.: Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung – Ein mathematischer Zugang, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, (2005). – ISBN 3-540-21885-8
- [97] VDI/VDE-Richtlinie 2631 Blatt 11:2020-07, Formprüfung, Spektralanalyse (Fourieranalyse, Harmonische Analyse)
- [98] Jusko, O. und Lüdicke, F.: Novel multi-wave standards für the calibration of form measuring instruments. *Proceedings 1st EuSpen*, Vol. 2. Bremen: Shaker-Verlag, S. 299-302, (1999). – ISBN 3-8265-6085-X
- [99] Jusko, O. und Lüdicke, F.: Neuartige Formnormale. *Quality Engineering*, 5, S. 50-51, (2000). – ISSN 1436-2457

- [100] Sander, M.: Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker. 2. Aufl. Göttingen: Feinprüf Perthen GmbH, (1993).
- [101] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für angewandte Mathematik* **92**, 156-171, (1881).
- [102] Lüdicke, F.: Gültigkeit der Hertzschen Pressung beim mechanischen Antasten in der Längenmeßtechnik. *Feinwerktechnik und Messtechnik* **91** (5), 242-244, (1983).
- [103] Küng, A., Meli, F. und Thalmann, R.: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. *Measurement Science and Technology*, **18**, 319-327, (2007).
- [104] Vliet, van, W.P. und Schellekens, P.H.J.: Accuracy limitations of fast mechanical probing. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **45**(1), 483-487, (1996).
- [105] Johnson, K. L.: Contact mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, (1985).
- [106] Grote, K.-H. und Feldhusen, J.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, (2007). – ISBN 978-3-540-49714-1
- [107] Czichos, H. (Hrsg.) und Hennecke, M. (Hrsg.): *Hütte – Das Ingenieurwissen*. 24. Springer Berlin Heidelberg, (2012). – ISBN 978-3-642-22894-0
- [108] DIN EN ISO 16610-41:2015-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 41: Morphologische Profilfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke (ISO 16610-41:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-41:2015
- [109] ISO 2632-1:1985-09, Roughness comparison specimens – Part 1: Turned, ground, bored, milled, shaped and planed (zurückgezogen)
- [110] Weißgerber, M.: Bestimmung der spezifischen, oberflächenbedingten Scanning-Antastabweichungen für taktile 3D-Koordinatenmessgeräte, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, (2019).
- [111] DIN EN ISO 10360-2:2010-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (ISO 10360-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10360-2:2009

- [112] MATLAB, 2019. 9.6.0.1072779 (*R2019b*), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [113] Omnisurf, Version 4.2.35, Columbus, Indiana: Digital Metrology Solutions, Inc.
- [114] DIN EN ISO 16610-21:2013-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011); Deutsche Fassung EN ISO 16610-21:2012
- [115] DIN EN ISO 16610-22:2016-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 22: Lineare Profilfilter: Spline-Filter (ISO 16610-22:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-22:2015
- [116] Roithmeier, R.: *Prüfgerechte Tolerierung: Maß, Form und Lage – Möglichkeiten der neuen GPS-Normen*, Zeiss Metrology Academy, Ellwangen: Opferkuch Verlag, (2016).
- [117] Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, PTB, Part 2 of the Final Report, Project MAT1-CT94-0076, (1999).

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Kistner, T., Gabbia, A. und Imkamp, D.: Messunsicherheit durch Simulation: Stand der Technik und neue Entwicklungen für die Koordinatenmesstechnik in der industriellen Produktion, Tagungsband. 18. GMA/ITG-Fachtagung – Sensoren und Messsysteme 2016, S.474-479, (2016).
- [P2] Heißelmann, D., Franke, M., Rost, K., Wendt, K., Kistner, T., Schwehn, C.: Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo Simulation. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing*, XI AMCTM, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology (2017).
- [P3] Franke, M., Kistner, T., Hausotte, T., Heißelmann, D., Schwehn, C. und Wendt, K.: Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme. *tm – Technisches Messen*, **84**(5), 325-335, (2017).
- [P4] Heißelmann, D., Franke, M., Kistner, T. und Schwehn, C.: Das virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM, Koordinatenmesstechnik 2018 – Technologien und Anwendung, DIN-Tagung, Braunschweig, (2018).
- [P5] Kistner, T., Imkamp, D. und Hausotte, T.: Modelle der Oberflächenform mechanisch bearbeiteter Werkstücke für die Messunsicherheitsbestimmung durch Simulation bei taktilen Koordinatenmessungen, Tagungsband. 20. GMA/ITG-Fachtagung – Sensoren und Messsysteme 2019, S.541-546, (2019).
- [P6] Kistner, T. und Imkamp, D.: Oberflächenmodelle mechanisch bearbeiteter Werkstücke für die Messunsicherheitsbestimmung mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät. *Tagungsband 9. VDI-Fachtagung Messunsicherheit – Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen*, Erfurt, 159-171, (2019).
- [P7] Kistner, T., Imkamp, D. und Hausotte, T.: Simulation der morphologischen Filterung und der Abplattung der Rauheitsspitzen mechanisch bearbeiteter Werkstücke und deren Auswirkung auf die Bewertung der Formabweichung in der Koordinatenmesstechnik. *tm – Technisches Messen*, , **88**(2), 78-89, (2021).

