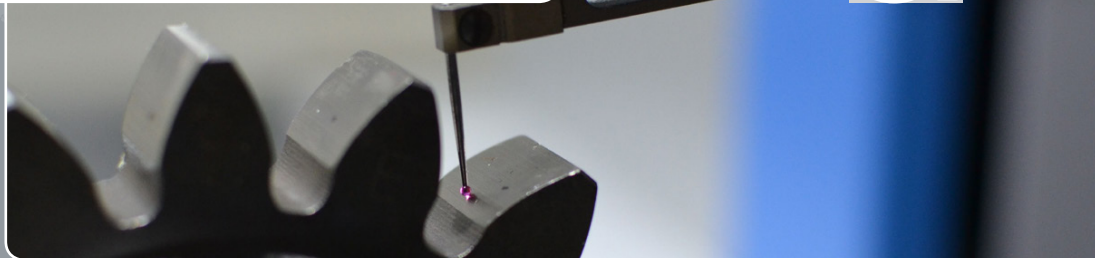


Matthias Eifler

mts
&



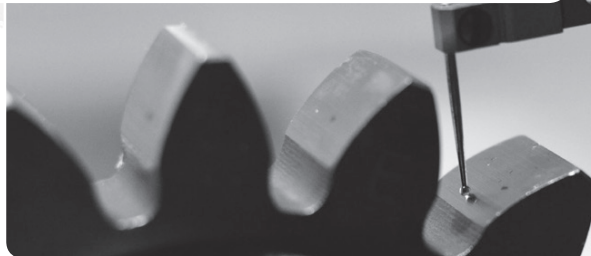
Tendenzen und Herausforderungen in der geometrischen Produktspezifikation am Beispiel der Rauheitsmesstechnik

Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik
Band 9

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Matthias Eifler

mts
&



Tendenzen und Herausforderungen in der geometrischen Produktspezifikation am Beispiel der Rauheitsmesstechnik

**Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik
Band 9**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN**

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.

Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik - Band 9

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Technische Universität Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Straße
67663 Kaiserslautern

Verfasser: Matthias Eifler
Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
Hauptabteilung 5 | Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck
D-386

© Matthias Eifler · Kaiserslautern 2019

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 2365-9742
ISBN 978-3-95974-117-0

Tendenzen und Herausforderungen in der geometrischen Produktspezifikation am Beispiel der Rauheitsmesstechnik

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Erlangung der *venia legendi* für das Fach

Messtechnik

genehmigte Habilitationsschrift

von

Dr.-Ing. Matthias Eifler, M.B.A.

aus Koblenz

D386

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann

Tag der Einreichung: 17.10.2018

Tag des Habilitationsvortrags: 22.05.2019

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Post-Doktorand am Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik an der TU Kaiserslautern sowie während Aufenthalten als Visiting Researcher an der University of California, Davis.

Mein großer Dank gilt dem Lehrstuhl-Inhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, der mich immer sehr gefördert hat und mir große wissenschaftliche Freiheit für die Umsetzung meiner Ideen eingeräumt hat. Sein offener und unkomplizierter Umgang trägt wesentlich zur guten Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl und zum aktiven Austausch zwischen Lehrenden, Forschenden und Studierenden des Fachbereiches bei. Er hat mich im Habilitationsprozess außerordentlich unterstützt.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Barbara Linke, die mich bei meinen Aufenthalten an der University of California, Davis sehr freundlich in ihre Arbeitsgruppe aufgenommen hat. Ich bin sehr dankbar für die schöne und bereichernde Zeit, die ich in den USA verbringen durfte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann danke ich für die Übernahme der Begutachtung im Habilitationsverfahren und Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich, Prof. Dr. Georg von Freymann, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune, Dr.-Ing. Carolin Sator und Lenarde Friedrich für die Arbeit in der Habilitationskommission.

Allen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich in den letzten Jahren im Rahmen der vorgestellten Arbeiten zusammengearbeitet habe, danke ich ebenfalls sehr herzlich, besonders Katja Klauer, Julian Hering und Andrej Keksel. Gemeinsame Veröffentlichungen entstanden im Zeitraum der Habilitation oder sind in Vorbereitung mit: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich, Dr. Wilfried Bauer, Dr.-Ing. Gaoliang Dai, Dr. Jayanti Das, Stefan Feifel, Prof. Dr. Georg von Freymann, Prof. Dr. Christoph Garth, Ian C. Garretson, Julian Hering, Linda Hofherr, Dr. habil. Dorothee Hüser, Jan C. Issel, Abdullah Karatas, Andrej Keksel, Simon Kieß, Dr.-Ing. Benjamin Kirsch, Katja Klauer, Dorothea Kölsch, Prof. Dr. Richard Leach, Prof. Dr.-Ing. habil. Barbara Linke, Anna-Pia Lohfink, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune, Indek Raid, Sebastian Rief, Samuel Schmidt, Dr.-Ing. Frank Schneider, Prof. Dr. Paul Scott, Dr.-Ing. Gerhard Stelzer, Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, Felix Ströer, Dr.-Ing. Francois Torner, Dr. Raimund Volk, Dr. Georg Wiora, Prof. Dr. Christiane Ziegler.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 926 „Bauteiloberflächen – Morphologie auf der Mikroskala“.

Mein weiterer Dank gilt allen Kollegen und Kolleginnen am Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik und im Dekanat des Fachbereichs Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Dem Geschäftsführer Dr.-Ing Marcus Ripp und Dr.-Ing. Carolin Sator, die sich beide außerordentlich für unsere Studierenden engagieren, danke ich auch für die gute Zusammenarbeit bei Themen des Studiengangmanagements und dafür, dass mir auch neben den Tätigkeiten im Dekanat immer genug Freiraum für Arbeiten in der Forschung blieb.

Zuletzt danke ich meinen Freunden und meiner Familie, besonders meinen Eltern Klaus und Claudia Eifler.

Kaiserslautern, im Juli 2019

Matthias Eifler

Zusammenfassung

Die geometrische Produktspezifikation steht - wie viele andere Industriezweige - vor einschneidenden Veränderungen. Durch Digitalisierung und Automatisierung ändern sich viele industrielle Rahmenbedingungen. Ziel dieser Arbeit ist es, die derzeitigen Trends für die industrielle Rauheitsmesstechnik systematisch zusammenzutragen. Basierend auf diesen Veränderungen werden korrespondierende eigene Forschungsarbeiten vorgestellt, welche an die gezogenen Schlussfolgerungen anknüpfen¹. Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Betrachtung technischer Oberflächen gewählt, welcher zunächst die fertigungstechnische Erzeugung deterministischer Rauheitsstrukturen analysiert. Anschließend werden die Beschreibung der resultierenden Topographiemerkmale mittels mathematischer Modelle und deren messtechnische Erfassung durch typische Topographie-Messgeräte untersucht. Weiterhin wird die hierauf aufbauende Charakterisierung der Oberfläche thematisiert, welche durch die Anwendung der Operationen Einpassung, Interpolation, Filterung und Berechnung von Rauheitskenngrößen gekennzeichnet ist.

Im Rahmen fertigungstechnischer Betrachtungen werden dabei neue Technologien für die Herstellung flächenhafter Kalibriernormale untersucht, welche stellvertretend für deterministische Rauheitsstrukturen dienen, die immer weitere industrielle Verbreitung finden, um funktionelle Bauteileigenschaften mithilfe der Oberflächenbeschaffenheit abzubilden. Als Fertigungsverfahren werden dabei das direkte Laserschreiben sowie das Mikrofräsen betrachtet.

Für die eigentliche Betrachtung dieser Oberflächen werden dabei Ansätze zur Modellierung von Rauheitseigenschaften untersucht, welche auf Methoden aus der Zeitreihenmodellierung basieren.

Die messtechnische Erfassung von Rauheitsstrukturen ist anschließend Gegenstand der Analyse des Übertragungsverhaltens. Dabei werden hier ebenfalls Modelle genutzt, um die Übertragung von Oberflächeneigenschaften durch technische Rauheitsmessgeräte zu modellieren.

Letzte Betrachtungen werden zur Auswertung von Rauheitskenngrößen angestellt. Dabei werden insbesondere die funktionsorientierten Rauheitskenngrößen untersucht, welche aufgrund der zunehmenden Komplexität technischer rauer Oberflächen verstärkt an Bedeutung gewinnen.

¹ Wesentliche Teile der Arbeiten wurden in einschlägigen Journal-Publikationen vorab veröffentlicht. Dies ist an entsprechender Stelle gekennzeichnet.

Abstract

The Geometrical Product Specification faces, just as many other industrial branches, significant changes. Caused by digitalization and automation many industrial frameworks change. The objective of this work is a systematic collection of the current trends in industrial roughness metrology. Based on these changes, corresponding examinations are introduced which are based on the drawn conclusions². In doing so, a holistic approach for the examination of technical surfaces is chosen that initially analyzes the manufacturing of deterministic rough surface structures. Subsequently, the description of the resulting topographic features with the aid of mathematical models and their metrological characterization with typical topography measuring instruments are examined. Building on this, the characterization of the surface is addressed based on the operations fitting, interpolation, filtering and calculation of roughness parameters.

In order to consider the manufacturing process, new technologies for the manufacturing of areal material measures are taken into account. These samples are representative for deterministic rough surfaces that gain more and more industrial relevance as they can image functional properties of a component based on their microstructures. For their manufacturing, direct laser writing and micro-milling are investigated.

Subsequently, the analysis of these surfaces is examined by applying approaches that are deduced from time series modeling for the description of their roughness properties.

The measurement of the rough surfaces is subsequently considered when the transfer behavior of measuring instruments is characterized. Also here, a modeling approach is chosen in order to describe the transfer of surface properties by industrial topography measuring instruments.

Lastly, analyses are conducted regarding the evaluation of roughness parameters. In doing so, especially function-oriented roughness parameters are examined that gain in importance due to the increasing complexity of rough component surfaces.

² Substantial parts of the work have been previously published in scientific journals. This is indicated at the corresponding location.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einführung & Begriffsdefinitionen	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Geometrische Produktspezifikation und Rauheitscharakterisierung.....	2
1.3 Abgrenzung und Einordnung der vorliegenden Arbeit.....	3
2 Fertigungsprozesse zur Erzeugung rauer Oberflächen	6
2.1 Fertigungstechnik - Einordnung und Tendenzen.....	7
2.2 Neue Fertigungsprozesse für flächenhafte Geometrienormale	10
2.2.1 Qualifikation des direkten Laserschreibens	12
2.2.2 Qualifikation von Mikrofräsprozessen	25
3 Raue Oberflächen	36
3.1 Raue Oberflächen - Einordnung und Tendenzen.....	36
3.2 Beschreibung rauer Oberflächen durch AR-, MA- und ARMA-Modelle	42
4 Übertragungsverhalten technischer Rauheitsmessgeräte	53
4.1 Übertragung rauer Oberflächen - Einordnung und Tendenzen	53
4.1.1 Grundsätzliche Rahmenbedingungen für Messungen der GPS.....	54
4.1.2 Übertragungsverhalten von Topographie-Messgeräten	58
4.2 Filtermodellierung zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens	62
5 Vorverarbeitung und Auswertung von Messdaten	84
5.1 Auswertung von Rauheit - Einordnung und Tendenzen	84
5.2 Untersuchung funktioneller Kenngrößen für optische Messverfahren	93

6 Fazit & Zusammenfassung	113
Anhang	115
Anhang A: Weitere Ergebnisse von mittels direktem Laserschreiben hergestellten Kalibriernormalen	115
Anhang B: Weitere Ergebnisse von mittels Mikrofräsen hergestellten Kalibriernormalen	120
Anhang C: Weitere Ergebnisse des ARMAseI-Modells	122
Anhang D: Weitere Ergebnisse der Untersuchung funktioneller Rauheitskenngrößen	124
Tabellenverzeichnis.....	126
Abbildungsverzeichnis.....	127
Stellungnahme zur Autorenschaft	128
Liste betreuter studentischer Arbeiten.....	130
Liste vorheriger Veröffentlichungen.....	131
Literaturverzeichnis	135
Lebenslauf des Verfassers	157

Formelzeichenverzeichnis

Kleinbuchstaben lateinisch

a	Koeffizient einer DGL
asd	mittlere quadratische Abweichung
b	Koeffizient einer DGL
b_R	Riefenbreite
d	Tiefenmaß bzw. Höhenmaß
dv	Abweichung zwischen optisch und taktil erfassten Rauheitskenngrößen
f	Ortsfrequenz
f_s	Abtastfrequenz
g	Gewichtsfunktion bzw. Impulsantwort
i	imaginäre Einheit
j	Laufvariable
k	Laufvariable
l	Abstandsmaß
l_{AR}	Anzahl AR-Parameter
l_{MA}	Anzahl MA-Parameter
m	Laufvariable
n	Laufvariable
\mathbf{n}	Tensor-Darstellung eines Rauschprofils
l_{res}	Maß für die laterale Auflösung bei Auswertung des Siemenssterns
p	Periodenlänge
r	Korrelationskoeffizient
s^2	empirische Varianz
s	empirische Standardabweichung
s_{res}^2	residuale Varianz
s_v	vertikale Zählschwelle
t_R	Riefentiefe
u	Laufvariable
v	Laufvariable
v_m	Messgeschwindigkeit
v_R	Riefenfläche
x	Koordinate einer lateralen Achse
\mathbf{x}	Tensor-Darstellung einer räumlichen Koordinate
x_a	laterale Koordinaten der Ist-Oberfläche
$x_{a,p}$	laterale Koordinaten des vorverarbeiteten Profils

$x_{a,v}$	laterale Koordinaten des virtuell gemessenen Werkstücks
x_g	laterale Koordinaten der geometrischen Oberfläche
$x_{w,v}$	laterale Koordinaten des virtuellen Werkstücks
y	Koordinate einer lateralen Achse
z	Höhenwerte einer Oberfläche
\mathbf{z}	Tensor-Darstellung der Höhenwerte
z	Variable der Z -Transformation
z_a	Höhenwerte der Ist-Oberfläche
$z_{a,p}^*$	Höhenwerte der vorverarbeiten, lateral gespiegelten Oberfläche
$z_{a,p}$	Höhenwerte der vorverarbeiten Oberfläche
$z_{a,v}$	Höhenwerte des virtuell gemessenen Werkstücks
z_{ali}	Höhenwerte einer ausgerichteten Oberfläche
z_{diff}	Höhenwerte des Differenzprofils
z_g	Höhenwerte der geometrischen Oberfläche
z_k	k -ter Wert der diskreten Profilhöhe
z_p	Höhenwerte eines künstlich generierten Rauheitsprofils
z_r	Höhenwerte eines normalverteilten Rauschprofils
z_w	Höhenwerte der wirklichen Oberfläche
$z_{w,v}$	Höhenwerte des virtuellen Werkstücks
z_σ	Höhenwerte als normalverteilte Zufallszahl

Großbuchstaben lateinisch

A	Neigungswinkel des Werkstücks
A_{tar}	Soll-Amplitude
\mathbf{A}	Tensor-Darstellung AR-Koeffizienten
AR	AR-Parameter
ACF	Autokorrelationsfunktion
B	Amplitudenfunktion
CCF	flächenhafte Kreuzkorrelation
CCF_p	profilhafte Kreuzkorrelation
$CCF_{p,max}$	maximale Kreuzkorrelation zweier Profile
$CCF_{p,min}$	minimale Kreuzkorrelation zweier Profile
\overline{CCF}_p	mittlere Kreuzkorrelation von Profilen
D	Diskretisierung von Steuerdaten
DS	Differenzmaß
$DS_{p,max}$	maximales Differenzmaß zweier Profile
$DS_{p,min}$	minimales Differenzmaß zweier Profile

$\bar{D}S_p$	mittleres Differenzmaß zweier Profile
D_x	Durchmesser in x -Richtung
D_y	Durchmesser in y -Richtung
G	Übertragungsfunktion
ITF	Instrumenten-Übertragungsfunktion
K	Zahl an Höhenwerten einer Topographie
L	Bahnabstand
M	Koeffizienten-Anzahl
\mathbf{M}	Tensor-Darstellung MA-Koeffizienten
MA	MA-Parameter
MWA	empirischer Mittelwert aller Amplituden
Mr_1	Materialanteil 1 nach DIN EN ISO 13565-2
Mr_2	Materialanteil 2 nach DIN EN ISO 13565-2
N	Zahl an Höhenwerten einer Topographie
N_t	Gesamtanzahl an Koeffizienten
OTF	optische Übertragungsfunktion
PE	Vorhersagefehler
PSD	Leistungsdichtespektrum
PSF	Punktspreizfunktion
$PSD1$	aus dem Profil berechnetes Leistungsdichtespektrum
$PSD2$	aus den ARMA-Koeffizienten berechnetes Leistungsdichtespektrum
PSD	Leistungsdichtespektrum in Tensor-Darstellung
P_{sm}	mittlere Rillenbreite nach DIN EN ISO 4287
Q	Koeffizienten-Anzahl
Q_a	Qualitätsparameter der mittleren Profilabweichung
Q	Tensor-Darstellung im ARMA-Modell
R	Radius
R_a	arithmetischer Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287
R_k	Kernrautiefe nach DIN EN ISO 13565-2
R_{max}	maximale Rautiefe
R_{mq}	Materialanteil R_{mq} nach DIN EN ISO 13565-3
R_{Opt}	optisch gemessener Rauheits-Kennwert
R_p	größte Spitzenhöhe nach DIN EN ISO 4287
R_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe nach DIN EN ISO 13565-2
R_{pq}	Plateauparameter R_{pq} nach DIN EN ISO 13565-3
R_q	quadratischer Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287
$R_{q,diff}$	quadratischer Mittenrauwert des Differenzprofils

R_t	Gesamthöhe nach DIN EN ISO 4287
R_T	Werkzeugradius
R_{Tak}	taktil gemessener Rauheits-Kennwert
R_{tip}	Tastspitzenradius
R_{vk}	reduzierte Riefentiefe nach DIN EN ISO 13565-2
R_{vq}	Talparameter R_{vq} nach DIN EN ISO 13565-3
R_z	größte Höhe nach DIN EN ISO 4287
S_a	flächenhafter arithmetischer Mittenrauwert nach DIN EN ISO 25178-2
$S_{a,tar}$	Soll-Wert des flächenhaften arithmetischen Mittenrauwerths
S_k	Kernhöhe nach DIN EN ISO 25178-2
S_{mq}	Materialanteil S_{mq} nach DIN EN ISO 25178-2
S_{mr1}	Materialanteil S_{mr1} nach DIN EN ISO 25178-2
S_{mr2}	Materialanteil S_{mr2} nach DIN EN ISO 25178-2
S_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe nach DIN EN ISO 25178-2
S_{pq}	Plateauabweichung nach DIN EN ISO 25178-2
S_q	flächenhafter quadratischer Mittenrauwert nach DIN EN ISO 25178-2
$S_{q,tar}$	Soll-Wert des flächenhaften quadratischen Mittenrauwerths
S_{vk}	reduzierte Talhöhe nach DIN EN ISO 25178-2
S_{vq}	Talabweichung nach DIN EN ISO 25178-2
SF	Strukturfunktion
\mathbf{Z}_w	Tensor-Darstellung der wirklichen Oberfläche
\mathbf{Z}_g	Tensor-Darstellung der geometrischen Oberfläche
\mathbf{Z}_a	Tensor-Darstellung der Ist-Oberfläche
\mathbf{Z}	allgemeine Tensor-Darstellung einer Topographie
$\bar{\mathbf{Z}}$	empirischer Mittelwert der Topographie-Höhe
X	Ergebnis der Z -Transformation
Z	kontinuierliches Frequenzspektrum einer Oberfläche
Z_a	frequenzabhängige Darstellung der Ist-Oberfläche
Z_d	diskretes Frequenzspektrum einer Oberfläche
Z_p	frequenzabhängige Darstellung eines künstlich generierten Rauheitsprofils
Z_r	frequenzabhängige Darstellung eines normalverteilten Rauschprofils
Z_w	frequenzabhängige Darstellung der wirklichen Oberfläche

Kleinbuchstaben griechisch

α	Rotationswinkel
α_{opt}	Rotationswinkel optisch gemessener Datensatz

α_{tact}	Rotationswinkel taktil gemessener Datensatz
σ	Standardabweichung
σ^2	Varianz
λ_c	Grenzwellenlänge Rauheit-Welligkeit nach DIN EN ISO 4287
λ_{\min}	kleinste auflösbare Wellenlänge
λ_s	Grenzwellenlänge der Rauheit nach DIN EN ISO 4287
ξ	Integrationskoordinate
τ	Verschiebung
υ	Übertragungsverhältnis
υ_v	virtuelles Übertragungsverhältnis
ω	Ortsfrequenz
$\boldsymbol{\omega}$	Tensor-Darstellung der Ortsfrequenz
ω_k	k -ter Wert der diskreten Ortsfrequenz

Großbuchstaben griechisch

Δt	Abtastschrittweite
Δx	Abstand in x -Richtung
Δy	Abstand in y -Richtung
Θ	Winkel zwischen den lateralen Achsen
Ω	diskrete Ortsfrequenz

Operatoren

$ARMA(\)$	Einpassung eines ARMA-Modells
$E[\]$	Erwartungswert
$M[\]$	Fertigungsoperator
$S[\]$	Abtastoperator
\otimes	Faltungsintegral
$\lceil \]$	Aufrundungsoperator

Abkürzungen

ACF	Autokorrelationsfunktion
AFM	Rasterkraftmikroskop
AR	autoregressives Modell
ARMA	Autoregressive-Moving-Average Modell
ARMA _{sel}	Algorithmus zur Modellauswahl
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DGL	Differentialgleichung

DIN	Deutsches Institut für Normung
DLW	Direktes Laserschreiben
EN	Europäische Norm
FFT	Fast Fourier Transformation
FIB	fokussierter Ionenstrahl
GPS	Geometrische Produktspezifikation
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITF	Instrumenten-Übertragungsfunktion
KM	Konfokalmikroskop
MA	Moving-Average Modell
MTF	Modulations-Übertragungsfunktion
MW	Mittelwert
NA	Numerische Apertur
OTF	optische Übertragungsfunktion
PSD	Leistungsdichtespektrum
PSF	Punktspreizfunktion
REM	Rasterelektronenmikroskop
UP	Ultra-Präzision
WLI	Weißlichtinterferometer
bzw.	beziehungsweise
et al.	und weitere
o.g.	oben genannt
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einführung & Begriffsdefinitionen

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Motivation der vorliegenden Arbeit. Weiterhin werden Begriffe aus der geometrischen Produktspezifikation (GPS) definiert. Auf dieser Basis erfolgt die Einordnung und Abgrenzung der vorgestellten Untersuchungen.

1.1 Motivation

Die Rahmenbedingungen im industriellen Umfeld ändern sich stetig, was auch Auswirkungen auf die Fertigungsmesstechnik hat [Sch09, S. 44]. Eine aktuelle Veränderung ist die immer stärkere Vernetzung der Produktion, welche unter der Bezeichnung „Industrie 4.0“ in den Fokus des produzierenden Gewerbes gerückt ist [Sen13, S. 1].

Neben diesen grundlegenden Veränderungen können Rahmenbedingungen, die in den letzten Jahren verstärkt zu massiven Veränderungen für die Fertigungsmesstechnik geführt haben, festgestellt werden:

Hochgenaue Fertigungsverfahren bieten neue Möglichkeiten zur Erzeugung definierter Bauteiloberflächen [Mee11, S. 180]. Hier können zwei unterschiedliche Trends erkannt werden: zum einen können Oberflächen und Bauteile immer häufiger mit einer so hohen Genauigkeit gefertigt werden, so dass eine umfassende messtechnische Überprüfung nicht notwendig ist [Kef15, S. 9]. Andererseits stellen die immer feineren und komplexeren Oberflächen, welche noch gemessen werden müssen, größere Herausforderungen für die Messgeräte dar, die zu ihrer Erfassung genutzt werden [Sch09, S. 44]. Die starke Vergrößerung der vorhandenen Rechenkapazitäten tritt u.a. aufgrund von kleineren elektronischen Bauteilen auf [Ham99, S. 43]. Dies führt in direktem Schluss zu neuen Herausforderungen für die GPS [Man12, S. 2], bietet aber auch neue Möglichkeiten, da hierdurch die Modellierung komplexerer physikalischer Zusammenhänge ermöglicht wird (vgl. z.B. im Allgemeinen [Lau13, S. 14], im Speziellen für die Fertigungsmesstechnik wurde dies im Rahmen von Vorarbeiten des Autors untersucht [Eif16a]). Da Messgeräte mit den komplexeren Oberflächen Schritt halten müssen, werden sie selbst aufgrund besserer Hard- und Software immer genauer und komplexer [Man12, S. 2] [Bos09, S. 28].

Aufgrund dieser zahlreichen Herausforderungen an die geometrische Messtechnik ist ein tiefgreifendes Verständnis von Messgeräten und Messprozessen wichtig. Für die Rauheitsmesstechnik ist der komplette Prozess von der Herstellung einer Oberfläche,

über deren Messung bis hin zur entsprechenden Auswertung relevant. Diese Arbeit soll einen Überblick über Tendenzen und Herausforderungen in all diesen Bereichen geben und fasst zugehörige, durchgeführte Forschungsarbeiten unter Beteiligung des Autors zusammen.

1.2 Geometrische Produktspezifikation und Rauheitscharakterisierung

Zunächst sei der Begriff der geometrischen Produktspezifikation (GPS) definiert. Hierzu wird in der Norm DIN EN ISO 14638 konstatiert:

„Geometrische Produktspezifikation (ISO GPS) ist das System, das zur Festlegung der geometrischen Anforderungen an Werkstücke in technischen Spezifikationen und den Anforderungen an ihre Verifizierung verwendet wird.“ [14638, S. 4]

Im Rahmen der GPS ist eine Vielzahl von Normen zu beachten, welche wiederum mit dem „GPS-Matrix-Modell“ (vgl. DIN EN ISO 14638 [14638]) katalogisierbar sind. Dieses ist in **Tabelle 1** [14638, S. 10] dargestellt.

Tabelle 1: Matrix-Modell der GPS-Normen nach DIN EN ISO 14638 [14638, S. 10]

	Kettenglieder						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symbole und Angaben	Anforderungen an Geometrielemente	Merkmale von Geometrielementen	Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung	Messung	Messgeräte	Kalibrierung
Größenmaß							
Abstand							
Form							
Richtung							
Ort							
Lauf							
Oberflächenbeschaffenheit: Profil							
Oberflächenbeschaffenheit: Fläche							
Oberflächenunvollkommenheit							

Dabei wird einmal nach verschiedenen Kettengliedern A-G und weiterhin nach unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften unterschieden [14638, S. 7 ff.]. Der Bereich der Rauheitscharakterisierung, mit dem sich diese Arbeit beschäftigt, ist dabei der profilhaften und flächenhaften Oberflächenbeschaffenheit zuzuordnen.

1.3 Abgrenzung und Einordnung der vorliegenden Arbeit

Diese Arbeit wird auf den markierten Bereich des GPS-Matrixmodells eingegrenzt, wobei im Speziellen der Bereich der Rauheitsmessung als Teilgebiet der Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit betrachtet wird. Rauheit ist in DIN 4760 als Gestaltabweichung 3.-5. Ordnung definiert [4760, S. 2] und beinhaltet im Wesentlichen Strukturgrößen im Mikrometer-Nanometer-Bereich (vgl. [4288, S. 7]).

Die vorliegende Arbeit nimmt eine möglichst umfassende Beschreibung aktueller Tendenzen und Herausforderungen in der Rauheitsmesstechnik vor. Dabei wird systematisch die komplette Fertigungsmesstechnik von der Fertigung definierter Oberflächen bis hin zur Auswertung z.B. standardisierter Rauheitskenngrößen untersucht. Auf Basis der herausgearbeiteten Tendenzen werden anschließend eigene Untersuchungen zu ausgewählten Themenfeldern präsentiert.

Die Struktur dieser Arbeit folgt dabei dem in **Abbildung 1** dargestellten Modell der Rauheitsmesstechnik als Teilgebiet der Fertigungsmesstechnik. Die eingeführten Begrifflichkeiten seien nachfolgend dargelegt: Ausgangspunkt eines Fertigungsprozesses ist die **geometrische Oberfläche**, welche repräsentiert ist durch die:

„ideale Oberfläche, deren Nennform durch die Zeichnung und/oder andere technische Unterlagen definiert wird.“ [4760, S. 1]

Tendenzen, welche die zugehörigen Vorgänge betreffen, werden in **Kapitel 2**: „Fertigungsprozesse zur Erzeugung technischer Oberflächen“ untersucht. Die Trends im Bereich von technischen Oberflächen sowie die Beschreibung der wirklichen Oberfläche werden in **Kapitel 3**: „Raue Oberflächen“ betrachtet. Die **wirkliche Oberfläche** ist dabei definiert als:

„die Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihn umgebenden Medium trennt.“ [4760, S. 1]

Die wirkliche Oberfläche wird dem Messgerät zugeführt, welches als Messdaten die **Istoberfläche** liefert, die:

„das messtechnisch erfasste, angenäherte Abbild der wirklichen Oberfläche eines Formelements“ [4760, S. 1]

beschreibt. Ab der wirklichen Oberfläche beginnt entsprechend das Aufgabengebiet der Messtechnik, die zur Erfassung ebenjener Oberfläche genutzt wird. Die hierbei auftretenden Vorgänge im Messgerät bilden die Grundlage für die Untersuchungen im Rahmen von **Kapitel 4**: „Übertragungsverhalten technischer Rauheitsmessgeräte“, welches das Übertragungsverhalten der jeweiligen Messeinrichtungen untersucht. Dabei werden sowohl generische Rahmenbedingungen der GPS als auch die Übertragung technischer Oberflächen durch Messgeräte betrachtet.

Fertigungsmesstechnik aus Sicht der Rauheitsmesstechnik

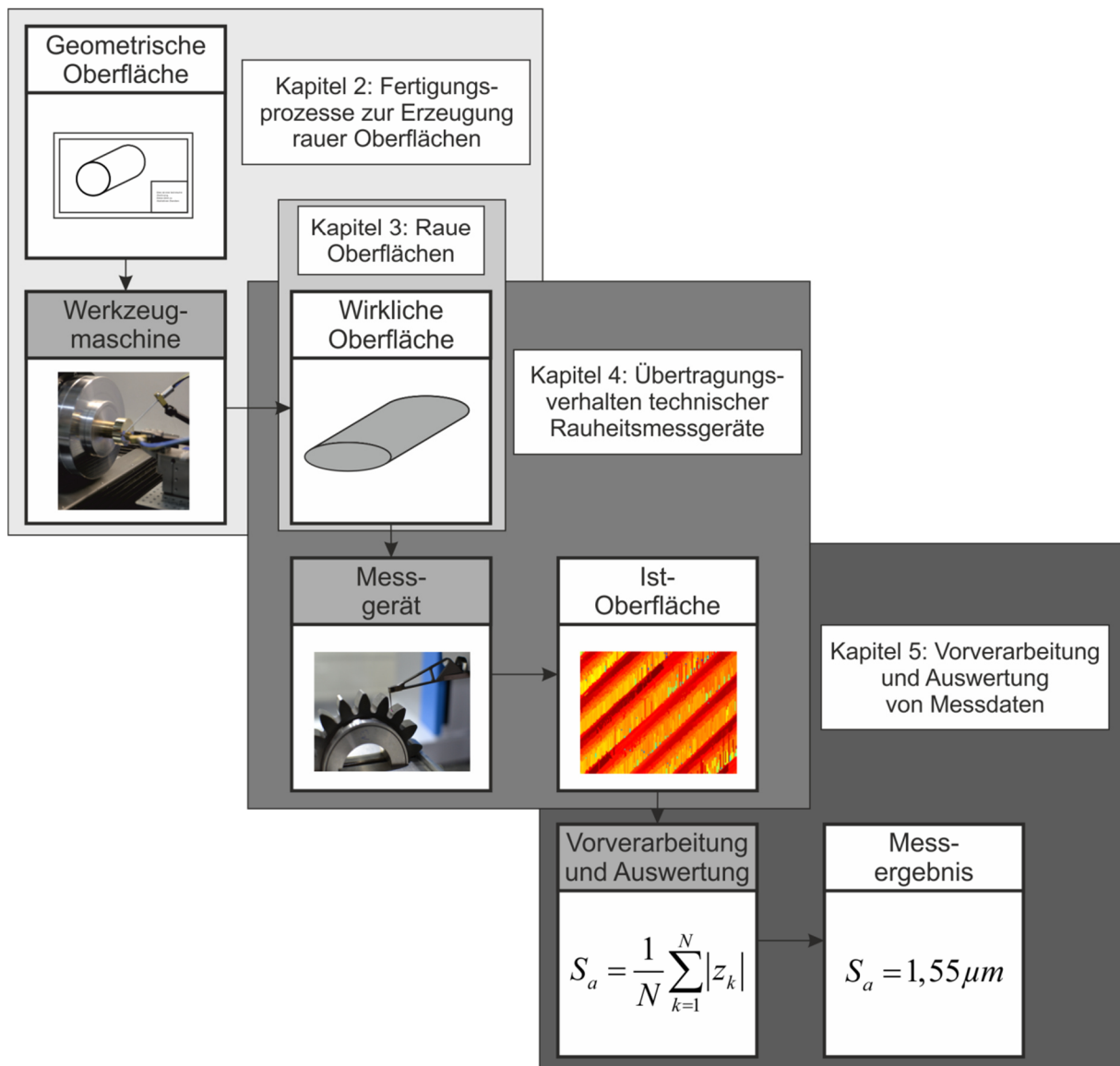


Abbildung 1: Einordnung der Rauheitsmesstechnik in die Fertigungsmesstechnik

Die so generierten Daten des Abbilds sind auszuwerten, wobei zunächst optional eine Vorverarbeitung erforderlich ist. Die tatsächliche Auswertung führt dann die Berechnung von gemessenen Eigenschaften der Oberfläche z.B. durch Datenverarbeitung mit Filtern oder Transformationen durch. Diese Themen werden im Rahmen von **Kapitel 5**: „Vorverarbeitung und Auswertung von Messdaten“ betrachtet.

In jedem Kapitel werden dabei zunächst aktuelle Entwicklungen und Trends diskutiert. Anschließend werden hierauf basierend ausgewählte eigene Untersuchungen durchgeführt und vorgestellt.

Für einige Anwendungsmöglichkeiten, z.B. die Auslegung von Geometrienormalen oder die Abschätzung der Messunsicherheit ist eine ganzheitliche Betrachtung auf die Rauheitsmesstechnik hilfreich. Für diese Anwendungen werden in **Kapitel 6** eine Zusammenfassung aller Ergebnisse sowie ein Ausblick gegeben.

2 Fertigungsprozesse zur Erzeugung rauer Oberflächen

Im folgenden Kapitel wird eine Einordnung von Fertigungsverfahren sowie aktueller Tendenzen zur Erzeugung technischer Oberflächen aus Sicht der Rauheitsmesstechnik durchgeführt. Weiterhin werden hierauf basierend zugehörige eigene Untersuchungen vorgestellt.

Wie in **Kapitel 1** verdeutlicht wurde, sollten die Prozesse Fertigung und Messung sinnvollerweise beide betrachtet werden, da sie Bestandteil der dargelegten Prozesskette der Fertigungsmesstechnik sind (vgl. **Abbildung 1**). Fertigungsverfahren sind in DIN 8580 definiert als:

„alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern“ [8580, S. 4].

Wie in **Abbildung 1** dargelegt wurde, kann der Fertigungsprozess dabei als Bindeglied zwischen geometrischer und wirklicher Oberfläche eingeordnet werden (vgl. DIN 4760 [4760]). Der entsprechende Ausschnitt des eingeführten Modells der Rauheitsmesstechnik, der die Fertigung betrifft, ist in **Abbildung 2** dargestellt. Ziel des Fertigungsverfahrens ist demnach die Erzeugung einer zur geometrischen Oberfläche möglichst ähnlichen wirklichen Oberfläche, die wiederum die tatsächliche Begrenzung des Bauteils repräsentiert [4287, S. 7]. Eine völlige Übereinstimmung dieser beiden Oberflächen ist allerdings nicht möglich, da dies einem Fertigungsprozess ohne Abweichung entsprechen würde [Bod92, S. 4].

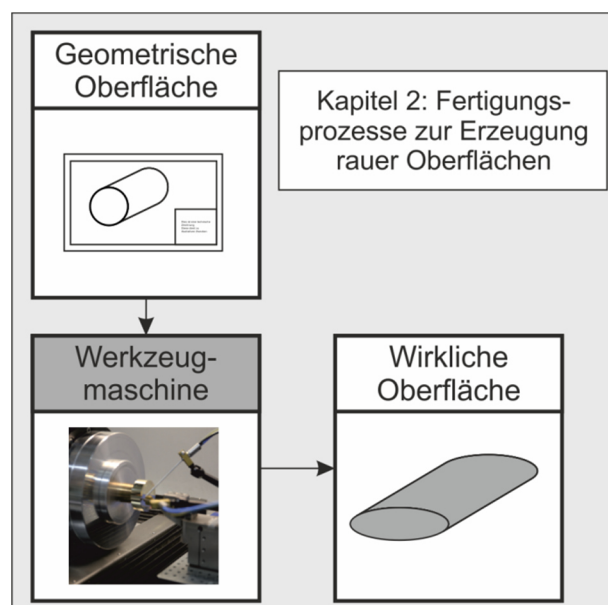


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses

Die Fertigung kann weiterhin auch signaltheoretisch interpretiert werden, wobei mit der wirklichen Oberfläche Z_w , der geometrischen Oberfläche Z_g sowie dem Fertigungsoperator $M[\cdot]$ gilt:

$$Z_w = M[Z_g]. \quad (1)$$

Problematisch ist dabei, dass die wirkliche Oberfläche Z_w immer auch gemessen werden muss und somit nie genau bekannt ist.

2.1 Fertigungstechnik - Einordnung und Tendenzen

Die Fertigungstechnik soll aus dem Kontext der Rauheitsmesstechnik heraus betrachtet und eingeordnet werden. Dabei werden entsprechende Tendenzen, die für die heutige Rauheitsmesstechnik von Relevanz sind, herausgestellt und auf Basis dieser Überlegungen eigene Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls vorgestellt werden.

Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist die Frage, welche Möglichkeiten zur Erzeugung technischer Oberflächen, die eine charakteristische Oberflächenrauheit aufweisen, bestehen. Hierfür typische Fertigungsprozesse sind spanende Fertigungsverfahren, die der dritten Hauptgruppe „Trennen“ zuzuschreiben sind (vgl. DIN 8580 [8580, S. 4]). Diese können u.a. in Fertigungsprozesse mit geometrisch bestimmter Schneide (z.B. Drehen, Bohren und Fräsen) und in Prozesse mit geometrisch unbestimmter Schneide (z.B. Schleifen, Honen und Läppen) unterteilt werden (vgl. [8580, S. 10]).

Je nach Fertigungsverfahren unterscheidet sich auch die sich ergebende Oberfläche, so dass häufig auch vom „Fingerabdruck“ des Fertigungsverfahrens gesprochen wird [Blu05, S. 431]: z.B. charakteristisch für Drehprozesse ist die durch den Vorschub der Werkzeugschneide resultierende kinematische Rauheit [Klo07, S. 57 f.], welche nach DIN 4760 einer Gestaltabweichung 3. Ordnung entspricht (vgl. [4760, S. 2]).

Bei Fertigungsprozessen mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie Schleifen, treten aufgrund der Kinematik der Verfahren i.d.R. weniger periodische Rauheitsstrukturen auf (vgl. [Klo05, S. 12]), so dass diese eher den Gestaltabweichungen 4. Ordnung zuzuweisen sind (vgl. [4760, S. 2]).

Für die Fertigungstechnik können folgende für die Rauheitsmesstechnik relevante Tendenzen herausgestellt werden:

- **Stärkere Verbreitung der Ultra-Präzisions-Zerspanung**

Aufgrund der stärkeren Etablierung der Nanotechnologie werden Oberflächen für Bauteile immer kritischer [Jia07, S. 2071]. Die Ultra-Präzisions-Zerspanung ist dabei den Verfahren der Nanotechnologie zugeordnet, kann immer bessere Fertigungsergebnisse erzielen und erfreut sich daher zunehmender Beliebtheit [Mee11, S. 183].

Ein Beispiel für die Anwendung von Ultra-Präzisions-Zerspanung ist dabei die Erzeugung von Raunormalen [Mee11, S. 184] [Hil97, S. 76], die u.a. auch vom Autor untersucht wurde [Eif16b, S. 1993 ff.]. Für spezielle Anwendungen ist die mit der Ultra-Präzisions-Zerspanung mögliche höhere Genauigkeit also erforderlich.

In einem von Tosello et al. veröffentlichten Ringvergleich zur flächenhaften Rauheitsbewertung wurde eine Vielzahl von identischen Normalen zur gleichzeitigen Messung repliziert (vgl. [Tos16, S. 530]), was ein Beispiel für den Fall ist, dass die Reproduzierbarkeit eines Fertigungsprozesses die der anschließenden Messung übersteigt.

- **Stärkere Verbreitung isotroper 3D-strukturierter sowie funktioneller Oberflächen**

Die zunehmende Fertigung von komplexen Oberflächenstrukturen mit funktionellen Eigenschaften [Jia07, S. 2085] [Lea13a, S. 5] stellt die Fertigungstechnik vor Herausforderungen. Wohingegen die klassische zerspanende Fertigung tendenziell eher statistisch verteilte Rauheitsstrukturen zur Folge hat [Jia07, S. 2085], werden heute verstärkt Verfahren zur Erzeugung von präzise definierten Rauheitsstrukturen eingesetzt [Lea13a, S. 5].

Aus diesem Grund wird, nachdem in Vorarbeiten bereits die Erzeugung definierter rauer Oberflächen mithilfe des Ultra-Präzisions-Drehens untersucht wurde [Eif16b] [Sch15b] [Sch15a] in **Kapitel 2.2.2** eine Untersuchung des Mikro-5-Achs-FräSENS zur Erzeugung verschiedener 3D-Rauheitsstrukturen vorgestellt. Außerdem erfolgt in **Kapitel 2.2.1** die Qualifizierung des direkten Laserschreibens, welches sich ebenfalls zur nanometergenauen Erzeugung von 3D-Rauheitsstrukturen eignet [Hoh15, S. 1].

- **Zunehmende Verbreitung von additiven Fertigungsverfahren**

Den Fertigungsverfahren, welche auf Basis additiver Fertigung funktionieren, liegt in den letzten Jahren ein „beachtlicher Entwicklungsfortschritt“ [Lac16, S. 1] zugrunde, so dass Lachmayer und Lippert von einem „Megatrend 3D-Druck“ [Lac16, S. 1]

sprechen. Gründe für dieses hohe Potential der Technologie sind neben je nach Einsatz möglichen wirtschaftlichen Vorteilen [Joh16, S. 32] insbesondere seine Möglichkeiten für die Herstellung individueller Werkstücke [Fel16, S. 5] [Gem16, S. 72] sowie zur dezentralen Organisation von Produktionsstätten [Fel16, S. 48].

Im Hinblick auf die Präzision dieser Fertigungstechnologie gibt es dabei aktuell große Fortschritte [Lac16, S. 1]. Aus diesem Grund werden in **Kapitel 2.2.1** Untersuchungen vorgestellt, inwiefern sich Verfahren der additiven Fertigung für eine Herstellung definierter technischer Rauheitsstrukturen eignen. Dabei wird die Fertigung von Kalibriernormalen mithilfe des bereits genannten direkten Laserschreibens (vgl. z.B. [Hoh15]) auf Basis von ersten Vorstudien [Eif15c] detailliert untersucht.

- **Genauere Modellierung sowie stärkere Verbreitung von Simulationen**

Z.B. für Spanprozesse sind in den letzten Jahrzehnten verschiedene neue Simulationsmöglichkeiten entstanden [Oki16, S. 46]. Heute können unter anderem atomistische Simulationen (vgl. [Gao16, S. 688 f.]) oder Simulationen auf Basis der Betrachtung von Kristalleigenschaften (vgl. [Bis16, S. 305 f.]) genutzt werden, um die Effekte, die bei der Zerspanung von Werkstücken auftreten, zu untersuchen.

Insbesondere für den Bereich der Fertigungsmesstechnik interessant ist jedoch die Vorhersage von gefertigten Rauheitsstrukturen. Die Vorhersage der kinematischen Rauheit bedingt durch die Werkzeugschneide (vgl. [Klo07, S. 57 f.]) und auch die Sicherstellung der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit deterministischer Rauheitsstrukturen können auf Basis von morphologischen Filteroperationen z.B. für Drehprozesse beschrieben werden [Krü07, S. 574]. U.a. vom Autor wurden hierzu weitergehende Untersuchungen zur Simulation von Drehprozessen und deren Fertigungsergebnis durchgeführt (vgl. [Eif16a, S. 105 ff.]). Raid et al. stellten weiterhin ein Modell zur Beschreibung des Einflusses verschiedener Prozessparameter des Drehens auf Drall- und Rauheitskenngrößen vor [Rai14, S. 282].

Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Untersuchungen werden verschiedene Fertigungsverfahren analysiert. Dabei werden neben dem direkten Laserschreiben auch Mikrofräsprozesse betrachtet sowie deren Eignung zur Fertigung von flächenhaften Kalibriernormalen flächendeckend untersucht.

2.2 Neue Fertigungsprozesse für flächenhafte Geometrienormale ³

Da eine flächenhafte Erfassung von Bauteiloberflächen mehr und mehr auch im industriellen Umfeld praktiziert wird⁴ [Lea13a, S. 6 f.], ist auch ein zunehmender Bedarf an Kalibriernormalen mit flächenhaften Eigenschaften festzustellen. Grundlage für die Anwendung der Maßverkörperungen wird die Norm DIN EN ISO 25178-600 bilden, welche sich im Entwurfsstadium befindet und die messtechnischen Merkmale definiert [25178-600, S. 19]. Der Begriff beschreibt dabei eine Eigenschaft, welche „die Messergebnisse beeinflussen kann“ [25178-600, S. 18]. Weitere Definitionen zu messtechnischen Merkmalen sind außerdem für einzelne Messprinzipien im Speziellen verfügbar (vgl. [25178-601], [25178-602], [25178-603], [25178-604]).

Die Aufgabe der Kalibriernormale, welche in DIN EN ISO 25178-70 standardisiert sind, kann es also entsprechend sein, für eine zuverlässige Abbildung von definierten Werten dieser Merkmale zu sorgen [25178-70, S. 5]. Die Norm DIN EN ISO 25178-700 befindet sich derzeit in Vorbereitung und wird als dritte erforderliche Komponente der Standardisierung dann die Ermittlung der messtechnischen Merkmale mithilfe von Maßverkörperungen beschreiben [25178-700]. Leach et al. stellen dabei einen umfassenden Überblick über flächenhafte Kalibrierverfahren dar [Lea15c, S. 797 ff.].

Um die Vielzahl messtechnischer Merkmale, welche zur Kalibrierung flächenhafter Topographie-Messgeräte erforderlich sind, abbilden zu können, werden in DIN EN ISO 25178-70 insgesamt 24 Arten von Geometrien, die als Kalibriernormale genutzt werden können, vorgestellt [25178-70, S. 7 f.]. Dabei lässt sich im Vergleich zu den profilhaften Normalen der Norm DIN EN ISO 5436-1 [5436-1] feststellen, dass die Normale deutlich vielseitigere und umfassendere Eigenschaften mithilfe ihrer Oberflächenstrukturen abbilden müssen.

Nicht zuletzt aufgrund der heute bis in die atomistische Größenordnung verfügbaren Höhenauflösungen von Messgeräten [Blu05, S. 433] müssen präzise Maßverkörperungen mit extrem kleinen Strukturgrößen verfügbar sein (vgl. z.B. [Koe11, S. 176]). Weiterhin von Vorteil sind Maßverkörperungen, welche Ähnlichkeiten zur Messaufgabe haben [Eif16a, S. 162]. Da Normale zur Rückführung von

³ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18c] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. Surf. Topogr.: Metrol. Prop. (6) 2018, 024010.

[Eif18b] Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: *Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography*. Procedia CIRP (71), 2018, S. 122-127.