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumform mit elastischer Matrizierung
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmman

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.

1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.

1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.

1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparsparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.

1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulennwickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.

1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Lasieranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.

1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17

Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.

1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.

1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.

1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.

1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahl-löten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Triologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahl-schweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe

LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen

LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.

ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld

FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.

ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile

LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfel

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.

ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz- und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosserie-
bau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unterneh-
menscontrollings um die Dimen-
sion Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen
zur Herstellung zyklisch-symmet-
rischer Bauteile mit Nebenform-
elementen durch Blechmassivum-
formung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich Vierzig-
mann**
Beitrag zur Untersuchung der tri-
bologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereit-
stellung von tribologischen Mod-
ellversuchen und Realisierung
von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absiche-
rung der formgebenden Operation
des Nasspressprozesses von Ge-
lege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Refe-
renzwert zur Bewertung der Ener-
gieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen ver-
zinkter Stahlbleche in Kehlnahtge-
ometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrma-
nidis**
Thermisch unterstützte Umfor-
mung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic
Rotor Measurement / Flexible Sys-
teme zur Montage von Permanent-
magneten und zur Messung mag-
netischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensver-
halten hochfester Leichtbauwerk-
stoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen
zum Prozessverhalten von Silizium
als Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer
Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike Hert-
weck**
Zeitliche Pulsformung in der La-
sermikromaterialbearbeitung -
Grundlegende Untersuchungen
und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach
for the Process Planning of En-
ergy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickel-
technik für verteilte Wicklungen
im Anwendungsfall der E-Trakti-
onsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstel-
lung montageführender Werkerin-
formationssysteme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung
und Regelung robotergeführter
Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels si-
multanem, intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch un-
terstützten Fertigungskette zur
Herstellung umgeformter Bauteile
aus der härtesten Aluminiumle-
gierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes
for the Cold Bulk Forming of Small
Metal Components from Metal
Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Mode-
ling, Simulation and Optimization
of Molded Interconnect Devices
(MID) Based on Laser Direct
Structuring (LDS) / Experimentelle
Untersuchung, Modellierung, Si-
mulation und Optimierung von
Molded Interconnect Devices
(MID) basierend auf Laser Direkt-
strukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsver-
fahren für flachleiterbasierte Pkw-
Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vivapc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten

FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung

FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion

KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)

FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung

LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion

FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen

LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern

LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißschweißprozesses

FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals

LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess

LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen

FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente

FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation

FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTMfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTMfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTMfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTMfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTMfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merk

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTMfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsticks auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramik
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtige Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel**Lutz**

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte

KTmflk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesen- mayer

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmflk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge

LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff

LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen

FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation

FMT, xiii u. 130 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-735-7.

Abstract

When determining the measurement uncertainty by simulation, the surface form is often also taken into account. For this purpose, the influence of its undersampling is determined during the acquisition of the workpiece surface. This is done by virtual probing. The basis for this is a model adapted to the surface. Different ways to create the surface models are shown. The surface models are based on theoretical models of surface formation during manufacturing or are derived from stylus measurements on representative surfaces. In these surface models, the effects arising during probing (flattening, filter effect of the probe element) are taken into account. The final model is adapted to the measurement parameters and can be used to determine the measurement uncertainty with the virtual coordinate measuring machine ('VCMM').

Bei der Messunsicherheitsermittlung durch Simulation wird häufig auch die Oberflächenform berücksichtigt. Dafür wird der Einfluss ihrer Unterabtastung bei der Erfassung der Werkstückoberfläche ermittelt. Dies geschieht durch eine virtuelle Abtastung. Die Grundlage bildet ein an die Oberfläche angepasstes Modell. Es wird gezeigt, wie verschiedene Oberflächenmodelle erstellt werden können. Die Oberflächenmodelle basieren auf theoretischen Modellen der Oberflächenentstehung bei der Fertigung oder werden aus Tastschnittmessungen an repräsentativen Oberflächen abgeleitet. In diesen Oberflächenmodellen werden die bei der Antastung entstehenden Effekte (Abplattung, Filterwirkung des Tastelementes) berücksichtigt. Die so an die Messparameter angepassten Modelle können bei der Messunsicherheitsermittlung mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät (VCMM') verwendet werden.