⁴ Dieser Aspekt wird in **Kapitel 4** eingehend erläutert.

Messgeräten dienen, muss außerdem eine zeitliche Stabilität der Eigenschaften gewährleistet werden [5436-1, S. 3]. In welcher Art und Weise eine fertigungstechnische Realisierung von Normalen mit all diesen Eigenschaften zu erfolgen hat, wird in der Normung allerdings nicht spezifiziert.

Für die Herstellung flächenhafter Raunormale wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Fertigungsverfahren eingesetzt: Frühauf et al. stellten Lappen als Methode zur Erzeugung stochastischer Rauheits-Topographien vor [Frü16, S. 682] [Frü12, S. 133]. Nemoto et al. nutzten Ultra-Präzisions-Zerspanung zur deterministischen Erzeugung einer unter stochastischen Gesichtspunkten ausgelegten Topographie [Nem09, S. 3], wobei Leach et al. den Prozess um eine Elektroabformung zur kostengünstigen Vervielfältigung erweiterten [Lea14b, S. 2].

Aus dem Sektor der Ultra-Präzisions-Zerspanung ist dabei auch insbesondere der Prozess des Ultra-Präzisions-Drehens bereits für die Fertigung profilhafter Geometrienormale bekannt und untersucht (vgl. z.B. [Mee11, S. 184], [Krü07, S. 574] [Hil97, S. 76], [Eif16a, S. 105 ff.]). Weitere Möglichkeiten für profilhafte Strukturen sind Ätzen [Frü05, S. 1287] und Schleifprozesse [Krü04, S. 31] [Häs65, S. 380].

Uchida et al. nutzten die Fertigung mithilfe eines fokussierten Ionenstrahls (FIB), um raue 3D-Topographien zu erzeugen [Uch11, S. 569]. Chen et al. nutzten weiterhin die Technik der Elektronenstrahl-Lithographie sowie die additive Fertigungstechnologie des direkten Laserschreibens (DLW), um entsprechende Oberflächen abzubilden [Che13, S. 1]. Das erstgenannte Verfahren ist eine bekannte Möglichkeit zur Erzeugung von Normalen [Gao08, S. 4] [Lea15b, S. 546].

Das Verfahren DLW wurde ebenfalls in Untersuchungen des Autors eingesetzt, um Raunormale herzustellen [Eif15c, S. 1] und soll aufgrund seiner guten Eignung nachfolgend für das entsprechende Aufgabengebiet umfassender untersucht und qualifiziert werden. Außerdem wird die Ultra-Präzisions-Zerspanung weitergehend betrachtet. In diesem Rahmen soll die grundlegende Eignung von Mikrofräsprozessen zur Erzeugung von flächenhaften Kalibrierstrukturen, welche bei ersten Betrachtungen nachgewiesen wurde [Nem09 S. 3 ff.] [Lea14b, S. 2], weitergehend untersucht werden.

Bei der Untersuchung der beiden Fertigungsverfahren ist dabei die zentrale Frage, inwiefern mit den Methoden Normale generiert werden können, welche den o.g. hohen Anforderungen genügen.

2.2.1 Qualifikation des direkten Laserschreibens ⁵

Dass 3D-Druck ein Fertigungsverfahren ist, welches im Rahmen einer Digitalisierung und Dezentralisierung der Fertigung Potential aufweist, wurde in **Kapitel 2.1** bereits festgestellt (vgl. auch [Fel16, S. 48]). Dass das Grundprinzip des 3D-Drucks nicht nur für industrielle Anwendungen sinnvoll genutzt werden kann, sondern auch im Hinblick auf wissenschaftliche Anwendungen interessant ist, beweist das Verfahren des direkten Laserschreibens [Hoh15, S. 1].

Dieses wurden in den 1990er-Jahren entwickelt [Mar97, S. 132 ff.] und kann Strukturen erzeugen, deren Größenordnung sich im Bereich der technischen Rauheit befindet (vgl. [Mar97, S. 134]). Aus diesem Grund soll das Verfahren in Bezug auf die Erzeugung verschiedener Normale für messtechnische Anwendungen der Rauheitsmesstechnik untersucht werden.

Neben den im Rahmen von Vorarbeiten durchgeführten Untersuchungen zur Fertigung eines Normals des Typs AIR [25178-70, S. 26 f.] nach DIN EN ISO 25178-70, welche die grundsätzliche Machbarkeit demonstrierten [Eif15c, S. 7 ff.], sind außerdem Studien zu den Fertigungsparametern des DLW durchgeführt worden, um eine Verbesserung des Fertigungsergebnisses und eine möglichst optimale Parameterauswahl zu ermöglichen [Str17, S. 23 ff.]. Auf Basis dieser Vorarbeiten soll eine möglichst vollumfängliche Machbarkeitsstudie zur Fertigung der Normale nach DIN EN ISO 25178-70 mithilfe des Verfahrens DLW durchgeführt werden. Vorteil ist dabei die Flexibilität dieses Fertigungsverfahrens, die dazu führt, dass eine Vielzahl variabler Normale in einem Fertigungsprozess auf dem Substrat (Träger der Normale) aufgebracht werden kann. Aus diesem Grund wurden zwei Proben mithilfe von DLW erzeugt, die jeweils eine möglichst hohe Anzahl verschiedener Normale für die Kalibrierung von Rauheitsmessgeräten nach DIN EN ISO 25178-70 aufweisen. Die beiden Proben weisen die gleichen Typen an Normalen, aber unterschiedliche geometrische Parameter der jeweiligen Geometrien auf. Geometrien, die entweder eine Untermenge anderer Geometrien sind⁶ oder nicht für die Kalibrierung von Rauheitsmessgeräten vorgesehen sind, wurden, wie auch das Normal des Typs AIR, welches vorab untersucht wurde (vgl. [Eif15c, S. 7 ff.]), nicht gefertigt.

⁵ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18c] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. Surf. Topogr.: Metrol. Prop. (6) 2018, 024010.

⁶ So ist z.B. die rechteckige Rille (Typ PGR) als eine Untermenge des periodischen Rechteckgitters (Typ PPR) zu interpretieren und somit keine Fertigung des Typs PGR erforderlich (vgl. DIN EN ISO 25178-70 [25178-70, S. 10 ff.]).

Ein Mikroskop-Bild der Probe, welche die Geometrien mit größeren Strukturbreiten im Vergleich zur anderen Probe abbildet, und insgesamt 18 standardisierte Normale aufweist, die jeweils eine Größe von $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ aufweisen, ist in **Abbildung 3** dargestellt und nach der Norm DIN EN ISO 25178-70 beschriftet.

Durch Anfertigen von Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) konnte gezeigt werden, dass bei beiden Proben eine Fertigung gemäß den geometrischen Vorgaben möglich war. Auf Basis dieser qualitativen Beurteilung scheint die Methode des direkten Laserschreibens gut für die Herstellung von nahezu beliebigen Kalibriernormalen nach DIN EN ISO 25178-70 geeignet zu sein. Die Aufnahmen einiger Geometrien sind exemplarisch in **Abbildung 4** dargestellt.

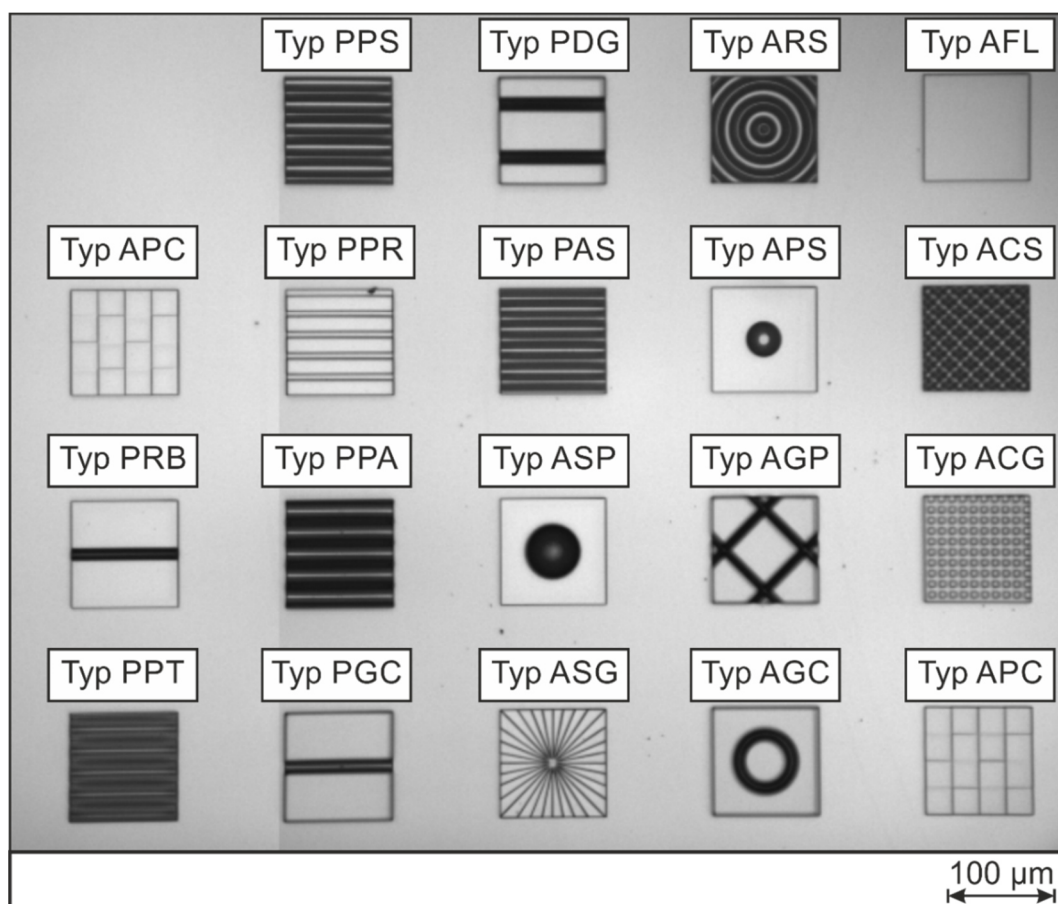


Abbildung 3: Lichtmikroskop-Aufnahme einer mit DLW hergestellten Probe, gefertigt wurden 18 Geometrien nach DIN EN ISO 25178-70

Zur tiefgreifenden Analyse der Qualität der Fertigung soll nachfolgend ebenfalls eine quantitative Beschreibung sowie eine messtechnische Charakterisierung mit verschiedenen Topographie-Messgeräten durchgeführt werden. Diese Erfassung wurde dabei neben dem Rasterelektronenmikroskop auch unter Anwendung eines Rasterkraftmikroskops (AFM, Nanosurf NaniteAFM) ausgeführt. Weiterhin wurden als

typische industrielle optische Messgeräte ein Konfokalmikroskop (KM, NanoFocus μ Surf), welches variable Objektivvergrößerungen aufweist sowie ein Weißlichtinterferometer (WLI, Zygo Nexview 8000) genutzt, um entsprechende Vergleichsdaten zu generieren.

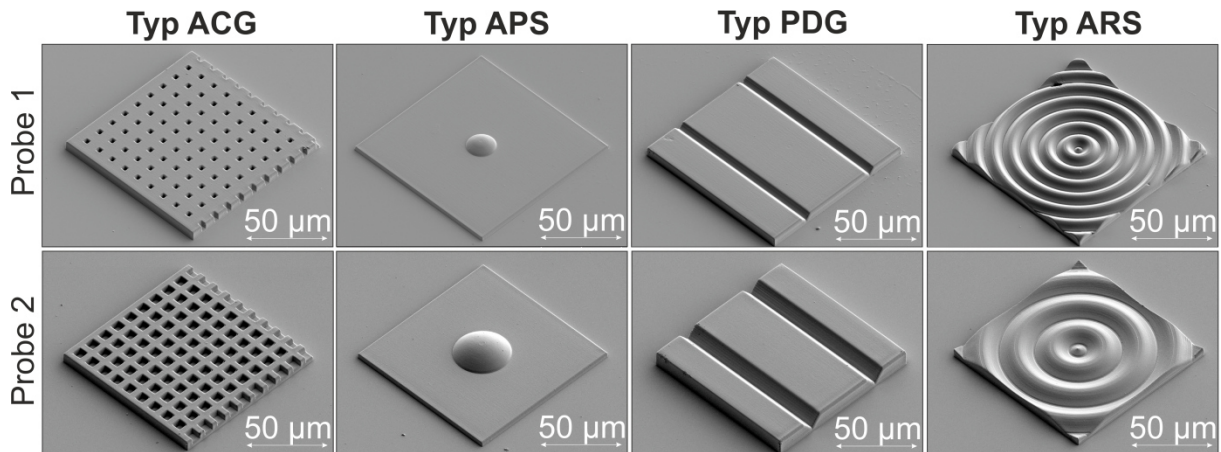


Abbildung 4: Beispielfähige REM-Aufnahmen einiger Geometrien nach DIN EN ISO 25178-70

Entsprechend sollten sich auf Basis der Ergebnisse neben der Beurteilung des Fertigungsverfahrens DLW auch Informationen zur industriellen Anwendbarkeit der entsprechend resultierenden Kalibriernormale gewinnen lassen.

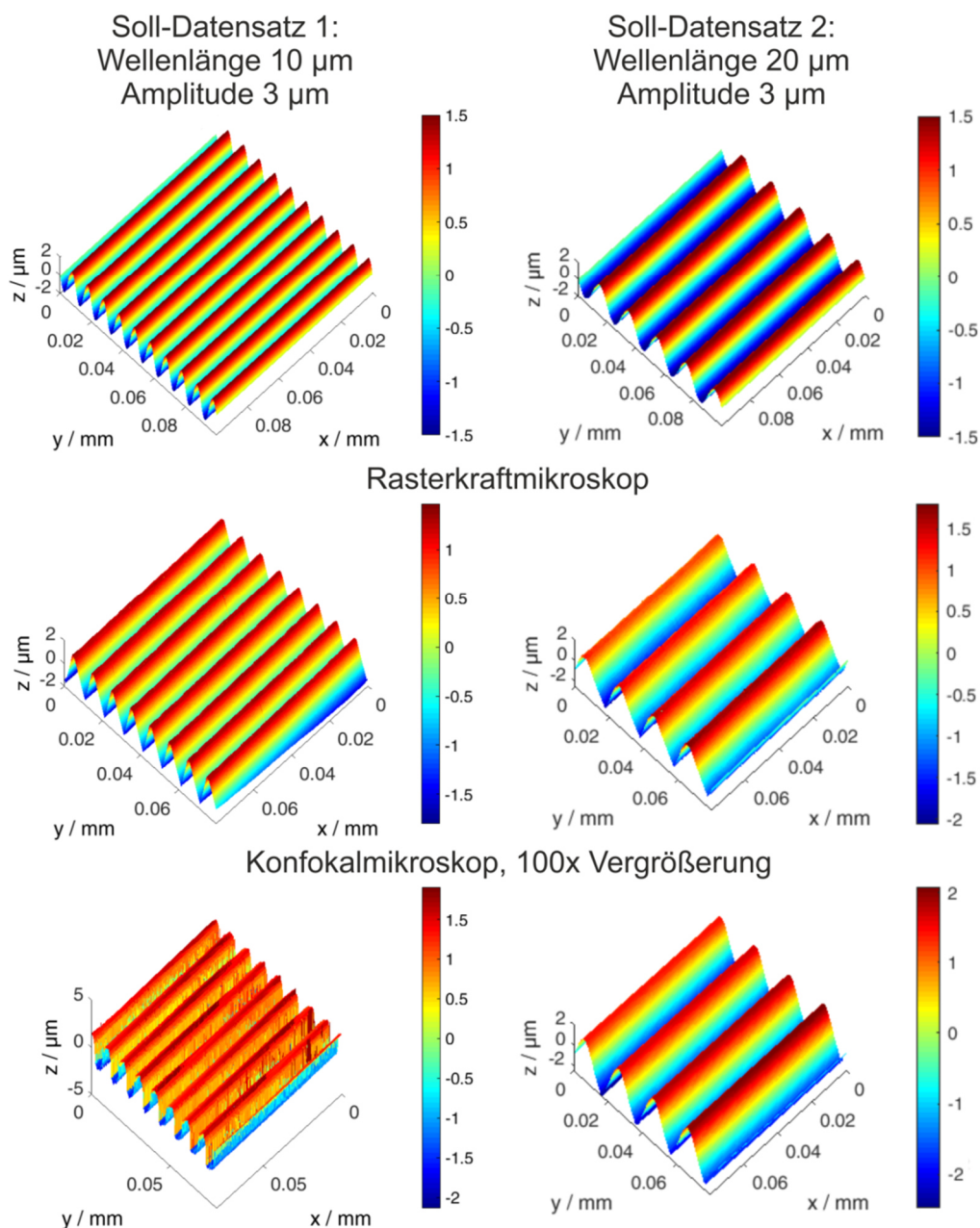
Nach Erfassung der zugehörigen Oberflächentopographien wurde eine einheitliche Vorverarbeitung implementiert, welche zunächst den zentralen Auswertebereich in der Mitte jeder einzelnen Struktur definierte. Dieser $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ große Bereich wurde anschließend von seiner Nennform getrennt, indem eine eingepasste Ebene subtrahiert wurde, bevor im Anschluss die jeweils in DIN EN ISO 25178-70 definierten Messgrößen berechnet und mit den Soll-Werten verglichen wurden. Diese Messgrößen beinhalten häufig auch die normgerechte Auswertung der im Rahmen von **Kapitel 5** untersuchten Rauheitsparameter.

Nachdem grundsätzlich bereits demonstriert wurde, dass eine Fertigung nahezu beliebiger Normale möglich ist, sollen nachfolgend exemplarisch einige Topographie-Messergebnisse der aufgezählten Messgeräte vorgestellt werden. Alle 18 in **Abbildung 3** dargestellten Typen von Normalen wurden dabei in zwei verschiedenen geometrischen Variationen hergestellt.

Aus der Gruppe der periodischen profilhaften Geometrien sind in **Abbildung 5** exemplarisch die gemessenen Topographien des Typs PPS nach DIN EN ISO 25178-70 nach der beschriebenen Vorverarbeitung dargestellt. Dabei wurden zwei

verschiedene Varianten mit unterschiedlicher Wellenlänge untersucht und es kann festgestellt werden, dass die messtechnisch erfassten Topographien mit den Methoden AFM, KM 100x und WLI sehr gut mit den dargestellten Soll-Geometrien beider Wellenlängen in Einklang stehen. Die KM 60x Messungen weichen aufgrund der geringeren Vergrößerung insbesondere bei der kurzwelligen Probe 1 ab, wobei optische Artefakte aufgrund lokal auftretender hoher Oberflächensteigungen auftreten. Die Wellenlänge von $10\ \mu\text{m}$ dieser Probe unterscheidet sich dabei nicht wesentlich von der Auflösungsgrenze des Messgerätes und kann nicht mehr zuverlässig erfasst werden. Wird die Probe 2 betrachtet, welche eine höhere Wellenlänge abbildet, so ist dieser Effekt nicht mehr in gleichem Maße zu beobachten.

Typ PPS nach DIN EN ISO 25178-70



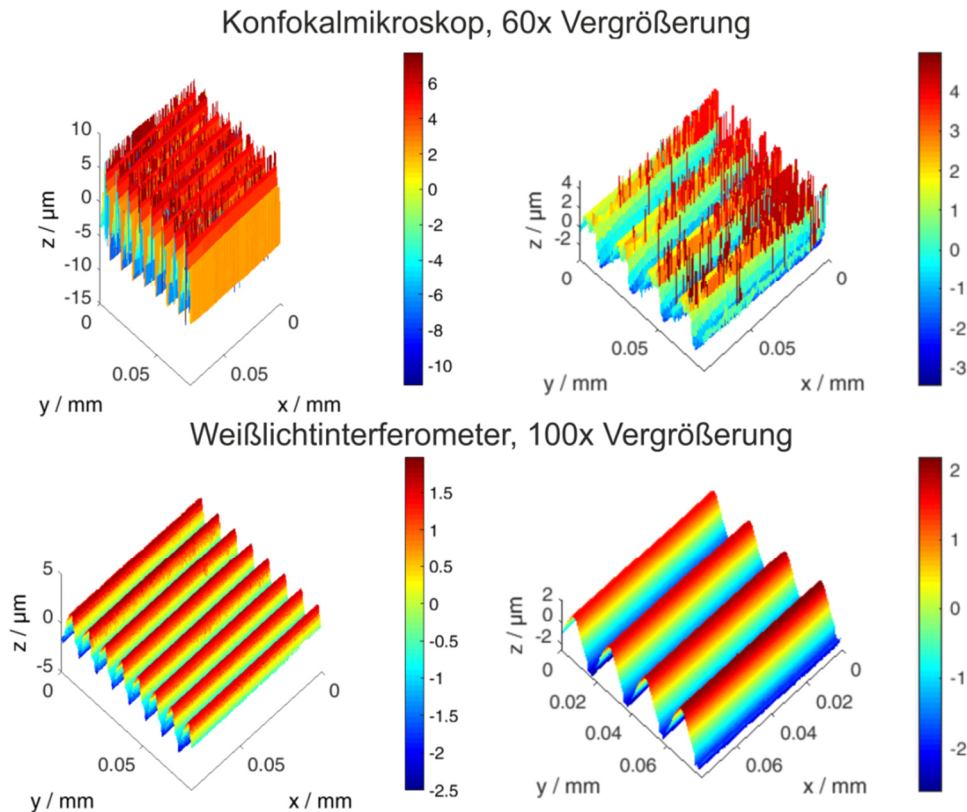


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen Topographien für die beiden Varianten des Normals PPS nach DIN EN ISO 25178-70 für verschiedene Messprinzipien. Soll-Geometrie, Rasterkraftmikroskop (AFM), Konfokalmikroskop (KM) 60x und 100x sowie Weißlichtinterferometer (WLI) 100x

Neben einem direkten Vergleich der messtechnisch erfassten Topographien sollen weiterhin die Messgrößen nach DIN EN ISO 25178-70 analysiert werden, welche für beide Geometrien in **Tabelle 2** zusammengefasst sind. Die Werte der Periodenlänge P_{sm} wurden dabei im $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ großen Auswertebereich je nach Wellenlänge auf Basis von sieben bzw. drei Perioden berechnet. Als weitere Parameter sollen die flächenhaften Rauheitskenngrößen S_a und S_q zur Beurteilung der Übereinstimmung zu den Soll-Geometrien dienen, die nach der beschriebenen Vorverarbeitung ermittelt wurden.

Hierbei lassen sich die Beobachtungen, die auf Basis der Topographien getroffen wurden, bestätigen: die laterale Auswertungsgröße P_{sm} stimmt für alle Messgeräte gut überein, die Horizontalkenngrößen S_a und S_q weisen außer bei den artefaktbehafteten Messungen des KM unter Anwendung einer 60x Vergrößerung ähnliche Werte wie die Soll-Größen auf.

Zusätzlich zu den im Detail dargelegten Ergebnissen der Sinus-Struktur treten ebenfalls identische Befunde bei den anderen periodischen profilhaften Normalen

nach DIN EN ISO 25178-70 auf, welche die Typen PPT, PPR, PPA und PAS umfassen (vgl. **Anhang A**).⁷

Tabelle 2: Messergebnisse S_a , S_q und P_{sm} bei Auswertung des Normals Typs PPS nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ PPS (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$
Soll-Größen	0,95	1,06	10	0,95	1,06	20
AFM (1 Messung)	0,79	0,90	10,0	0,85	0,97	20,5
KM 60x (4 Messungen)	3,43 ±0,03	3,79 ±0,22	10,1 ±0,0	1,27 ±0,02	1,51 ±0,04	20,2 ±0,1
KM 100x (4 Messungen)	1,25 ±0,07	1,30 ±0,06	10,1 ±0,0	1,14 ±0,01	1,29 ±0,01	19,9 ±0,4
WLI 100x (1 Messung)	1,11	1,24	10,3	1,17	1,34	20,9

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die rechteckige Struktur (Typ PPR) aufgrund der für das AFM recht großen Amplitude bei der kurzen Wellenlänge deutlich stärker als die KM Messungen von den Soll-Daten abweicht. Die bogenförmige Geometrie (Typ PPA) stimmt hingegen insbesondere bei der KM 100x und WLI 100x Messung gut überein. Mit dem AFM lässt sich weiterhin die Probe mit der kleineren Strukturweite und -höhe gut messen, wohingegen die 60x Vergrößerung bei beiden Geometrien wiederum zu optischen Artefakten führt. Bei Betrachtung der angenäherten Sinusform (Typ PAS) sowie der periodischen Dreiecksform (PPT) weicht nur die KM 60x Messung der 10 μm breiten Strukturen ab, alle anderen Topographien korrespondieren zu den Soll-Daten der Fertigung.

Ebenfalls bei Untersuchung der weiteren profilhaften Geometrien lassen sich übereinstimmende Ergebnisse erzielen: das Tiefeneinstellnormal (Typ PGC) wurde unter Zugrundelegung aller aus der 3D-Topographie extrahierbaren Einzelprofile orthogonal zur Rillenrichtung wie in DIN EN ISO 5436-1 vorgeschrieben ausgewertet. Es wurden hier zwei verschiedene Soll-Rillentiefen untersucht (3 μm und 6 μm): Bei

⁷ Alle Parameterauswertungen wurden in der Publikation:

[Eif18c] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. Surf. Topogr.: Metrol. Prop. (6) 2018, 024010 dargelegt. Die Parameter finden sich außerdem in **Anhang A**.

der kleinen Rillentiefe liefern alle untersuchten Messgeräte reproduzierbare Ergebnisse. Die $6 \mu\text{m}$ große Rillentiefe verursacht aufgrund der für das Messprinzip recht hohen Amplitude Abweichungen bei der AFM-Messung. Die gemessenen Rillentiefen der anderen Messungen stimmen ansonsten gut mit den Soll-Werten überein. Weiterhin können bei den KM 60x Auswertungen wieder optische Artefakte an den Stellen steiler Winkel beobachtet werden. **Tabelle 3** gibt einen Überblick über die gemessenen Rillentiefen aller Einzelauswertungen.

Tabelle 3: Messergebnisse d (Rillentiefe) bei Auswertung des Normals Typs PGC nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ PGC (DIN EN ISO 25178-70)		
	Soll-Datensatz 1	Soll-Datensatz 2
	$d / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$
Soll-Größen	3	6
AFM (319 bzw. 329 Auswertungen)	3,01 \pm 0,06	2,69 \pm 0,22
KM 60x (612 Auswertungen)	3,94 \pm 0,10	7,52 \pm 1,95
KM 100x (1024 Auswertungen)	3,28 \pm 0,61	6,30 \pm 0,39
WLI 100x (733 Auswertungen)	3,51 \pm 0,02	6,53 \pm 0,25

Wird die Geometrie Doppelrinne (Typ PDG) untersucht, so treten auch hier an den beiden Rillen, die allerdings eine dreieckige Form haben und am Rillengrund abgerundet sind, ähnliche Effekte auf: Die KM 60x Messung kann die steilen Winkel am Übergang von den Rillen zur Ebene nicht hinreichend abbilden und insbesondere bei dem hohen Wert der Rillentiefe treten bei Auswertung der Rillentiefen d_1 und d_2 Abweichungen bei allen Messgeräten auf. Die laterale Auswertegröße l , welche den lateralen Abstand der beiden Rillen charakterisiert, ist hingegen sehr reproduzierbar messbar. **Tabelle 4** fasst die genannten Auswertegrößen bei Anwendung der verschiedenen Messverfahren zusammen.

Als letztes profilhaftes Normal wurde das Normal Rasierklinge (Typ PRB) untersucht, wobei hier im Vergleich der zwei untersuchten Varianten trotz auftretender Artefakte festgestellt werden kann, dass die größere Geometrie eher vergleichbare Ergebnisse bei den untersuchten Messprinzipien lieferte (vgl. **Anhang A**).

Tabelle 4: Messergebnisse d_1 , d_2 (Rillentiefen) sowie l (Rillenabstand) bei Auswertung des Normals Typs PDG nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ PDG (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$d_1 / \mu m$	$d_2 / \mu m$	$l / \mu m$	$d_1 / \mu m$	$d_2 / \mu m$	$l / \mu m$
Soll-Größen	3	3	50	6	6	50
AFM (1 Messung, alle Einzelprofile)	2,68 ±0,02	2,71 ±0,02	49,8	3,72 ±0,09	3,48 ±0,11	49,5
KM 60x (4 Messungen, alle Einzelprofile)	3,90 ±0,85	3,82 ±1,66	50,3 ±0,1	3,60 ±1,71	2,55 ±1,01	50,5 ±0,7
KM 100x (4 Messungen, alle Einzelprofile)	2,31 ±0,76	3,00 ±0,44	50,6 ±0,1	4,65 ±1,62	3,86 ±1,95	50,2 ±0,9
WLI 100x (1 Messung, alle Einzelprofile)	3,77 ±0,05	3,36 ±0,06	50,9	7,49 ±0,04	7,43 ±0,06	51,1

Neben den profilhaften Geometrien wurden ebenfalls die flächenhaften Normale aus DIN EN ISO 25178-70 untersucht: Bei dem Normal mit senkrechten Rillen (Typ AGP) wurden ebenfalls in Analogie zur Doppelrille (PDG) die Tiefen und Abstände zwischen den Rillen ausgewertet. Als weitere in der Norm definierte Messgröße wurde der Winkel zwischen den beiden Symmetrielinien der Rillenpaare ermittelt. Auch hier stellen die Rillen, die zwar vom WLI mit der 100x Vergrößerung für alle vier Rillen in guter Übereinstimmung gemessen werden können, ansonsten allerdings aufgrund der o.g. Effekte Abweichungen hervorrufen, eine große messtechnische Herausforderung dar. Die lateralen Auswertegrößen sind hingegen bei allen Messgeräten in besserer Übereinstimmung (vgl. **Anhang A**).

Ähnliche Beobachtungen ergeben sich bei der kreisförmigen Rille (Typ AGC), bei der ebenfalls bei der $6 \mu m$ tiefen Rille die WLI 100x Messung die geringste Abweichung der Rillentiefe aufweist und allerdings im Gegensatz zum Typ AGP auch bei der $3 \mu m$ Rille gute Ergebnisse - außer mit der 60x Vergrößerung - erzielt werden können. Die laterale Größe des Rillendurchmessers wurde von allen Messgeräten mit durchschnittlichen Abweichungen von maximal $0,3 \mu m$ zum Soll-Wert zuverlässig erfasst.

Wird das flächenhafte Normal Halbkugel (Typ ASP) betrachtet, so ist wiederum die adäquate Erfassung der steilen Kanten problematisch. Das AFM verfügt über keinen hinreichend großen Messbereich, wohingegen WLI und KM für den kleineren der

beiden Kreisdurchmesser zu den Soll-Vorgaben vergleichbare Rauheitskenngrößen S_a und S_q ermitteln können, obgleich bei der 60x Vergrößerung die beschriebenen Artefakte am steilen Übergang von Ebene zu Halbkugel erzeugt werden. Ein größerer Halbkreisdurchmesser bei der zweiten Probe führt zu deutlich größeren Abweichungen.

Für das ähnlich gestaltete Normal Ebene-Kugel (Typ APS) wurden neben diesen flächenhaften Rauheitskenngrößen außerdem noch die Höhendifferenz zwischen Kugelmaximum und Referenzfläche d sowie die Kugeldurchmesser in x sowie y -Richtung (D_x, D_y) ermittelt. **Tabelle 5** fasst die Messergebnisse zusammen, wobei die lateralen Auswertegrößen tendenziell besser übereinstimmen und bei der Höhe der Kugel die KM 60x Messungen am stärksten von den Soll-Vorgaben abweichen.

Tabelle 5: Messergebnisse Parameter S_a, S_q, d (Kugelhöhe) sowie D_x, D_y (Kugeldurchmesser) bei Auswertung des Normals Typs APS nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ APS (DIN EN ISO 25178-70)										
	Soll-Datensatz 1					Soll-Datensatz 2				
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$d / \mu m$	$D_x / \mu m$	$D_y / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$d / \mu m$	$D_x / \mu m$	$D_y / \mu m$
Soll-Größen	0,10	0,32	3	16,4	16,4	0,71	1,22	6	32,4	32,4
AFM (1 Messung)	0,14	0,42	3,72	15,7	18,2	0,88	1,46	7,22	32,3	37,0
KM 60x (4 Messungen)	0,09 $\pm 0,00$	0,40 $\pm 0,00$	4,73 $\pm 0,00$	15,9 $\pm 0,5$	16,8 $\pm 0,2$	0,48 $\pm 0,09$	1,01 $\pm 0,11$	4,41 $\pm 0,57$	33,9 $\pm 0,3$	33,2 $\pm 0,8$
KM 100x (4 Messungen)	0,15 $\pm 0,00$	0,45 $\pm 0,00$	3,69 $\pm 0,02$	16,5 $\pm 0,1$	16,8 $\pm 0,4$	0,96 $\pm 0,01$	1,59 $\pm 0,01$	7,41 $\pm 0,02$	32,9 $\pm 0,1$	33,4 $\pm 0,1$
WLI 100x (1 Messung)	0,15	0,44	3,81	16,4	16,3	0,97	1,58	7,50	32,7	32,8

Die gute Übereinstimmung lateraler Auswertegrößen lässt sich ebenfalls beim Kreuzgitter-Normal (Typ ACG) beobachten, bei dem mit den beiden Gitterkonstanten l_x und l_y ebensolche Größen sowie zusätzlich der Winkel θ zwischen den beiden lateralen Achsen ausgewertet wurden. Die Gitterkonstanten werden wie in **Tabelle 6** dargestellt reproduzierbar gemessen, nur das AFM erfasst in der x -Richtung lediglich im Mittel 9,2 statt 10 μm . Dies lässt sich mit der taktilen Abtastung begründen, welcher eine Vorzugsrichtung zugrunde liegt.

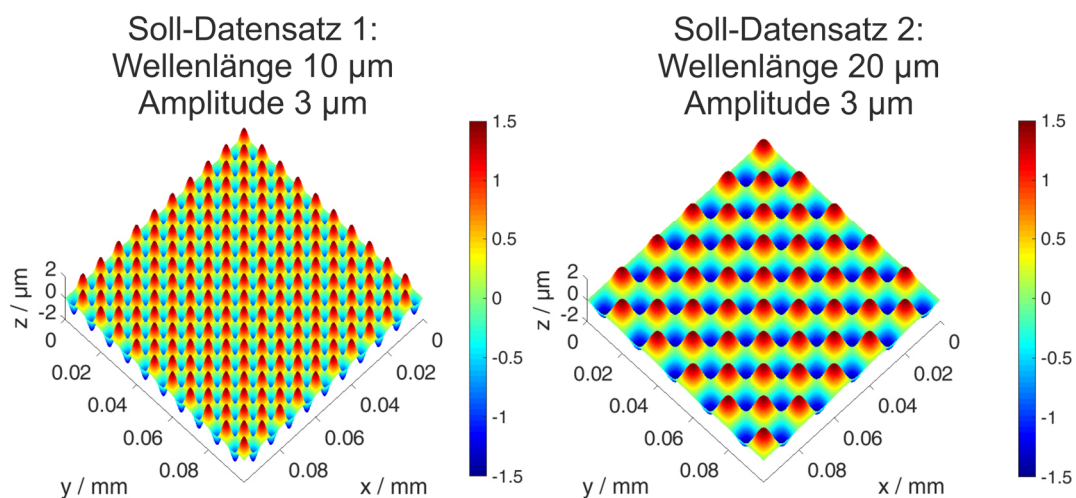
Tabelle 6: Messergebnisse Parameter l_x , l_y (Gitterkonstanten) sowie Θ (Winkel zwischen den lateralen Achsen) bei Auswertung des Normals Typs ACG nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ ACG (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$l_x / \mu\text{m}$	$l_y / \mu\text{m}$	$\Theta / ^\circ$	$l_x / \mu\text{m}$	$l_y / \mu\text{m}$	$\Theta / ^\circ$
Soll-Größen	10	10	90	10	10	90
AFM (1 Messung)	9,2 $\pm 0,2$	10,0 $\pm 0,1$	88,4	9,2 $\pm 0,3$	9,9 $\pm 0,3$	89,4
KM 60x (4 Messungen)	10,0 $\pm 0,5$	10,1 $\pm 0,2$	89,7 $\pm 0,2$	10,0 $\pm 0,1$	10,1 $\pm 0,1$	89,7 $\pm 0,2$
KM 100x (4 Messungen)	10,0 $\pm 0,2$	10,2 $\pm 0,4$	89,8 $\pm 0,1$	10,0 $\pm 0,1$	10,0 $\pm 0,2$	89,9 $\pm 0,1$
WLI 100x (1 Messung)	10,1 $\pm 0,1$	10,2 $\pm 0,1$	89,8	10,0 $\pm 0,1$	10,2 $\pm 0,1$	89,8

Auch die gekreuzte Sinusstruktur (Typ ACS) bestätigt, wie bei Betrachtung der Rauheitskenngrößen im **Anhang A (Tabelle 20)** sowie einiger gemessener Topographien in **Abbildung 6** ersichtlich wird, die bisherigen Ergebnisse. Dies trifft ebenfalls auf die radiale Sinuswelle (vgl. **Tabelle 20** in **Anhang A**, Typ ARS) zu.

Ein Normal zur Kalibrierung der Auflösungsfähigkeit eines Topographie-Messgerätes ist der sogenannte Siemens-Stern (Typ ASG), für den Giusca und Leach [Giu13, S. 2 ff.] eine Möglichkeit zur Auswertung beschrieben.

Typ ACS nach DIN EN ISO 25178-70



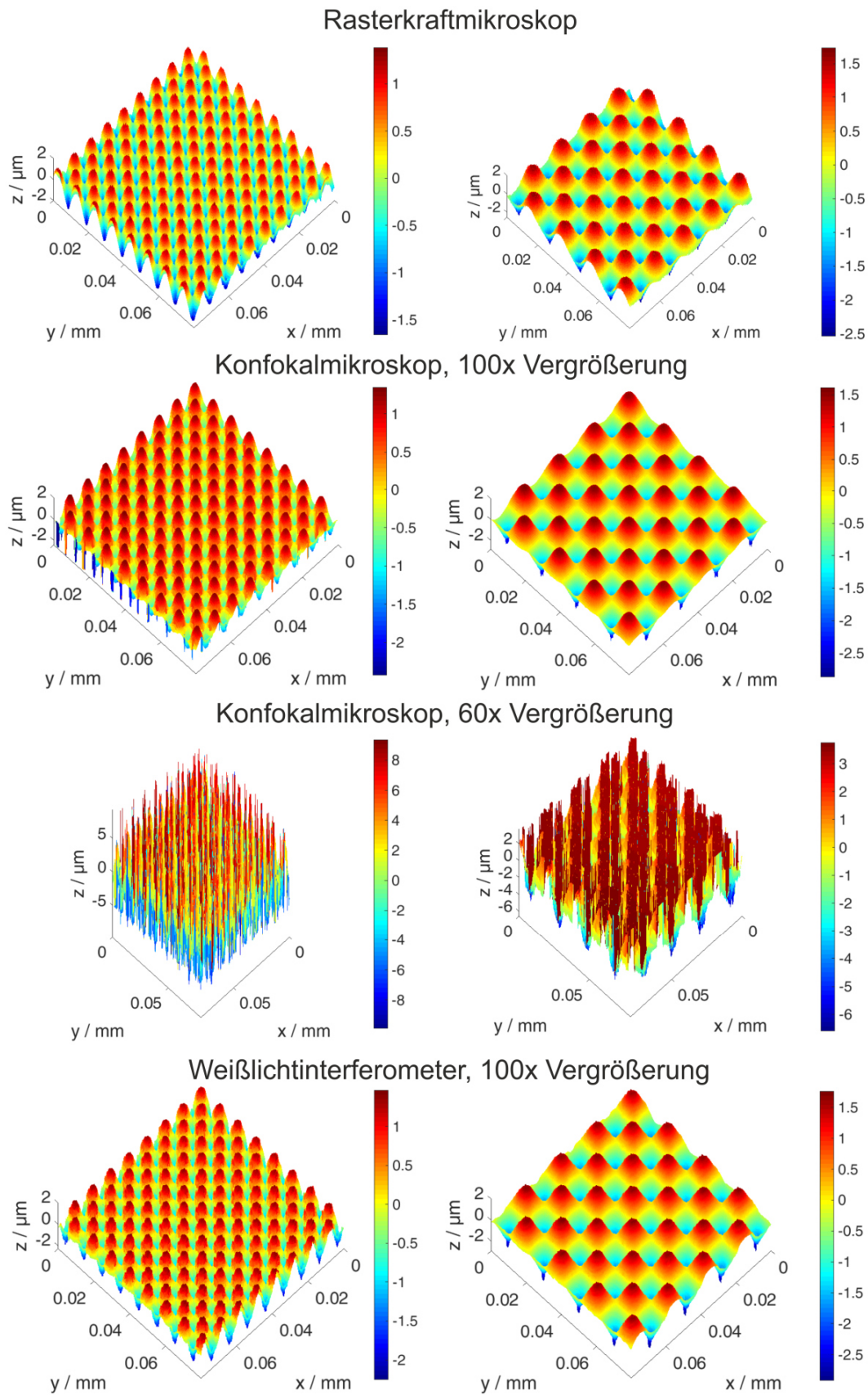


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen Topographien für die beiden Varianten des Normals ACS nach DIN EN ISO 25178-70 für verschiedene Messprinzipien. Soll-Geometrie, Rasterkraftmikroskop (AFM), Konfokalmikroskop (KM) 60x und 100x sowie Weißlichtinterferometer (WLI) 100x

Dabei wird für zwei Profile aus der 3D-Topographie, die durch zwei hohe sowie zwei angrenzende niedrige Plateaus verlaufen, die Differenz zwischen diesen beiden Profilen ermittelt [Giu13, S. 2]. Durch eine entsprechende Skalierung kann dieser Profilschrieb direkt in eine Amplitudenübertragung überführt werden, bei der für 50 % die Auflösungsgrenze definiert wird [Giu13, S. 3].

Neben diesem Kennwert der lateralen Auflösungsgrenze, dessen Ermittlung exemplarisch in **Abbildung 7** dargestellt ist, wurden außerdem die flächenhaften Rauheitskenngrößen ermittelt. Es ergeben sich bei Betrachtung der Ergebnisse typische Auflösungsgrenzen im Mikrometer-Bereich, wobei das WLI bei beiden Proben die besten Auflösungswerte erzielt (vgl. **Tabelle 7**).

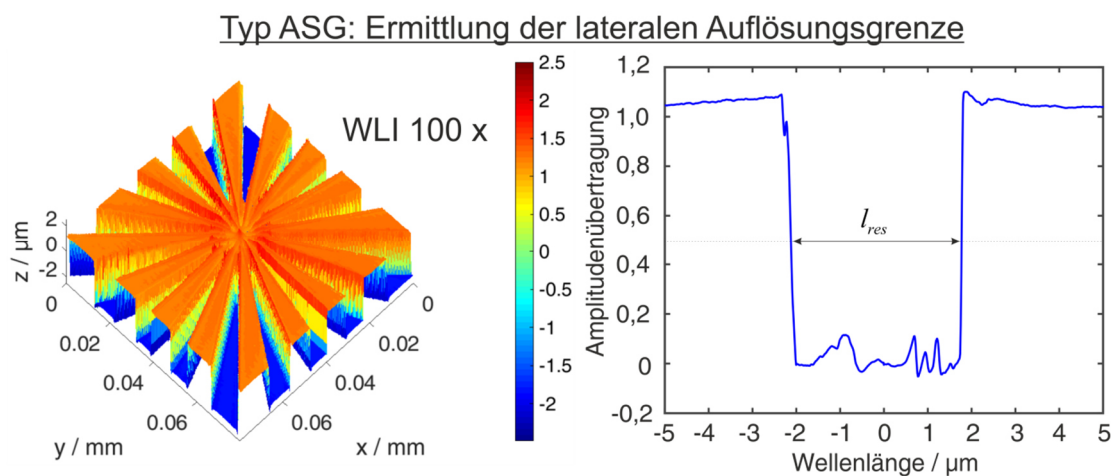


Abbildung 7: Gemessene Topographie WLI 100x für Soll-Datensatz des Normals Typ ASG nach DIN EN ISO 25178-70. Darstellung der Ermittlung der lateralen Auflösungsgrenze des Messgerätes

Letzte Normale sind die flache Ebene (Typ AFL) sowie das photochromatische Gitter (Typ APC), deren Ergebnisse in **Tabelle 20 (Anhang A)** dargestellt sind, wobei extrem feine Rauheiten abgebildet werden können.

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Technologie des direkten Laserschreibens enormes Potential für die Herstellung von Kalibriernormalen für die Anwendung bei flächenhaft scannenden optischen Messgeräten aufweist. Dabei wurden verschiedenste Geometrien mit einer Strukturgröße im Mikrometerbereich hergestellt, die sich für eine Kalibrierung von Messgeräten mit einer Unsicherheit im Nanometer-Bereich eignen. Dies konnte zum einen an der Wiederholgenauigkeit festgemacht werden, als auch an der Tatsache, dass solch kleine Strukturen hergestellt werden konnten, die selbst mit einer 60x Vergrößerung, die bereits einer Präzisionsmessung entspricht, nicht mehr hinreichend genau erfasst werden konnten.

Tabelle 7: Messergebnisse Parameter l_{res} (laterale Auflösungsgrenze) sowie S_a , S_q bei Auswertung des Normals Typs ASG nach DIN EN ISO 25178-70. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ ASG (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$l_{res} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$l_{res} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	0	1,46	1,48	0	0,49	0,49
AFM (1 Messung)	6,6	0,97	1,16	3,9	0,48	0,49
KM 60x (4 Messungen)	5,4 $\pm 0,4$	1,48 $\pm 0,00$	1,54 $\pm 0,00$	4,6 $\pm 0,4$	0,63 $\pm 0,00$	0,66 $\pm 0,00$
KM 100x (4 Messungen)	5,5 $\pm 0,2$	1,42 $\pm 0,03$	1,51 $\pm 0,05$	4,7 $\pm 0,5$	0,67 $\pm 0,01$	0,69 $\pm 0,02$
WLI 100x (1 Messung)	3,9	1,50	1,54	3,7	0,66	0,68

Die steilen Winkel führten mit dieser Vergrößerung insbesondere bei der Probe 1 zu nicht unerheblichen Abweichungen, konnten jedoch mit Messungen, die eine 100x Vergrößerung aufwiesen sowie AFM-Messungen ebenfalls verifiziert werden. Die zweite Probe mit entsprechend veränderten Strukturgrößen lieferte ebenfalls bei der 60x Vergrößerung Kenngrößen, die stärker mit den durch die virtuellen Datensätze vorgegebenen Soll-Werten übereinstimmten.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen konnten außerdem die hinreichende chemische Beständigkeit und Skalierbarkeit der Normale nachgewiesen [Her18, S. 2 ff.] [Eif18d, S. 16614 ff.] sowie das Auflösungsvermögen des direkten Laserschreibens bei der Herstellung von Kalibriernormalen qualifiziert [Her18, S. 5 ff.] werden. Dabei wurde ebenfalls ein Universalnormal entwickelt, welches auf Basis von sechs verschiedenen Typen von Normalen sämtliche grundlegenden metrologischen Eigenschaften der Normenserie DIN EN ISO 25178-60x (vgl. u.a. [25178-600, S. 19], [25178-603, S. 12], [25178-604, S. 10]) mithilfe nur eines Probensträgers abbilden kann [Eif18d, S. 16612 ff.].

Nachfolgend soll als weiterer möglicher Fertigungsprozess das Mikrofräsen für die Herstellung flächenhafter Geometrienormale betrachtet werden.

2.2.2 Qualifikation von Mikrofräsprozessen ⁸

Die grundsätzliche Eignung von Mikrofräsen für die Erzeugung flächenhafter Rauheitsnormale wurde für einzelne Beispiele nachgewiesen [Nem09, S. 1] [Lea14b, S. 2]. Zur weitergehenden Qualifikation des Verfahrens ist jedoch eine systematische und detaillierte Untersuchung der Eignung zur Erzeugung unterschiedlichster geometrischer Strukturen erforderlich. Dabei soll nachfolgend die Qualität von mittels Mikrofräsen erzeugten Oberflächen für verschiedene Normale bewertet werden.

Für die Analyse des Fertigungsverfahrens werden standardisierte Normale nach DIN EN ISO 25178-70 genutzt, deren Fertigung auch ebenfalls in **Kapitel 2.2.1** bereits systematisch untersucht wurde. Konkret betrachtet werden profil- und flächenhafte sinusförmige Oberflächen, welche als Maßverkörperungen PPS und ACS in DIN EN ISO 25178-70 (vgl. [25178-70], S. 8 und 24) definiert sind.

Abbildung 8 stellt die beiden untersuchten Arten von Normalen dar und gibt ebenfalls Informationen über die geometrischen Merkmale, auf deren Basis die Soll-Geometrien für die Fertigung definiert wurden. Weiterhin sind die gewählten Werte sowie die darauf basierenden Messgrößen, die sich entsprechend der normativen Vorgabe berechnen lassen, in **Tabelle 8** dargestellt.

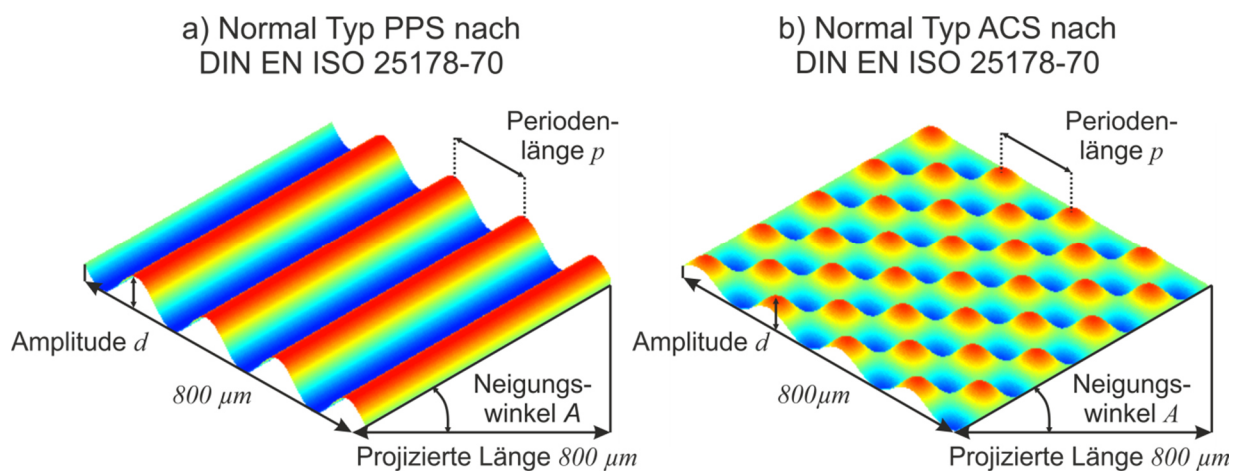


Abbildung 8: Typen der gefertigten Normale, Typen PPS und ACS nach DIN EN ISO 25178-70 sowie zugehörige Maße zur Definition der Geometrien

Entsprechend der zugehörigen metrologischen Eigenschaften sind bei der Struktur PPS die Amplitude des Sinus sowie dessen Wellenlänge relevant, wobei neben einer lateralen Achse auch die vertikale Achse kalibriert werden kann und außerdem die

⁸ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18b] Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: *Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography*. Procedia CIRP (71) 2018, S. 122-127.

Werte der flächenhaften Rauheitskenngrößen festliegen. Dies gilt analog für die Struktur ACS, bei der aufgrund ihrer flächenhaften Ausprägung die Achsen x,y,z durch den Vergleich der flächenhaften Rauheitskenngrößen mit ihren Soll-Werten überprüft werden können [25178-70, S. 24].

Tabelle 8: Soll-Geometrien, geometrischen Eigenschaften. Die Soll-Parameter S_a, S_q sind für den Steuerdatensatz mit einer Diskretisierung von $0,8 \mu\text{m}$, einem Bahnabstand von $4 \mu\text{m}$ sowie einem Neigungswinkel von 25° angegeben

Definition der zu fertigenden Soll-Geometrien		
	Typ PPS (DIN EN ISO 25178-70)	Typ ACS (DIN EN ISO 25178-70)
Amplitude $d / \mu\text{m}$	10	10
Periodenlänge $p / \mu\text{m}$	200	200
$S_a / \mu\text{m}$	$3,129 \approx d / \pi$	1,979
$S_q / \mu\text{m}$	$3,477 \approx d / (2\sqrt{2})$	2,452

Um eine positive Schnittgeschwindigkeit an allen Positionen des Werkzeugs zu gewährleisten, erfolgte die Zerspanung unter einem definierten Neigungswinkel, wobei unabhängig vom Wert dieses Neigungswinkels eine projizierte Fläche der Topographie von $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ vorgesehen wurde. Die Periodenlänge der Strukturen wurde dabei so eingestellt, dass die gewählte Länge p nach einem Abzug der schiefen Ebene abgebildet wurde.

Neben der grundsätzlichen Beurteilung des Mikrofräsens für die Herstellung von Geometrienormalen sollte die durchgeführte Studie insbesondere untersuchen, inwiefern unterschiedliche Steuerdaten für die Fertigung einer identischen Soll-Geometrie das Ergebnis der Fertigung verändern können.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Steuerdaten für identische Geometrien berechnet, bei denen für die in **Abbildung 9** gekennzeichneten Parameter Bahnabstand L , Ortsauflösung des Steuerdatensatzes D sowie Neigungswinkel des Werkstücks A unterschiedliche Werte gewählt wurden. Hierbei soll der Einfluss dieser Größen beschrieben werden, um einen Steuerdatensatz zu gestalten, der ein möglichst gutes Fertigungsergebnis gewährleistet.

Tabelle 9 stellt die gewählten Werte der Größen dar, die als Ausgangspunkt der Berechnung der G-Codes der mäanderförmigen Bewegung des Werkzeugs in Matlab dienten.

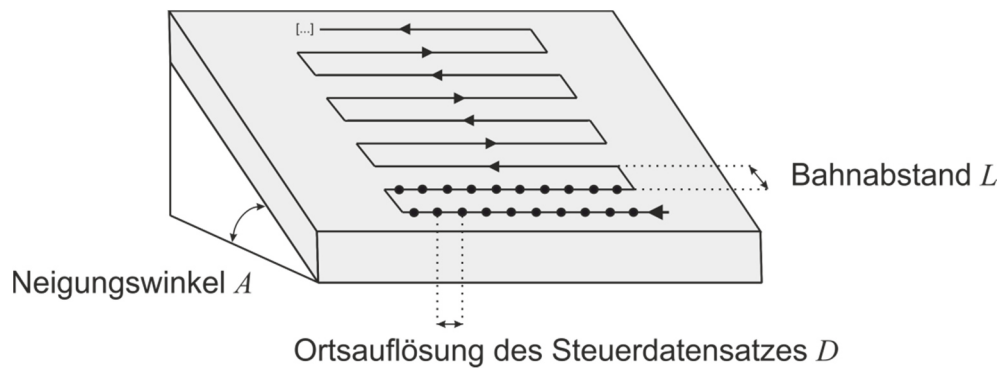


Abbildung 9: Untersuchte Parameter zur Erzeugung von Steuerdaten

Tabelle 9: Parameter zur Berechnung der Koordinaten der Werkzeugbahn

Parameter	Wert	Quotient L / R_{T1}	Quotient L / R_{T2}	Bezeichnung
Bahnabstand $L / \mu m$	4	0,04	0,08	$L1$
	6	0,06	0,12	$L2$
	8	0,08	0,16	$L3$
	12	0,12	-	$L4$
	16	0,16	-	$L5$
Ortsauflösung $D / \mu m$	0,8			$D1$
	5			$D2$
Neigungswinkel $A / ^\circ$	25			$A1$
	45			$A2$

Zwei unterschiedliche Fräswerkzeuge wurden für die Fertigung unterschiedlicher Parameterkombinationen untersucht. Bei dem ersten Werkzeug $T1$ handelt es sich um einen kugelförmigen Einschneider (Diamant, $R_{T1} = 100 \mu m$), bei dem zweiten Werkzeug $T2$ um einen Zweischneider (Hartmetall, $R_{T2} = 50 \mu m$), so dass neben unterschiedlichen Werkzeugtypen auch variable Materialien und Radien betrachtet wurden.

Die entsprechenden Untersuchungen wurden auf Basis eines vollfaktoriellen Versuchsplans unter Berücksichtigung der genannten Parameter durchgeführt. Der Bahnabstand L als Parameter wurde dabei auf unterschiedliche Arten untersucht. Neben der Betrachtung des Bahnabstands an sich war dabei die Beziehung zwischen Bahnabstand und der Größe des Werkzeugs von Interesse. Um hier eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen wurde der Parameter, wie in **Tabelle 9** dargestellt, für das Werkzeug $T1$ mit insgesamt fünf verschiedenen Stufen $L1-L5$ variiert. Der vollfaktorielle Versuchsplan führte entsprechend zu 20 verschiedenen Steuerdatensätzen für das Werkzeug $T1$ sowie zu 12 Kombinationen für das Werkzeug

T2. Für jede untersuchte Geometrie wurden demnach 32 verschiedene Proben hergestellt.

Als Werkzeugmaschine wurde die Maschine LT Ultra MMC 600 H1, welche sich für die 5-Achs-Mikrofräsbearbeitung mit Minimalmengenschmierung eignet, eingesetzt. Für die Proben wurde eine Messing-Legierung (CuZn39Pb3) im Hinblick auf Zerspanbarkeit und Korrosionsbeständigkeit ausgewählt, welche mit einem Vorschub von $10 \text{ mm} / \text{min}$ gespant wurde. Die Drehzahl während der Zerspanung wurde dabei an das Werkzeug angepasst und bei den Werkzeugen T1 und T2 zu 60000 min^{-1} bzw. 41000 min^{-1} festgelegt. Die Werkzeugmaschine sowie REM-Aufnahmen der genutzten Fräswerkzeuge sind als Überblick über den Fertigungsprozess in **Abbildung 10** gezeigt.

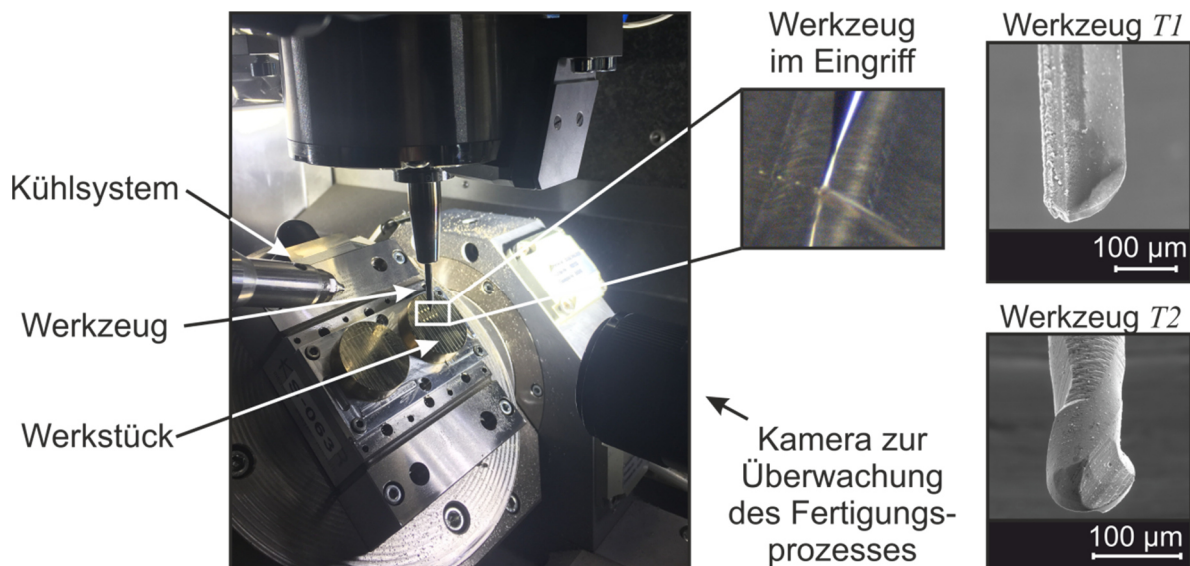


Abbildung 10: Mikrofräse LT Ultra MMC 600 H1 sowie Werkzeuge T1 und T2

Die Erfassung der Topographien der aus dem Fertigungsprozess resultierenden Normale wurde mittels vier Wiederholmessungen von den je Typ ACS und PPS 32 hergestellten Oberflächen durchgeführt, wobei diese insgesamt 256 Messungen mit dem Messprinzip der Konfokalmikroskopie (Nanofocus µSurf) erfolgten. Das hierbei eingesetzte Objektiv ($20\times$, $NA=0,6$) erlaubte die Erfassung eines Topographieausschnittes von $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ bei jeder Messung.

Zur Auswertung der auf diese Weise erzeugten Messdaten wurde ein Ebenenabzug unter Anwendung der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (Least-Squares) ausgeführt, welcher den nach DIN EN ISO 25178-2 vorgesehenen F-Operator [25178-2, S. 6] repräsentiert.

Weiterhin wurde im Anschluss zur Entfernung von langwelligen Gestaltabweichungen aus den Topographiedaten ein lineares, flächenhaftes Gauß-Filter gemäß der Norm DIN EN ISO 16610-61 [16610-61, S. 7 ff.] unter Anwendung einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 0,8$ mm genutzt.

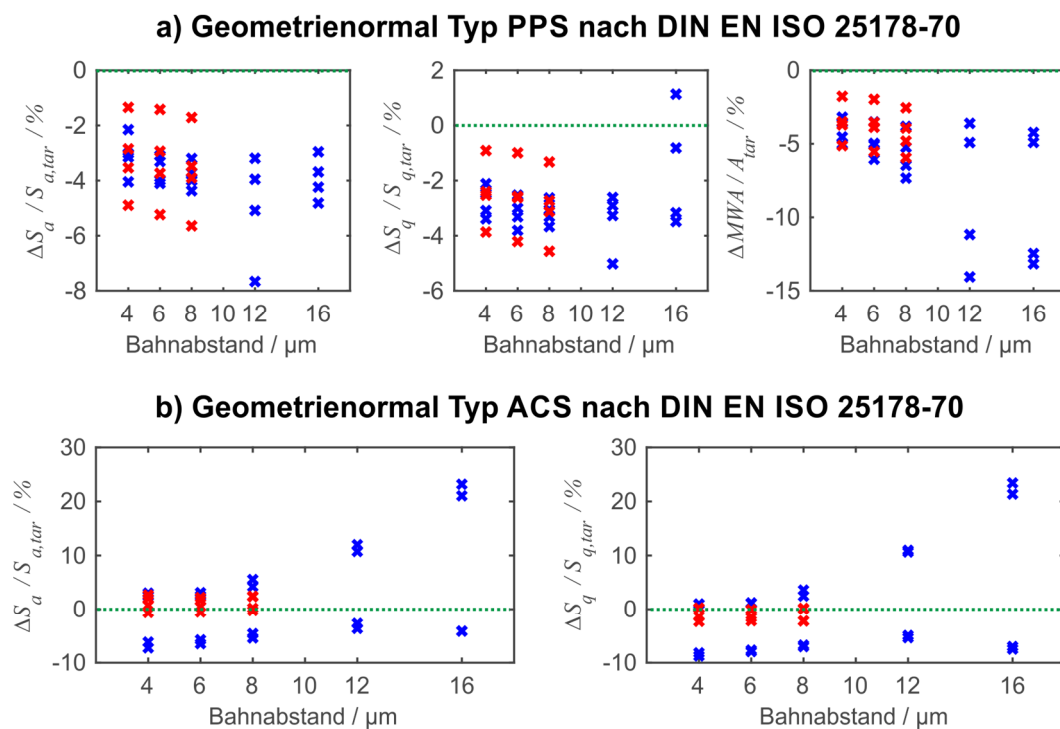
Da die Unterschiede zwischen den einzelnen Topographien deutlich erkennbar sein sollten, wurde kein Filter zur Entfernung sehr kurzweiliger Signalanteile genutzt. Um den Effekt der etwas variierenden Position des Messfeldes im Bezug zum jeweils gemessenen Normal auf die Auswertung abzustellen, wurde der Auswertebereich als Quadrat ($600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$) an jeweils identischer Stelle festgelegt. Die gewählte Seitenlänge führt dazu, dass der Auswertebereich exakt drei Periodenlängen der betrachteten Normale beinhaltet.

Als anschließend ermittelte Kenngrößen zur Beurteilung der insgesamt 256 Messungen der 32 Oberflächen pro Normal dienten die Kenngrößen S_a und S_q nach DIN EN ISO 25178-2 [25178-2, S. 12 f.], welche mit den Soll-Werten verglichen wurden und außerdem für die gekreuzte Sinusstruktur (ACS) als Messgröße normativ vorgesehen sind [25178-70, S. 24]. Zur weitergehenden Auswertung der profilhaften Sinusstruktur (PPS) erfolgte die Einpassung von je drei voneinander unabhängigen Sinuswellen in alle 385 aus den flächenhaften Messdaten extrahierbaren Schnitten in Richtung der Sinuswellen. Entsprechend der auf diese Weise 1155 berechneten Einpassungen wurde ein Maß für die Übereinstimmung zwischen der geometrischen Oberfläche (Soll-Geometrie) und der messtechnisch erfassten Ist-Geometrie des Sinus auf Basis der so ermittelten Amplituden d eingeführt. Diese Vorgehensweise ist dabei an die Auswertung des Chirp-Normals auf Basis der „small scale fidelity“ angelehnt [See14, S. 1 ff.]. Die Einpassungen wurden nach dem Least-Squares Kriterium berechnet. Um Unterschieden der Soll-Kenngrößen für die verschiedenen Steuerdatensätze, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Diskretisierungen und der Variation des Neigungswinkels ergeben, Rechnung zu tragen, wurden alle Werte als prozentuale Abweichungen zu den einzelnen Soll-Werten berechnet.

Die so ermittelten Ergebnisse sind in **Anhang B** zusammengestellt, wobei für alle 32 Proben pro Normal, die wie erläutert auf unterschiedliche Weise hergestellt wurden, jeweils empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung der vier durchgeführten Wiederholmessungen angegeben sind.

Zur systematischen Analyse der Effekte der einzelnen untersuchten Parameter auf die erläuterten Messgrößen sind zunächst in **Abbildung 11** die Ergebnisse ebendieser für die durchgeführte Variation des Bahnabstands L dargestellt. Diese sind außerdem

durch eine farbliche Kennzeichnung dem jeweiligen Werkzeug zuzuordnen. Weiterhin sind sämtliche Einzelergebnisse aus den 256 Topographie-Messungen nur sortiert nach dem Wert des Bahnabstandes eingezeichnet, um einen vollumfänglichen Überblick über die Streuung der Ergebnisse zu geben. Bei der Auswertung des profilhaften Sinusnormals PPS sind entsprechend die Mittelwerte aus allen wie beschrieben ermittelten 1155 Amplitudenwerten pro Topographie in der Abbildung gekennzeichnet. Das Auftreten der sehr unterschiedlichen Messgrößen für identische Bahnabstände ist auf die Variation der anderen Parameter innerhalb dieser Gesamtheit an Daten zurückzuführen.



	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>
Bahnabstand $L / \mu m$	4	6	8	12	16
Quotient L / R_{T1}	0,04	0,06	0,08	0,12	0,16
Quotient L / R_{T2}	0,08	0,12	0,16	-	-

× Werkzeug *T1*
 × Werkzeug *T2*

Abbildung 11: Analyse des Parameters Bahnabstand. Messgrößen des a) profilhaften und b) flächenhaften Sinusnormals.

$\Delta S_a / S_{a,tar}$: prozentuale Abweichungen des S_a -Wertes zum Soll-Wert,
 $\Delta S_q / S_{q,tar}$: prozentuale Abweichungen des S_q -Wertes zum Soll-Wert,
 $\Delta MWA / A_{tar}$: prozentuale Abweichungen der mittleren Amplitude zum Soll-Wert.

Bei dem in der Abbildung dargestellten Vergleich der Parameter fällt auf, dass das Werkzeug *T1* häufig etwas größere Beträge der prozentualen Abweichungen hervorruft. Aufgrund diverser abweichender Werkzeug-Parameter ist für eine umfassende Gegenüberstellung allerdings keine hinreichende Vergleichbarkeit gegeben.

Grundsätzlich stimmen die erfassten Messgrößen allerdings gut mit den Vorgaben überein: unabhängig vom Bahnabstand weicht z.B. kein erfasster Amplitudenwert mehr als 15 % von den vorgegebenen Werten ab, wobei viele Werte mit einer Abweichung <5 % gemessen werden können. Diese treten allerdings im Wesentlichen für die kleineren Werte der Bahnstände auf.

Allgemein lässt sich bei zunehmendem Bahnabstand beobachten, dass sich beim Normal des Typs ACS der Wertebereich der Messgrößen verbreitert. Bei Analyse des Normals Typ PPS tritt zudem, wie angedeutet, ab einem Bahnabstand von $12 \mu\text{m}$ häufig eine nicht unwesentliche Verringerung der gemessenen Amplitude auf. Der Effekt dieses Parameters als solches auf das Fertigungsergebnis begründet sich darin, dass ein direkter Eingriff in die Diskretisierung der Werkzeugbahn in lateraler Richtung erfolgt. Entsprechend erfolgt bei Erhöhung des Wertes eine gröbere Nachbildung der gewünschten Struktur.

Aufgrund der flächenhaften Ausprägung des Normals ACS ist in diesem Fall der Absolutwert des Bahnabstands entscheidender als die in **Abbildung 11** alternativ berechneten Parameterwerte, die zusätzlich die Größe des Werkzeugs berücksichtigen. Grund dafür ist, dass die laterale Achse, welche der Diskretisierung durch den Bahnabstand unterliegt, im Gegensatz zum Normal des Typs PPS ebenfalls eine Struktur aufweist.

Bei Nutzung des Werkzeugs T_2 lässt sich entsprechend bei Berücksichtigung der Werkzeuggeometrie feststellen, dass noch größere Werte des Quotienten L / R_{T_2} zu keiner wesentlichen Abweichung der ausgewerteten Messgrößen führen. Dies hängt mit dem kleineren Radius dieses Werkzeugs zusammen.

Wird der Parameter der Diskretisierung, wie in **Abbildung 12** dargestellt, variiert, so lässt sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen keine umfassende Beeinflussung der Ergebnisse feststellen. Lediglich die mittlere eingepasste Amplitude des profilhaften Normals weicht bei einer gröberen Diskretisierung der Fertigungsdaten im Durchschnitt etwas stärker vom Soll-Wert ab. Die Diskretisierung beschreibt dabei den Punktabstand einer lateralen Achse. Da in der anderen lateralen Achse ohnehin meist eine größere Schrittweite bei der Fertigung vorliegt, ist der Einfluss auf die Ergebnisse entsprechend gering.

Im Gegensatz hierzu hat der Neigungswinkel, wie in **Abbildung 13** gezeigt, einen starken Einfluss auf die resultierenden Auswertegrößen. Dabei lassen sich zwei gegenläufige Effekte feststellen: Bei Nutzung eines größeren Neigungswinkels lässt

sich eine höhere Qualität der Oberfläche der Normale beobachten, allerdings wurden ebenfalls morphologische Filtereffekte hervorgerufen, da aufgrund der Größe des Werkzeuges einige Abschnitte der Oberfläche nicht mehr wie im Datensatz vorgesehen erzeugt werden konnten. Mögliche Gründe hierfür sind, dass lokal die Krümmung der Oberfläche mit dem eingesetzten Werkzeug nicht mehr abgebildet werden kann oder ein Rundlauffehler vorliegt. Folge dieser lokalen Überschreitung der Werkzeugkrümmung ist die relative Verringerung der in **Tabelle 8** definierten Messgrößen bei den betroffenen Proben, die in vielen Fällen mit zunehmendem Neigungswinkel zu beobachten ist.

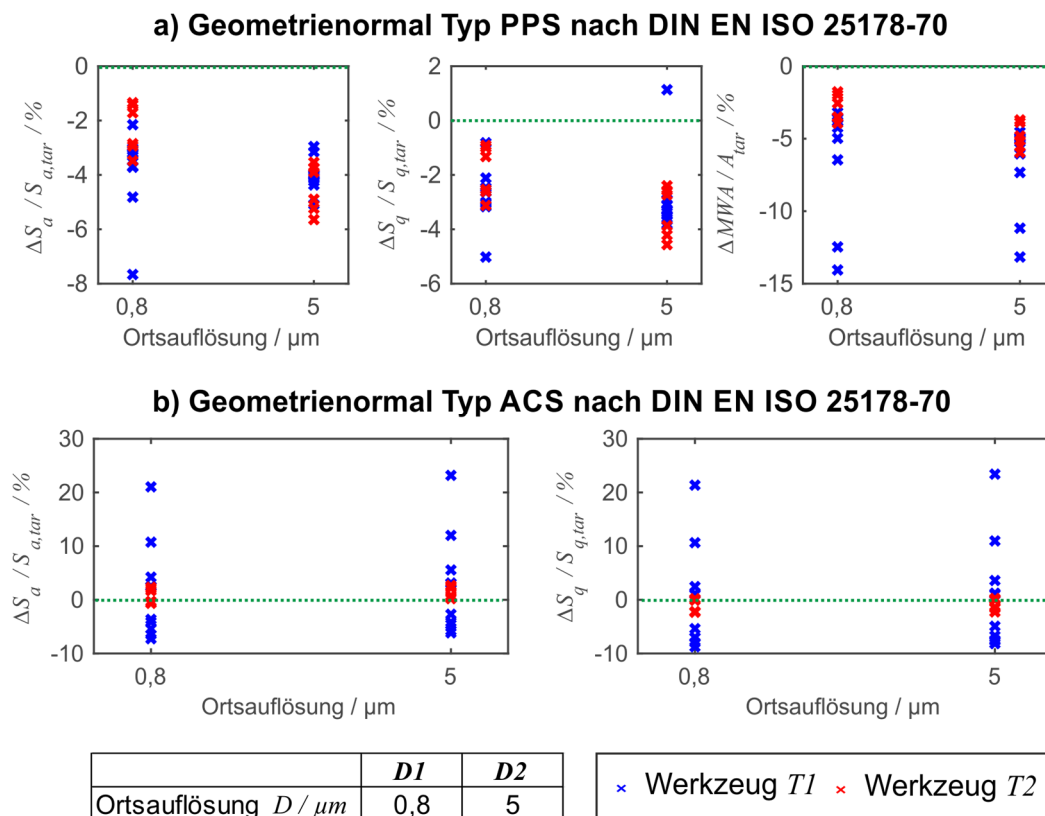


Abbildung 12: Analyse des Parameters Diskretisierung. Messgrößen des a) profilhaften und b) flächenhaften Sinusnormals

Bei dem Werkzeug *T1*, welches einen höheren Radius aufweist, ist der Effekt offensichtlich stärker ausgeprägt. Mit dem Werkzeug *T2* hingegen kann entsprechend auch eine Abbildung von steileren lokalen Oberflächenkrümmungen erfolgen. Anhand der gemessenen Topographien soll der Einfluss, den der Neigungswinkel auf Basis der morphologischen Filtereffekte auf die Oberfläche ausübt, ebenfalls dargestellt werden. Dabei sind in **Abbildung 14 a)** und **d)** Beispiele für gemessene Topographien der Steuerdaten-Parameter *T1 L1 D1 A1* sowie *T1 L1 D1 A2* des flächenhaften Sinus-Normals gezeigt, so dass hier eine direkte Gegenüberstellung der Neigungswinkel bei sonst gleichen Parametern möglich ist. Bei

der Probe, die mit dem Neigungswinkel $A2$ gefertigt wurde, lassen sich die durch die Oberflächenkrümmung hervorgerufenen Filtereffekte deutlich erkennen.

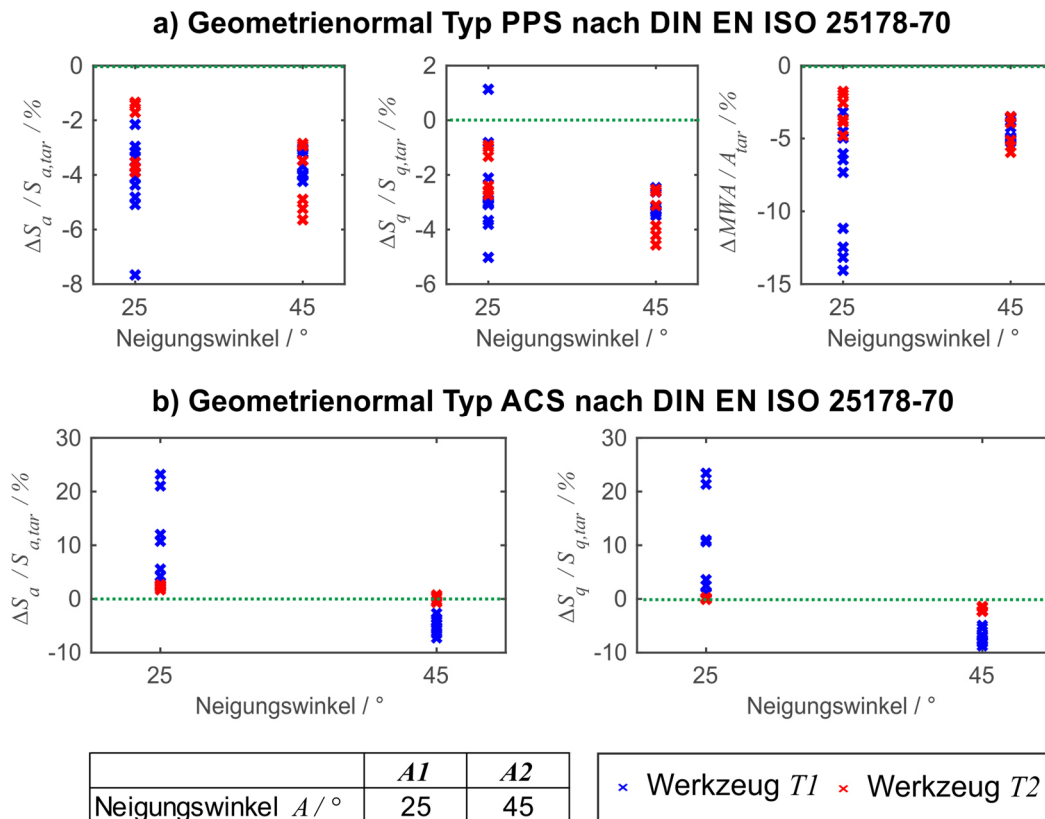


Abbildung 13: Analyse des Parameters Neigungswinkel. Messgrößen des a) profilhaften und b) flächenhaften Sinusnormals

Die Abhängigkeit dieses Phänomens von der Werkzeuggröße wurde bereits diskutiert und kann bei Analyse der Topographien in **Abbildung 14 c)** und **d)** demonstriert werden. Dabei ist der einzige unterschiedliche Parameter hier das Werkzeug, welches im Fall der Probe 27 eine geringere Größe aufweist. Entsprechend liegen hier trotz hohem Neigungswinkel während der Zerspanung keine wesentlichen Filtereffekte vor.

Werden die Topographien der profilhaften Sinusstruktur, wie in **Abbildung 14 b)** und **e)** dargestellt, miteinander verglichen, so lassen sich insbesondere Unterschiede bei den Amplituden feststellen. Die Probe 21 weist dabei im Mittel die größten Amplituden, Probe 32 hingegen die kleinsten Amplituden auf.

Auf Basis dieser Beobachtungen kann festgestellt werden, dass ein kleiner Bahnabstand sowie, unter der Einschränkung, dass keine morphologischen Filtereffekte auftreten, häufig auch ein steilerer Neigungswinkel während der Zerspanung zu einer geringeren Abweichung zwischen geometrischer Oberfläche und Ist-Oberfläche führen. Diese Phänomene lassen sich zusammengefasst bei der

Analyse der Topographien 27 und 5 in **Abbildung 14 c)** und **f)** der flächenhaften Sinusstruktur darstellen: die Oberflächenstruktur der Probe 27 ist im Vergleich zu Probe 5 nicht mit optischen Artefakten behaftet und weist eine Ausprägung auf, die deutlich näher an der geometrischen Oberfläche liegt.

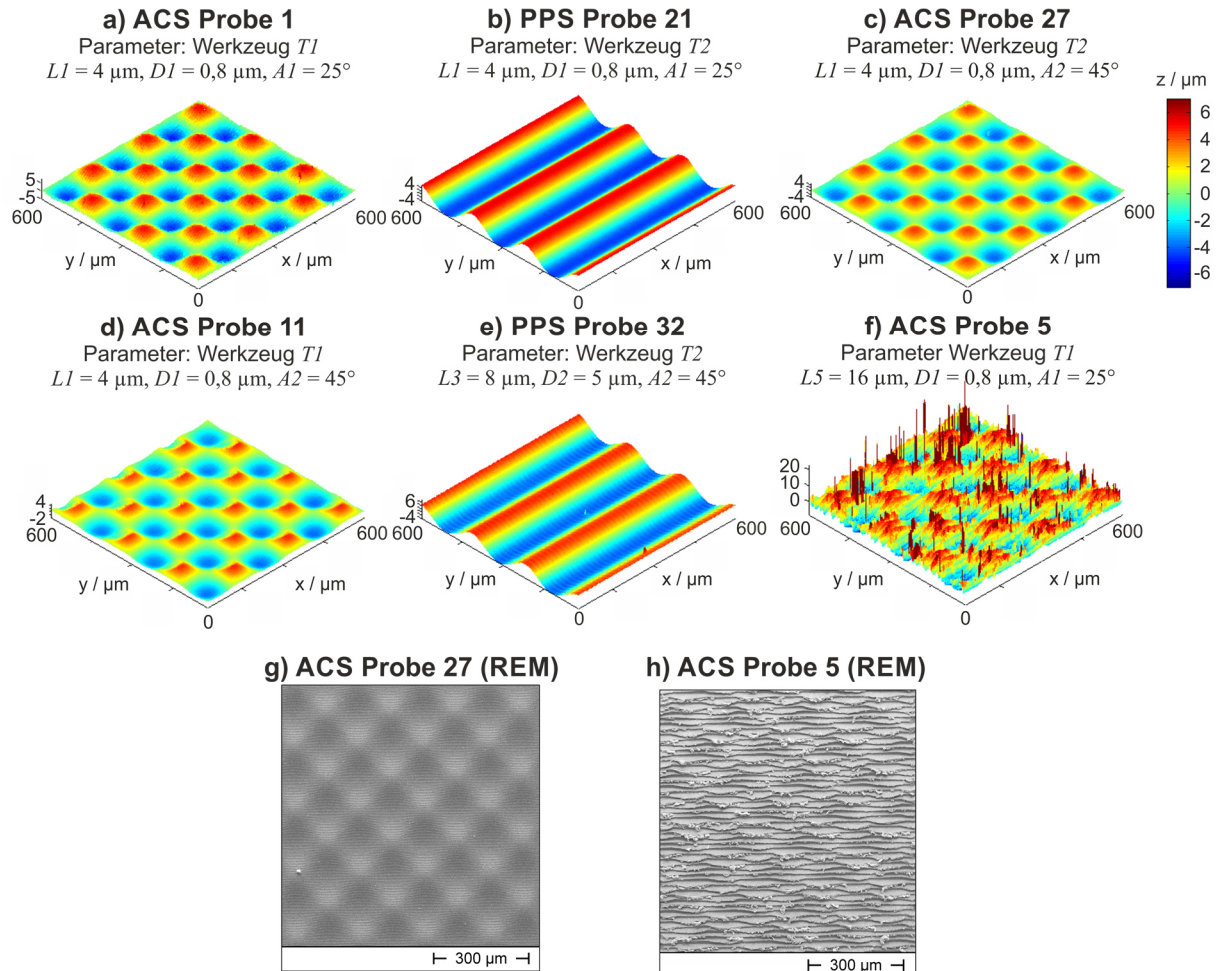


Abbildung 14: Topographien sowie REM-Aufnahmen. a) Normal ACS Probe 1, b) Normal ACS Probe 11, c) Normal PPS Probe 21, d) Normal PPS Probe 32, e) Normal ACS Probe 27, f) Normal ACS Probe 5, g) REM-Aufnahme ACS Probe 27, h) REM-Aufnahme ACS Probe 5

Solche Artefakte bei optischen Messungen treten typischerweise bei der Erfassung zu steiler Winkel auf (vgl. **Kapitel 2.2.1**), die in diesem Fall durch eine unzureichende Zerspannung der Oberfläche und die entsprechend zurückbleibenden Spanzipfel bedingt sind. Diese Verdrängung des Werkstoffs lässt sich auch beim Vergleich der REM-Aufnahmen in **Abbildung 14 g)** und **h)** feststellen, wo die Spanzipfel deutlich erkennbar sind. Die Probe 5 ist entsprechend bedingt durch ihre steilen Winkel nicht für einen Einsatz als Kalibriernormal geeignet, da bei unterschiedlichen Messgeräten keine wiederholbare Erfassung der steilen Oberflächenwinkel sichergestellt werden kann. Dabei soll ebenfalls nochmal betont werden, dass die unterschiedlichen

Ergebnisse ausschließlich auf eine unterschiedliche Gestaltung des Steuerdatensatzes zurückzuführen sind.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte letztlich nachgewiesen werden, dass die Ausgestaltung der Steuerdaten durch Variation der beiden Parameter Bahnabstand sowie Neigungswinkel auch zu einer deutlich anderen Ausprägung der Oberflächentopographie führte. Dabei sollten eine möglichst feine Diskretisierung sowie eine möglichst große Neigung des Werkstücks für die Auslegung der Steuerdaten gewählt werden, um möglichst geringe Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Ausprägung der Oberfläche zu erreichen. Beim Neigungswinkel ist allerdings darauf zu achten, dass keine morphologischen Filtereffekte auftreten, die zu einer Abweichung des Fertigungsergebnisses führen. Die entsprechenden Effekte können allerdings grundsätzlich unter Berücksichtigung des Werkzeugdurchmessers und der entsprechend bekannten Werkzeugkrümmung vorhergesagt werden. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass der Effekt bei dem Werkzeug mit höherem Radius ausgeprägter ist.

Letztlich ließ sich im Rahmen der vorgestellten Machbarkeitsstudie feststellen, dass die Mikrofräsbearbeitung neben dem direkten Laserschreiben eine weitere Technologie ist, die für die Erzeugung profilhafter sowie flächenhafter Kalibriernormale genutzt werden kann. Dies wurde durch Nutzung von zwei unterschiedlichen Werkzeug-Geometrien demonstriert.

Weitere Untersuchungen des Mikrofräsens zur Herstellung komplexerer Geometrien, zur morphologischen Filterwirkung sowie zu den Zerspanungsparametern sollten auf Basis der bisherigen Ergebnisse durchgeführt werden und können auch eine getrennte Analyse der absoluten und prozentualen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Kenngrößen beinhalten.

Der Vorzug des Mikrofräsens im Vergleich zu vielen anderen Methoden der Mikrofertigung ist dabei grundsätzlich, dass eine Bearbeitung metallischer, harter Werkstoffe möglich ist. Beim direkten Laserschreiben lassen sich allerdings noch kleinere Strukturgrößen realisieren, da hier keine Limitation durch die Werkzeuggröße sondern lediglich durch den Leuchtfleck auftritt. Letztlich bieten beide untersuchten Fertigungsverfahren interessante Möglichkeiten für die Herstellung von Kalibriernormalen.

Im folgenden **Kapitel 3** soll, nachdem der Aspekt der Erzeugung rauer Oberflächen untersucht wurde, eine Betrachtung dieser Oberflächen als solches erfolgen.

3 Raue Oberflächen

In **Kapitel 2** wurden Untersuchungen zur Erzeugung von definierten, rauen Bauteiloberflächen beschrieben. Das nachfolgende Kapitel widmet sich der Beschreibung von Oberflächenstrukturen im Bereich der Rauheit, die mithilfe möglichst weniger Parameter erfolgen soll.

Abbildung 15 ordnet die Betrachtungen des Kapitels ein und stellt den hierbei relevanten Bereich aus dem Grundmodell der Rauheitsmesstechnik gemäß **Abbildung 1** dar. Dabei soll auf Basis der mathematischen Beschreibung der wirklichen Oberfläche Z_w dargelegt werden, wie der Begriff der Rauheit verstanden und beschrieben werden kann. Die darauf folgende Messung der wirklichen Oberfläche wird in **Kapitel 4** behandelt.

Diese Unterteilung erfolgt dabei in Anlehnung an die Definition von virtuellen Messprozessen, die von Schmitt et al. vorgeschlagen wurde und den Messprozess als Interaktion zwischen Oberfläche (Messobjekt) und dem jeweils genutzten Messgerät darstellt (vgl. [Sch08c, S. 299]). Entsprechend widmet sich **Kapitel 3** dem Bereich des Messobjekts, wohingegen das Messgerät und die Wechselwirkung dieser beiden Komponenten in **Kapitel 4** untersucht werden.

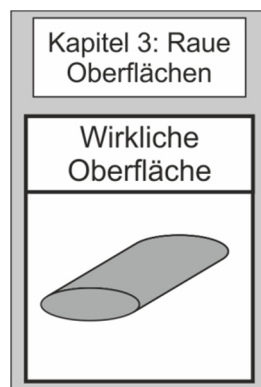


Abbildung 15: Schematische Darstellung der wirklichen Oberfläche

3.1 Raue Oberflächen - Einordnung und Tendenzen

Der Grundbegriff der Rauheit wurde in **Kapitel 1** bereits erläutert. Die Rahmenbedingungen und hieraus resultierende Trends für technische raue Oberflächen werden im nachfolgenden Kapitel dargelegt. Hierbei werden zunächst allgemeine Betrachtungen angestellt, bevor im Speziellen die mathematische Beschreibung von rauen Oberflächen betrachtet wird. Die neuen Möglichkeiten der Fertigungstechnik wurden im Rahmen von **Kapitel 2** erläutert und untersucht.

Entsprechend verändern sich auch die gefertigten Oberflächen selbst. Grundsätzlich lassen sich dabei folgende Tendenzen feststellen:

- **Raue Oberflächen werden feiner**

In **Kapitel 2** wurde konstatiert, dass die Fertigung von rauen Oberflächen immer präziser durchgeführt werden kann. So ist es z.B. möglich, Oberflächen mit Rauheiten von $R_z < 1nm$ zu erzeugen (vgl. [Dai04, S. 2042]). Dabei können in der Nanotechnologie unterschiedlichste Typen von Fertigungsverfahren angewendet werden (vgl. [Mee11, S. 180 f.]). Für viele moderne Anwendungen sind ultrapräzise gefertigte Oberflächen erforderlich [Jia07, S. 2072].

- **Raue Oberflächen sind verstärkt deterministisch**

Traditionell liegen zufällig erzeugte Oberflächenstrukturen auf Bauteiloberflächen vor [Lea13a, S. 4 f.]. Dies gilt für viele bis heute häufig eingesetzte Fertigungsprozesse [Jia07, S. 2087]. Jiang et al. identifizierten aber bereits 2007 das verstärkte Auftreten von deterministisch strukturierten Oberflächen als einen von drei großen Trends in der Oberflächenmesstechnik [Jia07, S. 2071] [Lea13a, S. 5]. Whitehouse konstatierte, dass diese Tendenz außerdem noch von einem verstärkten Auftreten von Freiformflächen begleitet wird, was dazu führt, dass insgesamt komplexere Oberflächen auftreten [Whi16, S. 1].

- **Raue Oberflächen haben funktionelle Eigenschaften**

Die zuletzt genannte Eigenschaft der Determiniertheit von Oberflächen geht mit der Abbildung funktioneller Eigenschaften einher [Jia07, S. 2085]. Evans und Bryan stellten 1999 eine Vielzahl von Möglichkeiten für funktionelle Eigenschaften u.a. für optische, mechanische oder strömungsmechanische Anwendungen vor [Eva99, S. 543]. Weckenmann und Hartmann stellten ebenfalls exemplarisch eine Vielzahl solcher Anwendungen zusammen [Wec13, S. 867] und auch Leach beschrieb eine verstärkte Verwendung dieser Eigenschaften [Lea13a, S. 5]. Dabei stellen auch die Fertigung und Messung solcher Oberflächen teilweise neue Herausforderungen dar (vgl. [Eva99, S. 550 ff.]).

- **Raue Oberflächen sind verstärkt 3D-strukturiert**

Die Fertigung rauer Oberflächen wurde in **Kapitel 2** betrachtet, wobei auch festgestellt wurde, dass traditionelle Fertigungsverfahren meist gerichtete Rauheitsstrukturen, wie z.B. die kinematische Rauheit des Drehprozesses [Klo07, S. 57 f.], erzeugen.

Wie erläutert werden heute allerdings verstärkt Fertigungsverfahren genutzt, die ungerichtete Strukturen erzeugen und somit nicht mehr mithilfe eines einzelnen Profilschnitts charakterisiert werden können (vgl. [Lea13a, S. 6], [See17, S. 1], [Sto00, S. 3], [Peh11, S. 457]). Beispiele hierfür sind Riblet-Oberflächen und Oberflächen mit definierten optischen Eigenschaften [Lea13a, S. 5].

Somit führen die vorher genannten neuen Eigenschaften und Anforderungen an Oberflächen auch dazu, dass verstärkt flächenhafte Strukturen auf rauen Oberflächen zu finden sind (vgl. [Lea13a, S. 5]).

- **Raue Oberflächen werden mit Modellen beschrieben** ⁹

Es folgt eine Betrachtung zur Modellierung technischer rauer Oberflächen. Dazu bestehen verschiedene Möglichkeiten. Seewig schlägt z.B. für geschlossene Profile die Darstellung auf Basis der Fourier-Reihe vor [See00, S. 26]. Dabei kann ein Profil $z(x)$ nach Überführung der Fourier-Reihe in die Fourier-Transformierte $Z(\omega)$ durch die inverse Fourier-Transformation charakterisiert werden [See00, S. 26]:

$$z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) \cdot e^{i\omega \cdot x} \cdot d\omega. \quad (2)$$

Für den ortsdiskreten Fall, der für jeden Messdatensatz repräsentiert wird, ergibt sich auf Basis des ortsdiskreten Spektrums $Z_d(\Omega)$ analog die folgende Rekonstruktion des k -ten Profilpunkts z_k [See00, S. 29]:

$$z_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Z_d(\Omega) \cdot e^{i\Omega \cdot k} \cdot d\Omega. \quad (3)$$

Wu beschrieb eine Zusammenfassung vorheriger Untersuchungen auf diesem Gebiet und untersuchte ebenfalls einen Ansatz über die diskrete Fouriertransformation bzw. deren Implementierung als Fast Fourier Transformation (FFT), um Topographien zu erzeugen, die gewünschte Eigenschaften basierend auf dem „Leistungsdichtespektrum oder der Autokorrelationsfunktion“ aufwiesen [Wu00, S. 47]. Das Verfahren wurde in späteren Arbeiten erweitert (vgl. [Wu04, S. 339 f.]). Bakolas nutzte ebenfalls die FFT [Bak03, S. 546] und Pawlus untersuchte u.a. den Ansatz von Wu für die Modellierung plateauartiger Oberflächen (vgl. [Paw08a, S. 459 f.]).

⁹ Ergebnisse und Inhalte dieses Abschnitts wurden vorab veröffentlicht:
[Eif18a] Eifler, M.; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: *Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation*. Technologies (6) 2018, 1, 3.

Bereits 1992 untersuchten Hu und Tonder die Vorgabe einer definierten Autokorrelationsfunktion sowie der Verteilung der Topographiehöhen, um eine Filterung zufällig erzeugter Daten derart durchzuführen, dass die resultierende Oberfläche diese vorgegebenen Eigenschaften abbildet [Hu92, S. 83]. Die Autokorrelationsfunktion ist entsprechend ein weiteres nützliches Werkzeug für die Beschreibung von Rauheit [Whi11, S. 44]. Manesh et al. nutzten die 3D-Autokorrelationsfunktion auf deren Basis ein Filter zur Transformation von Oberflächen ausgelegt wurde, um eine künstliche Oberfläche zu generieren (vgl. [Man10, S. 1375]).

He und Davies nannten als Möglichkeit zur Beschreibung des Frequenzspektrums neben PSD und ACF auch die Strukturfunktion [Lea15a, S. 2]. Auch Krolczyk et al. nutzten die PSD-Funktion zur Charakterisierung technischer Oberflächen [Kro16, S. 464].

Eine weitere alternative Beschreibung zur Fourier-Transformation stellt die Charakterisierung einer rauen Oberfläche „durch eine geeignete Verteilungsdichtefunktion“ [See00, S. 39] dar. Hüser et al. geben einen Überblick über verschiedene Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, die zur Beschreibung von Rauheit genutzt wurden [Hüs16b, S. 7 ff.]. Whitehouse konstatierte auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik, dass für die Verteilung von rauen Oberflächen standardmäßig eine Normalverteilung angenommen werden kann [Whi11, S. 44]. Für die Synthese technischer Oberflächen wird häufig die von Johnson 1949 vorgeschlagene Methodik eingesetzt, welche die Abbildung beliebiger Verteilungen auf eine Normalverteilung gestattet (vgl. [Joh49, S. 149]), z.B. von Manesh et al. [Man10, S. 1375] und Hüser et al. [Hüs16b, S. 9].

Im Rahmen der statistischen Herangehensweise zur Charakterisierung von Rauheitsprofilen wurde weiterhin von Seewig die Nutzung eines „Auto-Regressive Moving Average“-Modells (ARMA) vorgeschlagen, bei dem ein Profil z auf Basis eines auto-regressiven Anteils sowie eines Moving-Average Anteils mit dem Rauschprofil n und zugehörigen Parametern AR_j und MA_j dargestellt wird [See00, S. 41]:

$$z_k + \sum_{j=1}^{l_{AR}} z_{k-j} \cdot AR_j = n_k + \sum_{j=1}^{l_{MA}} n_{k-j} \cdot MA_j . \quad (4)$$

Auch Watson und Spedding untersuchten bereits in den 80er-Jahren entsprechende Ansätze [Wat82, S. 219 ff.]. Whitehouse betrachtete Zeitreihenmodelle sowie deren Verknüpfung zu funktionellen Eigenschaften [Whi83, S. 495] und auch weitere

Vorgehensweisen über das ARMA-Modell finden sich in der Literatur [You91, S. 29 ff.].

Kay und Marple stellten das ARMA-Modell dabei als typische Form einer Differenzgleichung dar und beschrieben, wie auf Basis der Z -Transformation die Übertragungsfunktion eines Systems $G(z)$ ermittelt werden kann (vgl. [Kay81, S. 1387]):

$$G(z) = \frac{\sum_{j=1}^{l_{AR}} AR_j \cdot z^{-j}}{\sum_{j=1}^{l_{MA}} MA_j \cdot z^{-j}} = \frac{AR(z)}{MA(z)}. \quad (5)$$

Das Ergebnis $X(z)$ der Z -Transformation einer diskreten Wertefolge $x_k, k \in \mathbb{N}$ kann dabei wie folgt berechnet werden [Mer10, S. 86]:

$$X(z) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} x_j \cdot z^{-j}. \quad (6)$$

Wird als Eingangssignal ein weißes Rauschen eingesetzt, so kann ebenfalls ein direkter Zusammenhang zum Leistungsdichtespektrum $PSD(\omega)$ des Prozesses hergeleitet werden (vgl. [Kay81, S. 1387 f.]):

$$PSD(\omega) = \sigma^2 \cdot \Delta t \cdot \left| \frac{AR(e^{i\omega\Delta t})}{MA(e^{i\omega\Delta t})} \right|, \quad (7)$$

wobei σ^2 die Varianz des Eingangssignals, Δt die Abtastschrittweite und ω die Kreisfrequenz bezeichnet (vgl. [Kay81, S. 1387 f.]).

Die Darstellung des Leistungsdichtespektrums (PSD) erfolgt dabei für die folgenden Frequenzen [Kay81, S. 1387]:

$$\frac{-\pi}{\Delta t} \leq \omega \leq \frac{\pi}{\Delta t}. \quad (8)$$

Jacobs et al. identifizierten und betrachteten drei offene Fragestellungen bei der Anwendung der PSD für die Topographie-Auswertung: das Fehlen eines einheitlichen Berechnungsvorgangs, der Verlust an Information bei der messtechnischen Erfassung der PSD auf Basis einer Topographiemessung, welcher durch Bandbegrenzung und Artefakte des Messgeräts unvermeidlich ist, sowie die Tatsache, dass besonders kleine Strukturen aufgrund von z.B. messgeräte-abhängigen Artefakten zwar am wenigsten zuverlässig messtechnisch für die Ermittlung der PSD erfasst werden

können, für einige funktionelle Oberflächeneigenschaften aber relevant sind [Jac17, S. 3].

Weiterhin kann konstatiert werden, dass das Leistungsdichtespektrum auch auf Basis der sogenannten Autokorrelationsfunktion („Selbstähnlichkeit“) berechnet werden kann [Whi11, S. 51]. Die ACF ist dabei in Abhängigkeit der Verschiebung τ in einem Intervall l wie folgt definiert [Whi11, S. 45]:

$$ACF(\tau) = \lim \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} z(x) \cdot z(x + \tau) \cdot dx. \quad (9)$$

Entsprechend folgt unter Anwendung der Fourier-Transformation die folgende mathematische Verknüpfung [Whi11, S. 51]:

$$PSD(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} AFC(\tau) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \cdot d\tau \quad (10)$$

sowie [Chi00, S 641]:

$$ACF(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} PSD(\omega) \cdot e^{i\omega\tau} \cdot d\omega. \quad (11)$$

Teilweise kann das ARMA-Modell auch vereinfacht werden: Werden alle l_{MA} Moving-Average Parameter vernachlässigt ($MA_j = 0$), ergibt sich ein rein auto-regressives Modell (AR), welches häufig bereits eine gute Näherung für technische Oberflächen darstellt [See00, S. 41].

Uchida et al. führten einen Vergleich kausaler und nicht-kausaler AR-Ansätze zur Modellierung rauher Oberflächen durch [Uch04, S. 1288]. Auf dieser Basis wurde auch ein Algorithmus zur Auslegung flächenhafter rauher Kalibriernormale vorgestellt [Uch11, S. 565]. Dieses Modell ist ebenfalls zur Erzeugung von „unregelmäßigen Normalen“ in der Norm DIN EN ISO 25178-70 enthalten (vgl. [25178-70, S. 35 f.]).

Ogilvy und Foster hingegen untersuchten Modelle auf Basis des Moving-Average Verfahrens, wobei mehrere Gewichtungsansätze zur Abbildung rauher Oberflächenprofile verglichen wurden [Ogi89, S. 1244].

Aus dem Zusammenhang in Gleichung (9) wird deutlich, dass die ACF sich ebenfalls zur Erzeugung von Oberflächen eignet, da sie alle frequenzabhängigen Informationen beinhaltet und eine integrale Betrachtung der Rauheit ermöglicht [Chi00, S. 641]. Ein entsprechender Ansatz zur Erzeugung von rauhen Oberflächen wurde bereits 1978 von

Patir vorgestellt (vgl. [Pat78, S. 263 ff.]). Gu und Huang nutzten ebenfalls die ACF zur Erzeugung von rauen Strukturen [Gu90, S. 276].

Eine alternative Beschreibung, welche auf anschauliche Weise Oberflächencharakteristiken darstellt, ist die bereits erwähnte Strukturfunktion $SF(\tau)$ [He14, S. 2]. Diese repräsentiert den Verlauf der Varianz eines Profils $z(x)$ in Abhängigkeit einer variablen Koordinate $x + \tau$ [He14, S. 1]:

$$SF(\tau) = E\left[\left(z(x + \tau) - z(x)\right)^2\right], \quad (12)$$

wobei der Operator $E[\]$ entsprechend den Erwartungswert charakterisiert.

3.2 Beschreibung rauer Oberflächen durch AR-, MA- und ARMA-Modelle ¹⁰

Es wurden unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung von rauen Oberflächen, u.a. auf Basis stochastischer Modelle, vorgestellt. Häufig erfolgt dabei, wie in **Kapitel 3.1** dargestellt, die Berechnung von synthetischen Oberflächendaten auf Basis einer definierten ACF. Letztlich kann allerdings auch die Umkehrung dieses Ansatzes als „Reverse Engineering“ nützliche Informationen bereitstellen. Dies zielt auf die Fragestellung ab, wie eine vorhandene Oberflächentopographie auf Basis ihrer stochastischen Eigenschaften möglichst realistisch beschrieben werden kann. Entsprechend sollen die frequenzabhängigen Eigenschaften einer bekannten Oberfläche z.B. aus einem bestmöglich eingepassten stochastischen Modell extrahiert werden. Sind diese bekannt, so kann z.B. eine Vielzahl von Profilen mit möglichst ähnlichen Eigenschaften berechnet werden.

Die Nutzung von AR-, MA und ARMA-Modellen zu diesem Zweck soll dabei nachfolgend untersucht werden. So ist deren optimale Auswahl im Hinblick auf die Rauheitsmesstechnik bisher nicht umfassend untersucht. Watson und Spedding schlugen auf Basis empirischer Daten vor, bei MA-Modellen nicht mehr als etwa 30 Parameter zu nutzen [Wat82, S. 222]. Bohlmann setzte zwei bis acht AR-Parameter zur Modellierung von Oberflächen ein [Boh94, S. 75] und Seewig konstatierte, dass eine Zahl von fünf bis zehn Koeffizienten für eine adäquate Beschreibung rauer Oberflächen erforderlich seien [See00, S. 43].

¹⁰ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:
[Eif18a] Eifler, M.; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: *Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation*. Technologies (6) 2018, 1, 3.

Ideal ist allerdings eine Betrachtung, die automatisch ein Modell auswählt und auf Basis eines berechneten Residuums eine optimale Anzahl an Parametern definiert. Grundsätzlich existiert für die Klärung dieser Fragen ein Werkzeug, welches aus der Betrachtung von Zeitreihen stammt und dessen Eignung für die Beschreibung rauer Oberflächen nachfolgend untersucht werden soll: das ARMA_{sel}-Modell, welches 2000 von Broersen vorgestellt wurde (vgl. [Bro00, S. 766 ff.]).

Bohmann betrachtete zur Festlegung der Koeffizientenzahl den „Final Prediction Error“, der von Aikake (vgl. [Aka70, S. 203 ff.]) definiert wurde [Boh94, S. 74]. Diesen nutze auch Broersen bei der Definition der ARMA_{sel}-Methode, welche eine objektive Ermittlung des bestmöglichen AR-, MA- oder ARMA-Modells für die Beschreibung eines gegebenen Signals erlaubt [Bro00, S. 766]. Letztlich entspricht der Ansatz nach dem ARMA_{sel}-Modell dabei einer „Brute-Force“ Methode, die auf Basis nachfolgend eingeführter Gütekriterien das beste Modell auswählt [Bro00, S. 769].

Grundlage dieser Betrachtung ist entsprechend eine Spezifikation des Vorhersagefehlers unterschiedlicher Modelle [Bro00, S. 769]. Für die Charakterisierung von AR-Modellen wird das bereits genannte Kriterium nach Aikake genutzt, auf dessen Basis ein Zusammenhang zwischen der residualen Varianz s_{res}^2 eines AR-Prozesses der Ordnung l_{AR} zum Vorhersagefehler $PE(l_{AR})$ bei einem Eingangssignal mit N diskreten Werten folgendermaßen hergestellt werden kann [Aka70, S. 209] [Bro93, S. 198 f.] [Bro00, S. 769]:

$$PE(l_{AR}) = s_{res}^2 \cdot \prod_{n=1}^{l_{AR}} \frac{1 + \frac{1}{(N-n+1)}}{1 - \frac{1}{(N-n+1)}}. \quad (13)$$

Auch bei Anwendung von MA-Modellen mit einer Anzahl von l_{MA} Koeffizienten sowie ARMA-Modellen, welche l_{AR} AR- und $l_{MA} = l_{AR} - 1$ MA-Koeffizienten nutzen, lässt sich ein analoger Zusammenhang ableiten, wobei unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesamtanzahl an Koeffizienten N_t für den Vorhersagefehler gilt [Bro00, S. 769] [Bro02, S. 215]:

$$PE(N_t) = s_{res}^2 \cdot \frac{1 + \frac{N_t}{N}}{1 - \frac{N_t}{N}}. \quad (14)$$

Unter Nutzung des Vorhersagefehlers kann außerdem ein „Modellfehler“ von ARMA-Prozessen berechnet werden [Bro98, S. 1749 f.]. Durch die Berücksichtigung dieser

statistischen Vorhersagefehler bei der Modelauswahl lässt sich diese letztlich auf einer objektiven Grundlage durchführen, was auf das Modell des kleinsten Vorhersagefehlers führt [Bro00, S. 769].

Der vorgestellte Ansatz von Broersen kann dabei auch für die Modellierung rauer Oberflächen ein interessantes Werkzeug sein. Die Beschreibung von rauen Oberflächen mit unterschiedlichen Merkmalen soll dabei nachfolgend untersucht werden. Die mit den Modellen ermittelten stochastischen Eigenschaften von Oberflächenprofilen können dabei z.B. für die numerisch effiziente Erzeugung von virtuellen Testdaten genutzt werden.

Zur Untersuchung der Algorithmen nach Broersen (vgl. [Bro00], [Bro93], [Bro98], [Bro02]), welche als Matlab-Toolbox verfügbar sind, eignet sich als Anwendung das in **Abbildung 16** dargestellte Normal Rubert 130, welches Oberflächen variabler typischer industrieller Fertigungsverfahren jeweils mit unterschiedlich stark ausgeprägter technischer Rauheit aufweist.

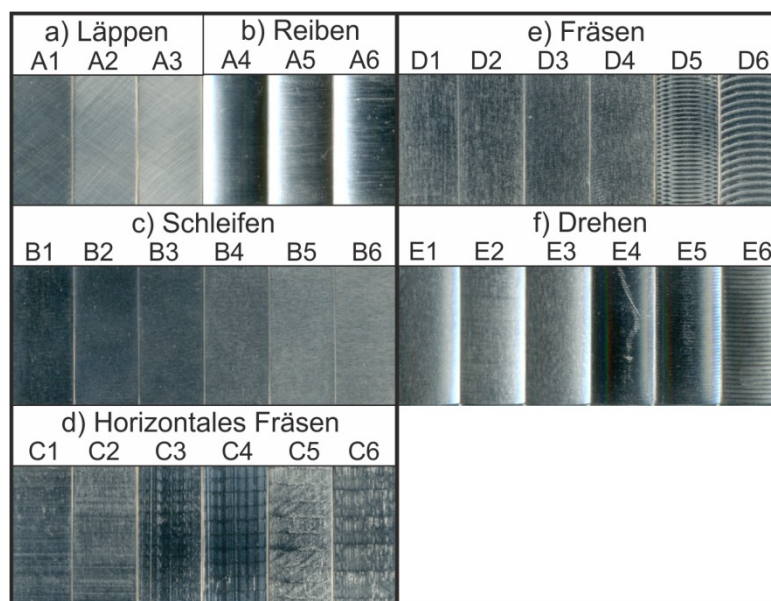


Abbildung 16: Untersucher Satz von technischen Oberflächen Rubert 130. In der Nomenklatur angegeben sind jeweils das Fertigungsverfahren sowie die Ausprägung der Rauheit

Um Messdaten für die Anwendung des Modells zu generieren, wurden die 30 dargestellten Oberflächen unter Anwendung des Tastschnittgerätes Hommel Nanoscan (Tastspitze $R_{tip} = 5\mu m$) erfasst. Bevor eine Anwendung des ARMAsele-Algorithmus erfolgte, wurden zur Vorverarbeitung für jeden Tastschnitt eine Geradenausrichtung nach dem Least-Squares-Verfahren, eine lineare Gauß-Filterung ($\lambda_c = 0,8mm$, $\lambda_s = 2,5\mu m$) sowie eine anschließende Extraktion von jeweils 50

Auswertestellen der Länge $l = 4\text{mm}$ im Abstand von je $200\ \mu\text{m}$ zueinander, ausgeführt. Die Profile C3-C6 und D6 weisen aufgrund ihrer mechanischen Bearbeitung langwellige deterministische Oberflächenstrukturen auf, so dass bei diesen Profilen eine Erhöhung der Filter-Grenzwellenlänge λ_c in der Vorverarbeitung vorgenommen wurde.

Anschließend erfolgte eine Anwendung des ARMA_{sel}-Algorithmus auf alle 30x50 vorverarbeiteten Datensätze. Zur Beurteilung der Oberflächen und des Einflusses sowohl von Fertigungsverfahren als auch Ausprägung der Rauheit wurden die Art des ausgewählten Modells (AR-, MA- oder ARMA), die jeweilige zur bestmöglichen Modellierung erforderliche Anzahl an Koeffizienten sowie der Vorhersagefehler analysiert. Somit lassen sich Schlussfolgerungen treffen, mit welchen und wie vielen Informationen eine stochastische Beschreibung des jeweiligen Oberflächenprofils erfolgen kann.

Abbildung 17 zeigt jeweils einen Bereich des Tastschnitts der geläppten Probe mit der am geringsten (A1) und am stärksten ausgeprägten (A3) Rauheit. Auf alle geläppten Profilausschnitte wurde der beschriebene ARMA_{sel}-Ansatz angewendet, wobei die in **Abbildung 17 c)** dargestellte Modellauswahl erfolgte. Die Tabelle zeigt dabei, wie häufig bei den 50 Auswertungen jedes Oberflächentyps A1-A3 welches Modell ausgewählt wurde. Bei Betrachtung des Vorhersagefehlers lässt sich feststellen, dass dieser für geläppte Profile bei allen drei Modelltypen nahezu identisch groß ist. Dargestellt sind beim Vorhersagefehler der empirische Mittelwert sowie die empirische Standardabweichung jeweils aller 50 besten Modelle der einzelnen drei Modelltypen. Das jeweils optimale Modell aus allen drei Modelltypen ist wiederum als ARMA_{sel}-Modell markiert. Entsprechend kann gefolgert werden, dass sich grundsätzlich alle drei Modelltypen zur Abbildung der stochastischen Eigenschaften geläppter Profile anbieten. Die jeweilige Anzahl an Koeffizienten der optimalen Modelle stellt Teil **d)** der Abbildung dar.

Werden geriebene Oberflächen (A4-A6) betrachtet, so ergeben sich aufgrund ihrer ähnlich stochastischen Höhenverteilung übereinstimmende Ergebnisse, wobei auch hier alle drei Modelltypen in etwa gleich große Werte des Vorhersagefehlers liefern. Hier werden allerdings ausschließlich AR- und ARMA-Modelle als optimales Modell berechnet. Die grafische Darstellung der Ergebnisse der Modellauswahl ist analog zur Aufbereitung von **Abbildung 17** für alle 50 Auswerteabschnitte je Profil in **Anhang C** dargestellt. Grundsätzlich kann dabei festgestellt werden, dass für rauere geriebene Oberflächen bei Anwendung des ARMA-Modells bereits mit einer noch geringeren

Anzahl an Koeffizienten die Beschreibung ihrer stochastischen Eigenschaften erfolgen kann.

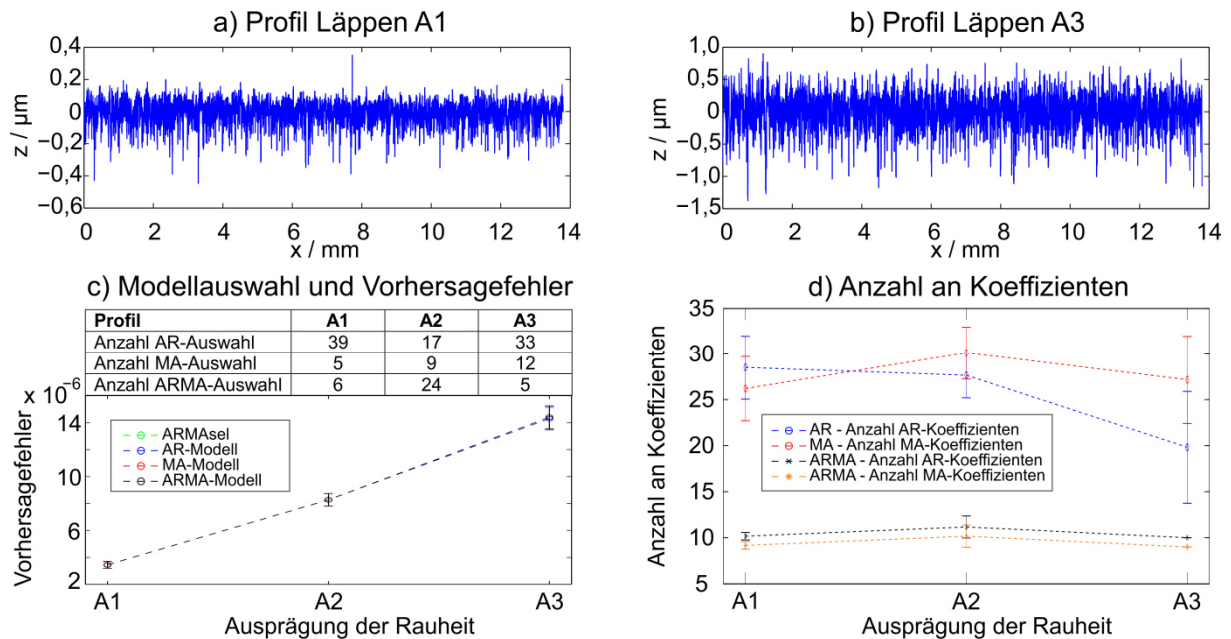


Abbildung 17: Anwendung des ARMAseI-Algorithmus auf geläppte Profile, Modellauswahl, Vorhersagefehler und optimale Anzahl an Koeffizienten

Vom Satz der Rubert-Normale sind weiterhin sechs mit variablem Grad an Rauheit geschliffene Oberflächen (B1-B6) untersucht worden, deren Ergebnisse bei der Beschreibung mithilfe des ARMAseI-Algorithmus in **Abbildung 18** zusammengefasst sind. Hierbei scheint für kleine Rauheiten das MA-Modell am passendsten für die Modellierung. Wird der Grad der Rauheit erhöht, werden hingegen verstärkt AR-Modelle als ARMAseI-Modell ausgewählt. Trotz der Unstetigkeitsstellen im Profil B1 weist dieses feine Profil aber zusammen mit B2 den kleinsten Vorhersagefehler auf. Für eine stärkere Ausprägung der Rauheit lässt sich neben einem zunehmenden Vorhersagefehler auch eine abnehmende Anzahl erforderlicher Modell-Koeffizienten feststellen.

Als viertes Fertigungsverfahren wurden die Profile C1-C6, die durch horizontales Fräsen hergestellt worden sind, betrachtet, deren Ergebnisse in **Abbildung 19** gezeigt sind. Da dieses Fertigungsverfahren tendenziell eher deterministische Oberflächenstrukturen hervorruft, kann hier festgestellt werden, dass bei zunehmender Rauheit mehr Koeffizienten zur Modellierung gewählt werden, da in diesem Fall die deterministischen Oberflächenstrukturen einflussreicher werden. Für diese deterministischen Oberflächen werden außerdem zunehmend AR-Modelle ausgewählt und der Vorhersagefehler des MA-Modells steigt für die Oberfläche C6 signifikant an.

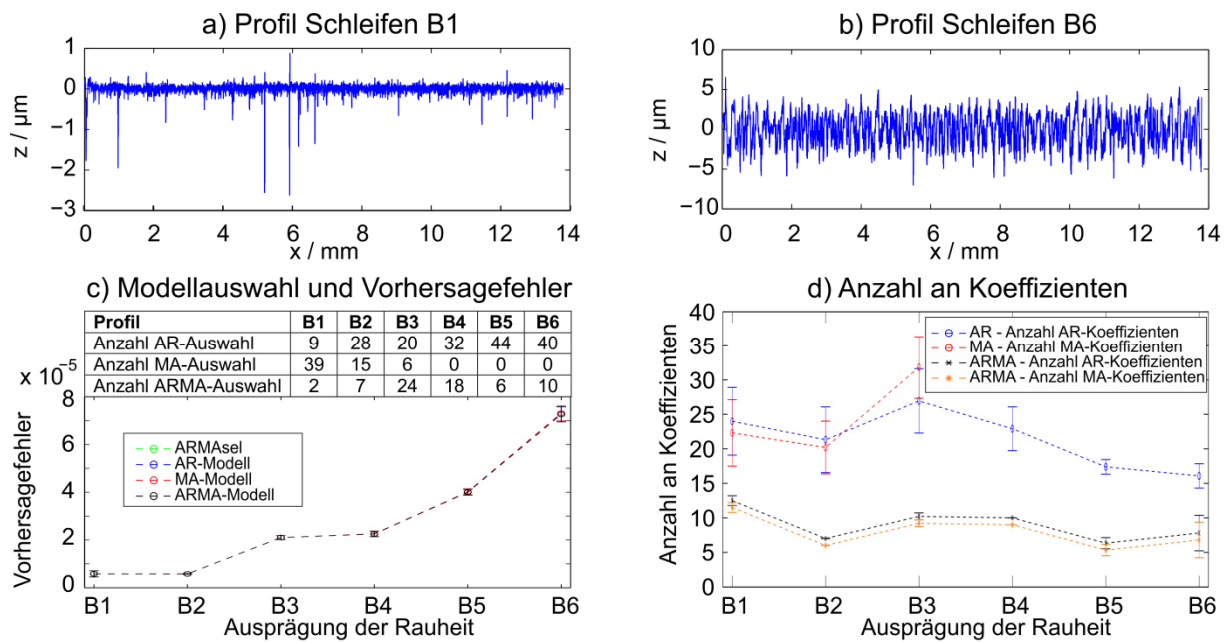


Abbildung 18: Anwendung des ARMAseI-Algorithmus auf geschliffene Profile, Modellauswahl, Vorhersagefehler und optimale Anzahl an Koeffizienten

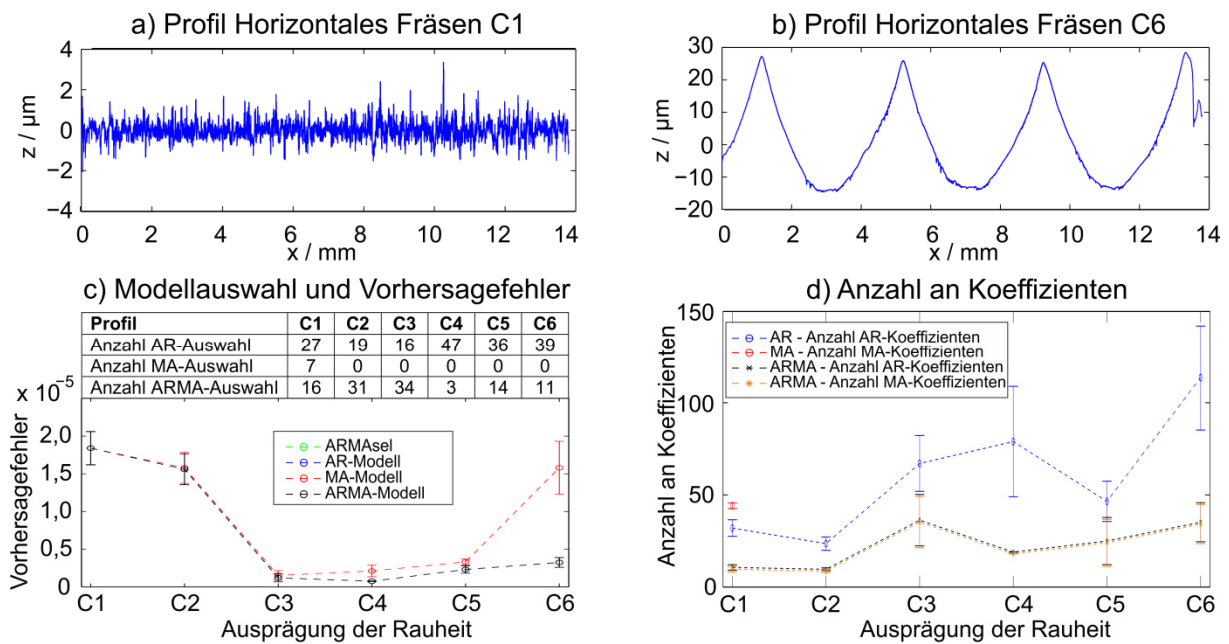


Abbildung 19: Anwendung des ARMAseI-Algorithmus auf horizontal gefräste Profile, Modellauswahl, Vorhersagefehler und optimale Anzahl an Koeffizienten

Bei der Betrachtung gefräster Oberflächen (D1-D6), deren Ergebnisse in **Anhang C** gezeigt werden, kann ebenfalls festgestellt werden, dass für die Modellierung der sehr rauen, verstärkt deterministischen Oberflächen erst eine höhere Zahl an Modell-Koeffizienten in den Zeitreihen-Modellen zu einem kleinen Vorhersagefehler führt.

Als letztes Fertigungsverfahren wurden die gedrehten Profile E1-E6, deren Ergebnisse ebenfalls in **Anhang C** gegeben sind, mit dem ARMAseI-Algorithmus untersucht,

wobei hier ausschließlich AR- und ARMA-Modelle zum jeweils kleinsten Vorhersagefehler führen. Hier kann bei der Anzahl der benötigten Koeffizienten allerdings noch ein anderer Einfluss festgestellt werden: Die weniger rauen Oberflächen benötigen mehr Koeffizienten für die Beschreibung ihrer stochastischen Eigenschaften als die rauen Profile. Dies kann mit der zunehmenden Komplexität der Oberflächen zusammenhängen. Der hierdurch entstehende Einfluss auf die benötigte Zahl an Koeffizienten scheint im Fall der gedrehten Oberflächen gewichtiger zu sein als der Einfluss der zunehmend deterministischen Ausprägung bei steigender Rauheit.

Letztlich kann zunächst als Fazit konstatiert werden, dass die Oberflächen des Normals Rubert 130 unabhängig vom Grad der Rauheit sowie dem Fertigungsverfahren auf ein Zeitreihenmodell, welches die entsprechenden stochastischen Eigenschaften nach den Kriterien des ARMAse1-Ansatzes bestmöglich annähert, zurückgeführt werden können. Inwiefern hier allerdings nach quantitativen Maßstäben eine hinreichend präzise Abbildung der Eigenschaften durch die Modelle erfolgt, soll weiter untersucht werden.

Hierzu eignen sich die PSD-Funktion bzw. das Periodogramm, welche auf zwei unterschiedliche Arten ermittelt werden können: zunächst mithilfe der Überführung des Profils $\vec{z} = z_n, n = 0, \dots, N-1$ in den Frequenzbereich unter Anwendung der diskreten Fourier-Transformation (DFT) (vgl. [Sch08, S. 192], [Wer06, S. 147]):

$$Z_{d,k} = \sum_{n=0}^{N-1} z_n \cdot e^{\frac{-i \cdot 2\pi \cdot k \cdot n}{N}}, k = 0, \dots, N-1 \rightarrow PSDP_k = \frac{1}{2\pi \cdot N} |Z_{d,k}|^2, k = 1, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil, \quad (15)$$

wobei $\lceil \cdot \rceil$ den Aufrundungsoperator bezeichne. Bei reellen Signalen wird entsprechend die Symmetrie im Frequenzbereich ausgenutzt, was auf folgende notwendige Normierungen zur Darstellung des Periodogramms $\mathbf{PSD}_p = (\vec{\Omega}, P\vec{SD}1)$ führt (vgl. [Mat18]):

$$PSDP_k = 2 \cdot PSDP_k, k = 2, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil, \quad (16)$$

$$PSD1_k = 10 \cdot \log_{10}(PSDP_k), P\vec{SD}1 = PSD1_k, k = 1, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil, \quad (17)$$

$$\Omega_k = (k-1) \cdot \frac{2\pi}{N}, \vec{\Omega} = \frac{\Omega_k}{\pi}, k = 1, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil. \quad (18)$$

Die zweite Möglichkeit, die PSD-Funktion zu ermitteln, entspricht dem von Kay und Marple [Kay81, S. 1387 f.] skizzierten Ansatz, der in **Kapitel 3.1** vorgestellt wurde.

Broersen nutzte den gleichen Ansatz und stellte den Zusammenhang zwischen den ARMA-Koeffizienten sowie der PSD-Funktion auf Basis der Varianz des Eingangsräuschens σ^2 wie folgt her [Bro02, S. 213]:

$$PSD2_k = \frac{\sigma^2}{2\pi} \cdot \frac{\left| 1 + \sum_{j=1}^{l_{MA}} MA_j \cdot e^{-i\Omega_k j} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{j=1}^{l_{AR}} AR_j \cdot e^{-i\Omega_k j} \right|^2}, \quad k = 1, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil. \quad (19)$$

Analog zur PSD-Funktion, die direkt aus dem Profil berechnet wurde, sind auch hier eine Normierung und logarithmische Darstellung anzuwenden, damit ein quantitativer Vergleich dieser beiden Ergebnisse ermöglicht wird:

$$PSD2_k = 10 \cdot \log_{10}(PSD2_k), \quad \vec{PSD2} = PSD2_k, \quad k = 1, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} + 1 \right\rceil. \quad (20)$$

Die Übereinstimmung zwischen den Werten von $\vec{PSD1}$ sowie $\vec{PSD2}$ wird auf Basis der mittleren quadratischen Abweichung asd bei allen 50 Auswertungen je Oberfläche berechnet. Da eine Auswertung bei gleichen Frequenzen erfolgt, kann so letztlich direkt beurteilt werden, wie gut die stochastischen Eigenschaften der jeweiligen Oberfläche durch das AR-, MA- oder ARMA-Modell angenähert werden:

$$asd = \frac{\sum_{k=1}^{\lceil N/2+1 \rceil} (PSD1_k - PSD2_k)^2}{\lceil N/2+1 \rceil}. \quad (21)$$

Werden die sich ergebenden Werte in **Tabelle 10** miteinander verglichen, so kann festgestellt werden, dass nicht bei allen Fertigungsverfahren ein Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Rauheit und der in Gleichung (21) definierten Modellabweichung festzustellen ist.

Der entscheidende Faktor für die Modellqualität ist hingegen wie deterministisch oder stochastisch eine Oberfläche ausgeprägt ist. Die Fertigungsverfahren Läppen, Reiben und Schleifen führen zu stochastisch ausgeprägten Oberflächen, welche mit den stochastischen Zeitreihenmodellen entsprechend gut beschrieben werden können. Insbesondere bei den gedrehten und gefrästen Oberflächen ist hingegen mit zunehmender Rauheit eine stark deterministisch ausgeprägte Rauheit festzustellen, die dazu führt, dass mit den stochastischen Modellen nur noch eine weniger genaue Annäherung der Oberflächeneigenschaften möglich ist.

Dieser Sachverhalt soll an einem Beispiel ebenfalls illustriert werden: **Abbildung 20** stellt die berechneten PSD-Funktionen der Oberflächen B6 und E6 für beide Berechnungsmethoden gegenüber. Bei Betrachtung der Oberfläche B6, welche offensichtlich einer sehr stochastischen Ausprägung unterliegt, weisen die unterschiedlich berechneten PSD-Funktionen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Wird hingegen das Profil E6 betrachtet, so haben die unterschiedlich berechneten PSD-Funktionen aufgrund der nur in geringem Umfang zufällig ausgeprägten Strukturen eine nicht unwesentliche Abweichung zueinander.

Tabelle 10: Vergleich der PSD-Funktion aus dem Profil sowie aus dem ARMA-Modell, asd in $(db/rad)^2$

	1 (Fein)	2	3	4	5	6 (Rau)
Läppen A1-A3	793,43 ±145,66	442,52 ±126,41	241,82 ±92,57	-	-	-
Reiben A4-A6	-	-	-	125,79 ±54,51	252,67 ±186,56	450,03 ±241,73
Schleifen B1-B6	599,20 ±168,52	449,88 ±130,49	190,59 ±81,91	107,40 ±40,61	120,47 ±75,34	254,55 ±167,72
Horizontales Fräsen C1-C6	128,49 ±53,65	119,42 ±65,36	633,30 ±308,22	845,03 ±386,99	2365,10 ±799,30	1375,94 ±539,69
Fräsen D1-D6	118,06 ±38,05	176,06 ±98,03	317,77 ±212,99	756,30 ±398,38	1455,34 ±479,92	2335,25 ±688,24
Drehen E1-E6	126,57 ±44,75	132,47 ±73,99	192,15 ±127,93	1287,04 ±418,82	1864,56 ±522,53	2594,69 ±802,70

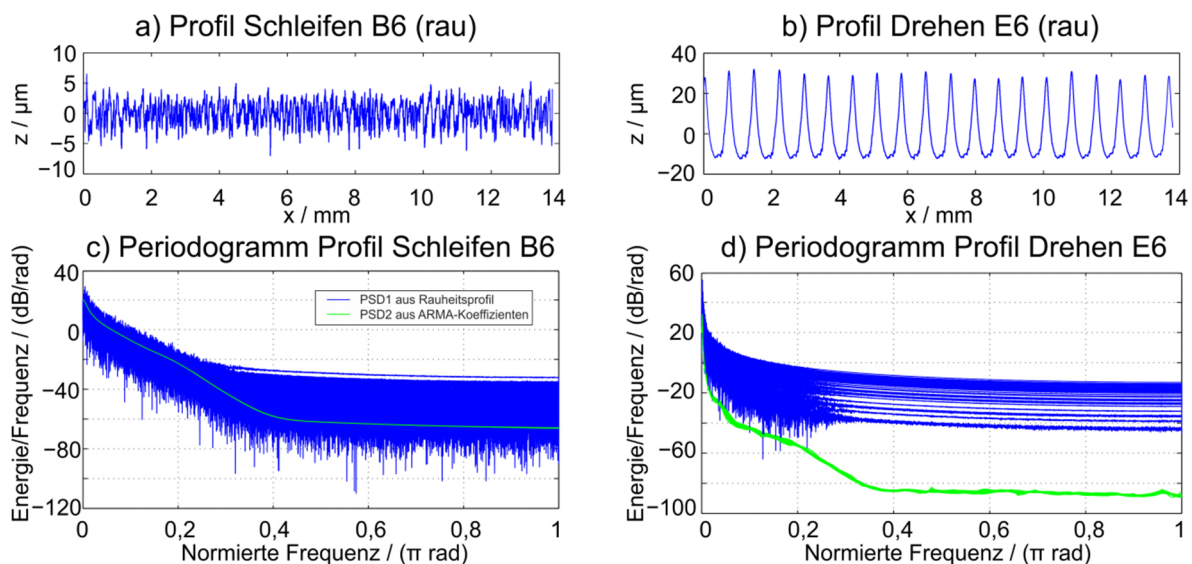


Abbildung 20: Periodogramme bei Modellierung von stochastischen Profilen (exemplarisch B6 Schleifen) sowie von deterministischen Profilen (exemplarisch E6 Drehen) mithilfe des ARMA-Modells

Abschließend stellt sich noch die Frage nach Anwendungsmöglichkeiten der mit dem ARMAseI-Modell ermittelten stochastischen Eigenschaften. Dabei besteht die Option, auf Basis dieser Eigenschaften eine Erzeugung einer Vielzahl künstlicher Oberflächenprofile mit möglichst ähnlichen stochastischen Eigenschaften durchzuführen. Dazu kann folgendes Vorgehen genutzt werden: Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung eines Ausgangsvektors \vec{z}_r mit einem normalverteilten Rauschen z_σ :

$$\vec{z}_r = z_r(i), i = 1, 2, \dots, N, z_r(i) = \frac{z_\sigma}{N}. \quad (22)$$

Weiterhin wurde in **Kapitel 3.1** beschrieben, dass eine Filter-Übertragungsfunktion $G(z)$ im Z -Bereich aus den Koeffizienten eines ARMA-Modells ermittelt werden kann, welche die entsprechenden Eigenschaften des zugrunde liegenden Oberflächenprofils frequenzabhängig abbildet.

Auf dieser Basis reicht also eine Filterung der generierten Daten \vec{z}_r mit den entsprechend durch das ARMAseI-Modell definierten Filterkoeffizienten aus, um ein Oberflächenprofil zu erzeugen, welches ähnliche Eigenschaften aufweist. Zur Implementierung kann z.B. das Faltungstheorem genutzt werden (vgl. z.B. [Mer10, S. 91]):

$$z_p(j) = g(j) \otimes z_r(j), j = 1, 2, \dots, N, \quad (23)$$

$$Z_p(z) = G(z) \cdot Z_r(z). \quad (24)$$

Werden die berechneten Testprofile anschließend normiert, so können sie für das Training neuronaler Netze genutzt werden, indem mit wenig Rechenaufwand eine große Zahl an Testdaten mit spezifischen Eigenschaften eines definierten Fertigungsverfahrens zur Verfügung gestellt werden kann. Die nachfolgende **Abbildung 21** stellt einige entsprechend auf diese Weise berechnete Testdaten dar, wobei hier ebenfalls festgestellt werden kann, dass bei stochastischen Oberflächen eine präzisere Abbildung der Profileigenschaften mit dem ARMAseI-Ansatz möglich ist.

Wird ein neuronales Netz mit den erzeugten Testdaten aus den 30 vorgestellten Proben des Normals Rubert 130 trainiert, so lässt sich eine automatisierte Erkennung des Fertigungsverfahrens erlernen, was den messtechnischen Anwender mit automatischen Hinweisen zur ordnungsgemäßen Auswertung der entsprechenden Daten unterstützen kann. Bei einer entsprechend hohen Anzahl an Testdaten lassen

sich bei Prüfung der vorgestellten Messdaten Erkennungsraten von 60-78 % erzielen und teilweise kann festgestellt werden, dass lediglich ein einzelner Auswerteabschnitt eines Profils repräsentativ für den speziellen Fertigungsprozess, der zu dessen Erzeugung genutzt wurde, sein kann.¹¹

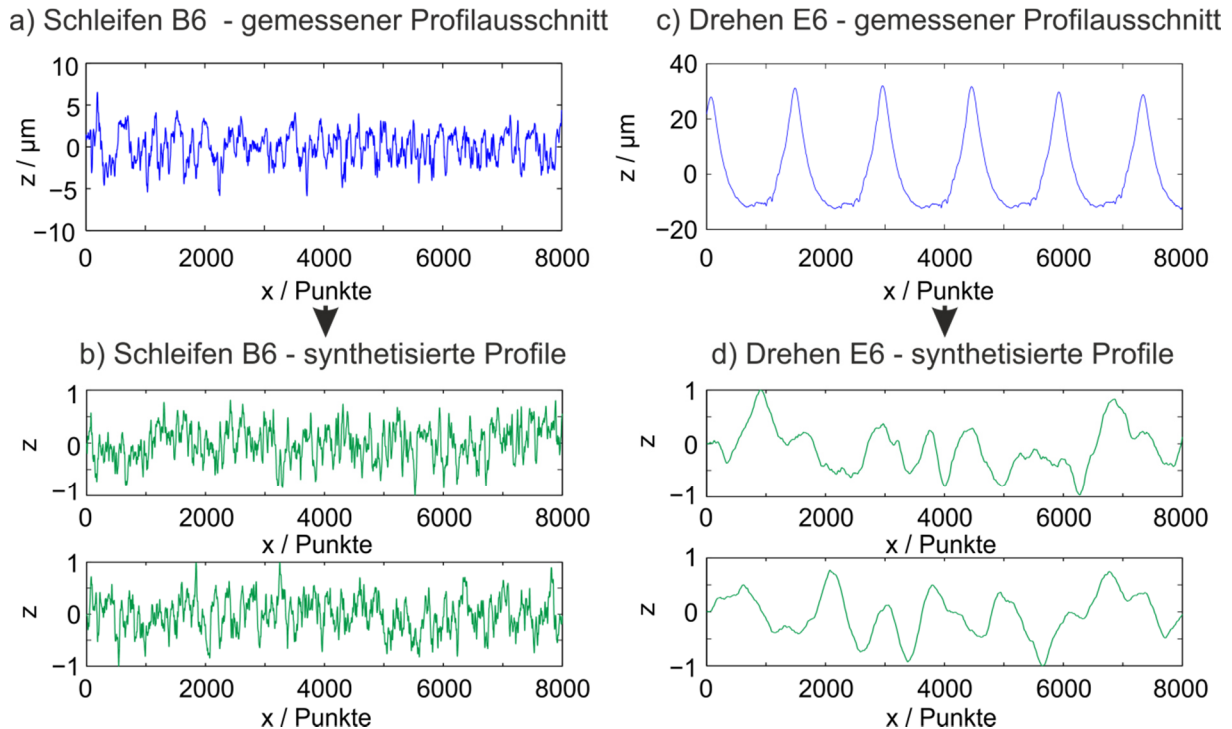


Abbildung 21: Berechnung von Testdaten aus dem ARMAseI-Modell, dargestellt sind jeweils die Profilausschnitte, welche zur Abbildung der stochastischen Eigenschaften genutzt wurden und zwei Beispiele für hieraus berechnete Profile

Nachdem die Beschreibung von rauen Oberflächen als solches in diesem Kapitel diskutiert wurde, soll anschließend die zentrale Betrachtung des Übertragungsverhaltens beim Messen dieser Oberflächen untersucht werden. Dabei können ebenfalls, wie bei der Beschreibung der eigentlichen Oberfläche, frequenzabhängige Ansätze gewählt werden, wie im folgenden **Kapitel 4** beschrieben wird.

¹¹ Weitere Ergebnisse insbesondere zu neuronalen Netzen auf Basis der beschriebenen Testdaten finden sich in folgender Publikation:

[Eif18a] Eifler, M.; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: *Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation*. Technologies (6) 2018, 1, 3.

4 Übertragungsverhalten technischer Rauheitsmessgeräte

Nach Betrachtungen zur wirklichen Oberfläche sowie zu ihrer Beschreibung wird deren Erfassung mithilfe von Rauheitsmessgeräten analysiert. So gilt allgemein mit dem Abtastoperator $S[\cdot]$ der folgenden Zusammenhang zwischen wirklicher Oberfläche Z_w und Ist-Oberfläche Z_a :

$$Z_a = S[Z_w]. \quad (25)$$

Das entsprechende Schaubild, das den relevanten Ausschnitt der Prozesskette der Fertigungsmesstechnik illustriert, ist in **Abbildung 22** gegeben.

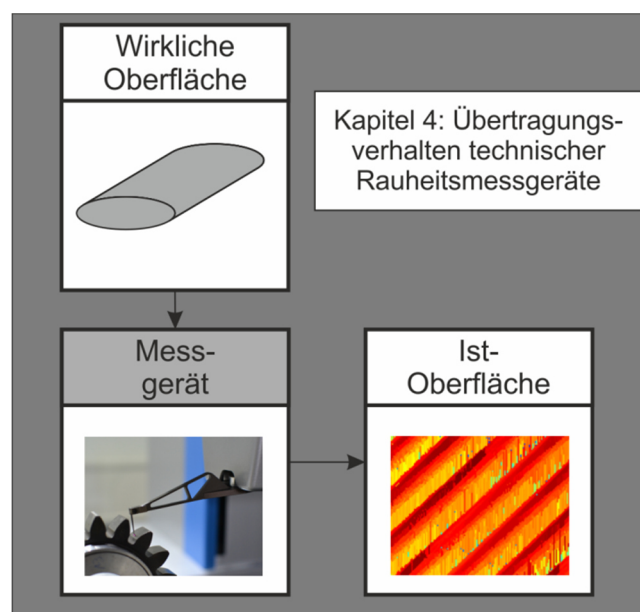


Abbildung 22: Übertragung von Oberflächen durch technische Rauheitsmessgeräte

Die Übertragung durch das Messgerät soll in diesem Kapitel eingehend untersucht werden. Dazu erfolgt auch hier zunächst eine Motivation der durchgeführten Untersuchungen durch eine Darstellung aktueller Tendenzen auf diesem Gebiet. Es wird hierbei zwischen grundsätzlichen Tendenzen sowie speziellen Tendenzen in Bezug auf das Übertragungsverhalten unterschieden.

4.1 Übertragung rauer Oberflächen - Einordnung und Tendenzen

Einführend werden generelle Rahmenbedingungen im Bereich der Messung rauer Oberflächen erläutert, bevor im Anschluss im Speziellen eine Betrachtung des Übertragungsverhaltens von Messgeräten ausgeführt wird.

4.1.1 Grundsätzliche Rahmenbedingungen für Messungen der GPS

Die Rahmenbedingungen in der geometrischen Produktspezifikation ändern sich fortwährend. Aktuell können folgend genannte Entwicklungen in diesem Bereich beobachtet werden:

- **Höhere Anforderungen an Genauigkeit und Wiederholbarkeit**

In **Kapitel 2** wurde bei den Betrachtungen zur Fertigung bereits konstatiert, dass Oberflächen immer präziser hergestellt werden können. Dies führt dazu, dass auch die Messtechnik, z.B. im Bereich der Längenmessung [Bos09, S. 28] höher auflösend werden wird.

Bis in die 2000er-Jahre hinein wurden dabei insbesondere die Rückführung und die Kenngrößen auf der entsprechend erforderlichen feinen Rauheitsskala untersucht [Blu05, S. 432]. Die Unsicherheit der Messungen wird kleiner und mittlerweile sind auch flächige Rauheitskenngrößen bis in den Nanometerbereich durch entsprechende Normale rückführbar (vgl. [Frü16, S. 681]). Die Kalibrierung der korrespondierenden Kenngrößen wurde u.a. ebenfalls vom Autor untersucht [Eif15c, S. 8]. Sogar Messung und Kalibrierung einzelner Atomstufen sind mittlerweile im Bereich des Möglichen [Koe11, S. 176].

- **Verstärkte Verbreitung der Inline- und Inprozess-Messtechnik sowie kleiner Qualitätsregelkreise**

Die Ausführung von Rauheitsmessungen direkt in der Fertigungsstraße (Inline-Messung) wird z.B. im Automotive-Sektor bereits durchgeführt [See09, S. 1]. Eine noch tiefergehende Integration von Messtechnik wird durch die Inprozess-Messtechnik erreicht, welche parallel zum Fertigungsprozess stattfindet (vgl. [Sch08a, S. 58]).

Durch die frühe Detektion ist es möglich, eine bessere Wertschöpfung zu erzielen, da Abweichungen der Oberfläche frühzeitig erkannt werden (vgl. [Sch08a, S. 58]). Für Fertigungsstraßen werden entsprechend robuste Messverfahren benötigt, um kleine Qualitätsregelkreise zu erzielen, wozu sich z.B. die winkelauflösende Streulichtmesstechnik [See09, S. 1] [See16b, S. 1] [Wen15, S. 3] oder pneumatische Abstandssensoren [Sch15c, S. 1] eignen.

Weitere Technologien, wie die Weißlichtinterferometrie, werden ebenfalls aktuell z.B. im Hinblick auf Schwingungskompensation für Anwendungen in der Inline-Messtechnik untersucht und weiterentwickelt (vgl. [Ter17, S. 1], [Sch13b, S. 16]).

- **Komplexere Oberflächenstrukturen müssen erfasst werden**

Dass Oberflächenstrukturen im Bereich der technischen Rauheit komplexer werden, wurde in **Kapitel 3** dargelegt. Die komplexen Oberflächen müssen ebenfalls auch messtechnisch erfasst werden und enthalten z.B. deterministische Strukturen (vgl. [Lea13a, S. 4]) oder Materialkontraste (vgl. [Tor17b, S. 1]). Da bei Betrachtung von Messprozessen das Zusammenspiel von Messgerät und Messobjekt eine wichtige Rolle einnimmt [Sch08c, S. 299], resultieren hieraus auch entsprechende Herausforderungen für Messgeräte. Besondere Herausforderungen für die messtechnische Erfassung treten außerdem dadurch auf, dass Produkte und ihre Geometrie stärker individualisiert werden [Whi16, S. 1].

- **Funktionelle Eigenschaften müssen geprüft werden**

In **Kapitel 3** wurde dargelegt, dass Bauteile häufiger tiefgreifende funktionelle Eigenschaften mithilfe ihrer Oberflächenstruktur abbilden. Hieran muss sich auch die Messtechnik orientieren und Methoden zur Prüfung dieser funktionellen Eigenschaften bereitstellen. So wurde z.B. ein auf Basis einer funktionsorientierten Betrachtung ausgelegtes Prüfschema von Weckenmann und Hartmann vorgestellt [Wec15, S. 74] [Wec13, S. 869].

- **Zunehmender Einsatz von 3D-Messtechnik und optischer Topographiemessgeräte**

Bei Betrachtung rauer Oberflächen (**Kapitel 3**) wurde dargelegt, dass heutige technische Oberflächen verstärkt 3D-strukturiert sowie isotrop sind. Entsprechend herrscht auch darüber Einigkeit, dass solche Oberflächen durch 2D-Messverfahren nicht hinlänglich charakterisiert werden können und der Einsatz von 3D-Messtechnik häufiger als bisher sinnvoll ist (vgl. [Peh11, S. 457], [Lea13a, S. 6 f.], [Jia07, S. 2072]).

Die flächenhafte Erfassung von Oberflächen kann allerdings mit taktilen Messgeräten in keiner für die Praxis akzeptablen Dauer durchgeführt werden, so dass hier ebenfalls eine stärkere Nachfrage nach optischen Messgeräten zur Erfüllung dieser Aufgaben gefolgert werden kann [Lea14a, S. 126].

Hierbei spielt ebenfalls eine Rolle, dass bei den offenen Punkten der Rückführung flächenhafter Topographiemessungen in den letzten Jahren Fortschritte erzielt wurden (vgl. u.a. [Giu12b, S. 1 ff.], [Giu12a, S. 1 ff.], [Giu13, S. 1 ff.], [Eif16a, S. 66 ff.], [Lea04, S. 1246 ff.], [Lea11, S. 49 ff.], [Lea15b, S. 545 ff.], [See14, S. 1. ff.], [Dai06, S. 545 ff.] sowie **Kapitel 2.2**), wobei die für die flächenhafte Rückführung erforderliche

Ausstattung nach derzeitigem Stand der Technik nicht allorts vorhanden ist [For13a, S. 2].

Auch die Standardisierung in diesem Bereich ist nach derzeitigem Stand noch unvollständig, allerdings Thema aktueller Normungsarbeit [See17, S. 3] und ein Aspekt, der nachfolgend separat behandelt werden soll.

- **Standardisierung der 3D-Topographiemessung**

Nach grundlegenden ersten Forschungstätigkeiten im Gebiet der 3D-Topographiemessung (vgl. Stout et al. [Sto00] sowie Blunt et al. [Blu03]) wurde 2003 im ISO TC 213 die Arbeitsgruppe 16 „Areal and profile surface texture“ mit der Aufgabe betraut, auch eine entsprechende Standardisierung herbeizuführen (vgl. [Blu03, S. 346], [See17, S. 1]).

Diese Standardisierung wurde und wird durch die Veröffentlichung der Normenserie DIN EN ISO 25178 erreicht, welche die flächenhaften Eigenschaften der Oberflächenbeschaffenheit behandelt (vgl. [25178-1, S. 1]) und somit die entsprechende Zeile im GPS-Matrixmodell ausfüllt (vgl. **Kapitel 1.2**) [25178-1, S. 31]. So sind z.B. durch die Bereitstellung der Norm DIN EN ISO 25178-2 im Jahr 2012 (vgl. [See17, S. 2]) klare Definitionen und Rahmenbedingungen für die korrekte industrielle Anwendung neuer flächenhafter Rauheitskenngrößen geschaffen worden (vgl. [25178-2, S. 12 ff.]). Die Normung einiger Themen, u.a. von Kalibrierprozessen für die flächenhafte Messung wird allerdings aktuell noch ausgearbeitet (vgl. [25178-700, S. 1 ff.] sowie **Kapitel 2.2.2**).

- **Einsatz virtueller Messtechnik**

Schmitt et al. gehen davon aus, dass aufgrund besserer Rechenkapazitäten die virtuelle Messtechnik in der Zukunft noch weiter Verbreitung finden wird [Sch08c, S. 309]. Die entsprechende Methodik ist dabei z.B. für die Analyse komplexer optischer Messsysteme geeignet und kann aus diesem Grund u.a. „zu einem verbesserten Verständnis des gesamten Messprozesses“ [Sch08b, S. 235] führen. Als weitere Motivation für die Nutzung virtueller Messgeräte kann zusätzlich aufgeführt werden, dass sich Informationen für die Messunsicherheitsanalyse gewinnen lassen [Sch08c, S. 298]. Der Autor hat dabei z.B. die Nutzung virtueller Messtechnik für die Auslegung von Kalibriernormalen untersucht [Eif16a, S. 1].

Schmitt et al. geben einen Überblick über verschiedene Anwendungen im Bereich der virtuellen Messtechnik [Sch08c, S. 298 ff.]. Einige seien ebenfalls nachfolgend kurz genannt: virtuelle Tastschnittgeräte wurden u.a. von Schwenke modelliert [Sch99,

S. 80 ff.] und eine Implementierung einer Abtastung erfolgt üblicherweise durch morphologische Filteroperationen [Kry04b, S. 43] [Pue05, S. 663].

Virtuelle optische Messgeräte sind z.B. als Weißlichtinterferometer [Sch08b, S. 230] [Tor18, S. 76 ff.] oder Streulichtsensor [See16b, S. 2 ff.] [Tor18, S. 137 ff.] vorhanden. Torner gibt einen grundlegenden Überblick über virtuelle, optische Sensoren [Tor18, S. 11 ff.] sowie die Methodik von Ray-Tracing-Simulationen [Tor18, S. 14 ff.], welche für die entsprechende Modellierung genutzt werden können (vgl. z.B. [Sch08b, S. 231]). Dieser Ansatz kann z.B. auch für die virtuelle Computer-Tomographie genutzt werden [Bel12, S. 1] [Rei08, S. 4].

Auch pneumatische Sensoren können modelliert werden, wozu entweder geometrische Zusammenhänge [Eif14, S. 27 f.] [Eif15a, S. 87 f.] [Sch15c, S. 49 ff.] oder aber CFD-Simulationen [Eif15a, S. 88 f.] [Sch13a, S. 908 f.] [Eif14, S. 29] genutzt werden können. U.a. der Autor nutze die virtuelle pneumatische Abstandsmessung zur Auslegung von Kalibriernormalen [Eif16a, S. 98 ff.].

- **Neue Modelle zur Rekonstruktion von Topographiedaten**

Nach der Erfassung des Messsignals, welches den „zeitlichen Verlauf einer messbaren Größe“ [Mer10, S. 1] charakterisiert, erfolgt die Ermittlung der Ist-Oberfläche. Zur Berechnung der Topographie-Höhen aus den Rohdaten einer Messung werden je nach Messprinzip verschiedene Methoden angewendet. Für Weißlichtinterferometer stellten de Groot und Deck 1995 die Phasenauswertung vor [Gro95, S. 389 ff.], welche grundsätzlich eine Wiederholgenauigkeit der Höhenachse bis in den Nanometerbereich ermöglicht [Dec95, S. 147]. Seit den 1990er-Jahren hat diese Auswertemethodik entsprechend ihre Verbreitung gefunden. Andere Möglichkeiten sind die Wavelet-Transformation [San97, S. 1065 ff.] oder die Einhüllenden-Auswertung, die auf Basis der Hilbert-Transformation erfolgen kann [Xie17, S. 6].

Heutige Untersuchungen beschäftigen sich häufig mit Nichtlinearitäten und Artefakten wie z.B. dem Batwing-Effekt (vgl. z.B. [Xie12, S. 236], [Leh12, S. 760]) in der Weißlichtinterferometrie oder auch Phasensprüngen, die bei Materialkontrasten auf dem Messobjekt auftreten [Gao08, S. 2] und durch die zeitgleiche Erfassung der materialabhängigen ellipsometrischen Winkel korrigiert werden können [Leo03, S. 513]. Entsprechende Untersuchungen zur Ellipso-Höhentopometrie sind Gegenstand aktueller Forschung [Leo10, S. 623 ff.] [Leo14, S. 5286 ff.] [Rai15,

S. 4591 ff.] [Tor17b, S. 1 ff.]. Zum Batwing-Effekt lassen sich z.B. auf Basis von Signalmodellierung Erkenntnisse gewinnen [Xie16, S. 14283].

Bei der Konfokalmikroskopie existieren grundsätzlich die Methoden „Maximumverfahren, Schwerpunktverfahren und Fitverfahren“ [VDI10, S. 14], um eine Auswertung von Konfokalkurven durchzuführen. Neuere Ansätze nutzen z.B. die Fouriertransformation und ihre „Verschiebungseigenschaft“ [See13c, S. 4] für diese Operation.

4.1.2 Übertragungsverhalten von Topographie-Messgeräten ¹²

Neben allgemeinen Trends kann auch speziell das Übertragungsverhalten von Topographie-Messgeräten analysiert werden. Eigene Betrachtungen zu diesem Gebiet werden in **Kapitel 4.2** behandelt. Dabei kann konstatiert werden, dass diverse Möglichkeiten existieren, um Informationen über diese grundlegende Systemeigenschaften zum Zwecke der Analyse von Messgeräten zu gewinnen.

Auf Grundlage dieser Eigenschaften können z.B. virtuelle Messungen für jede mögliche Oberfläche modelliert werden. Entsprechend ist es für viele Anwendungen sehr hilfreich, die Übertragungsfunktion eines spezifischen Topographie-Messgerätes zu ermitteln. Es lassen sich auf dem Gebiet grundsätzlich folgende Tendenzen beobachten:

- **Uneinheitliche Definition der Grenzen der Übertragung**

Auflösungsgrenzen von Messgeräten, z.B. die laterale Auflösung, sind bisher noch nicht zweifelsfrei definiert (vgl. [Lea11, S. 64]). De Groot beschreibt das Problem auch für die Höhenauflösung und stellt eine Vielzahl vorhandener Kriterien vor (vgl. [Gro17, S. 3]). Als neue Definition für die laterale Auflösung wurde z.B. von Seewig et al. die Prüfung der „kleinskaligen Profiltreue“ vorgeschlagen [See14, S. 1].

Allerdings sind erste Tendenzen zur Vereinheitlichung der entsprechenden Definitionen vorhanden. So gibt es eine Initiative „Faires Datenblatt“, welche sich für eine eindeutige Beschreibung solcher grundlegender Definitionen einsetzt (vgl. [See18b, S. 81 ff.]). Dies ist insbesondere dahingehend nützlich, da bisher noch keine Norm für die Kalibrierung flächenhafter Topographie-Messgeräte veröffentlicht wurde,

¹² Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Kek18] Keksel, A.; Eifler, M.; Seewig, J.: *Modeling of topography measuring instrument transfer functions by time series models*. Measurement Science and Technology, (29) 2018, 095012.

diese sich aber im Entwurfsstadium befindet (vgl. [25178-700, S. 1 ff.]) [See18a, S. 213 ff.].

In grundlegender Art wird der Begriff dabei in der Normenreihe DIN EN ISO 25178-60x definiert, wobei in Teil 600 postuliert wird, dass es sich bei einer Übertragungsfunktion um einen Zusammenhang „zwischen der tatsächlichen Menge und der gemessenen Menge“ [25178-600, S. 9] handelt. Ähnliche Definitionen finden sich in DIN EN ISO 25178-601 [25178-601, S. 9], DIN EN ISO 25178-602 [25178-602, S. 12], DIN EN ISO 25178-603 [25178-603, S. 7] und DIN EN ISO 25178-604 [25178-604, S. 7].

Im entsprechenden Entwurf der Norm DIN EN ISO 25178-600 existieren auch verschiedene Definitionen zu Auflösungsgrenzen (vgl. [25178-600, S. 15 f.]). Konkreter beschreiben Giusca et al. die Ermittlung dieses Zusammenhangs, nach denen sich für die vertikale Achse mehrere definierte Stufenhöhen [Giu12a, S. 3] sowie für die beiden horizontalen Achsen Gitternormale [Giu12a, S. 6] zur Überprüfung einzelner Werte der Übertragung eignen. Auf Basis einer linearen Regression für den entsprechenden Soll-Ist-Vergleich dieser einzelnen Werte lässt sich eine Darstellung der Übertragungsfunktion generieren (vgl. [25178-600, S. 11], [Giu12a, S. 3]).

- **Modelle bzw. virtuelle Messtechnik zur direkten Beschreibung des Übertragungsverhaltens**

Die zunehmende Bedeutung virtueller Messgeräte wurde in **Kapitel 4.1.1** erläutert. Eine Untersuchung dieser Methodik wurde dabei für verschiedene Messgeräte und Messprinzipien durchgeführt (vgl. z.B. [Sch08c, S. 298 ff.], [Sch99, S. 31 ff.], [See16b, S. 2 ff.], [Tor17a, S. 155 ff.], [Bel12, S. 1 ff.]). Für die spezifische Beschreibung des Systemverhaltens bei der Übertragung rauher Oberflächen wurden umfangreiche Untersuchungen zur Modellierung optischer Sensoren durch Torner durchgeführt [Tor18, S. 58 ff.].

Neben der Nutzung virtueller Sensoren gibt es allerdings prinzipiell noch weitere Techniken, um Übertragungseigenschaften von Messeinrichtungen zu modellieren. So kann die „Instrumenten-Übertragungsfunktion“ (ITF) eine ganzheitliche Charakterisierung der Achsen einer beliebigen Messeinrichtung gewährleisten [For13a, S. 2]. So definieren de Groot und Colonna de Lega die ITF wie folgt [Gro06, S. 31]:

$$Z_a(i\omega) = ITF(i\omega) \cdot Z_w(i\omega), \quad (26)$$

wenn das Eingangssignal als wirkliche Oberfläche

$$z_w(x) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} Z_w(i\omega) \cdot e^{i\omega x} \cdot d\omega \quad (27)$$

und das Ausgangssignal als Ist-Oberfläche

$$z_a(x) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} Z_a(i\omega) \cdot e^{i\omega x} \cdot d\omega \quad (28)$$

bezeichnet seien. Insbesondere für optische Messgeräte existieren Modelle zur direkten Beschreibung des Übertragungsverhaltens, welche spezieller als „optische Übertragungsfunktionen“ (OTF) bezeichnet werden und über welche Foreman et al. einen umfassenden Überblick geben [For13a, S. 3 ff.].

So schlagen z.B. de Groot und Colonna de Lega für Weißlichtinterferometer ein einfaches Modell zur Ermittlung des Betrags der Modulations-Übertragungsfunktion (MTF) vor, welches in Abhängigkeit der Parameter Lichtwellenlänge und numerische Apertur (NA) die frequenzabhängige Beschreibung der MTF ermöglicht [Gro06, S. 32]. Eine messtechnische Erfassung ist dabei z.B. durch Messung einer Stufe möglich [Gro06, S. 35].

Zur ortsabhängigen Darstellung kann weiterhin die „Punktspreizfunktion“ (PSF) genutzt werden, welche als Gewichtsfunktion eines optischen Systems zu interpretieren ist und entsprechend das Ausgangssignal bei einer Anregung mit dem Dirac-Impuls beschreibt, so dass unter Zugrundelegung des Faltungstheorems für die flächenhafte Betrachtung folgt [For13a, S. 3]:

$$z_a(\mathbf{x}) = PSF(\mathbf{x}) \otimes z_w(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(\mathbf{x}) \cdot z_w(\mathbf{x} - \xi) \cdot d\xi, \quad (29)$$

$$Z_a(i\omega) = OTF(i\omega) \cdot Z_w(i\omega). \quad (30)$$

\mathbf{x} sei dabei ein Tensor, der allgemein räumliche Koordinaten bezeichne und ω die entsprechenden Frequenzen.

Foreman et al. untersuchten für das Messprinzip der konfokalen Mikroskopie weitergehend die Extraktion von Informationen zum Übertragungsverhalten aus virtuellen Messdaten [For13b, S. 99]. Weitere aktuelle Untersuchungen zum Übertragungsverhalten technischer Rauheitsmessgeräte seien nachfolgend kurz genannt: Mit einer modellbasierten Ermittlung der Übertragungsfunktion von Weißlichtinterferometern unter Anwendung von Kugeln als Messobjekt analysierten Su et al. die Eignung der entsprechenden Proben zur Kalibrierung [Su17, S. 3302 f.].

Volk und Feifel nutzten eine solche Präzisionskugel ebenfalls für die ganzheitliche Überprüfung von Tastschnittgeräten [Vol13, S. 2].

Xie et al. modellierten die Übertragung von Höhenstufen mit verschiedenen optischen Messprinzipien und beschrieben u.a. inwiefern das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Höhe ausschlaggebend für das Auftreten optischer Artefakte bei konfokalen Mikroskopen sowie Weißlichtinterferometern ist [Xie17, S. 15].

Für einen umfassenden Überblick zur Ermittlung der OTF sei weiterhin auf die Veröffentlichung von Foreman et al. verwiesen [For13a, S. 3 ff.]. In **Kapitel 4.2** sollen Untersuchungen zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen vorgestellt werden, welche auf einer direkten mathematischen Beschreibung basieren (vgl. [Eif16a, S. 132 ff.]). Dazu können unterschiedliche Normale als Ausgangspunkt genutzt werden, welche als solches ebenfalls eine Möglichkeit zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens bieten. Die bisher hierzu genutzten Ansätze sollen nachfolgend betrachtet werden.

- **Spezielle Normale zur messtechnischen Erfassung des Übertragungsverhaltens**

Um für die Messung des Übertragungsverhaltens erwünschte Strukturen abzubilden, wurden verschiedene Oberflächen vorgeschlagen. Teague et al. nutzten bereits 1982 Sinus-Geometrien mit mehreren Wellenlängen, um frequenzabhängige Aussagen über Messgeräte zu treffen [Tea82, S. 72]. Diese Idee wurde mit dem Chirp-Normal der PTB, welches Sinus-Strukturen mit sich immer weiter verkleinernder Ortsfrequenz aufweist, ebenfalls umgesetzt [Krü07, S. 572]. Pehnelt et al. stellten 2011 Untersuchungen zur Anwendung des Chirp-Normals vor [Peh11, S. 457]. Fuji et al. zeigten ebenfalls Ansätze zur Charakterisierung von Messgeräten mit Chirp-Strukturen [Fuj11, S. 1]. Krüger-Sehm et al. nutzten in ähnlicher Weise Rechteckgitter mit mehreren Ortsfrequenzen [Krü05, S. 21].

Eine neue Version des Chirp-Normals wurde 2012 mit zusätzlichen feineren Wellenlängen vorgestellt [PTB12, S. 98]. Seewig et al. stellten 2014 einen automatisierten Auswertalgorithmus für die „kleinskalige Profiltreue“ bei Messungen des Chirp-Normals vor [See14, S. 1].

Weiterhin existieren Normale, deren Oberfläche auch für die Darstellung eines Frequenzspektrums vorgesehen ist, wie z.B. superfeine Raunormale [Ehr11, S. 144]. Vom Autor wurde außerdem ein Ortsspektren-Normal vorgestellt, welches an eine reale Anwendung angelehnt ist und einen möglichst breiten Bereich an Frequenzen

quasi kontinuierlich abbildet [Eif16a, S. 76]. Zur Auswertung dieses Normals eignet sich dabei ebenfalls ein ARMA-Filter, um die Übertragungseigenschaften des Messgerätes abzubilden [Eif16a, S. 132 f.]. Dieser Ansatz zur Beschreibung der Übertragungsfunktion soll in **Kapitel 4.2** noch weitergehend untersucht werden.

- **Direkte messtechnische Erfassung des Übertragungsverhaltens**

Leach und Cross schlugen eine Erfassung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion mithilfe eines schwingenden Werkstücks, welches mit variabler Frequenz angeregt werden kann, vor [Lea02a, S. N1]. Ein ähnlicher Ansatz wurde dabei bereits von Bendeli et al. in den 1970er-Jahren verfolgt (vgl. [Ben74, S. 137 ff.]).

Da auf Basis der Fourier-Transformation gezeigt werden kann, dass ein Rechteck beliebig viele Frequenzen enthält, nutzen de Groot und Colonna de Lega ein Tiefeneinstellnormal, um die ITF direkt messtechnisch zu erfassen und erzielten eine gute Übereinstimmung zu theoretischen Betrachtungen (vgl. [Gro06, S. 35]).

Haitjema stellte ein Chirp-Signal mithilfe eines Piezo-Systems bereit und betrachtete den Zusammenhang zwischen den gemessenen Höhenwerten sowie der mit einem Referenz-Interferometer erfassten Bewegung eines Tasters, um die Übertragung zu beurteilen [Hai98, S. 112]. Yashchuk et al. untersuchten die Charakterisierung der MTF eines optischen Topographie-Messgerätes wozu „ein binäres pseudo-zufälliges (BPR) Gitter“ [Yas08, S. 1] diente.

4.2 Filtermodellierung zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens ¹³

Wie beschrieben ist die Gewinnung von Informationen über das Übertragungsverhalten eines Messgeräts häufig aufwendig, da zur Durchführung z.B. eine Oberfläche gestaltet, hergestellt und gemessen werden muss. Weitere beschriebene Techniken sind außerdem von ihrer Natur nicht direkt mit praktischen Aspekten des untersuchten Messgeräts verknüpft.

Ideal wäre entsprechend ein Ansatz, der neben einer theoretischen Basis zusätzlich praktische Aspekte einbezieht. Aus diesem Grund kann die Filtermodellierung möglicherweise ein geeignetes Werkzeug für diesen Zweck sein.

Nachfolgend soll dabei überprüft werden, inwiefern sich dieses Werkzeug aus der Signalverarbeitung eignet, um Informationen über das Systemverhalten bei der

¹³ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Kek18] Keksel, A.; Eifler, M.; Seewig, J.: *Modeling of topography measuring instrument transfer functions by time series models*. Measurement Science and Technology, (29) 2018, 095012.

Übertragung rauer Oberflächen zu gewinnen. Grundsätzlich wäre dabei eine entsprechende Modellierung unter Anwendung beliebiger Profile möglich. Einzig deren fertigungstechnische Umsetzbarkeit sowie messtechnische Kompatibilität zu den hierfür eingesetzten Geräten muss gewährleistet sein. Daher ist grundsätzlich keine Auslegung einer neuen Oberfläche für diesen Zweck vorgesehen. Die genutzten Rauheitsprofile sollten stochastisch sein, Merkmale innerhalb des interessierenden Bereichs an Ortsfrequenzen aufweisen und es sollten Informationen zu den Soll-Höhenwerten der Oberflächen vorliegen.

Die nachfolgende Analyse soll entsprechend prüfen, inwiefern das grundlegende Systemverhalten bei der Rauheitsmessung unter Nutzung von Messdaten bekannter Oberflächen beschrieben werden kann und in welchem Maße sich die gewonnenen Ergebnisse für die Vorhersage von Messergebnissen nutzen lassen. Dazu wird die Nutzung von ARMA-Modellen vorgeschlagen (vgl. **Kapitel 3**), deren Methodik aus der Beschreibung von Zeitreihen stammt (vgl. [Pat12, S. 64], [Bro00, S. 766]) und deren Anwendung für technische Messgeräte wie folgt motiviert werden soll:

Messgeräte lassen sich grundsätzlich als dynamische Systeme interpretieren, welche in ihrer analogen Darstellung durch Differentialgleichungen abgebildet werden können [Mey14, S. 9]:

$$\sum_{k=0}^M a_k \cdot \frac{\partial^{(k)} z_a(x)}{\partial x^k} = \sum_{k=0}^Q b_k \cdot \frac{\partial^{(k)} z_w(x)}{\partial x^k}. \quad (31)$$

Dabei seien für den hier betrachteten Fall die Eingangsgröße als ein Profil $z_w(x)$ der wirklichen Oberfläche und die Ausgangsgröße als ein Profil $z_a(x)$ der Ist-Oberfläche definiert.

Grundsätzlich kann dabei eine wirkliche Oberfläche $z_w(x)$ als Fourier-Reihe interpretiert werden und ist somit auf Basis der komplexwertigen Exponentialfunktion zu beschreiben:

$$z_w(x) = B(\omega) \cdot e^{i\omega x}, \quad (32)$$

wobei die Amplitudenfunktion als $B(\omega)$ bezeichnet sei. Die resultierende frequenzabhängige Übertragungsfunktion $G(i\omega)$ des Messgerätes, welche auf die Ist-Oberfläche $z_a(x) = G(i\omega) \cdot B(\omega) \cdot e^{i\omega x}$ führt, hängt somit direkt mit den Koeffizienten $a_k = 0, \dots, M$, $b_k = 0, \dots, Q$ der Differentialgleichung zusammen, wie sich durch Einsetzen in Gleichung (31) zeigen lässt:

$$\sum_{k=0}^M a_k \cdot G(i\omega) \cdot B(\omega) \cdot (i\omega)^k \cdot e^{i\omega t} = \sum_{k=0}^Q b_k \cdot B(\omega) \cdot (i\omega)^k \cdot e^{i\omega t}, \quad (33)$$

$$\rightarrow G(i\omega) = \frac{\sum_{k=0}^Q b_k \cdot (i\omega)^k}{\sum_{k=0}^M a_k \cdot (i\omega)^k}. \quad (34)$$

Entsprechend der diskreten Ausprägung des Messsignals ist eine Beschreibung als LTD-System zielführend, welche zu der nachfolgenden rekursiven Darstellung als Differenzgleichung analog zu Gleichung (31) führt [Mey14, S. 231]:

$$z_a[n] = \sum_{k=0}^Q b_k \cdot z_w[n-k] - \sum_{k=1}^M a_k \cdot z_a[n-k]. \quad (35)$$

Diese Gleichung entspricht der in **Kapitel 3** behandelten ARMA-Gleichung. Wird ein Koeffizientenvergleich mit Gleichung (4) ausgeführt, so kann festgestellt werden, dass mit $b_0=1$ gilt, dass die Q Koeffizienten b_k für $k=1, \dots, Q$ den l_{MA} Moving-Average Koeffizienten MA_k entsprechen und die M Koeffizienten a_k die l_{AR} Auto-Regressive Koeffizienten AR_k beschreiben. Weiterhin ist dabei das normalverteilte Rauschen durch das Eingangssignal der wirklichen Oberfläche repräsentiert.

Dieses Modell soll für die Ermittlung von Übertragungsfunktionen genutzt werden, wobei vorherige Arbeiten hierzu als Ausgangspunkt dienen sollen (vgl. [Eif16a, S. 132 ff.]). Dabei wurde eine Oberfläche speziell auf definierte Eigenschaften im Frequenzbereich hin ausgelegt, um als Maßverkörperung zur Bewertung des Übertragungsverhaltens genutzt werden zu können [Eif16a, S. 76]. Wie in **Kapitel 3** dargelegt ist die ARMA-Modellierung typisch für die Abbildung von Zeitreihen [Pat12, S. 64], eignet sich aber außerdem auch für die Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen.

Das beschriebene Modell der Übertragung durch ein Messgerät im Ortsbereich:

$$z_a[n] = \sum_{k=0}^{l_{MA}} MA_k \cdot z_w[n-k] - \sum_{k=1}^{l_{AR}} AR_k \cdot z_a[n-k] \quad (36)$$

wird zunächst entsprechend unter Anwendung der DFT in eine frequenzabhängige Darstellung umgerechnet:

$$Z_a(\Omega) = Z_w(\Omega) \cdot \sum_{k=0}^{l_{MA}} MA_k \cdot e^{-i\Omega k} - Z_a(\Omega) \cdot \sum_{k=1}^{l_{AR}} AR_k \cdot e^{-i\Omega k}. \quad (37)$$

Im nächsten Schritt kann analog zu Gleichung (34) die Übertragungsfunktion in den diskreten Frequenzen $v(\Omega)$, $\Omega = 2\pi \cdot m \cdot N^{-1}$, $m = 0, 1, \dots, N-1$ für N Profilpunkte dargestellt werden (vgl. auch [Eif16a, S. 133]):

$$v(\Omega) = \frac{Z_a(\Omega)}{Z_w(\Omega)} = \frac{\sum_{k=0}^{l_{MA}} MA_k \cdot e^{-i\Omega \cdot k}}{1 + \sum_{k=1}^{l_{AR}} AR_k \cdot e^{-i\Omega \cdot k}}. \quad (38)$$

Die Berechnung der Modell-Parameter AR_k und MA_k wird nachfolgend als algebraischer Fit beschrieben, der die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate auf die Beziehung von wirklicher Oberfläche und Ist-Oberfläche in Gleichung (36) anwendet. Das Modell lässt sich in Matrix-Schreibweise angeben:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\begin{pmatrix} z_a[l_{AR} + 1] \\ \vdots \\ z_a[N] \end{pmatrix}}_{\mathbf{Q}} + \underbrace{\begin{pmatrix} z_a[l_{AR}] & \cdots & z_a[1] \\ \vdots & & \vdots \\ z_a[N-1] & \cdots & z_a[N-l_{AR}] \end{pmatrix}}_{\mathbf{Z}_a} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} AR_1 \\ \vdots \\ AR_{l_{AR}} \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \\ & = \underbrace{\begin{pmatrix} z_w[l_{AR} + 1] & \cdots & z_w[l_{AR} + 1 - l_{MA}] \\ \vdots & & \vdots \\ z_w[N] & \cdots & z_w[N - l_{MA}] \end{pmatrix}}_{\mathbf{Z}_w} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} MA_0 \\ \vdots \\ MA_{l_{MA}} \end{pmatrix}}_{\mathbf{M}}, \end{aligned} \quad (39)$$

wobei die Zahl der AR-Koeffizienten mindestens genau so groß sein muss wie die Zahl der MA-Koeffizienten ($l_{AR} \geq l_{MA}$) und folgt:

$$\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M} = \mathbf{0}. \quad (40)$$

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt nach dem folgenden Kriterium:

$$\min_{\mathbf{A}, \mathbf{M}} \left((\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M})^T \cdot (\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M}) \right). \quad (41)$$

Auf dieser Grundlage lassen sich durch Betrachtung als Extremwertproblem die beiden Vektoren \mathbf{A} und \mathbf{M} berechnen:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{A}} \left((\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M})^T \cdot (\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M}) \right) = \mathbf{Z}_a^T \mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M} \stackrel{!}{=} \mathbf{0}, \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{M}} \left((\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M})^T \cdot (\mathbf{Q} + \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M}) \right) = \mathbf{Z}_w^T \mathbf{Q} + \mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_w \cdot \mathbf{M} \stackrel{!}{=} \mathbf{0}. \quad (43)$$

Werden die Gleichungen (42) - (43) umgestellt, ergeben sich im Anschluss die gesuchten Parameter des ARMA-Modells:

$$\mathbf{M} = \left(\mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_w - \mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_a (\mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_a)^{-1} \mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_w \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{Z}_w^T \mathbf{Q} - \mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_a (\mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_a)^{-1} \mathbf{Z}_a^T \mathbf{Q} \right), \quad (44)$$

$$\mathbf{A} = \left(\mathbf{Z}_a^T \mathbf{Z}_a \right)^{-1} \cdot \left(\left(\mathbf{Z}_w^T \mathbf{Z}_a \right)^T \mathbf{M} - \left(\mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{Z}_a \right)^T \right). \quad (45)$$

Ergebnis dieser Betrachtung sind die Werte der ARMA-Koeffizienten, welche als Gewichte im nach Gleichung (36) definierten Modell für die Beziehung von Ist-Oberfläche und wirklicher Oberfläche dem Ansatz der kleinsten Abweichungsquadrate genügen. Letztlich liegt dem Modell dabei der Ansatz zugrunde, das Übertragungsverhalten der Messung durch ein lineares Modell mit diesen Parametern zu beschreiben und dabei möglichst viele Effekte der Messung abzubilden. Möglicherweise sind allerdings nichtlineare physikalische Zusammenhänge wie die Filterung durch taktile Abtastung [Kry04b, S. 44] oder Beugungseffekte (vgl. [Xie17, S. 6 f.]) nicht vorherzusagen. In welchem Umfang es hier zu einer Diskrepanz zwischen Modell und realem Messgerät kommt, soll nachfolgend zur Bewertung des Modells untersucht werden. Mit den Ergebnissen ist eine Einordnung möglich, inwiefern sich das ARMA-Modell zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens technischer Rauheitsmessgeräte eignet.

Die Untersuchung wird dabei auf Basis verschiedener Geometrienormale ausgeführt, welche in vorherigen Untersuchungen modellbasiert für die Kalibrierung von Tastschnittgeräten ausgelegt wurden (vgl. [Eif16a, S. 67 ff.], [See16a, S. 260 ff.], [Eif16b, S. 1994 ff.]) und erfolgt entsprechend zunächst auch für die Analyse eines taktilen Messgeräts. Vorteilhaft bei der Verwendung der modellbasiert ausgelegten Oberflächen ist nicht nur, dass diese ausgehend von realen Messaufgaben berechnet wurden, sondern auch, dass neben der geometrischen Oberfläche aufgrund der Modellierung von Fertigung und Messung ebenfalls virtuelle Modelle der wirklichen Oberfläche sowie der Ist-Oberfläche bekannt sind (vgl. [Eif16a, S. 70]). Dies wird durch die Abbildung des Auslegungsprozesses als inverses Problem erzielt (vgl. [See16a, S. 260]).

Aus diesem Grund wird die in **Abbildung 23** aufgezeigte Methodik vorgeschlagen: Die berechneten Rauheitsstrukturen der geometrischen Oberfläche (\bar{x}_g, \bar{z}_g) werden nicht nur im Rahmen des Experiments zur Erzeugung realer Topographiedaten (\bar{x}_a, \bar{z}_a) durch das untersuchte Messgerät genutzt, sondern dienen auch weiterhin für die Bereitstellung des virtuellen Werkstücks $(\bar{x}_{w,v}, \bar{z}_{w,v})$, welches die zweite Eingangsgröße des ARMA-Modells repräsentiert. Dazu werden die Modelle von Fertigung und Messung, welche im konkreten Fall durch morphologische Profilfilter unter Nutzung

der Schneidengeometrie bei der spanenden Fertigung [Krü07, S. 574] sowie der Kontur der Tastnadel für die Messung [Kry04b, S. 44] abzubilden sind, genutzt.

Die zu ermittelnde Übertragungsfunktion beschreibt letztlich den Zusammenhang zwischen den Datensätzen (\bar{x}_a, \bar{z}_a) und $(\bar{x}_{w,v}, \bar{z}_{w,v})$. Im Experiment erfolgt die Fertigung der Werkstücke mithilfe eines Ultra-Präzisions-Drehprozesses, wobei dessen Unsicherheit erfahrungsgemäß maximal der des anschließend ausgeführten Messprozesses entspricht. Weiterhin kann mit dem virtuell gemessenen Profil $(\bar{x}_{a,v}, \bar{z}_{a,v})$ eine Übertragungsfunktion des virtuellen Messgeräts ermittelt werden.

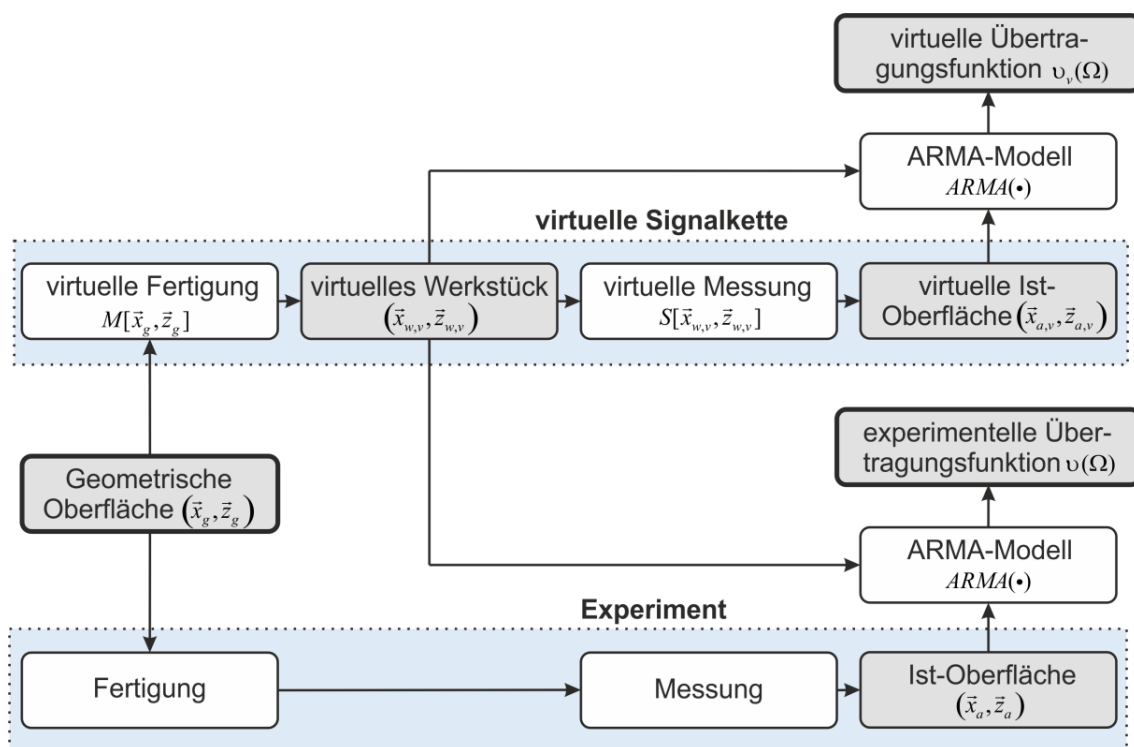


Abbildung 23: Ansatz zur Verifizierung des ARMA-Modells zur Berechnung von Übertragungsfunktionen

Entscheidend für den Ansatz ist, dass über die wirkliche Oberfläche möglichst realistische Informationen vorliegen müssen. Dazu könnten neben der vorgeschlagenen Methodik über das inverse Problem, welches eine Berechnung der entsprechenden Oberfläche ermöglicht, ebenfalls AFM-Messungen genutzt werden.

Um neben der grundsätzlichen Machbarkeit auch die Vielseitigkeit der vorgeschlagenen Methodik zu eruieren, wurden auf Basis erster Betrachtungen [Eif16a, S. 131 ff.] verschiedene Normale als Oberflächen untersucht.

Die Messdaten (\bar{x}_a, \bar{z}_a) wurden dabei jeweils wie folgt vorverarbeitet, bevor sie dem ARMA-Modell zugeführt wurden: Durch Interpolation erfolgte zunächst eine

Anpassung des lateralen Punktabstandes an den Wert der Eingangsdaten $(\vec{x}_{w,v}, \vec{z}_{w,v})$ des ARMA-Modells, bevor in den nächsten Schritten eine Ausrichtung mithilfe einer nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate berechneten Geraden sowie eine Filterung mit $\lambda_s = 2,5 \mu m$ nach DIN EN ISO 16610-21 zur Trennung der Daten von sehr kurzen Topographiewellenlängen durchgeführt wurden. Letzter Punkt der Vorverarbeitung ist die Extraktion der einzelnen Auswertestellen aus dem Gesamtdatensatz, welche auf Grundlage der Periodizität der einzelnen Normale vorgenommen wurde. Durch die Periodizität der Normale wird dabei gewährleistet, dass an beliebigen Stellen eine Extraktion identischer Oberflächenparameter erfolgen kann [See15, S. 45].

Die folgend genannten Normale wurden dabei untersucht, wobei an entsprechender Stelle ebenfalls erläutert wird, in welcher Form Auswertestellen extrahiert worden sind. Weiterhin erfolgte eine Ausrichtung der Daten der jeweiligen Auswertestelle in Bezug auf das virtuelle Werkstück, wobei die laterale Positionsbeziehung der Datensätze, bei welcher der größte Wert des Korrelationskoeffizienten dieser beiden Profildaten auftrat, hierzu als Grundlage diente.

Der anschließende Einsatz des beschriebenen ARMA-Algorithmus, welcher die Parameter des Modells für die spezifische Auswertestelle berechnet, wurde so unabhängig von der Positionierung des Auswerteausschnitts ermöglicht. In Anlehnung an die Erfahrungswerte von Seewig [See00, S. 43] wurden dabei Zahlen von $l_{AR} = 15$ und $l_{MA} = 5$ Parametern für die Modelleinpassung angenommen. Als erster Anwendungsfall wurde ein Linearitätsnormal für die Kalibrierung der Höhenachse betrachtet, welches charakteristische Oberflächenstrukturen von Schleifprozessen aufweist und modellbasiert erzeugt wurde (vgl. [Eif16b, S. 1994 f.], [Eif16a, S. 72 f.]).

Die Erzeugung der realen Messdaten (\vec{x}_a, \vec{z}_a) wurde mithilfe einer Ultra-Präzisions-Drehmaschine [Eif16b, S. 1996] sowie einer anschließenden taktilen Abtastung mit dem Tastschnittgerät Hommel Nanoscan ausgeführt. Entsprechend der Periodenlänge von 4 mm wurden entlang der 16 mm des Profils Auswertestellen im lateralen Abstand von je 200 μm ausgewählt, so dass sich insgesamt 53 Auswertungen für die Anwendung des ARMA-Modells ergaben.

Die Ergebnisse sind in **Abbildung 24 a)** zusammengefasst: Hier sind neben einer Periodenlänge des virtuellen Werkstücks $(\vec{x}_{w,v}, \vec{z}_{w,v})$ ein exemplarischer Auswerteausschnitt (\vec{x}_a, \vec{z}_a) sowie als Ergebnisse die 53 nach Gleichung (38) aus den Koeffizienten des ARMA-Modells ermittelten Übertragungsfunktion des Messgeräts dargestellt. Unabhängig von der Auswerteposition ergeben sich ähnliche Ergebnisse,

welche auch einem klassischen Messgeräte-Verhalten entsprechen, bei dem kleine Ortsfrequenzen besser als Signalanteile mit kurzer Wellenlänge übertragen werden.

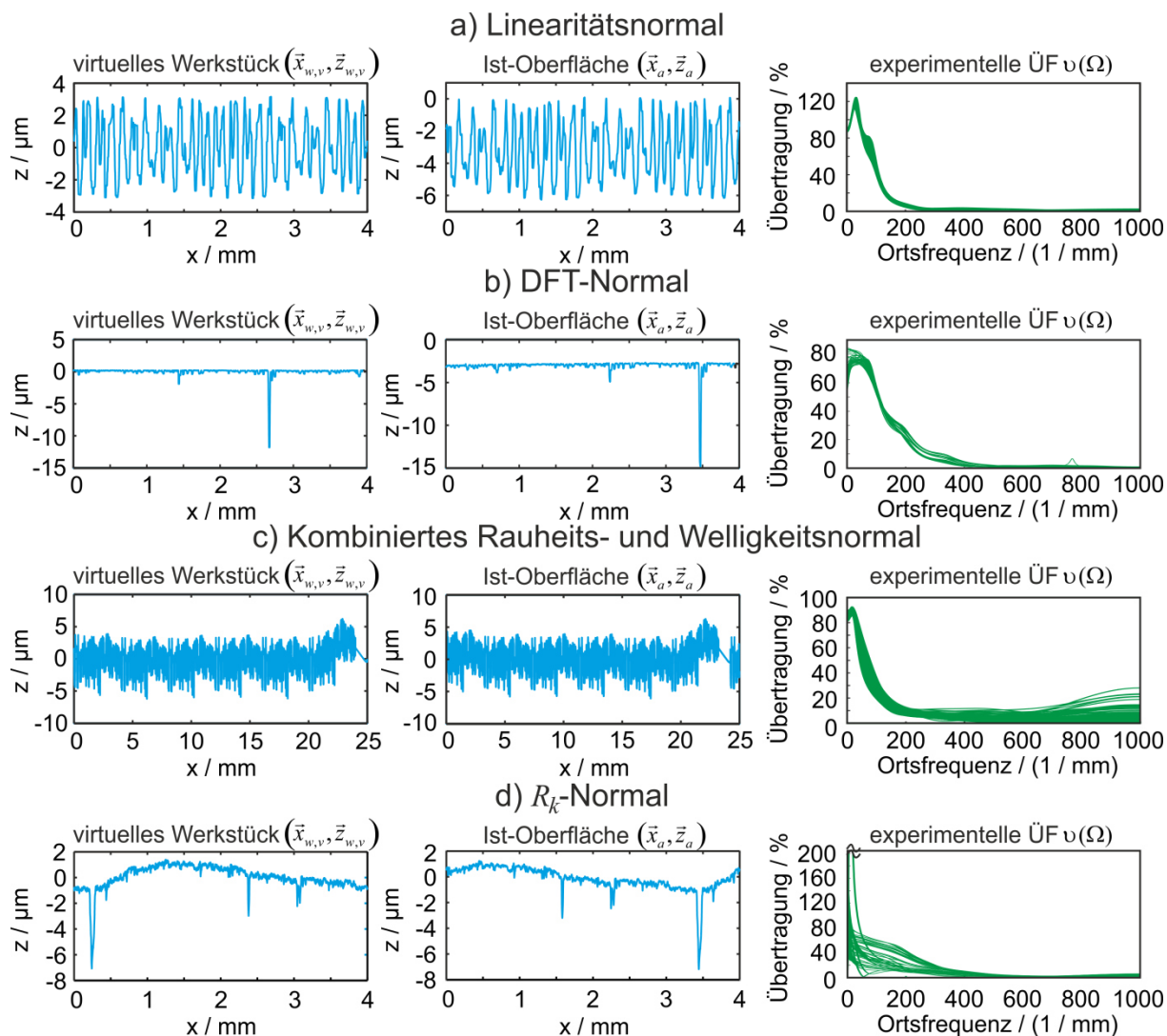


Abbildung 24: Nutzung des ARMA-Modells zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen am Beispiel von Normalen für Tastschnittgeräte, a) Linearitätsnormal, b) DFT-Normal, c) Kombiniertes Rauheits- und Welligkeitsnormal, d) R_k -Normal. Dargestellt sind jeweils das virtuelle Werkstück, ein exemplarischer Ausschnitt der gemessenen Ist-Oberfläche und alle ermittelten Übertragungsfunktionen

Auch die Analyse anderer Normale führte wie in **Abbildung 24** gezeigt zu grundsätzlich ähnlichen Ergebnissen: Das Normal in **Abbildung 24 b)** ist eine Oberfläche, die speziell für eine Kalibrierung des Frequenzbereichs ausgelegt wurde und auf einer gehonten Oberfläche basiert [Eif16a, S. 75 ff.]. Die Eigenschaften der Periodizität entsprechen denen des Linearitätsnormals, so dass auch hier neben dem virtuellen Normal sowie einem exemplarischen Auswertebereich die Ergebnisse von insgesamt 53 extrahierten Datensätzen dargestellt sind. Fertigung, Messung,

Datenvorverarbeitung und Auswertung wurden ebenfalls analog durchgeführt, was auch hier auf grundsätzlich plausible Übertragungsfunktionen führt.

Das dritte betrachtete Normal in **Abbildung 24 c)** ist ein Normal, welches sowohl Welligkeits- als auch Rauheitskenngrößen kalibrieren kann (vgl. [Eif16a, S. 79]) und eine Gesamtlänge von 50 mm aufweist, bei der sich alle Strukturen im Abstand von 25 mm wiederholen, was bei einem lateralen Abstand von $200\text{ }\mu\text{m}$ zu einer Generation von 114 Auswertestellen führt. Auch bei diesem Normal führt der vorgestellte Ansatz zu plausiblen Verläufen der Übertragungsfunktion.

Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Oberflächen lässt sich feststellen, dass sich diese allerdings teilweise unterscheiden. Grundsätzlich kann der vorgestellte Ansatz vorzugsweise für stochastische Oberflächen gute Ergebnisse liefern. Dies wird auch bei Betrachtung einer vierten exemplarischen Oberfläche, dem R_k -Normal (vgl. [Eif16a, S. 71]) deutlich, welches einige deterministische Anteile aufweist: das Normal hat eine Länge von $12,8\text{ mm}$ sowie eine Periodizität von 4 mm und liefert so 37 Auswertestellen, deren Ergebnisse in **Abbildung 24 d)** zusammengefasst sind und bei deren Analyse deutliche Unterschiede zu allen anderen Ergebnissen bei der Übertragung von langwelligen Signalanteilen auftreten.

Aufgrund dieser durch die Ausprägung der Oberfläche bedingten Unterschiede in den Ergebnissen wurde der Ansatz weiter optimiert, um eine Anwendbarkeit auf beliebige Oberflächen und Messprinzipien zu gewährleisten. Dabei sind auch entsprechende Möglichkeiten für eine objektive Beurteilung der Modellgüte vorzusehen. Dies kann u.a. durch Gegenüberstellung mit Übertragungsfunktionen basierend auf alternativen Ansätzen nach **Kapitel 4.1.2** erfolgen.

Als Ausgangspunkt für die genannte Optimierung wurde die Vorverarbeitung der Daten modifiziert. Wird wie im Beispiel in **Abbildung 25 a)** dargestellt die Ausrichtung der beiden Eingangsdatensätze des ARMA-Modells zueinander betrachtet, so lässt sich feststellen, dass eine leichte Verkipfung der Datensätze zueinander sowie kleine Unterschiede in der lateralen Skalierung vorliegen. Dies lässt sich unter anderem auf Einflüsse der nicht perfekt linearen Vorschubachse des Messgerätes zurückführen. Als weitere offensichtliche Abweichung kann angeführt werden, dass lange Wellenlängen nicht mit ihrer Eingangsamplitude (100 %) übertragen werden, wie es eigentlich typisch für das Tiefpassverhalten des Messgerätes wäre. Entsprechend wurde als Ziel der modifizierten Vorverarbeitung die Korrektur dieser Abweichungen definiert.

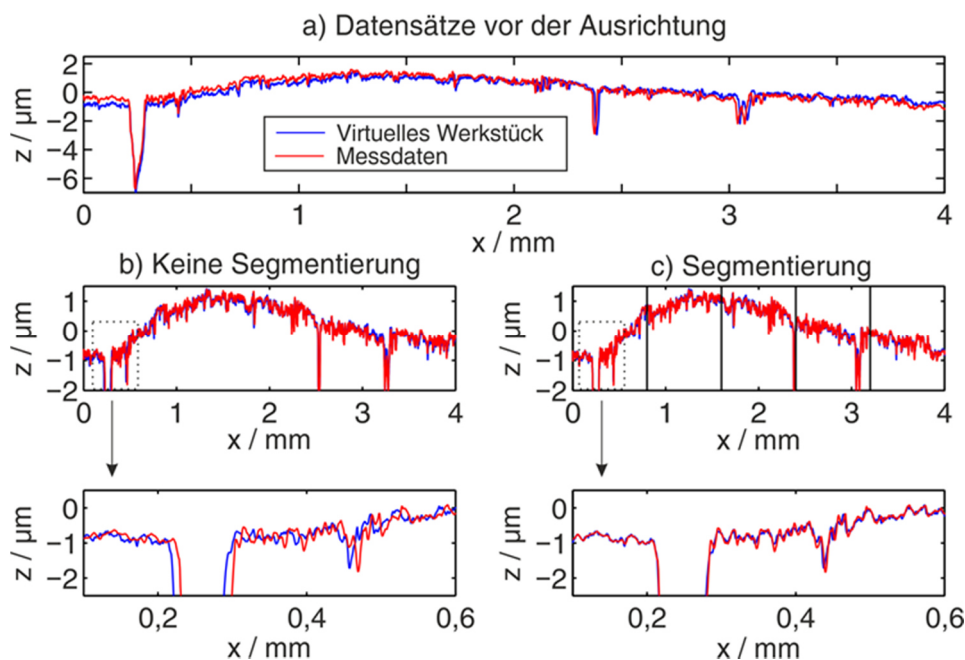


Abbildung 25: Effekt der Segmentierung bei der Ausrichtung. a) Datensätze des R_k -Normals vor der Ausrichtung, b) Vorverarbeitung der Daten vor der Optimierung, c) Vorverarbeitung der Daten nach Optimierung

Zur Erzielung dieser gewünschten Robustheit des Ansatzes wurde zunächst die Methode, die zur Positionierung der Eingangsprofile des ARMA-Modells zueinander genutzt wurde, optimiert. Dazu wurde eine Segmentierung der Ist-Oberfläche in z.B. 5 Abschnitte vorgenommen und anschließend die beschriebene Ausrichtung über den Korrelationskoeffizienten nicht mehr für das gesamte Profil, sondern für die Segmentierungsabschnitte unabhängig voneinander ausgeführt.

Nach dem Kriterium der Korrelation wurde dabei nicht nur die optimale Verschiebung in beide Achsen, sondern auch die bestmögliche rotatorische Ausrichtung des Segmentes zum zugehörigen Teil des virtuell gefertigten Werkstücks herbeigeführt. In wie viele Ausschnitte die Segmentierung dabei vorgenommen wurde, wurde in Abhängigkeit der Ausprägung der lateralen Abweichungen sowie dem Profil als solches festgelegt. Ein Effekt dieser Ausrichtungsmethode ist dabei, dass einzelne Datenpunkte doppelt oder gar nicht auf das virtuelle Werkstück abgebildet werden, wenn sie an einer der Übergangsstellen liegen. Der Qualitätsgewinn des Gesamtmodells durch die verbesserte Ausrichtung wird allerdings als wesentlich signifikanter eingeschätzt. Dies lässt sich in **Abbildung 25 b) und c)** beobachten, in denen die Effekte der optimierten Ausrichtung am Beispiel des R_k -Normals illustriert werden. Dabei lässt sich feststellen, dass durch die Segmentierung eine deutlich verbesserte Ausrichtung der beiden Eingangsdatensätze des ARMA-Modells

zueinander erzielt werden kann. Selbst kleine Abweichungen können bei der Übertragung hoher Ortsfrequenzen zu Veränderungen der Ergebnisse führen.

Die zweite offensichtliche Abweichung der zu geringen Übertragung bei kleinen Frequenzen wird wie folgt behoben: Aufgrund der Ausrichtung der Profile ist kein Signalanteil der größten Wellenlänge vorhanden. Daher wird ein Gleichanteil (Konstante) zum Signal künstlich hinzugefügt, um einen solchen Anteil zur Überprüfung der Übertragungseigenschaften zur Verfügung zu stellen. Als Konsequenz wird erwartet, dass bei kleinen Frequenzen eine Übertragung festgestellt werden kann, die näher als vorher an 100 % liegt.

Inwiefern die erweiterte Ausrichtung der Profildaten als Grundlage für eine universelle Beschreibung des Übertragungsverhaltens dienen kann, soll nachfolgend nicht nur mit Messdaten des bisher untersuchten Tastschnittgerätes, sondern auch mit Daten eines optischen Messgerätes, dem Konfokalmikroskop NanoFocus μ Surf, untersucht werden.

Die Analyse der mit dem Tastschnittgerät Hommel Nanoscan erzielten Messdaten wurde mit der beschriebenen Signalverarbeitung durchgeführt, wobei zusätzlich zwei Modellierungsrichtungen - nicht nur die Richtung „vorwärts“ sondern auch der Fall „rückwärts“ - betrachtet wurden, um zu überprüfen, inwiefern dies einen Einfluss auf die Ergebnisse für die untersuchten Oberflächen hervorruft. Bei der Rückwärts-Modellierung erfolgte dabei eine laterale Spiegelung der Profildaten nach der Vorverarbeitung. Liegt nach der Vorverarbeitung der Messdaten (\bar{x}_a, \bar{z}_a) der Datensatz $(\bar{x}_{a,p}, \bar{z}_{a,p})$ vor, so lässt sich der Datensatz $\bar{z}_{a,p}^*$ für die Rückwärts-Modellierung, welcher anschließend als Eingangsdatensatz für das ARMA-Modell dient, wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned} z_{a,p}^*[1] &= z_{a,p}[N] \\ z_{a,p}^*[2] &= z_{a,p}[N-1] \\ z_{a,p}^*[3] &= z_{a,p}[N-2] \\ &\vdots \\ z_{a,p}^*[N] &= z_{a,p}[1]. \end{aligned} \tag{46}$$

Eine analoge Sortier-Operation wurde ebenfalls auf die Soll-Daten appliziert, bevor eine Anwendung des skizzierten ARMA-Modelles erfolgte. Bezüglich des Diskretisierungsabstandes konnte empirisch beobachtet werden, dass ein enger Abstand vorteilhafte Ergebnisse zur Folge hatte, so dass die Erzeugung eines konstanten lateralen Interpolationsabstandes beider Profile von $\Delta x = 100nm$ als weiterer Vorverarbeitungsschritt genutzt wurde.

Nach den genannten Schritten unter Nutzung unterschiedlicher Werte des Segmentierungsabstands in der Vorverarbeitung erfolgte die Analyse des Tastschnittgerätes und führte für die unterschiedlichen Modellierungsrichtungen bei Analyse der vier beschriebenen Testoberflächen auf die in **Abbildung 26** gegebenen Übertragungsfunktionen. Dabei wurden die drei Werte der Segmentierungsabstände, in die jeweils das gesamte gemessene Profil unterteilt wurde, spezifisch für jedes Normal a) - d) festgelegt.

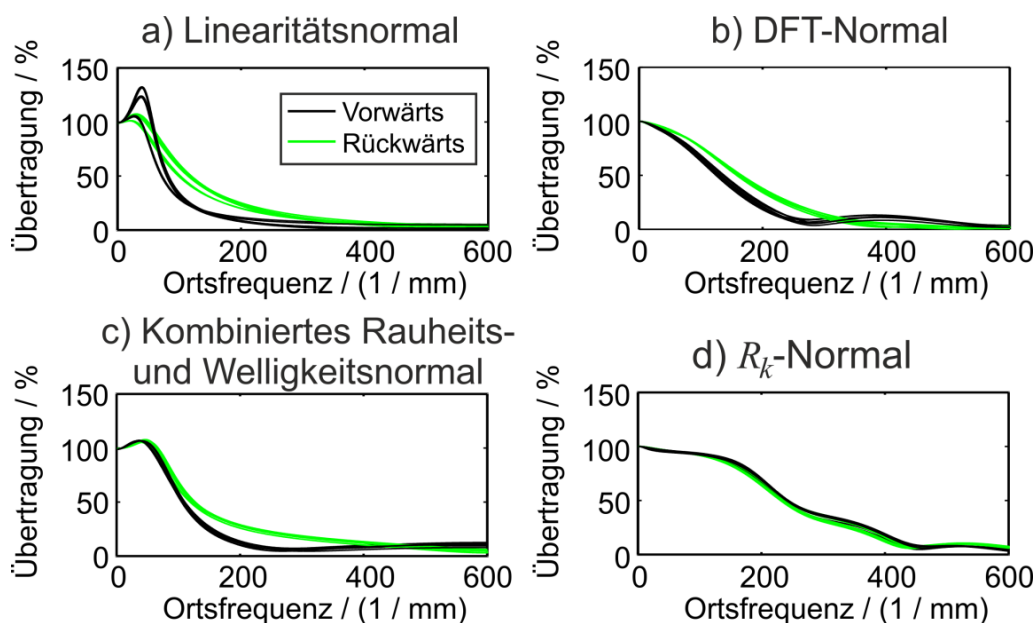


Abbildung 26: Übertragungsfunktionen Hommel Nanoscan unter Anwendung des ARMA-Modells, verbesserter Datenvorverarbeitung sowie variabler Modellierungsrichtung

Bei Betrachtung der Auswerteparameter für die Untersuchung des Tastschnittgerätes, welche in **Tabelle 11** zusammengefasst sind, ist festzustellen, dass für das R_k -Normal, welches nicht nur Signalanteile mit geringer Frequenz, sondern auch sehr unregelmäßige Strukturelemente aufweist, breitere Segmentierungsabstände sinnvoll sind, welche in diesem speziellen Fall zu einem besseren Modellergebnis führen. Weiterhin wurde für die Anwendung des ARMA-Modells an beiden Enden des Gesamtprofils zur Unterdrückung des Einflusses von Randeffekten auf das Ergebnis jeweils ein Segment nicht berücksichtigt.

Aufgrund der stückweisen Ausrichtung obliegt die beschriebene Vorverarbeitung ebenfalls einer gewissen Richtungsabhängigkeit, weshalb für jeweils alle drei Varianten der Profildsegmentierung die vier Szenarien:

- i) Vorverarbeitung vorwärts - ARMA-Modell vorwärts,
- ii) Vorverarbeitung rückwärts - ARMA-Modell vorwärts,

- iii) Vorverarbeitung vorwärts - ARMA-Modell rückwärts,
- iv) Vorverarbeitung rückwärts - ARMA-Modell rückwärts,

untersucht wurden, was pro Probe auf eine Anzahl von 12 verschiedenen Übertragungsfunktionen führt, die zur Darstellung dieses Einflusses alle in **Abbildung 26** abgebildet sind. Um eine hinreichende Modellgenauigkeit für alle Modelle zu gewährleisten, wurde die Anzahl der genutzten Parameter auf Basis einer empirischen Untersuchung für alle Oberflächen zu $l_{AR} = 25$ und $l_{MA} = 14$ erhöht.

Tabelle 11: Parameter für die Datenvorverarbeitung bei Untersuchung des Messgeräts Hommel Nanoscan

Auswerteparameter Hommel Nanoscan			
Normal	Gesamtlänge	Periodenlänge	Segmentierungsabstände
a) Linearitätsnormal	16 mm	4 mm	0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm
b) DFT-Normal	16 mm	4 mm	0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm
c) Kombiniertes Rauheits- und Welligkeitsnormal	2x24 mm (Rauheit) 50 mm (Welligkeit)	4 mm (Rauheit) 25 mm (Welligkeit)	0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm
d) R_k -Normal	12,8 mm	4 mm	1 mm; 0,8 mm; 0,67 mm

Es kann festgestellt werden, dass mit der erweiterten Vorverarbeitung reproduzierbare Übertragungsfunktionen resultieren, welche auch kleine Frequenzen mit plausibler Amplitude übertragen.

Allerdings lassen sich zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Oberflächen nach wie vor Unterschiede nachweisen, so dass zu klären ist, inwiefern sich bestimmte Typen von Profilen für die Ermittlung der Übertragungsfunktion besser eignen als andere. Grundsätzlich sollte das Übertragungsverhalten unabhängig von der gemessenen Oberflächenstruktur sein, wird allerdings durch die unterschiedlichen frequenzabhängigen Eigenschaften der Testdaten für seine Ermittlung sowie durch kleine stochastische und systematische Abweichungen zwischen den Messungen beeinflusst.

Dies kann mit dem A-priori-Wissen, dass das untersuchte Messgerät eine Amplitudenübertragung von mindestens 50% bis etwa $f = 200 \text{ mm}^{-1}$ aufweist, veranschaulicht werden. Zur Erfassung der Übertragungsfunktion ist es entsprechend erforderlich, den vollständigen Frequenzbereich bis zu mindestens dieser

Ortsfrequenz durch die entsprechende Testoberfläche abzubilden. Entsprechend kann grundsätzlich gefolgert werden, dass die Qualität der Ergebnisse durch eine Abbildung vieler Frequenzen in der Testoberfläche sowie eine möglichst präzise Messung begünstigt wird. Durch eine Gegenüberstellung mit Übertragungsfunktionen, die mithilfe eines Chirp-Normals erfasst wurden, soll später noch eine präzisere Beurteilung der Ergebnisse erfolgen.

Vorher soll jedoch als zweites Messprinzip die optische Erfassung von Oberflächen, konkreter das Konfokalmikroskop NanoFocus μ Surf, untersucht werden, um festzustellen, ob auch das Übertragungsverhalten eines weiteren Messgerätes ermittelt werden kann.

Dazu wurden unter Anwendung einer 20x Vergrößerung flächenhafte Oberflächendaten der gleichen Proben mithilfe mehrerer Einzelmessungen erfasst, aus denen Profile selektiert wurden, welche analog als Eingangsgröße für die verbesserte Vorverarbeitung und das anschließend eingepasste ARMA-Modell dienen. Die Erfassung des kombinierten Rauheits- und Welligkeitsnormals wurde allerdings nicht mit dem Konfokalmikroskop durchgeführt, da dies aufgrund der großen lateralen Ausprägung des Normals von 50 mm nicht im Rahmen einer akzeptablen Anzahl von Einzelmessungen möglich war.

Bedingt durch den stärker als bei der taktilen Messung vorhandenen Anteil sehr kurzer Wellenlängen im Signal wurde außerdem ein λ_s -Filter (DIN EN ISO 16610-21) berücksichtigt. In Anlehnung an den lateralen Abtastabstand von $\Delta x = \Delta y \approx 1,56 \mu m$ wäre nach DIN EN ISO 25178-3 eine Grenzwellenlänge von $\lambda_s = 8 \mu m$ vorgesehen [25178-3, S. 9], welche allerdings unter Berücksichtigung des Abtasttheorems zum Wert der doppelten auflösbaren Wellenlänge von $\lambda_s = 2 \cdot \lambda_{\min} = 6,25 \mu m$ bzw. $f = 160 mm^{-1}$ festgelegt wurde, um nur so viele Signalanteile wie nötig zu entfernen. Dieser weitere Vorverarbeitungsschritt trennt das Rauschen vom Restsignal zur weiteren Auswertung.

Wie in der Übersicht der Auswerteparameter in **Tabelle 12** dargestellt wurde beim R_k -Normal, welches sehr hochfrequente Anteile enthält, außerdem eine Vorverarbeitung des virtuellen Werkstücks mit $\lambda_s = \lambda_{\min} = 3,125 \mu m$ vorgenommen, um Wellenlängen zu entfernen, deren Abtastung aufgrund der lateralen Auflösungsbegrenzung ohnehin nicht möglich wäre. Da das Linearitätsnormal solche hohen Frequenzen nicht enthält und das DFT-Normal stufenartige Profilanteile enthält, die durch eine solche

Filteroperation verfälscht werden würden, wurde bei den beiden anderen Normalen dieser Schritt nicht angewendet.

Tabelle 12: Parameter für die Datenvorverarbeitung bei Untersuchung des Messgeräts NanoFocus μ Surf

Auswerteparameter NanoFocus μ Surf				
Normal	Gesamtlänge	Periodenlänge	Segmentierungsabstände	λ_s der Vorfilterung
a) Linearitätsnormal	16 mm	4 mm	0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm	-
b) DFT-Normal	12 mm	4 mm	0,5 mm; 0,4 mm; 0,2 mm	-
c) R_k -Normal	12,8 mm	4 mm	1 mm; 0,8 mm; 0,67 mm	3,125 μ m

Abgesehen von den bisher aufgeführten Variationen wurde unter Nutzung der Parameter in **Tabelle 12** eine identische Ermittlung der Übertragungsfunktionen wie bei der Analyse des Tastschnittgerätes durchgeführt. Die hieraus folgenden Beschreibungen des Übertragungsverhaltens in **Abbildung 27** sind wie auch beim Tastschnittverfahren grundsätzlich plausibel sowie für verschiedene Modellierungsrichtungen und Segmentierungsabstände vergleichbar, unterscheiden sich allerdings ebenfalls je nach genutzter Oberfläche etwas, wobei aber beobachtet werden kann, dass eine grundsätzliche Eignung des ARMA-Modells auch für die Charakterisierung optischer Messgeräte vorliegt.

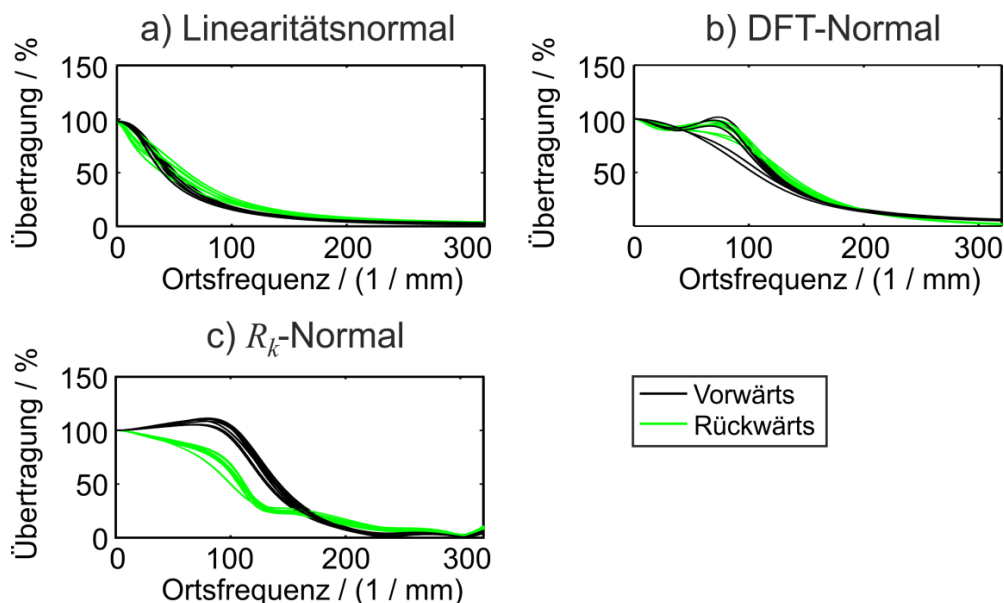


Abbildung 27: Übertragungsfunktionen NanoFocus μ Surf unter Anwendung des ARMA-Modells, verbesserter Datenvorverarbeitung sowie variabler Modellierungsrichtung

Zur Ermöglichung einer weitergehenden Analyse der Qualität der bisherigen Ergebnisse wurden die Übertragungsfunktionen beider Messgeräte einzelnen übertragenen Amplituden gegenübergestellt, die durch Messungen eines Chirp-Normals (vgl. [Krü07, S. 572 ff.]) ermittelt wurden.

Das entsprechende Messobjekt wurde am Lehrstuhl FBK hergestellt und weist sinusförmige Profilanteile der Periodenlängen $2 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ und einer Amplitude von 400 nm auf, welche für die Sinuswellen hoher Ortsfrequenz allerdings derart angepasst wurde, dass eine Abbildung auch bei diesen hohen Frequenzen durch den Spitzenradius von $R_r = 5 \mu\text{m}$ des Diamant-Drehmeißels ermöglicht wurde. Entsprechend kann mit der Probe die Amplitudenübertragung für den Frequenzbereich $10 \text{ mm}^{-1} - 500 \text{ mm}^{-1}$ experimentell geprüft werden.

Zur Berechnung der frequenzabhängigen Amplitudenübertragung wurden aus gemessenen Profilen die einzelnen Sinuswellen extrahiert und eine Einpassung der Nenngeometrie angewendet, woraufhin die eingepassten und nominellen Werte der Amplituden wellenlängenabhängig verglichen wurden (vgl. [See14, S. 3 f.]). Dieser Auswertung liegt dabei das Konzept der „kleinskaligen Profiltreue“, welches zur Charakterisierung von lateralen Auflösungsgrenzen genutzt werden kann [See14, S. 4 f.], zugrunde.

Folgende Messabläufe wurden im Rahmen der Untersuchung genutzt: Taktill wurden acht Tastschnitte des strukturierten Bereichs mit allen Wellenlängen aufgenommen und optisch erfolgte durch Zusammenfügen mehrerer Einzelmessungen ebenfalls die Erfassung aller Sinuswellen als flächenhafte Darstellung, aus welcher im Anschluss drei Einzelprofile an unterschiedlichen Positionen für die Ermittlung der Übertragungseigenschaften ausgewählt wurden. Dabei wurde wie auch bei der Erzeugung der Messdaten für das ARMA-Modell ein Objektiv mit 20x Vergrößerung eingesetzt.

Die auf Basis der Chirp-Auswertung erzeugten Werte der Übertragungsverhältnisse sind in **Abbildung 28** gemeinsam mit den Ergebnissen der ARMA-Modelle dargestellt. Dabei ist in Anlehnung an die Grenzwellenlänge von Filtern ebenfalls eine Amplitudenübertragung von 50 % gekennzeichnet. Entsprechend kann auch hier festgestellt werden, dass dieser Wert, je nachdem welches Normal für das ARMA-Modell genutzt wurde, durchaus variiert. Die geringste Abweichung zu den Messergebnissen lässt sich bei beiden Messgeräten durch die Übertragungsfunktionen des R_k -Normals erzielen, welches im Vergleich z.B. zum Linearitätsnormal eine sehr große Bandbreite zur Verfügung stellt.

Z.B. bei ebendiesem Normal ist daher die unzureichende Übertragung kurzer Wellenlängen möglicherweise auf deren geringe Ausprägung im Testprofil zurückzuführen. Als Schlussfolgerung des Vergleichs lässt sich also entsprechend darlegen, dass sich die Ergebnisse aus der Einpassung des ARMA-Modells - insofern alle Frequenzen in hinreichender Ausprägung vorhanden sind - mit den durch das Chirp-Normal ermittelten Übertragungseigenschaften decken.

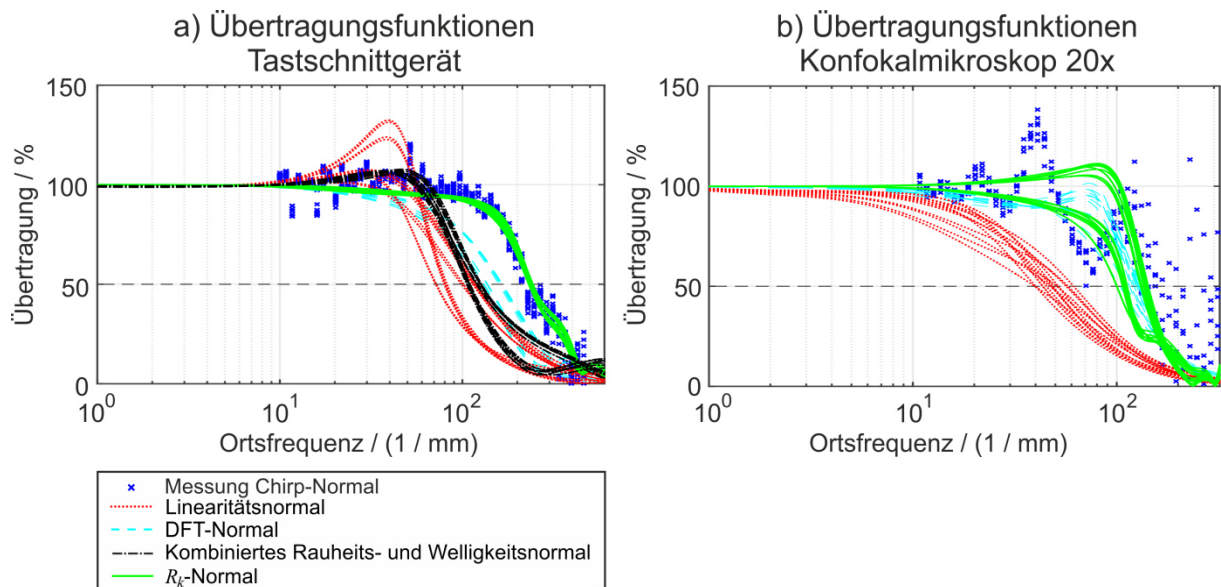


Abbildung 28: Erfassung von Übertragungseigenschaften mithilfe des Chirp-Normals. a) Messergebnisse Tastschnittgerät, b) Messergebnisse Konfokalmikroskop, hierbei befindet sich das Ergebnis einer Einpassung der Messdaten mit einer ermittelten Amplitudenübertragung von >150 % außerhalb des Darstellungsbereichs

Bei der optischen Messung kommt es aufgrund des Rauschens zu einer inhomogeneren Verteilung der einzelnen Übertragungsverhältnisse bei hohen Frequenzen. Außerdem lassen sich in den Ergebnissen krümmungsabhängige Artefakte der konfokalen Mikroskopie (vgl. [Mau13, S. 5]) feststellen.

Nachdem durch die beschriebene Methodik bereits eine erste grundlegende Verifikation der beschriebenen Modelle erfolgen konnte, sollen weitere Betrachtungen mithilfe virtueller Messungen erfolgen. Die Ergebnisse dieser virtuellen Messungen können auf Basis der aus dem ARMA-Modell folgenden Übertragungsfunktionen berechnet werden, wobei die entsprechende Implementierung auf Grundlage des Faltungstheorems im Frequenzbereich erfolgt, um die erforderliche Filterwirkung durch das Messgeräte-Verhalten zu berücksichtigen. Die Übertragungsfunktionen werden dabei in der komplexwertigen Darstellung genutzt. Insofern die Ergebnisse das tatsächliche Übertragungsverhalten der jeweiligen Geräte wiedergeben, sollte eine generische Implementierung möglich sein, die unabhängig von der Oberfläche für die

Vorhersage von Abtastungsergebnissen vorgesehen werden kann. Die Nutzung als virtuelles Messgerät kann dabei nicht nur zur Einordnung der eingepassten ARMA-Modelle dienen, sondern spiegelt auch eine Möglichkeit zu deren praktischer Anwendung wieder. Mithilfe dieser simulierten Abtastung des virtuellen Werkstücks lässt sich die virtuelle Ist-Oberfläche $\bar{z}_{a,v}$ berechnen, deren Übereinstimmung mit der tatsächlichen Ist-Oberfläche durch folgenden Parameter Q_a charakterisiert werden soll:

$$Q_a = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (z_a[k] - z_{a,v}[k])^2} . \quad (47)$$

Dieser liefert entsprechend Informationen über den punktweisen Abstand bzw. die punktweise Abweichung dieser beiden Datensätze zueinander. Der Effekt dieser virtuellen Abtastung ist an einem Ausschnitt des R_k -Normals in **Abbildung 29** dargestellt, wobei eindeutig zu beobachten ist, dass dieser dem Einfluss der nicht-virtuellen taktilen Abtastung durchaus nahekommt.

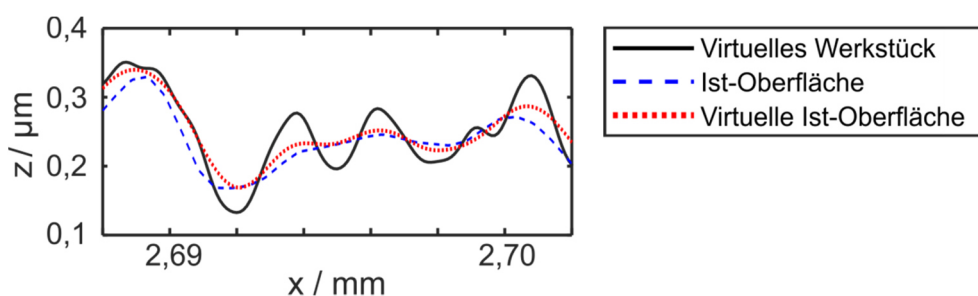


Abbildung 29: Ausschnitt des R_k -Normals. Vergleich der realen, taktilen Messung mit der mit den aus dem R_k -Normal ermittelten ARMA-Koeffizienten gefilterten Oberfläche

Für die virtuelle taktile Messung wurde für jedes der vier untersuchten Normale eine Übertragungsfunktion aus den 12 beschriebenen Varianten mit variabler Segmentierung und Modellierungsrichtung gemittelt. Genau diese vier unterschiedlichen Normale wurden jeweils mit allen Übertragungsfunktionen in entsprechend 16 Kombinationen gefiltert, um die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse der ARMA-Modelle auf Basis von Gleichung (47) beurteilen zu können.

Aufgrund der lateralen Diskretisierung der taktilen Messung von $f_s = 2000 \text{ mm}^{-1}$ wurden vor der Filterung allerdings alle Werte in der Übertragungsfunktion bei Frequenzen $f > 1000 \text{ mm}^{-1}$ zu Null gesetzt ($|v(f \geq 1000 \text{ mm}^{-1})| = 0$), um die Einhaltung des Abtasttheorems vorauszusetzen und Frequenzanteile, die ohnehin im realen Signal nicht vorhanden sein könnten auch im Signal der virtuellen Abtastung zu eliminieren. Da die berechneten Übertragungsfunktionen auf Grundlage dieses

begrenzten Frequenzbereichs ermittelt wurden, setzen sie sich außerhalb des Definitionsbereiches aus Rauschteilen zusammen, deren Einfluss so entfernt wird. Dieses Phänomen und seine Behebung sind für das R_k -Normal in **Abbildung 30** nachvollziehbar.

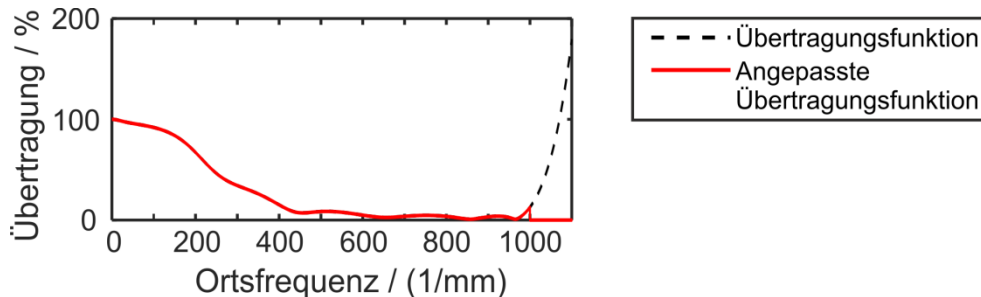


Abbildung 30: Rauschanteil in der Übertragungsfunktion des Hommel Nanoscan auf Basis des R_k -Normals sowie die Korrektur dieser Abweichungen bei hohen Frequenzen

Erfolgt keine entsprechende Korrektur, lassen sich bei einigen virtuellen Messergebnissen teilweise nicht unerhebliche Abweichungen feststellen. Entsprechend wurden die Ergebnisse der 16 benannten Kombinationen virtueller Messungen nach diesem Vorverarbeitungsschritt berechnet. Dabei ergaben sich nach Gleichung (47) die in **Tabelle 13** zusammengefassten Werte des Parameters Q_a , der zusätzlich auf die Gesamthöhe des virtuellen Werkstücks R_t nach DIN EN ISO 4287 bezogen wurde (vgl. [4287, S. 15]).

Bei der zeilenweisen Analyse lassen sich entsprechend Rückschlüsse über die Güte der entsprechenden Messdaten für ein Normal gewinnen, wobei beim R_k -Normal Abweichungen von Ist-Oberfläche und virtueller Ist-Oberfläche nur in sehr geringem Umfang beobachtet werden können. Diese liegen in der Größenordnung 27-43 nm und weisen so die realitätsnahe Güte der zugehörigen Simulationen der Messung nach, da sich diese nicht stark von dem zufälligen Rauschanteil industrieller Topographie-Messungen unterscheidet.

Dieser Zusammenhang kann auch in **Abbildung 31** nachvollzogen werden, welche für exemplarische Ausschnitte der vier Normale die virtuellen Werkstücke den zugehörigen taktil erfassten Ist-Oberflächen gegenüberstellt. Die kurzwelligen Rauschanteile machen sich bei den Strukturen des R_k -Normals weniger als bei den anderen Normalen bemerkbar. Dabei zeichnet sich das R_k -Normal wie bereits konstatiert durch die Amplitudenabdeckung eines großen Frequenzbereichs aus. Im Vergleich zu den anderen Testprofilen sind auch eine ausreichende Ausprägung und Übertragung kurzer Wellenlängen durch das Messgerät vorhanden, was bereits beim

Vergleich zu den Übertragungsverhältnissen der Sinuswellen des Chirp-Normals festgestellt werden konnte.

Tabelle 13: Bewertung der virtuellen, taktilen Abtastungen im Vergleich zu realen Messungen mit dem Gerät Hommel Nanoscan. Parameter Q_a nach Gleichung (47) und Quotient Q_a/R_t . a) Linearitätsnormal, b) DFT-Normal, c) Kombiniertes Rauheits- und Welligkeitsnormal, d) R_k -Normal

Bewertung der virtuellen, taktilen Abtastung mittels ARMA-Modellen					
ARMA-Modell für die Übertragungsfunktion →		a)	b)	c)	d)
Gemessene Oberfläche ↓					
a) Linearitätsnormal	Q_a / nm	304	295	312	306
	Q_a / R_t	4,83 %	4,69 %	4,96 %	4,86 %
b) DFT-Normal	Q_a / nm	136	124	138	128
	Q_a / R_t	1,13 %	1,03 %	1,15 %	1,06 %
c) Kombiniertes Rauheits- und Welligkeitsnormal	Q_a / nm	336	332	343	339
	Q_a / R_t	2,70 %	2,67 %	2,76 %	2,73 %
d) R_k -Normal	Q_a / nm	43	32	37	27
	Q_a / R_t	0,51 %	0,38 %	0,44 %	0,32 %

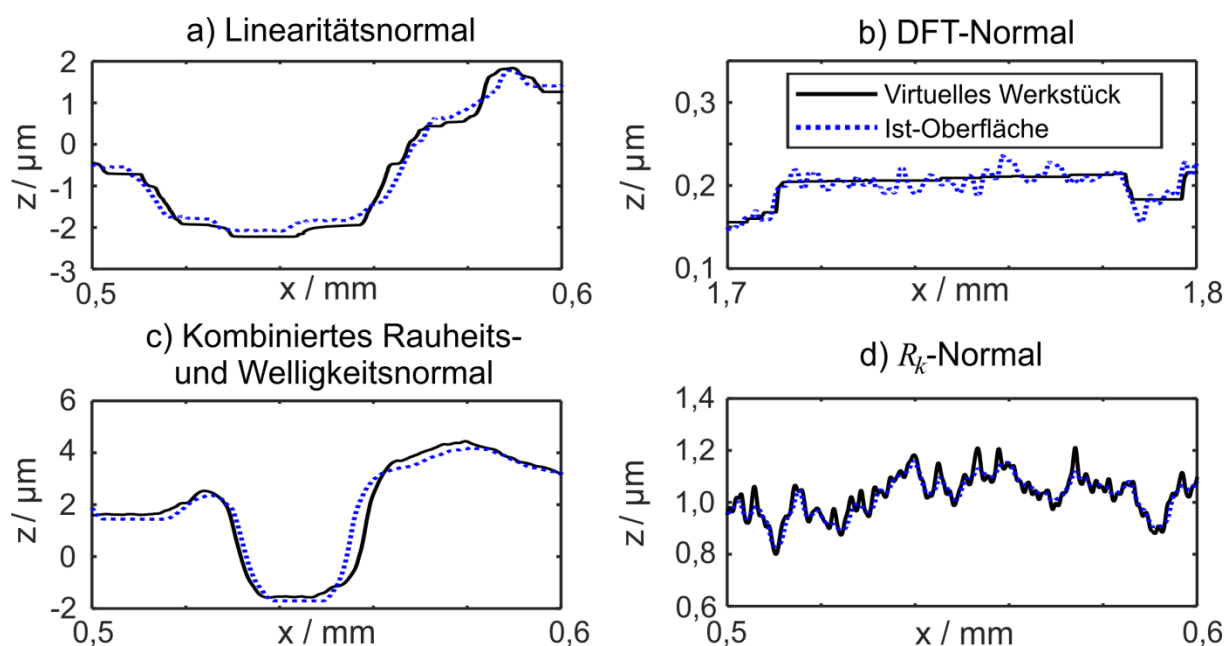


Abbildung 31: Reale Messung der Normale. Exemplarische Darstellung des Rauscheinflusses der Messung sowie der Abweichungen zwischen virtuellem Werkstück und Ist-Oberfläche

Entsprechend lassen sich beim spaltenweisen Vergleich der unterschiedlichen Übertragungsfunktionen nur geringe Abweichungen feststellen, da sich die genannten Effekte der Oberfläche als solches stärker auswirken als das gewählte

Übertragungsverhalten für die virtuelle Abtastung. Insgesamt führt die Nutzung des ARMA-Modells des R_k -Normals zur Abtastung desselbigen zu den geringsten Abweichungen. Für das Messgerät Hommel Nanoscan lassen sich demnach auf Basis der ARMA-Modelle Vorhersagen von Messergebnissen aufstellen, da hier durchschnittliche Abweichungen im Sub-Mikrometer-Bereich auftreten, die somit eine deutlich geringere Größenordnung als die Gesamthöhe der Oberfläche aufweisen.

Eine identische Analyse des Konfokalmikroskops soll nachfolgend ebenfalls durchgeführt werden. In **Tabelle 14** ist dabei die Analyse des Parameters Q_a zusammengefasst, wobei zur Einhaltung des Abtasttheorems das Übertragungsverhältnis in Anlehnung an die - im Vergleich zur taktilen Messung - höhere Abtastschrittweite nach der Vorschrift $\left| \upsilon(f \geq 320 \text{ mm}^{-1}) \right| = 0$ transformiert wurde.

Tabelle 14: Bewertung der virtuellen, optischen Abtastungen im Vergleich zu realen Messungen mit dem Gerät NanoFocus μ Surf. Parameter Q_a nach Gleichung (47) und Quotient Q_a/Rt . a) Linearitätsnormal, b) DFT-Normal, c) R_k -Normal

Bewertung der virtuellen, optischen Abtastung mittels ARMA-Modellen				
ARMA-Modell für die Übertragungsfunktion \rightarrow		a)	b)	c)
Gemessene Oberfläche \downarrow				
a) Linearitätsnormal	Q_a / nm	256	276	288
	Q_a / Rt	4,07 %	4,39 %	4,58 %
b) DFT-Normal	Q_a / nm	207	198	202
	Q_a / Rt	1,72 %	1,64 %	1,68 %
c) R_k -Normal	Q_a / nm	110	83	78
	Q_a / Rt	1,30 %	0,98 %	0,92 %

Auch bei dem zweiten untersuchten Messprinzip treten bei der Oberfläche des R_k -Normals die kleinsten Abweichungen von virtueller und realer Messung auf. Dieses Phänomen ließ sich bereits bei der Untersuchung des Tastschnittgeräts mithilfe der Profilstruktur des entsprechenden Normalen sowie der Güte der Messung erklären. Grundsätzlich sei allerdings an dieser Stelle ebenfalls auf die kleine Größenordnung aller Werte verwiesen.

Entsprechend kann also konstatiert werden, dass sich für alle Normale, insbesondere aufgrund der hohen Güte seiner Messung aber für das R_k -Normal, bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen unterschiedlicher Messgeräte und -prinzipien mit dem ARMA-Modell Ergebnisse erzielen lassen, welche sich auch für eine anschließende

Modellierung virtueller Messungen eignen. Dies wurde anhand des Tastschnittgeräts sowie des Konfokalmikroskops nachgewiesen.

Damit kann letztlich ebenfalls gefolgert werden, dass mithilfe der Zeitreihenmodellierung eine Charakterisierung des Übertragungsverhaltens technischer Rauheitsmessgeräte erfolgen kann. Dies wurde für Oberflächen mehrerer Kalibriernormale nachgewiesen. Es war möglich, durch eine verbesserte Ausrichtung der Ein- und Ausgangsdatensätze des Messgerätes zueinander die Eignung des Modells für komplexere Profilstrukturen sowie eine höhere Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei den beiden betrachteten Messprinzipien optisch und taktil herzustellen.

Die Gegenüberstellung zu mithilfe von Sinus-Strukturen eines Chirp-Normals ermittelten Punkten der Amplitudenübertragung lieferte ein Maß der Modellgüte, welche dann höher war, wenn die Messdaten für das ARMA-Modell eine hohe Qualität aufwiesen sowie außerdem eine hinreichende Abdeckung aller relevanten Ortsfrequenzen gewährleistet wurde. Zusätzlich wurden die eingepassten ARMA-Modelle für die Simulation von Abtastungen eingesetzt, deren resultierende Profile eine starke Korrelation zu den mit realen Messgeräten erzielten Topographien aufwiesen, so dass die beiden Profile teilweise nicht wesentlich signifikanter als das Messgeräte-Rauschen voneinander abwichen. Sowohl bei Betrachtung des Tastschnittgeräts als auch bei Analyse des Konfokalmikroskops lieferte das R_k -Normal die besten Ergebnisse. Als Grund dafür wurde u.a. identifiziert, dass das Profil Strukturen sämtlicher relevanter Ortsfrequenzen beinhaltet. Dies konnte entsprechend - neben der hohen erforderlichen Qualität der Messdaten - als seine Voraussetzung für die adäquate Anwendung des ARMA-Modells zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens identifiziert werden.

Im Rahmen künftiger Analysen sind weitergehende Analysen zur Qualifizierung des ARMA-Modells für die Beschreibung des Übertragungsverhaltens sinnvoll. So kann für WLI z.B. ein Vergleich zur ITF durchgeführt werden. Auch zum Einfluss des Frequenzspektrums des Oberflächenprofils auf die Ergebnisse sowie für die Erweiterung des Ansatzes auf flächenhafte Topographie-Messungen können weitere Analysen aufschlussreich sein. Nachdem in **Kapitel 4** die Messung als solches Gegenstand der Betrachtungen war, soll im folgenden **Kapitel 5** die Auswertung der auf diese Weise generierten Messdaten betrachtet werden.

5 Vorverarbeitung und Auswertung von Messdaten

Nach der eigentlichen Messung liegen Modelldaten der rauen Oberfläche vor, welche gemäß der Definition in DIN 4760 als Ist-Oberfläche Z_a bezeichnet werden [4760, S. 1]. Damit eine objektive Beurteilung der Rauheit möglich ist, müssen diese Daten weiter ausgewertet werden, was, wie in **Abbildung 32** dargestellt, letztlich auf das eigentliche Messergebnis führt. Optional wird außerdem eine Vorverarbeitung der Daten durchgeführt. Die Auswerteschritte lassen sich in die vier Kategorien Einpassung, Interpolation, Filterung und Kennwertberechnung unterteilen und werden gemäß dieser Kategorisierung nachfolgend betrachtet.

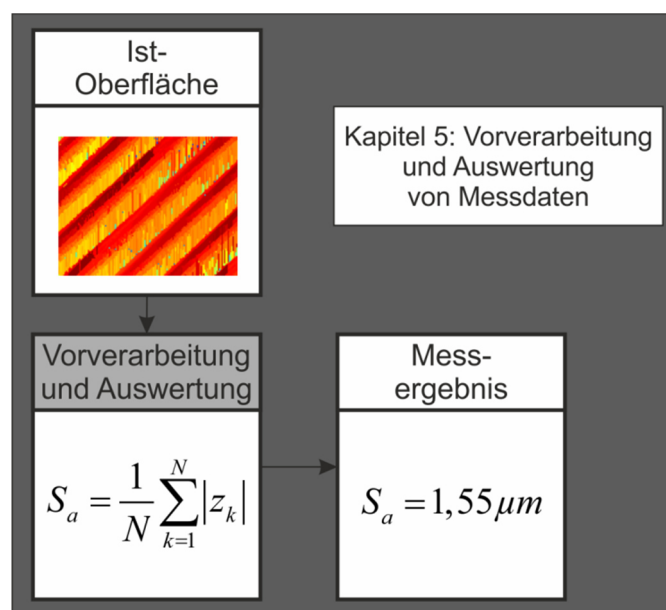


Abbildung 32: Auswertung und Vorverarbeitung von Messdaten

5.1 Auswertung von Rauheit - Einordnung und Tendenzen

In **Kapitel 4** wurde der Schritt der Erfassung von geometrischen Eigenschaften mithilfe von Messgeräten erläutert und signaltheoretisch untersucht. Nächstes Ziel nach der Durchführung der Messung an sich ist es, im Rahmen der Auswertung möglichst relevante Informationen aus den so gewonnenen Rohdaten zu extrahieren. Je nach Messaufgabe können dabei völlig unterschiedliche Vorgehensweisen erforderlich werden. So ist z.B. für den Bereich der Formmessung die Zuordnung von geometrischen Eigenschaften wichtig. Traditionell wird zur Bewertung gefertigter Bauteile ein Vergleich zwischen geometrischen Messergebnissen und der Soll-Geometrie ausgeführt, wohingegen heute allerdings verstärkt auf die simulierte Prüfung funktioneller Eigenschaften übergegangen wird [Har13, S. 285].

Nachfolgend wird eine Einordnung der vier Teilgebiete Einpassung, Interpolation, Filterung und Kennwertberechnung aus Sicht der Rauheitsmesstechnik beschrieben und es wird weiterhin eine Aufzählung bestehender Trends in diesen Bereichen vorgenommen.

- **Numerisch effizientere Implementierung von Einpassungsalgorithmen**

Bei Auswertung von profilhaften Daten, die mit einem Tastschnittgerät aufgenommen wurden, ist das „Beseitigen der Nennform“ [3274, S. 5] vorgesehen, bevor die Auswertung nach DIN EN ISO 4287 (vgl. [4287, S. 9]) durchgeführt wird [3274, S. 5]. Heutige Tastschnittgeräte erlauben eine Erfassung von Strukturen im Wellenlängenbereich Form bis Rauheit in einer einzigen Messung und weisen somit neben einem hinreichend großen Messbereich auch eine extrem feine Auflösung der Höhenachse auf [Vol13, S. 2].

Insbesondere wenn die Form als solches betrachtet werden soll ist die Einpassung von typischen Grundformen wie z.B. Kreisen, Zylindern oder Kegeln eine häufige Auswerteaufgabe [Gro13, S. 1]. Soll bei einer Rauheitsauswertung die bereits erwähnte Nennform der Oberfläche aus dem Datensatz entfernt werden, bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Z.B. Einpassungen mit der Least-Squares und der Total-Least-Squares Methode sind verbreitet, wobei der Ansatz mit der Total-Least-Squares Methode im Gegensatz zur Least-Squares Methode keine Überhöhung des verbleibenden Rauheitsprofils hervorruft (vgl. [Kus17, S. 68]).

Entsprechend kann mit der letztgenannten Einpassungsmethode auch bei größeren Einflüssen durch die Nennform wie hohen Steigungen noch eine unverfälschte Erfassung von Rauheitsstrukturen durchgeführt werden [Kus17, S. 73]. Bei Anwendung der Least-Squares Einpassung wird dabei außerdem grundsätzlich der größtmögliche Anteil vom quadratischen Mittenrauwert R_q bzw. S_q der Form subtrahiert [For13c, S. 113 f.].

Für die flächenhafte Betrachtung ist der F-Operator in DIN EN ISO 25178-2 als „Operator, welcher die Formanteile von der Primärfläche entfernt“ [25178-2, S. 6] definiert. Hierbei ist zu beachten, dass bei Auswertung von Rauheit häufig nur ein kleiner Ausschnitt der Nennform in den Messdaten enthalten ist [For13c, S. 119]. Selbst die Einpassung vermeintlich einfacher 3D-Geometrien wie die eines Zylinders ist dabei bei geringer Datenmenge nach wie vor numerisch herausfordernd [For13c, S. 124] [Gro13, S. 10]. U.a. aus diesem Grund wurden als Alternativen hierzu die Einpassung von empirischen Modellen [For13c, S. 124] oder die Separation der

langwelligen Gestaltabweichungen durch Anwendung von Filtern [For13c, S. 126 f.] untersucht. Für einen umfassenden Überblick über Methoden zur Einpassung sei auf die Darstellungen von Forbes [For13c, S. 107 ff.] verwiesen.

- **Anwendung interpolierender Filter**

Es können immer wieder Messdaten auftreten, die nicht die zur weiteren Auswertung gewünschte Diskretisierung aufweisen, so dass eine Interpolation erforderlich wird. Diese kann auch - je nach Art ihrer Ausführung und bei geringer Dichte an Messpunkten - einen Einfluss auf die resultierenden Rauheitskenngrößen haben [Bla13, S. 19].

Die Gewichtsfunktion von Filtern ist normativ in kontinuierlicher Darstellung vorgegeben (vgl. u.a. [16610-21, S. 6]). Da Messdaten meist digital und damit diskret gefiltert werden müssen, ist die entsprechende Implementierung in der Literatur für äquidistante Abtastintervalle beschrieben (vgl. u.a. [Kry04a, S. 9 f.], [See12, S. 202 f.]). Um eine Schrägstellung des Tasters zur Oberfläche während der Messung zu erlauben, führen einige industrielle Tastschnittgeräte jedoch eine nichtäquidistante Abtastung aus, so dass eine anschließende Interpolation erforderlich wird (vgl. [Kus17, S. 51]). Entsprechend handelt es sich bei Interpolation und Filterung um zwei konsekutive Prozessschritte, die aber auch zeitgleich durchgeführt werden können, da z.B. das lineare Gauß-Filter [16610-21, S. 6 ff.] auch direkt auf nichtäquidistante Messdaten angewendet werden kann (vgl. [Kus17, S. 100 f.]).

Sehr verbreitet für Interpolationen ist dabei die Nutzung von Splines wie z.B. dem kubischen Spline (vgl. [Uns99, S. 26]). Unser präsentiert einen umfassenden Überblick über entsprechende Methoden [Uns99, S. 23 ff.].

Auch flächenhaft erfasste Messdaten weisen z.B. durch Fehlstellen kein äquidistantes Raster auf [Rai13, S. 1]. Eine Tendenz bei der flächenhaften Interpolation ist dabei die Untersuchung von neuen Lösungsansätzen wie z.B. dem Kriging aus der Geostatistik [Rai13, S. 1 ff.].

- **Zunehmende Verbreitung komplexer Filterverfahren**

Für eine Rauheitsauswertung muss der entsprechende Anteil der Topographie noch von den übrigen Gestaltabweichungen (vgl. [4760, S. 1 f.], [Bod92, S. 86]) getrennt werden. Dabei werden das Rauheitsprofil gemäß DIN EN ISO 4287 für den profilhaften [4287, S. 7] sowie die S-L-Oberfläche gemäß DIN EN ISO 25178-2 für den flächenhaften Fall [25178-2, S. 6] ermittelt.

Ein Überblick über gängige Filterverfahren in der geometrischen Produktspezifikation findet sich allgemein bei Seewig und Groh [See13d, S. 1 ff.], in der Filter-Normenserie DIN EN ISO 16610 (vgl. [16610-1, S. 3]) sowie für flächenhafte Anwendungen bei Seewig [See13b, S. 67 ff.]

In der industriellen Anwendung der profilhaften Rauheitsmesstechnik sind dabei insbesondere das lineare Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-21 ([16610-21, S. 6 ff.]), das lineare Spline-Filter nach DIN EN ISO 16610-22 [16610-22, S. 8 ff.] sowie für plateauartige Oberflächen das Sonderfilter-Verfahren nach DIN EN ISO 13565-1 [13565-1, S. 2. ff] und das robuste Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-31 [See00, S. 79 ff.] [See05, S. 254 ff.] [16610-31, S. 6 ff.] technisch relevant.

Die komplexeren Filterverfahren sind ebenfalls standardisiert und z.B. das Sonderfilter-Verfahren nach DIN EN ISO 13565-1 (vgl. [13565-1, S. 2 ff.]) ist für die Ermittlung der R_k -Parameter als Filterverfahren vorgeschrieben [13565-2, S. 3]. Jiang schlug allerdings vor, das gaußsche Regressionsfilter anstelle des Sonderfilters einzusetzen, da dieses im Zuge der Filteroperation langwelligen Profilanteilen bei plateauartigen Oberflächen robuster folgen kann [Jia10, S. 576].

Weitere Charakteristik des Sonderfilter-Verfahrens ist die Tatsache, dass es aufgrund seiner Prozessfolge nur bei Ausreißern, welche in Richtung der Täler auftreten, robust arbeitet, so dass Seewig es als „einseitig robust“ beschrieb [See00, S. 125]. Im Gegensatz hierzu führen robuste Regressionsfilter auch bei Ausreißern in beide Richtungen zu einem guten Ergebnis [See00, S. 127]. Grundsätzlich wurde aber ebenfalls herausgestellt, dass bei Tälern, deren Breite im Verhältnis zur Grenzwellenlänge der robusten Profilfilterung einen hohen Wert aufweist, auch eine Beeinflussung des entfernten Welligkeitsprofils folgen kann [Dob13, S. 117]. Entsprechend wurde z.B. auch vorgeschlagen, robuste Profilfilter derart zu gestalten, dass die entsprechenden Effekte behoben werden [Dob13, S. 117].

Da auch die Oberflächen komplexer werden (vgl. **Kapitel 3**), ist immer wieder die Auswahl von komplexeren Profilfiltern erforderlich, auch wenn die Funktion der einzelnen Filter im industriellen Umfeld häufig nicht hinreichend bekannt ist [See00, S. 126].

Zur flächenhaften Analyse gibt es identische Filterverfahren, die teilweise noch nicht standardisiert sind [16610-60, S. 5]. Dabei ist vorgesehen, dass die Normenserie DIN EN ISO 16610-6x die lineare, die Normenserie DIN EN ISO 16610-7x die robuste und die Normenserie DIN EN ISO 16610-8x die morphologische Flächenfilterung

beschreibt bzw. beschreiben wird [16610-60, S. 19]. Diese Thematik wird weiterhin nachfolgend separat betrachtet.

- **Zunehmende Verbreitung der flächenhaften Filterung**

Da wie in **Kapitel 4** beschrieben ein verstärkter Einsatz von flächenhafter Messtechnik für die Erfassung von Rauheit beobachtet werden kann und somit auch entsprechende Messdaten generiert werden, kommt es ebenfalls zum zunehmenden Einsatz flächenhafter Filterverfahren.

Seewig gibt einen Überblick über die aktuellen Methoden der flächenhaften Filterung [See13b, S. 67 ff.]. Dabei sind zunächst lineare flächige Filter zu nennen, deren Grundlagen in DIN EN ISO 16610-60 vorgestellt werden [16610-60, S. 9 ff.]. In dieser Normenserie erschienen ist bisher das flächenhafte Gauß-Filter, welches ebenfalls auf Basis profilhafter Filterung implementiert werden kann [16610-61, S. 12]. Weitere lineare 3D-Filter, wie das Spline-Filter, werden noch erscheinen [16610-60, S. 5].

Bereits erschienen ist außerdem die erste Norm zu robusten flächenhaften Filtern, welche das flächenhafte gaußsche Regressionsfilter beschreibt [16610-71, S. 7 ff.]. Ebenfalls gibt es eine erste Norm zur Segmentierung [16610-85, S. 5 ff.]. Weitere Normen zu robusten und morphologischen flächenhaften Filtern sind ebenfalls in Vorbereitung [16610-60, S. 5].

- **Zunehmende Verbreitung flächenhafter Kenngrößen**

Die vorverarbeiteten Messdaten müssen mit entsprechenden Parametern charakterisiert werden. Diese Kennwertberechnung erfolgt nach den vorgestellten Vorverarbeitungsoperationen. Die hierbei genutzten Kenngrößen sowie ihre Berechnung sind in DIN EN ISO 4287 für generelle profilhafte Betrachtungen [4287, S. 12 ff.] und in DIN EN ISO 13565-2 für taktil erfasste Profile, die „plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften“ [13565-2, S. 1] unterliegen, definiert.

Erste Rauheitsparameter waren die amplitudenbasierten Kenngrößen „größte Höhe des Profils“ [4287, S. 12], heute als R_z bezeichnet, sowie der R_a -Wert, bekannt als „arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten“ [4287, S. 15], welche bis Ende der 1960er Jahre verbreitet eingesetzt wurden [Blu03, S. 5 f.]. Ab dann entwickelten sich neue Parameter, deren Anzahl nach Blunt bis zu den 1980er Jahren bereits dreistellig war [Blu03, S. 7]. Whitehouse stellte diese Entwicklung 1982 in Frage, und empfahl eine Reduzierung der Anzahl von Parametern [Whi82, S. 75].

Etwa zur gleichen Zeit wurden die ersten Untersuchungen zur flächenhaften Erfassung von Oberflächen durchgeführt [Blu03, S. 7]. Von Stout et al. wurden im sogenannten „Blue Book“ bereits unterschiedliche Klassen von flächenhaften Rauheitskenngrößen eingeführt [Sto00, S. 216 ff.]. Weitere Arbeiten und Kenngrößen für diese Art der Charakterisierung wurden im „Green Book“ von Blunt und Jiang vorgestellt [Blu03, S. 17 ff.].

Die ersten flächenhaften Parameter wurden fast ausschließlich auf Basis einer Übertragung von bestehenden profilhaften Analysemöglichkeiten auf die flächenhafte Betrachtung generiert [Chi00, S. 639]. Aber auch erste tatsächlich flächenhafte Kenngrößen unter Nutzung der Autokorrelationsfunktion sowie des Leistungsdichtespektrums der Oberfläche wurden ebenso früh vorgeschlagen [Chi00, S. 639] wie die Fraktalmethode, über deren Einsatzmöglichkeiten für die Auswertungen von Rauheit de Chiffre et al. einen Überblick geben [Chi00, S. 643 ff.].

Im Jahr 2002 wurde zur Initiierung der Normungsarbeit u.a. im Bereich dieser Rauheitskenngrößen eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen [Jia07, S. 2073], welche als WG 16 des ISO TC 213 im darauffolgenden Jahr die Arbeit aufnahm [See17, S. 2]. Die Norm DIN EN ISO 25178-2, die in diesem Rahmen entstand und 2012 veröffentlicht wurde, enthält die genannten neuen Ansätze wie die Analyse räumlicher Parameter [25178-2, S. 13 ff.] und legte daher den Grundstein für deren zunehmende industrielle Anwendung.

Eine weitere neue Methode zur flächenhaften Charakterisierung nach DIN EN ISO 25178-2 ist die Segmentierung und Auswertung nach einzelnen Strukturelementen [25178-2, S. 29 ff.]. Die entsprechend standardisierte Definition dieser Kenngrößen und der zugehörigen Oberflächensegmentierung steht allerdings aktuell noch zur Diskussion [Bla16, S. 1].

Für flächenhafte Analysen kann somit zwischenzeitlich ebenfalls ein ähnlicher Trend zu einer großen Zahl verschiedener Kenngrößen festgestellt werden (vgl. [Mat11, S. 499]).

- **Anwendung komplexerer Kenngrößen**

Die lange bekannten und industriell genutzten Kenngrößen wie R_a , die rein auf Basis der Amplitudenwerte einer Topographie ermittelt werden, sind für die komplexer werdenden Oberflächen heutiger Bauteile in vielen Fällen nicht mehr zur Charakterisierung ausreichend [Lea15a, S. 2].

Die vorher genannten Kenngrößen und Methoden der flächenhaften Charakterisierung nach DIN EN ISO 25178-2 [25178-2] bieten neue Möglichkeiten, sind allerdings häufig komplexer in der Anwendung als profilhafte Auswertungen. Erhofft wird aufgrund der gesteigerten Komplexität allerdings eine höhere Aussagekraft der Kenngrößen.

So wurde z.B. festgestellt, dass für Oberflächen, die eine starke Strukturierung aufweisen, Flächenparameter Schwachstellen aufweisen und eine element-basierte Charakterisierung sinnvoll sein kann [Blu05, S. 435]. Um z.B. die Aussagekraft der neuen strukturelement-basierten Charakterisierung (vgl. [25178-2, S. 29 ff.]) zu beschreiben, wurde von Biggerelle et al. eine Untersuchung auf Basis der statistischen Methodik des Bootstrapping durchgeführt [Big17, S. 5]. Dabei wurde in den meisten Fällen die Höhenamplitude der einzelnen skalenbegrenzten Strukturelemente als das signifikanteste Kriterium dieser Analyse ermittelt [Big17, S. 8].

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung komplexerer Kenngrößen: Für funktionelle Oberflächen kann eine frequenzabhängige Beschreibung, welche u.a. mit den in **Kapitel 3** betrachteten und untersuchten Werkzeugen ACF und PSD möglich ist, sinnvoll sein [Lea15a, S. 2]. Die Möglichkeiten, die die PSD für technische Oberflächen bietet, wurden dabei von Jacobs et al. detailliert untersucht [Jac17, S. 3 ff.] und Krolczyk et al. betrachteten gedrehte Oberflächen anhand ihrer PSD-Funktion [Kro16, S. 464].

- **Zunehmender Einsatz funktioneller Kenngrößen** ¹⁴

Dass es nicht möglich ist, alle Oberflächen auf Basis amplitudenbasierter Kenngrößen zu charakterisieren und für die Funktion des Bauteils der Materialanteil des Profils entscheidend ist, wurde früh festgestellt (vgl. z.B. [Bod92, S. 110]). Diese Erkenntnis führte zur Einführung der sogenannten R_k -Parameter, zunächst in der deutschen Norm DIN 4776 (vgl. [Bod92, S. 116 ff.]), danach in der internationalen Norm DIN EN ISO 13565-2 [13565-2, S. 1 ff.], welche insbesondere in Europa industrielle Akzeptanz erfahren hat (vgl. [Mat11, S. 500]). Diese Kenngrößen sind dabei speziell für die Charakterisierung von „Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften“ [13565-1, S. 1] geeignet. Jeder Bereich der Materialanteilkurve steht dabei mit einer Funktion des Bauteils in direktem Zusammenhang: die Spitzen (R_{pk})

¹⁴ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Kla18] Klauer, K.; Eifler, M.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: *Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy*. Engineering Science and Technology, an International Journal (21) 2018, S. 302-313.

zum Reibverhalten, der Kernbereich (R_k) zur Tragfähigkeit sowie die Täler (R_{vk}) zur Schmierung (vgl. z.B. [Wie11, S. 5]).

Ein flächenhaftes Äquivalent zu diesen Kenngrößen wurde bei der Einführung der Norm DIN EN ISO 25178-2 mit den S_k -Parametern geschaffen (vgl. [25178-2, S. 15 ff.]). Ein weiteres Werkzeug sind die Parameter nach DIN EN ISO 13565-3, die auf Basis der Material-Wahrscheinlichkeitsdichtekurve ermittelt werden (vgl. [13565-3, S. 3 ff.]) und in den USA entwickelt wurden [Paw09, S. 6079]. Grundsätzlich konstatiert außerdem Whitehouse, dass die Höhenverteilung plateauartiger Oberflächen aufgrund der Tatsache, dass sie durch mehrere überlagerbare Fertigungsprozesse erzeugt werden, durch Faltung der durch die Einzelprozesse generierbaren Höhenverteilungen berechnet werden kann [Whi11, S. 44]. Für eine ausführlichere Erläuterung der Entstehung funktioneller Rauheitskenngrößen sei z.B. auf Pawlus et al. verwiesen [Paw08b, S. 342 f.].

Sowohl R_k - als auch S_k -Kenngrößen haben zwischenzeitlich eine weite Verbreitung erfahren: Bei einer Umfrage 2016 gaben knapp 35 % der Befragten an, den Kennwert R_k zu nutzen [Tod17, S. 89]. Beim S_k -Wert betrug dieser Wert etwas mehr als 20 % [Tod17, S. 90]. Etwa 15 % der Befragten nutzen die Kennwerte nach DIN EN ISO 13565-3 [13565-3, S. 1 ff.] [Tod17, S. 89], die somit weniger häufig in der Industrie als die R_k -Kenngrößen eingesetzt werden [Tod17, S. 86]. Teilweise wird allerdings auch die Ansicht vertreten, dass alle bisherigen Ansätze noch keine ideale Möglichkeit zur Charakterisierung von plateauartigen Oberflächen darstellen [Mat11, S. 506].

Daher sind auch die funktionsorientierten Kenngrößen wie die R_k -Parameter weiterhin Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Ein essentielles Thema ist dabei ihre Messunsicherheit. Es stellt sich ebenfalls die Frage der Kalibrierung und Rückführung der Parameter nach DIN EN ISO 13565-2, wozu u.a. unter Beteiligung des Autors erste Arbeiten durchgeführt wurden und ein entsprechendes Normal zur Abbildung der zugehörigen Kenngrößen vorgeschlagen wurde [See15, S. 44 ff.] [See16a, S. 259 ff.]. Weiterhin sind analytische Methoden zur Unsicherheit der Parameter auf Basis der Oberflächenstatistik von Seewig [See13a, S. 296] und Methoden, die Monte Carlo Simulationen anwenden, von Hüser et al. [Hüs16b, S. 10] sowie vom Autor [Eif16a, S. 153 ff.] erarbeitet worden. Das damit einhergehende tiefere Verständnis der funktionellen Kenngrößen begünstigt dabei deren verstärkten Einsatz in industriellen Anwendungen.

Ein typischer Einsatz für die R_k -Kenngrößen ist die Charakterisierung von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren und des zugehörigen Honprozesses, der

zu ihrer Bearbeitung genutzt wird (vgl. z.B. [Kar12, S. 561], [Paw09, S. 6078 ff.], [Fen02, S. 395 ff.], [Bod00, S. 88], [Ros08, S. 1475 ff.]). Aber auch für andere Anwendungen, wie die Beurteilung von Schneidkanten [Hüs16a, S. 266] oder künstlichen Hüftgelenken [Big07, S. 1329], eignen sich die Kenngrößen.

Feng et al. untersuchten Honprozesse und führten dazu eine Gewichtung der einzelnen Parameter nach DIN EN ISO 13565-2 durch, wobei die Parameter Mr_2 und R_k mit Abstand am entscheidendsten für die Charakterisierung von Oberflächen in Motoren eingestuft wurden [Fen02, S. 399]. Auf dieser Basis wurde außerdem ein neuronales Netz ausgewählt, welches die funktionellen Rauheitsparameter auf Basis eines vorliegenden Honprozesses bestmöglich ohne Messung prognostizieren kann [Fen02, S. 406].

Bigerelle und Iost untersuchten die algorithmische Umsetzung der Berechnung der R_k -Kenngrößen und stellten eine Methodik hierzu vor [Big07, S. 1319]. Buj Corral et al. schätzten unter Anwendung der Rauheitskenngrößen nach DIN EN ISO 13565-3 die Abbott-Kurve, verglichen diese mit der gemessenen Kurve und leiteten auf dieser Basis Aussagen zum zugehörigen Finishing-Prozess ab [Buj10, S. 621].

Pawlus et al. untersuchten die Korrelation der verschiedenen funktionellen Rauheitskenngrößen bei der Auswertung von Zylinderlaufbahn-Oberflächen, wobei festgestellt werden konnte, dass R_k stark mit den Spitzen-Parametern R_{pk} und R_{pq} korrelierte, die Werte Mr_1 und Mr_2 extrem abhängig voneinander waren und außerdem enge Beziehungen zwischen R_{vq} und R_{vk} , R_{pq} und R_{pk} sowie zwischen R_{mq} und jeweils R_{vk} , Mr_1 und Mr_2 vorlagen (vgl. [Paw09, S. 6080]). Identische Beobachtungen ließen sich ebenfalls bei den flächenhaften Auswertungen der S -Kenngrößen machen [Paw09, S. 6081]. Aufgrund dieser Ähnlichkeiten stellte sich schnell die Frage, ob alle entsprechenden Auswertungen überhaupt eine zusätzliche Extraktion von Informationen über die Oberfläche gewährleisten können [Paw09, S. 6081]. Z.B. Franco und Sinatora erarbeiteten einen Ansatz, nur S_k zu nutzen und anstelle der Kenngrößen S_{vk} und S_{pk} bevorzugt die neu eingeführte Volumenauswertung der 3D-Materialanteilkurve nach DIN EN ISO 25178-2 (vgl. [25178-2, S. 21 ff.]) durchzuführen [Fra15, S. 106].

Weitere Korrelationsanalysen der unterschiedlichen funktionellen Parameter wurden von Rosen et al. experimentell [Ros08, S. 1482 ff.] sowie von Pawlus et al. auf Basis modellierter Oberflächen [Paw14, S. 7] durchgeführt.

Alternativ zu funktionsorientierten Rauheitskenngrößen schlugen Deepak Lawrence et al. vor, die Abbott-Kurve nicht mit der Topographie sondern für das Grauwertbild einer Oberfläche zu ermitteln und hieraus analog eine Kenngrößenermittlung durchzuführen [Dee14, S. 318]. Dabei war eine Korrelation zu den topographie-basierten Kenngrößen insbesondere bei optischer Erfassung der Topographie detektierbar und die Daten konnten zur Erzeugung eines neuronalen Netzes genutzt werden [Dee14, S. 332 f.]. Puente León schlug auf Basis des Grauwertbildes einer Oberfläche die Schätzung des Leistungsdichtespektrums (vgl. **Kapitel 3.1**) und eine darauf basierende Ermittlung des Honwinkels von Zylinderlaufbahnen vor [Pue02, S. 505]. Auch Pawlus und Grabon definierten auf Basis der Abbott-Kurve alternative Parameter, die speziell für eine Beschreibung von Profilveränderungen durch z.B. Fertigungsprozesse geeignet sind [Paw08b, S. 342]. Michalski und Pawlus nutzten u.a. zur Unterscheidung verschiedener Honprozesse die Kenngrößen R_p / R_t sowie R_k / R_t welche nach ihrer Einschätzung eine hinreichend gute Charakterisierung der Höhenverteilung eines Profils ermöglichen [Mic93, S. 142].

Abschließend kann entsprechend konstatiert werden, dass es eine Vielzahl von Untersuchungen zur funktionellen Charakterisierung von Oberflächen sowie den entsprechenden Parametern gibt. In Kombination mit dem erhöhten Einsatz optischer Messgeräte (vgl. **Kapitel 4**) ergeben sich allerdings noch Herausforderungen bei deren Anwendung, welche im Rahmen des nachfolgenden Kapitels detailliert betrachtet werden sollen. Dabei sollen bereits standardisierte Kenngrößen eingesetzt werden.

5.2 Untersuchung funktioneller Kenngrößen für optische Messverfahren ¹⁵

Es wurde bereits erläutert, dass grundsätzlich eine stärkere Verbreitung funktioneller Rauheitskenngrößen wie den R_k -Parametern festzustellen ist (vgl. **Kapitel 5.1**). Bisher allerdings werden die genannten Kenngrößen vorzugsweise für taktile Messgeräte eingesetzt - auch da die entsprechenden Normen für die flächenhafte Charakterisierung noch nicht lange erschienen sind (vgl. DIN EN ISO 25178-2 [25178-2, S. 1]) und in der industriellen Anwendung die profilhafte Analyse von Oberflächen immer noch häufig das Mittel der Wahl darstellt [Lea04, S. 1246]. Blunt et

¹⁵ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Kla18] Klauer, K.; Eifler, M.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: *Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy*. Engineering Science and Technology, an International Journal (21) 2018, S. 302-313.

al. stellten 2005 fest, dass funktionelles Oberflächenverhalten bisher nicht umfassend genug und vorzugsweise für Profile betrachtet wurde [Blu05, S. 431]

Einige neuere Untersuchungen, die in der Zwischenzeit erfolgt sind, wurden im vorherigen **Kapitel 5.1** aufgezählt. Allerdings ist trotzdem eine weitergehende systematische Untersuchung dieses Sachverhaltes sinnvoll, um mögliche Herausforderungen aus messtechnischer Sicht, welche z.B. durch die Interaktion des optischen Messgeräts mit der Probe entstehen [Lea14a, S. 127], charakterisieren zu können. Die Beschreibung von Wechselwirkungen zum Bauteil ist bei optischen Messgeräten komplexer als bei Tastschnittgeräten [Lea14a, S. 127]. Der Grund dafür ist u.a., dass Eigenschaften des Lichts wie z.B. die verwendete Wellenlänge einen Einfluss auf die gemessene Oberfläche haben [14406, S. 6]. Hieraus kann entsprechend auch eine Verfälschung der aus diesen Daten berechneten Rauheitskenngrößen entstehen.

Grundsätzlich sind Gegenüberstellungen von optischen und taktilen Messprinzipien dabei bereits Gegenstand verschiedener Studien gewesen: Nouira et al. verglichen die Messung von Tiefeneinstellnormalen und stellten bei kleinen Rillentiefen Abweichungen im Nanometer-Bereich fest, wobei allerdings ebenfalls zu beobachten war, dass das taktile Messgerät Profile mit weniger Messrauschen erfassen konnte [Nou14, S. 8 f.]. Auch Haitjema untersuchte Tiefeneinstellnormale mit taktiler und optischer Abtastung und wies dabei eine Variation der Messergebnisse nach, die er als „unbefriedigend für Kalibrierungen“ hoher Ebenen der Kalibrierhierarchie bezeichnete [Hai97, S. 161].

Schwarzer und Volk verglichen Messungen eines chromatisch konfokalen Mikroskops mit denen eines Tastschnittgerät und stellten dabei Abweichungen der Kenngrößen R_{max} und R_z insbesondere bei feineren Rauheiten fest [Sch17, S. 120]. Grund hierfür sind die von Mauch et al. beschriebenen krümmungsabhängigen Artefakte bei der konfokalen Mikroskopie [Mau13, S. 5].

Bei dem von Song et al. durchgeführten Vergleich mit optisch und taktil erfassten Profilen eines Normals ließen sich unter Auswertung der Kreuzkorrelation Werte von mindestens 92,1 % und somit auch eine entsprechend hohe Übereinstimmung zwischen den einzelnen Messverfahren feststellen [Son06, S. 502].

In einem von Koenders et al. beschriebenen Ringvergleich wurden Normale nach DIN EN ISO 5436-1 untersucht [Koe04, S. 4], wobei z.B. bei Auswertung einer Rillentiefe

über alle Messergebnisse eine empirische Standardabweichung von mehr als 10 % des empirischen Mittelwertes auftrat [Koe04, S. 14].

Auch Leach und Hart beschrieben als Ausgangspunkt weiterer Untersuchungen eine Gegenüberstellung taktiler und optischer Messergebnisse von profilhaften Rauheitskenngrößen mit „sehr alarmierenden“ Abweichungen [Lea02b, S. 8]. Im Rahmen der darauffolgenden Arbeiten konnte ebenfalls bestätigt werden, dass unterschiedliche Messprinzipien und Messgeräte nicht immer ähnliche Ergebnisse liefern [Lea02b, S. 30].

Vorbürger et al. stellten beim Vergleich zwischen Daten von Tastschnittgeräten sowie Weißlichtinterferometern fest, dass die Signifikanz der Abweichungen mit dem Grad der Rauheit in Zusammenhang steht und zeigten, dass dieser Effekt für verschiedene Messgeräte und Oberflächen gültig ist [Vor07, S. 117].

Leach und Haitjema fassten 2010 diverse Vergleiche verschiedener Messgeräte zusammen [Lea10, S. 2] und leiteten weiterhin Maßgaben für die ordnungsgemäße Durchführung von Vergleichsmessungen wie z.B. die Sicherstellung eines identisch großen Frequenzbereichs ab [Lea10, S. 8].

Nachfolgend wird eine entsprechende Studie im Speziellen für die Erfassung von Rauheitskenngrößen, die typischerweise für die funktionelle Charakterisierung genutzt werden, beschrieben. Aufgrund der in **Kapitel 5.1** beschriebenen zunehmenden Relevanz dieser profilhaften und flächenhaften Kenngrößen im industriellen Kontext sowie der ebenfalls weiter zunehmenden Verbreitung optischer Messverfahren (vgl. **Kapitel 4**) sollen so weitergehende Aussagen zum praktischen Einsatz dieser Kenngrößen getroffen werden. Der Stand der Technik zu funktionellen Rauheitskenngrößen als solches wurde in **Kapitel 5.1** dargelegt.

Grundlegende Untersuchungen zur optischen Erfassung funktioneller Oberflächen sind dabei ebenfalls vorhanden (vgl. [Bre04, S. 135 ff.]). Auch erste Untersuchungen zur Erfassung funktioneller Kenngrößen mit optischen Messgeräten wurden durchgeführt: Arantes et al. verglichen an Zylinderlaufbahnen die Ergebnisse der profilhaften Kenngrößen des Tastschnittverfahrens wie R_k mit den flächenhaft ausgewerteten Größen eines WLI wie S_k und stellten fest, dass optische Messungen zu größeren Werten der betrachteten Rauheitskenngrößen führten [Ara17, S. 15].

Ein ähnlicher Vergleich wurde systematisch mit verschiedenen Zylinderlaufbahn-Oberflächen durchgeführt, welche häufig unter Anwendung der funktionsorientierten

Parameter analysiert werden, und soll nachfolgend beschrieben werden. Als Kenngrößen eingesetzt wurden dabei R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 , Mr_2 (vgl. DIN EN ISO 13565-2 [13565-2]), R_{pq} , R_{mq} , R_{vq} (vgl. DIN EN ISO 13565-3 [13565-3]) sowie deren flächenhaften Äquivalente S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr1} , S_{mr2} , S_{pq} , S_{mq} , S_{vq} (vgl. DIN EN ISO 25178-2 [25178-2]), um die wichtigsten standardisierten Parameter auf Basis der Materialanteilkurve zu untersuchen.

Dabei wurden Messungen eines Konfokalmikroskops (NanoFocus μ Surf, 20x Vergrößerung, $NA = 0,45$, Diskretisierung $\Delta x = \Delta y \approx 1,56 \mu m$) auf Übereinstimmung mit denen eines Tastschnittgerätes (Hommel NanoScan 855, Tastspitzenradius $R_{ip} = 5 \mu m$, Abtastgeschwindigkeit $v_m = 0,5 mm / s$, Diskretisierung $\Delta x = 0,5 \mu m$, $\Delta y = 5 \mu m$) hin untersucht.

Neben einem Vergleich der genannten Rauheitskenngößen wurden dabei außerdem deren Korrelation, die Korrelation der gemessenen Topographien sowie die Erfassung einzelner Strukturmerkmale betrachtet.

Stand der Technik ist dabei, dass die entsprechenden Kenngrößen meist taktil erfasst werden. Somit sollte auf dieser Basis eine Beurteilung, inwiefern spezielle Effekte der optischen Messung zu einer Abweichung der Messergebnisse bei plateauartigen Oberflächen führen, möglich sein. Weiterhin sollen die sich ergebenden Herausforderungen bei der konfokalen Erfassung dieser Oberflächen ermittelt werden.

Dabei lassen sich als Einflussgrößen auf die untersuchten Oberflächen bzw. deren Messergebnisse die grundsätzliche Charakteristik der Oberfläche, ihre Amplitude, das jeweils zu ihrer Erfassung eingesetzte Messgerät sowie mögliche Umgebungseinflüsse auf die Messung identifizieren. All diese Rahmenbedingungen sollten eine Beeinflussung des Messergebnisses hervorrufen und sind entsprechend zu berücksichtigen bzw. zu untersuchen. Zur bestmöglichen Vermeidung der Umgebungseinflüsse wurden beide Topographie-Messplätze schwingungsgedämpft unter Laborbedingungen genutzt. Die anderen Parameter wurden entsprechend kontrolliert verändert und untersucht.

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Messverfahren zueinander zu ermöglichen, musste bei der Erfassung insbesondere sichergestellt werden, dass ein identischer und reproduzierbarer Ausschnitt der Oberfläche in den Messdaten beider Topographien für die nachfolgende Auswertung inkludiert war. Dazu wurde das folgende Vorgehen umgesetzt, welches in **Abbildung 33** dargestellt ist: Zur Extraktion des Messbereiches wurde ein Marker auf den einzelnen Werkstücken angebracht und

ebenfalls in beiden gemessenen Topographien erfasst. Die optisch erfasste Topographie hatte durch das Zusammenfügen mehrerer Messfelder dabei eine Fläche von ca. $8,55\text{-}8,61\text{ mm} \times 0,73\text{-}0,76\text{ mm}$, die taktil gemessene unter Berücksichtigung aller Tastschnitte eine Fläche von $8\text{ mm} \times 1\text{ mm}$.

Die beschriebene Erfassung der Messdaten erlaubt die Extraktion eines identischen Auswertebereiches, welcher mit einer Fläche von $0,2344\text{ mm} \times 5,6\text{ mm}$ in einer lateralen Dimension auch groß genug ist, um eine normgerechte Filterung und Auswertung eines Einzelprofils nach DIN EN ISO 13565-1 mit $\lambda_c = 0,8\text{ mm}$ zu gewährleisten.

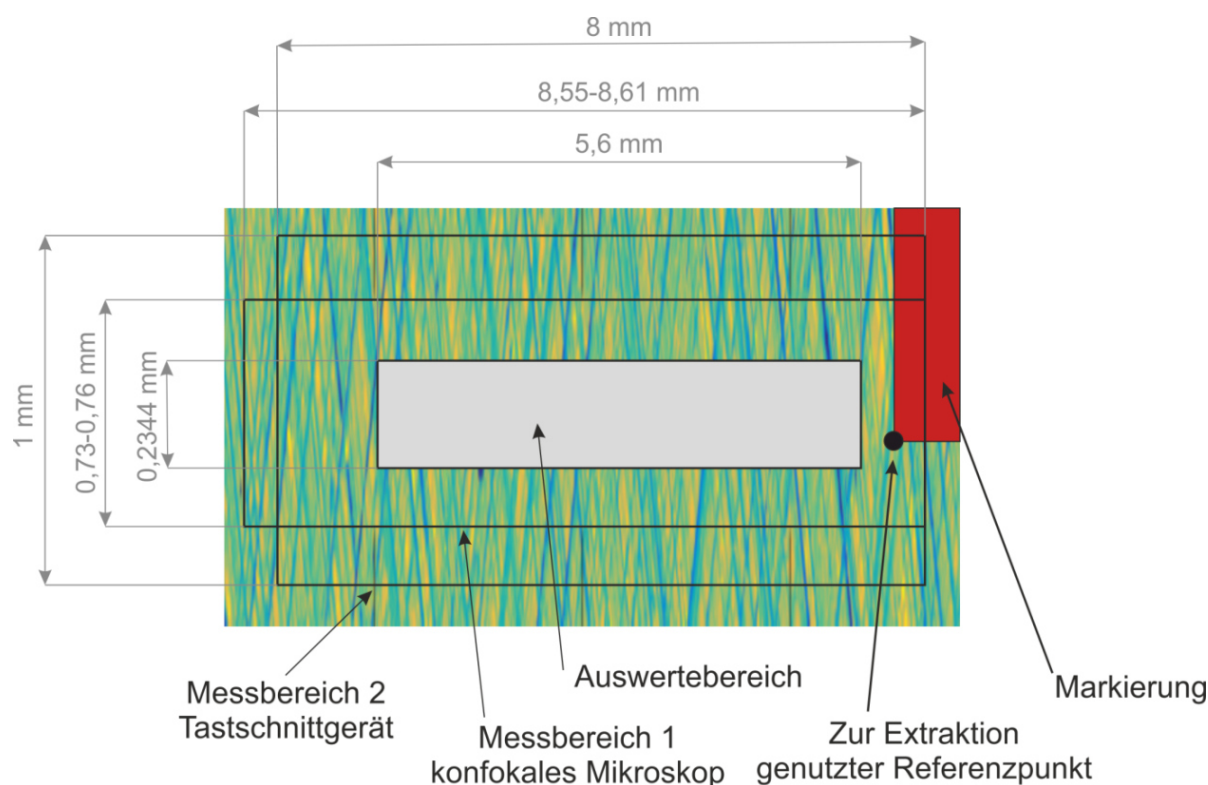


Abbildung 33: Übersicht der Messbereiche und des Auswertebereichs bei den Vergleichsmessungen

Aus den Einzelprofilen der taktilen Messung wurden mit der von Rief et al. [Rie17, S. 110 f.] beschriebenen Vorgehensweise die Rohdaten der 3D-Topographie ermittelt. Vor der Extraktion des dargestellten Auswerteausschnitts der einzelnen Messgeräte wurde weiterhin eine entsprechende Datenvorverarbeitung vorgesehen, deren Implementierung in **Abbildung 34** dargestellt ist und die sicherstellt, dass vergleichbare Daten für die Auswertung bereitgestellt werden konnten.

a) Ausrichtung durch Rotation

Neben der translatorischen Verschiebung der Datensätze unterschiedlicher Topographie-Messgeräte zueinander, welche auf Basis der gemessenen Markierung,

die in beiden Datensätzen erfasst wurde, charakterisiert werden kann, ist außerdem eine Verdrehung der Datensätze zueinander möglich, welche durch die nachfolgend beschriebene Ausrichtung korrigiert werden soll.

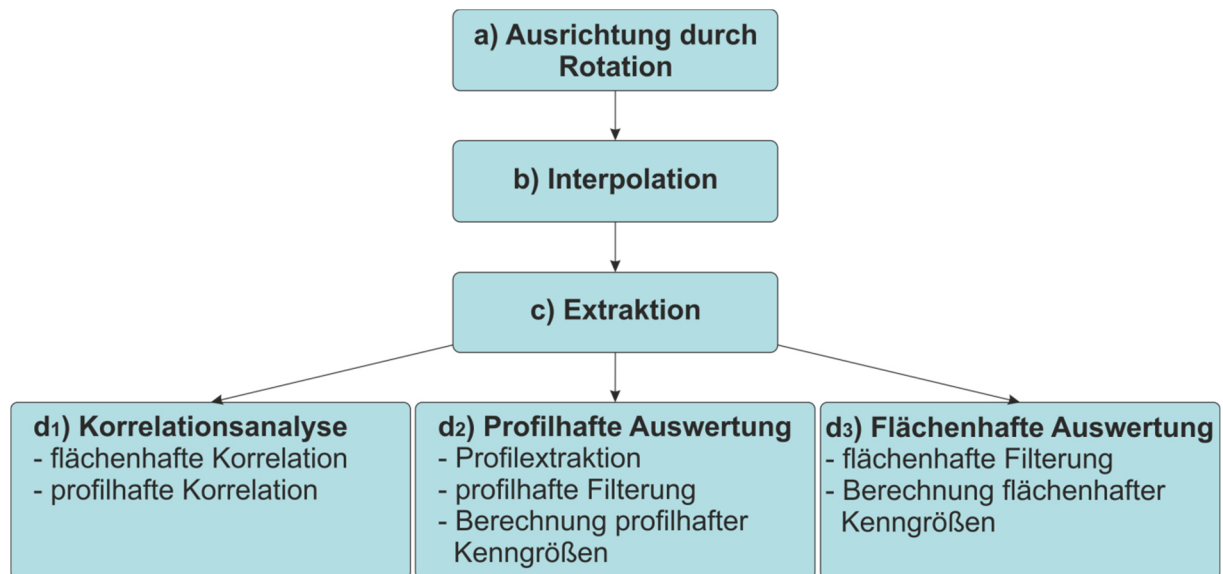


Abbildung 34: Auswerterroutine zur Ermittlung profilhafter und flächenhafter funktioneller Rauheitskenngrößen

Unter Nutzung des in **Abbildung 33** dargestellten Referenzpunktes erfolgte eine erste Extraktion von Topographiedaten, wobei die im Anschluss auszurichtenden Bereiche ermittelt wurden. Nach einer λ_s -Filterung unter Anwendung der Norm DIN EN ISO 16610-61 zur Reduzierung von besonders kurzwelligen Anteilen des Messsignals, die dem Rauschen zuzuschreiben sind, wurden für jede Probe die beiden Topographie-Datensätze der unterschiedlichen Messprinzipien auf die gleiche räumliche Diskretisierung der lateralen Achsen interpoliert. Die hieraus resultierenden Höhenwerte seien nachfolgend für die Daten des Tastschnittgerätes mit Z_1 bezeichnet, die des konfokalen Mikroskops mit Z_2 :

$$Z_1 = z_1(u, v), Z_2 = z_2(u, v), u = 1, 2, \dots, K, v = 1, 2, \dots, N. \quad (48)$$

Zur anschließend ausgeführten Ausrichtung dieser Datensätze wurde die flächenhafte Kreuzkorrelation als Ausrichtungskriterium maximiert. In Abhängigkeit der Verschiebungsparameter k und n kann wie von Lewis beschrieben ein ortsabhängiger Korrelationskoeffizient $r(u, v)$ berechnet werden [Lew95, S. 121]:

$$r(u, v) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (z_1(u, v) - \bar{Z}_1) \cdot (z_2(k-u, n-v) - \bar{Z}_2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (z_1(u, v) - \bar{Z}_1)^2 \cdot (z_2(k-u, n-v) - \bar{Z}_2)^2}}. \quad (49)$$

\bar{Z}_1 sowie \bar{Z}_2 sind dabei die Bezeichnungen der empirischen Mittelwerte der auszurichtenden Datensätze nach Gleichung (48). Nach der Definition in Gleichung (49) beschreibt der Wert $r=1$ dabei eine perfekt positive Korrelation, $r=-1$ eine perfekt negative Korrelation und der Wert $r=0$ keine vorhandene Korrelation. U.a. Song et al. nutzten die Korrelationsanalyse zum Vergleich unterschiedlicher Topographien [Son05, S. 437].

Als erstes Maß für die Ähnlichkeit der beiden verglichenen Oberflächen nach der durch die Verschiebung umgesetzten bestmöglichen Ausrichtung zueinander soll nachfolgend dabei das Maximum der Funktion nach Gleichung (49), welches als flächenhafter Kreuzkorrelationsparameter CCF bezeichnet sei, genutzt werden:

$$CCF = \max [r(u, v)], \quad u = 1, 2, \dots, K, \quad v = 1, 2, \dots, N. \quad (50)$$

Mithilfe der Kenngröße lässt sich auch eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Messgeräte durchführen (vgl. [Son06, S. 501]). Auf Basis dieses Parameters erfolgte hier die iterative Ermittlung der Verdrehung der beiden Datensätze zueinander. Dabei wurden die beiden Topographien um einen Winkel α zueinander gedreht, wobei der im Anschluss berechnete Wert des Kreuzkorrelationsparameters CCF als Kriterium dafür genutzt wurde, wie gut die jeweils angenommene Verdrehung der beiden Daten mit dem tatsächlichen Wert übereinstimmte. Entsprechend erfolgte eine teilweise mehrstufige Maximierung von CCF nach Gleichung (50) und der zugehörige Drehwinkel α wurde als Grundlage der weiteren Ausrichtung angenommen.

Der zugehörige Wert CCF bei dieser Verdrehung beschreibt weiterhin, wie bereits erläutert, die Übereinstimmung der beiden Topographie-Datensätze. Der auf diese Weise ermittelte Rotationswinkel α wurde anschließend genutzt, um die eigentliche Ausrichtung durchzuführen. Die Ausrichtung erfolgte für die beiden vollständigen nicht-interpolierten Datensätze und nicht nur für den überlappenden Bereich, welcher zur Ermittlung des Winkels genutzt wurde. Außerdem wurde die Ausrichtung auf beide Topographien aufgeteilt. Konkret bedeutet dies, dass der Datensatz des Konfokalmikroskops mit $\alpha_{opt} = -\alpha / 2$ und der des Tastschnittgeräts mit $\alpha_{tact} = \alpha / 2$ gedreht wurde, so dass durch die Rotationsausrichtung ein geringerer Anteil der gemeinsamen, überlappenden Topographiefläche verloren ging.

b) Interpolation

Im nächsten Verarbeitungsschritt erfolgte eine Interpolation der Datensätze. Da die Ausrichtung der Daten wie beschrieben mit den ursprünglichen Daten durchgeführt

wurde und die erste Interpolation lediglich dazu diente, Datensätze für die Ermittlung des Rotationswinkels zu generieren, war dies eine Möglichkeit, Topographiepunkte beider Messgeräte an den gleichen lateralen Positionen zu berechnen.

c) Extraktion des flächenhaften Datensatzes

Nach der beschriebenen Interpolation wurden auf Basis des Referenzpunkts (vgl. **Abbildung 33**) die tatsächlichen Auswertebereiche für die Datensätze von Tastschnittgerät und Konfokalmikroskop extrahiert, wobei diese durch die vorher durchgeführte Interpolation eine identische Anzahl von jeweils 11200×400 Datenpunkten aufweisen. Entsprechend der Größe des genannten Auswertebereichs resultiert hier eine äquidistante Diskretisierung von $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$, $\Delta y = 0,586 \mu\text{m}$.

d1) Korrelationsanalyse

Die ausgerichteten und interpolierten Topographien der Auswertebereiche wurden wie in **Abbildung 34** dargestellt drei Auswertungen zugeführt, wobei zunächst eine Betrachtung aus der Korrelationsanalyse für die beiden untersuchten Messprinzipien erfolgte. Der erste Parameter hierfür ist der flächenhafte Kreuzkorrelationsparameter CCF nach Gleichung (50), welcher für die wie in **Abbildung 33** dargestellt extrahierten Auswerteabschnitte im Anschluss an die in a)-c) beschriebenen Schritte ermittelt wurde, um die Korrelation des gesamten Auswerteabschnitts zwischen den Daten des Konfokalmikroskops sowie denen des Tastschnittgeräts integral zu beurteilen.

Darüber hinaus wurde neben der Betrachtung der jeweiligen Gesamtdatensätze ebenfalls eine Korrelationsanalyse aller 400 normgerecht auswertbaren Einzelprofile durchgeführt, wobei für den Korrelationskoeffizienten des v -ten Profils CCF_v unter Applikation der bisherigen Nomenklatur folgt:

$$r_v(u) = \frac{\sum_{k=1}^K (z_1(u, v) - \bar{Z}_{1,v}) \cdot (z_2(k-u, v) - \bar{Z}_{2,v})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (z_1(u, v) - \bar{Z}_{1,v})^2 \cdot (z_2(k-u, v) - \bar{Z}_{2,v})^2}}, \text{ für } v = 1, 2, \dots, N, \quad (51)$$

$$CCF_v = \max[r_v(u)], \quad u = 1, 2, \dots, K, \quad v = 1, 2, \dots, N. \quad (52)$$

Die mit $\bar{Z}_{1,v}$ und $\bar{Z}_{2,v}$ bezeichneten Werte sind dabei die empirischen Mittelwerte des jeweils taktil oder optisch erfassten Profils. Als Auswerteparameter für die profilhafte Analyse wurden dabei folgende Größen definiert: die größte und kleinste Übereinstimmung von je zwei Profilen im gesamten flächenhaften Datensatz:

$$CCF_{p,\max} = \max(CCF_v), \quad CCF_{p,\min} = \min(CCF_v) \text{ für } v = 1, 2, \dots, N \quad (53)$$

sowie weiterhin die Verteilung der Korrelationskoeffizienten, für welche die ersten beiden Momente der Statistik als Grundlage dienen:

$$C\bar{C}F_p = \frac{1}{N} \cdot \sum_{v=1}^N CCF_v, \quad (54)$$

$$s(CCF_p) = \sqrt{s^2(CCF_p)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{v=1}^N (CCF_v - C\bar{C}F_p)^2}. \quad (55)$$

Als ebenfalls profilhaftes Auswertekriterium wurde die Methode nach Song et al. genutzt, für welche zunächst der Höhenunterschied zwischen den ausgerichteten Einzelprofilen $z_{1,ali,v}(u)$, $z_{2,ali,v}(u)$, $u = 1, 2, \dots, K$ des $v = 1, 2, \dots, N$ -ten Profilschnitts benötigt wird [Son05, S. 438]:

$$z_{diff,v}(u) = z_{1,ali,v}(u) - z_{2,ali,v}(u), \quad u = 1, 2, \dots, K \quad \text{für} \quad v = 1, 2, \dots, N. \quad (56)$$

Der Parameter DS für die $v = 1, 2, \dots, N$ -ten Profile, welcher ebenfalls ein Maß für deren Übereinstimmung darstellt, folgt anschließend in Abhängigkeit der Rauheitskenngröße R_q des jeweiligen Höhenunterschieds nach Gleichung (56) sowie des Referenzprofils zu [Son05, S. 438]:

$$DS(v) = \frac{R_{q,diff}(v)^2}{R_{q,1}(v)^2}, \quad \text{mit} \quad (57)$$

$$R_{q,diff}(v) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^K z_{diff,v}^2(u)}{K}}, \quad R_{q,1}(v) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^K z_{1,v}^2(u)}{K}}, \quad v = 1, 2, \dots, N. \quad (58)$$

Zur weiteren Bewertung dieser Funktion für den Vergleich von zwei kompletten 3D-Topographien wurden ebenfalls das jeweils größte und kleinste Ergebnis über alle Einzelprofile sowie die Verteilung aller Werte auf Basis der statistischen Momente (siehe Gleichungen (53)-(55)), analog bezeichnet als $DS_{p,max}$, $DS_{p,min}$, $\bar{D}S_p$ und $s(DS_p)$, genutzt.

d2) Profilhafte Auswertung und d3) Flächenhafte Auswertung

Die Ermittlung der funktionsorientierten Rauheitskenngrößen ist im Wesentlichen durch die zugehörige Normung festgelegt, wobei allerdings der profilhafte und flächenhafte Fall getrennt betrachtet werden müssen. Da nach der bisher erläuterten Vorverarbeitung der Messdaten eine hohe Übereinstimmung der Auswerteabschnitte

der beiden Messverfahren gewährleistet ist, können die funktionellen Kenngrößen der nachfolgenden Auswertungen direkt in Bezug zueinander gesetzt werden.

Bei der profilhaften Analyse erfolgte die Berechnung von jeweils 400 Kenngrößen für jede 3D-Topographie, wobei für die Profile das Sonderfilterverfahren (DIN EN ISO 13565-1 [13565-1, S. 3 f.]) mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8\text{mm}$ sowie ein λ_s -Filter mit $\lambda_s = 2,5\mu\text{m}$ genutzt wurden, bevor im Anschluss die o.g. Kenngrößen der Normen DIN EN ISO 13565-2 und DIN EN ISO 13565-3 für plateauartige Oberflächenprofile ermittelt wurden.

Die flächenhafte Auswertung wurde für den kompletten Auswertebereich durchgeführt, wobei das robuste Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-71 zur Extraktion der Rauheitstopographie unter Nutzung der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8\text{mm}$ [16610-71, S. 7 ff.] sowie zum Entfernen des Rauschens ebenfalls ein λ_s -Filter mit der identischen Grenzwellenlänge wie bei der profilhaften Auswertung angewendet wurden, bevor die funktionsorientierten Kenngrößen der flächenhaften Norm DIN EN ISO 25178-2 ermittelt wurden.

Nachdem die Auswerteroutinen detailliert dargelegt wurden, sollen nachfolgend die ausgewählten Proben für die Untersuchungen vorgestellt werden, welche nach dieser Vorgehensweise betrachtet wurden. Mit den beschriebenen Messverfahren Tastschnittverfahren sowie konfokale Mikroskopie, für die ein Vergleich des Übertragungsverhaltens erfolgen sollte, wurden sechs unterschiedlich gehonte Zylinderlaufbahnen erfasst. Die ebenfalls beschriebene flächenhafte Erfassung gestattete dabei eine hinreichende statistische Absicherung der Ergebnisse (vgl. [Lea13a, S. 6]). Wie bereits in **Kapitel 5.1** dargestellt wurde, ist die Beurteilung gehonter Oberflächen sowie Zylinderlaufbahnen im Speziellen dabei eine klassische messtechnische Aufgabe, bei der die Durchführung einer funktionsorientierten Auswertung zu zusätzlichen Informationen über die Oberfläche führt (vgl. z.B. [Paw09, S. 6078 ff.], [Fen02, S. 395 ff.], [Bod00, S. 88], [Ros08, S. 1475 ff.] sowie **Kapitel 5.1**).

Die in **Abbildung 35** dargestellten Oberflächen können zwei Probengruppen A und B zugeordnet werden: Die Messdaten der Proben A1-A3 eines Automobilherstellers haben eine unregelmäßige Näpfchenstruktur unterschiedlicher Amplitude und die dargestellten Topographien B1-B3 eines Zulieferbetriebes der Automobilindustrie sind durch gekreuzte Riefenstrukturen - ebenfalls mit variabler Amplitude - geprägt. In der Abbildung dargestellt sind dabei jeweils die taktil erfassten Auswertebereiche der untersuchten Proben.

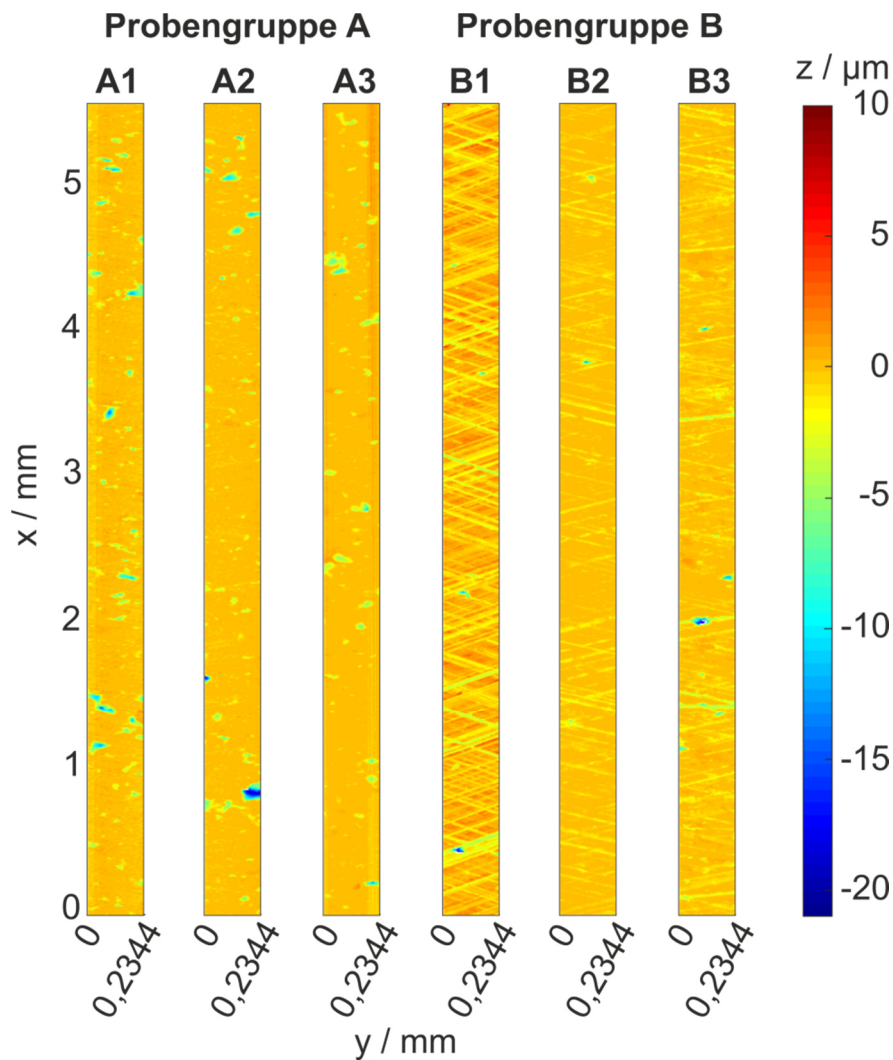


Abbildung 35: Gemessene, ausgerichtete und gefilterte Topographien der Zylinderlaufbahnen A1-B3, Messergebnisse mit Tastschnittgerät Hommel Nanoscan 855

Nachfolgend seien die Ergebnisse der sechs Proben dargestellt, wobei zunächst die Ergebnisse der beschriebenen Korrelationsparameter, die wie oben erläutert den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen den mit unterschiedlichen Messprinzipien erzeugten Topographien charakterisieren, in **Tabelle 15** zusammengefasst sind.

Bei Betrachtung der Korrelationswerte lassen sich sowohl für die flächenhafte (CCF) als auch profilhafte (CCF_p) Analyse ausschließlich positive Korrelationswerte ermitteln, wobei beim Vergleich zwischen den Probengruppen außerdem beobachtet werden kann, dass die absoluten Werte der Probengruppe B tendenziell über einen breiteren Bereich gestreut sind als die der Gruppe A.

Weiterhin kann folgender Zusammenhang zur grundsätzlichen Ausprägung der jeweiligen Oberfläche festgestellt werden: Die Proben, die sehr homogen ausgeprägt sind, weisen eine geringere flächenhafte Übereinstimmung auf als die Proben, die über

sehr prägende einzelne Strukturmerkmale wie Näpfchen oder tiefe Riefen verfügen. Dies zeigt sich z.B. an der Probe A2, welche eine hohe Korrelation aufweist und über einzelne Näpfchen verfügt, die sehr bedeutsam für die Oberfläche als Ganzes sind. Die Proben, die im Gegensatz dazu keine oder sehr viele auffallende Näpfchen oder Riefen aufweisen, korrelieren schlechter, was dadurch begründet ist, dass die berechneten Korrelationskoeffizienten sehr stark auf Abweichungen der beiden Topographien zueinander reagieren und bei großen Strukturelementen, die mit beiden Messprinzipien ähnlich erfasst werden können, im Rahmen der Korrelationsberechnung automatisch die beiden Flächen speziell im Hinblick auf diese Merkmale zueinander ausgerichtet werden.

Tabelle 15: Untersuchung der Korrelation zwischen taktil und optisch erfassten Topographien

Korrelationsauswertung Proben A1-B3						
Probe	A1	A2	A3	B1	B2	B3
CCF (3D)	0,452	0,640	0,539	0,498	0,340	0,717
$CCF_{p,max}$ (2D)	0,731	0,798	0,820	0,634	0,789	0,849
$CCF_{p,min}$ (2D)	0,348	0,211	0,325	0,376	0,190	0,516
$C\bar{C}F_p$ (2D)	0,565	0,571	0,595	0,531	0,309	0,702
$s(CCF_p)$ (2D)	0,074	0,179	0,133	0,067	0,133	0,072
$DS_{p,max}$	2,434	3,178	2,606	1,889	2,085	1,105
$DS_{p,min}$	0,990	0,406	0,359	0,773	0,379	0,285
$\bar{D}S_p$	1,564	1,172	0,932	1,061	1,311	0,571
$s(DS_p)$	0,296	0,629	0,433	0,259	0,330	0,146

Als weitere Auswertungen wurden wie in **Abbildung 34** dargestellt die standardisierten funktionsorientierten Kenngrößen flächenhaft sowie für alle 400 Einzelprofile je untersuchtem Bauteil wie oben beschrieben ermittelt, wobei für die letztgenannte Analyse hier jeweils empirischer Mittelwert und Standardabweichung über alle Einzelwerte für die weitere Auswertung betrachtet werden sollen. Die ermittelten Werte aller Parameter sind in **Anhang D** für die untersuchten Messgeräte angegeben und sollen nachfolgend miteinander verglichen werden.

Als Maß für die Abweichung zwischen optisch ermitteltem (R_{Opt}) sowie taktil ermitteltem (R_{Tak}) Kennwert bzw. mittlerem Kennwert sei dabei die Variable d_v definiert:

$$d_v = \frac{R_{Opt} - R_{Tak}}{R_{Tak}} \cdot 100\%, \quad (59)$$

welche in Prozent angegeben wird. Auf Basis dieser in **Abbildung 36** dargestellten Abweichungen der Kenngrößen nach DIN EN ISO 13565-2 und DIN EN ISO 13565-3 zwischen den einzelnen Messgeräten soll eine Charakterisierung der unterschiedlichen Erfassung der Topographie ermöglicht werden. Weiterhin soll auf dieser Basis beurteilt werden, inwiefern sich die unterschiedliche Physik der Messgeräte auch in den genannten Rauheitskenngrößen manifestiert.

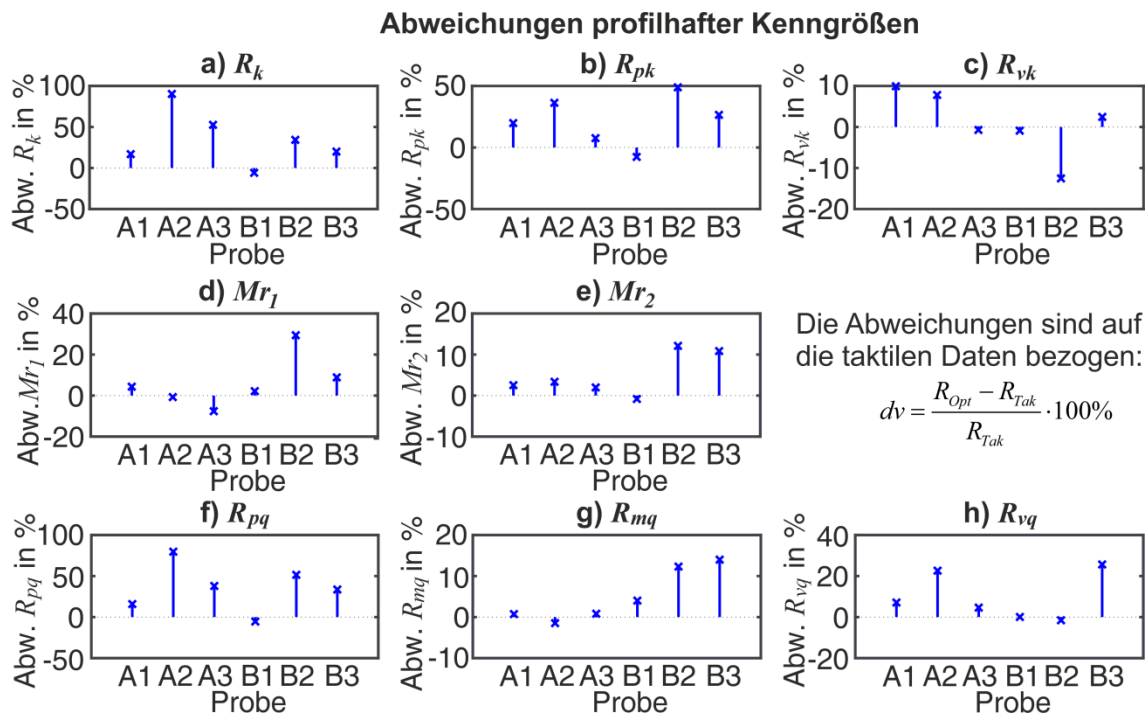


Abbildung 36: Abweichungsparameter nach Gleichung (59) für die Kenngrößen nach DIN EN ISO 13565-2 sowie DIN EN ISO 13565-3

Bei Betrachtung der Abweichungen lässt sich feststellen, dass das optische Messgerät bei fünf von sechs Proben einen höheren Wert für R_{pq} ausgibt, was auf eine tendenziell größere gemessene Rauheit im Plateaubereich hindeutet.

Eine analoge Beobachtung lässt sich ebenfalls bei Analyse der Parameter R_k und R_{pk} treffen: Der Kernbereich sowie der Spitzenbereich der Höhe umfassten bei optischer Erfassung aller Topographien außer bei Betrachtung der Probe B1 einen breiteren Höhenbereich, was auf eine erhöhte Rauheit hindeutet.

Bei Betrachtung der Täler mit der Kenngröße R_{vk} traten bei der Messung mit dem Konfokalmikroskop allerdings auch kleinere Werte als bei der taktilen Erfassung auf, so dass festgestellt werden kann, dass die Erfassung von Profiltälern nicht immer im gleichen Maß gewährleistet ist. Entsprechend lässt sich tendenziell eine Verschiebung hin zu den Spitzen- und Kernbereichen feststellen.

Eine identische Untersuchung soll nachfolgend für die flächenhaften funktionellen Kenngrößen nach DIN EN ISO 25178-2 durchgeführt werden, wobei in **Abbildung 37** ebenfalls zunächst die prozentualen Abweichungen zwischen taktiler und optischer Messung gezeigt werden. Diese wurden mit dem gleichen Vorgehen wie bei der profilhaften Analyse ermittelt (vgl. Gleichung (59)).

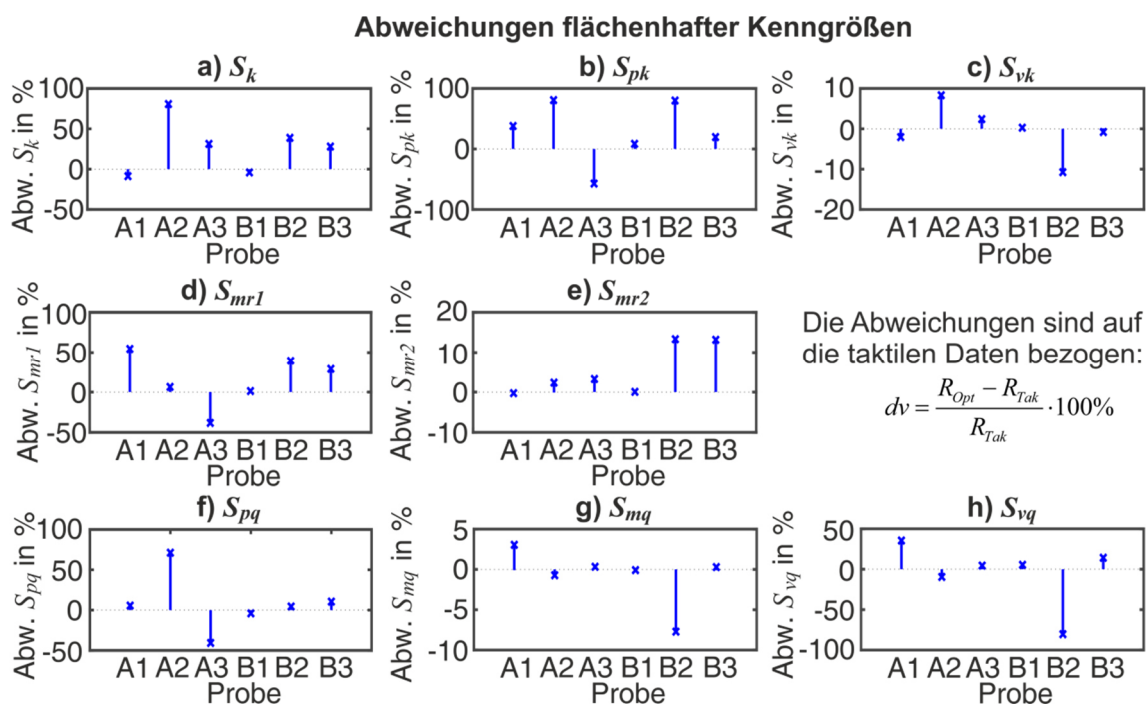


Abbildung 37: Abweichungparameter nach Gleichung (59) für die Kenngrößen nach DIN EN ISO 25178-2

Die grundsätzlichen Beobachtungen ähneln denen der profilhaften Analyse, wobei festgestellt werden kann, dass bei den vier Proben A1-A3 und B2 bei der flächenhaften Analyse im Mittel höhere Abweichungswerte festgestellt werden können. Bei den anderen beiden Proben ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Abweichungen beim Vergleich der beiden Analysemethoden. Da die Ausrichtung und Filterung des flächenhaften Datensatzes ganzheitlich und nicht für jedes Profil einzeln erfolgte, ist die entsprechende Konsequenz allerdings, dass wie beschrieben bei den meisten Proben größere Unterschiede auftreten.

Werden Höhenamplitude sowie die Abweichung der profilhaften Parameter gemeinsam betrachtet, kann bei der Probengruppe B eine negative Korrelation festgestellt werden, bei der Probengruppe A ist hingegen kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen. In der Probengruppe B hat die Oberfläche B1 die größte Amplitude, gefolgt von B3 und B2. Dies entspricht der umgekehrten Rangordnung des Betrags der mittleren Abweichung aller profilhaften funktionellen Rauheitskenngrößen. **Tabelle 16** fasst die Amplituden der Oberflächen bei taktiler Messung zusammen und gibt außerdem die Zahlenwerte des mittleren Abweichungsbetrages der beiden Typen von funktionellen Kenngrößen an. Wird ein Vergleich dieser Ergebnisse durchgeführt, ergibt sich auch für den flächenhaften Fall bei den Proben B1-B3 eine negative Korrelation zwischen Amplitude und Parameterabweichung. Bei Probengruppe A ist kein direkter Zusammenhang identifizierbar.

Tabelle 16: Amplituden der Proben A1-B3 sowie zugehörige mittlere Parameterabweichungen

Probe	Höhenamplitude taktil / μm	Mittlere Parameterabweichung profilhaft / %	Mittlere Parameterabweichung flächenhaft / %
A1	8,95	9,61	18,26
A2	9,28	30,23	32,49
A3	6,03	14,17	22,25
B1	6,57	3,36	2,97
B2	2,32	25,35	38,81
B3	5,75	17,78	14,45

Nach Feststellung dieser Abweichungen stellt sich allerdings die Frage nach deren Ursache. Aus diesem Grund wurden einige ausgewählte Profile der Proben A1-B3 direkt auf Basis ihrer mit den beiden Messverfahren erfassten Topographiewerte verglichen. Dies sollte ermitteln auf welcher Basis sich unterschiedliche Ausprägungen der Riefen- und Spitzenbereiche ergeben. Zwei Beispiele sind in **Abbildung 38** dargestellt. Dabei kann festgestellt werden, dass im Umfeld tiefer Riefen optische Artefakte auftreten, die eine Vergrößerung der Spitzenparameter zur Folge haben. Dabei können z.B. Beugungseffekte an sehr engen und tiefen Tälern auftreten, die solche Abweichungen in der Höhenübertragung hervorrufen [Xie17, S. 11]. Solche Artefakte können bei Konfokalmikroskopen z.B. aber auch durch Oberflächenkrümmungen erzeugt werden [Mau13, S. 5].

Weiterhin ist im zweiten Beispiel gezeigt, dass insbesondere mitteltiefe, enge Riefen optisch nicht in gleicher Ausprägung wie bei der taktilen Messung erfasst werden

können. Dies führt ebenfalls dazu, dass andere Werte der Rauheitskenngrößen berechnet werden.

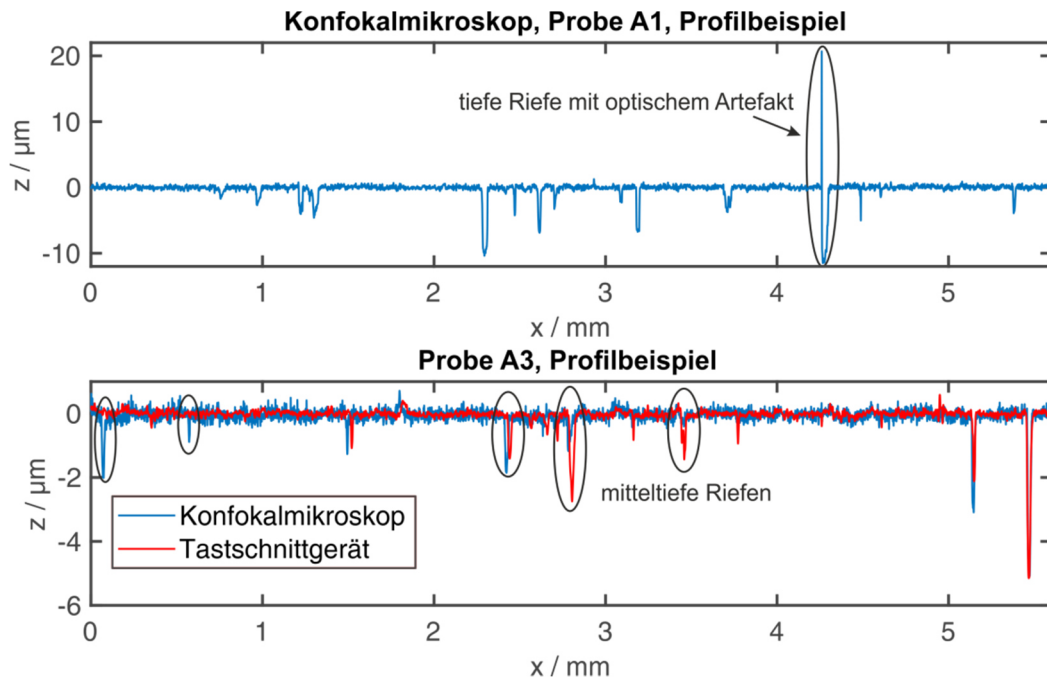


Abbildung 38: Exemplarische Darstellung von Abweichungen bei Messungen mit dem Konfokalmikroskop. Optische Artefakte und unterschiedliches Übertragungsverhalten mitteltiefer Riefen

Insbesondere das Übertragungsverhalten der Riefen soll nachfolgend detaillierter miteinander verglichen werden. Dazu wurde für die Daten beider Messverfahren eine Segmentierung sämtlicher Riefen profilweise für die gesamte Fläche der sechs Topographiedatensätze A1-B3 ausgeführt. Als Segmentierungsschwelle der Riefen diente dabei weiterhin wie laut DIN EN ISO 4287 üblich eine vertikale Zählschwelle für die der Wert $s_v = 0,1 \cdot R_z$ eingesetzt wurde (vgl. [Sco06, S. 561] sowie [4287, S. 11]).

Nach der Extraktion aller Riefen, welche diese Schwelle erfüllen, erfolgte für alle Strukturen auf Basis ihrer Breite von N diskreten Profilverpunkten mit dem lateralen Abstand Δx die Ermittlung von Riefentiefe t_R :

$$t_R = \max(|z(x_k)|), \quad k = 1, \dots, N, \quad (60)$$

Riefenbreite b_R :

$$b_R = (N - 1) \cdot \Delta x, \quad (61)$$

sowie der angenäherten Riefenfläche v_R :

$$v_R = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{z(x_k) + z(x_{k+1})}{2} \cdot \Delta x. \quad (62)$$

Die Ergebnisse der Parameter nach den Gleichungen (60)-(62) wurden nach Analyse sämtlicher Einzelprofile getrennt nach Messprinzip ermittelt und sind mithilfe des Histogramms in **Abbildung 39** dargestellt.

Bei Vergleich der Histogramme lassen sich die vorherigen Befunde auf einer großen Datenbasis verifizieren: Aufgrund eines in Bezug auf das Tastschnittgerät stärker ausgeprägten Messgeräte-Rauschens tritt beim Konfokalmikroskop eine deutlich erhöhte Zahl von Riefen kleiner Tiefe, kleiner Breite sowie kleiner Fläche auf. In den Messdaten des Tastschnittgeräts treten dafür allerdings wie bereits beschrieben häufiger Riefen mittlerer Größenausprägung auf. Begründungen dieser Abweichungen des Übertragungsverhaltens bei mittelgroßen Riefen wurden auf Grundlage der verschiedenen physikalischen Messprinzipien bereits genannt.

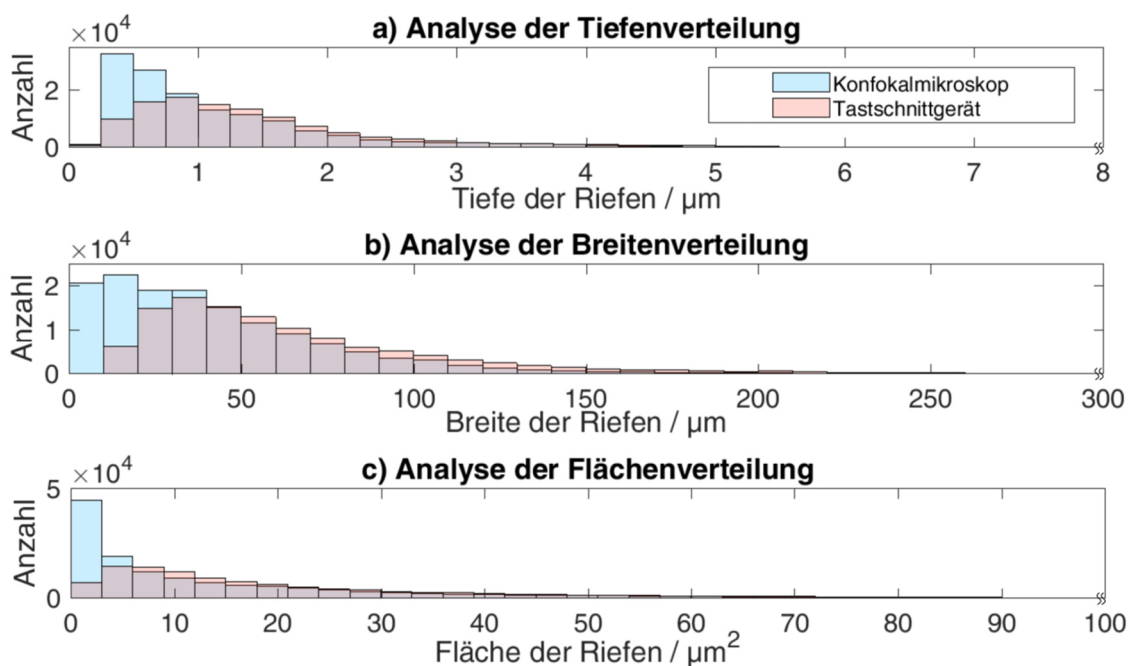


Abbildung 39: Analyse aller Riefen der Proben A1-B3, Darstellung als Histogramme der a) Riefentiefe, b) Riefenbreite, c) Riefenfläche zum Vergleich der beiden Messprinzipien

Nach eingehender Analyse sowohl der funktionsorientierten Kenngrößen als auch der Übertragung einzelner Strukturen soll auch noch der Zusammenhang zwischen den Kenngrößen bei jeweils beiden Messgeräten betrachtet werden. Dazu sind die Korrelationskoeffizienten r aller Parameterkombinationen für den profilhaften (**Tabelle 17**) sowie flächenhaften (**Tabelle 18**) Fall ermittelt worden.

Bei den dargestellten Ergebnissen dieses normierten Maßes mit $-1 \leq r \leq 1$ sind weiterhin Werte starker positiver und negativer Korrelation farblich hervorgehoben und

bestätigen Ergebnisse von früheren experimentellen Analysen dieser Art (vgl. [Paw09, S. 6080 f.], [Ros08, S. 1482]).

Tabelle 17: Analyse der Korrelation der profilhaften funktionsorientierten Kenngrößen

Korrelationen profilhafte Kenngrößen Konfokalmikroskop								
	R_k	R_{pk}	R_{vk}	Mr_1	Mr_2	R_{pq}	R_{mq}	R_{vq}
R_k	1	0,885	-0,106	-0,513	0,248	0,988	-0,628	-0,248
R_{pk}		1	0,133	-0,199	0,420	0,915	-0,480	0,007
R_{vk}			1	0,399	0,313	-0,055	0,278	0,747
Mr_1				1	0,482	-0,433	0,477	0,517
Mr_2					1	0,292	0,074	0,414
R_{pq}						1	-0,574	-0,197
R_{mq}							1	0,474
R_{vq}								1
Korrelationen profilhafte Kenngrößen Tastschnittgerät								
	R_k	R_{pk}	R_{vk}	Mr_1	Mr_2	R_{pq}	R_{mq}	R_{vq}
R_k	1	0,901	-0,115	-0,361	0,387	0,989	-0,618	-0,278
R_{pk}		1	0,127	-0,060	0,536	0,931	-0,435	-0,047
R_{vk}			1	0,443	0,310	-0,064	0,351	0,753
Mr_1				1	0,556	-0,277	0,621	0,564
Mr_2					1	0,442	0,241	0,389
R_{pq}						1	-0,539	-0,218
R_{mq}							1	0,577
R_{vq}								1

Zunächst lässt sich dabei beobachten, dass die Korrelationen unabhängig von dem jeweiligen Messprinzip ähnlich stark ausgeprägt sind. Obgleich also die beiden Messprinzipien ein teilweise abweichendes Übertragungsverhalten einzelner Topographiemerkmale aufweisen, welches ebenfalls einen entsprechenden Einfluss auf die resultierenden Kenngrößen hervorruft, ist das zu beobachtende Korrelationsverhalten zwischen diesen Parametern sehr ähnlich ausgeprägt. Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Werten der jeweiligen Spitzen- und Riefenparameter der Gruppen R_k , R_{pk} , R_{vk} sowie R_{mq} , R_{pq} , R_{vq} feststellen. Weiterhin

hängen die Ausprägung von R_k und R_{pk} eng miteinander zusammen. Dies wird analog für die flächenhafte Analyse beim Vergleich der identischen S -Parameter beobachtet.

Tabelle 18: Analyse der Korrelation der flächenhaften funktionsorientierten Kenngrößen

Korrelationen flächenhafte Kenngrößen Konfokalmikroskop								
	S_k	S_{pk}	S_{vk}	S_{mr1}	S_{mr2}	S_{pq}	S_{mq}	S_{vq}
S_k	1	0,986	-0,074	-0,556	0,452	0,997	0,733	0,709
S_{pk}		1	0,043	-0,415	0,568	0,981	0,695	0,686
S_{vk}			1	0,747	0,480	-0,061	-0,111	0,185
S_{mr1}				1	0,320	-0,560	-0,561	-0,399
S_{mr2}					1	0,436	0,221	0,220
S_{pq}						1	0,781	0,760
S_{mq}							1	0,933
S_{vq}								1
Korrelationen flächenhafte Kenngrößen Tastschnittgerät								
	S_k	S_{pk}	S_{vk}	S_{mr1}	S_{mr2}	S_{pq}	S_{mq}	S_{vq}
S_k	1	0,815	-0,064	-0,276	0,454	0,980	0,435	0,736
S_{pk}		1	-0,095	0,312	0,625	0,895	0,254	0,463
S_{vk}			1	0,123	0,631	-0,150	-0,841	-0,098
S_{mr1}				1	0,465	-0,139	-0,401	-0,451
S_{mr2}					1	0,445	-0,437	0,096
S_{pq}						1	0,469	0,727
S_{mq}							1	0,576
S_{vq}								1

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde die optische Erfassung von Topographien zur Analyse funktioneller Rauheitskenngrößen betrachtet. Motivation hierfür war, dass der Einsatz der entsprechenden Kenngrößen nach wie vor häufig auf die Auswertung profilhafter sowie taktil erfasster Oberflächendaten beschränkt bleibt.

Bei auf dieser Basis durchgeführten Vergleichsmessungen von Zylinderlaufbahnen wurden Oberflächentopographien mit einem Tastschnittgerät sowie einem optischen Messgerät, einem Konfokalmikroskop, erfasst. Grundsätzlich wurden dabei ähnliche

Topographien erzielt, was sich anhand der Korrelationsparameter, welche zum Vergleich der Messergebnisse berechnet wurden, zeigte.

Bei der Analyse der funktionellen Rauheitskenngrößen zeigte sich weiter, dass das Übertragungsverhalten der Messprinzipien für einzelne Topographiemerkmale sowohl bei der profilhaften als auch bei der flächenhaften Betrachtung teilweise voneinander abwich.

Im Rahmen der weitergehenden Analyse der eigentlichen Topographien wurden zunächst auf Basis der physikalischen Interaktion zwischen Messgerät und Oberfläche optische Artefakte festgestellt. Dabei war aufgrund der Tatsache, dass diese insbesondere bei mitteltiefen engen Tälern auftraten, davon auszugehen, dass diese beugungsinduziert sind. Entsprechend war es mit der optischen Messung nicht möglich, eine identisch große Zahl an mittelgroßen Tälern zu detektieren wie in der nachfolgenden statistischen Analyse der Verteilung der Riefentiefe, -breite und der Riefenfläche auf Basis einer hohen Zahl an Messdaten bestätigt werden konnte. Diese unterschiedliche Übertragung einzelner Profilelemente wurde entsprechend auch als Grund für das Abweichen der funktionellen Rauheitskenngrößen identifiziert.

Die anschließende Korrelationsanalyse zeigte bei beiden Messprinzipien allerdings ein ähnliches Korrelationsverhalten der einzelnen Rauheitskenngrößen zueinander.

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen sollte geklärt werden, inwiefern die Ergebnisse nur für die konfokale Mikroskopie gelten oder ebenfalls bei anderen optischen Messgeräten, wie z.B. Weißlichtinterferometern, in ähnlicher Art und Weise auftreten. Damit kann ein Vergleich der Erfassung funktioneller Rauheitskenngrößen mit unterschiedlichen optischen Messverfahren erfolgen.

6 Fazit & Zusammenfassung

Viele Rahmenbedingungen in der Rauheitsmesstechnik führen aktuell dazu, dass in diesem Bereich neue Technologien entwickelt und etabliert werden. Die Notwendigkeiten und/oder Möglichkeiten hierzu resultieren nicht zuletzt aus Veränderungen in angrenzenden Disziplinen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Vielzahl entsprechender Entwicklungen aufgezeigt, auf deren Basis ebenfalls eigene Forschungsarbeiten durchgeführt und vorgestellt wurden.

So wurde z.B. demonstriert, dass durch Verbesserungen in der Modellierung sowie der Fertigungstechnik auch in der Messtechnik viele neue Ansätze für die Erfassung und Auswertung von rauen Oberflächen entstehen. Entsprechend wurden sukzessive alle Themen ausgehend von der Fertigung von rauen Oberflächen über deren Messung bis hin zur Auswertung der sich in diesem Rahmen ergebenden Daten betrachtet.

Dabei wurden nicht nur Untersuchungen zur Qualifikation der Fertigungsverfahren direktes Laserschreiben sowie Mikrofräsen zur Erzeugung flächenhafter Kalibriernormale vorgestellt, sondern es erfolgte auch eine Analyse mathematischer Modelle für die Beschreibung rauer Oberflächen und des Übertragungsverhaltens von Rauheitsmessgeräten. Weiterhin wurden die Einsatzmöglichkeiten funktioneller Rauheitskenngrößen bei der optischen Erfassung von Oberflächentopographien ausführlich analysiert.

Ein Nachweis, dass sich sowohl Mikrofräsen als auch direktes Laserschreiben zur Erzeugung flächenhafter Geometrienormale eignen, konnte erbracht werden. Mithilfe dieser Methoden ist es auch möglich, eine Implementierung des Konzepts der messtechnischen Eigenschaften zur flächenhaften Kalibrierung (vgl. [25178-600, S. 19]) zu gewährleisten.

Weiterhin konnte dargelegt werden, dass ARMA-Modelle ein geeignetes Werkzeug zur Beschreibung und Synthese technischer Oberflächen darstellen und mit dieser Methodik z.B. Trainingsdaten für neuronale Netze erzeugt werden können. Gleichmaßen eignen sich diese Zeitreihenmodelle allerdings auch für die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens verschiedener Topographie-Messgeräte, wie ebenfalls demonstriert wurde.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen konnten Unterschiede bei der Übertragung von Oberflächen mit funktionellen Eigenschaften zwischen den Messprinzipien taktil und optisch herausgearbeitet werden.

Durch die genannten Ergebnisse sowie ganzheitliche Beschreibungen der Rauheitsmesstechnik soll zukünftig die Gewinnung zusätzlicher Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit ermöglicht werden. Hier können konkreter z.B. die mathematische Beschreibung der Messunsicherheit sowie die virtuelle Auslegung von Topographien genannt werden. Letztere kann dabei ebenfalls für eine Gestaltung von Kalibriernormalen und so eine Reduktion der Messunsicherheit anwendbar sein. Weiterhin können einzelne Anwendungen, z.B. zur Erzeugung künstlicher Oberflächen sowie der Analyse des Übertragungsverhaltens, durch entsprechende Software-Lösungen industriell nutzbar gemacht werden.

Anhang

Anhang A: Weitere Ergebnisse von mittels direktem Laserschreiben hergestellten Kalibriernormalen ¹⁶

In den nachfolgenden Tabellen werden weitere Ergebnisse aus **Kapitel 2.2.1** dargelegt. Dabei sind jeweils die Auswerteparameter nach DIN EN ISO 25178-70 ermittelt worden. Die Vorverarbeitung ist separat in **Kapitel 2.2.1** erläutert.

Tabelle 19: Weitere Ergebnisse profilhafter Normale nach DIN EN ISO 25178-70, Typen PPT, PPR, PPA, PAS, PRB. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ PPT (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$
Soll-Größen	0,75	0,87	10	0,75	0,87	20
AFM (1 Messung)	0,74	0,85	10,1	0,70	0,80	20,3
KM 60x (4 Messungen)	3,13 ±0,03	3,56 ±0,03	10,2 ±0,0	0,81 ±0,00	0,98 ±0,01	20,2 ±0,1
KM 100x (4 Messungen)	0,77 ±0,03	0,89 ±0,03	10,2 ±0,0	0,83 ±0,01	0,97 ±0,01	20,6 ±0,1
WLI 100x (1 Messung)	0,83	0,96	10,3	0,87	1,02	20,7

Typ PPR (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$
Soll-Größen	1,26	1,37	10	1,26	1,37	20
AFM (1 Messung)	0,38	0,45	10,0	0,45	0,55	20,0
KM 60x (4 Messungen)	0,92 ±0,02	1,22 ±0,02	10,1 ±0,0	1,31 ±0,01	1,49 ±0,01	20,2 ±0,0
KM 100x (4 Messungen)	0,85 ±0,05	1,13 ±0,03	10,1 ±0,0	1,27 ±0,02	1,46 ±0,02	20,2 ±0,0
WLI 100x (1 Messung)	1,18	1,35	10,2	1,35	1,50	20,3

¹⁶ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18c] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. Surf. Topogr.: Metrol. Prop. (6) 2018, 024010.

Typ PPA (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$
Soll-Größen	0,70	0,84	10	1,82	2,24	20
AFM (1 Messung)	0,76	0,88	10,0	0,92	1,08	18,9
KM 60x (4 Messungen)	2,02 ±0,01	2,54 ±0,01	10,2 ±0,1	0,38 ±0,01	0,51 ±0,02	20,0 ±0,1
KM 100x (4 Messungen)	0,77 ±0,04	1,00 ±0,04	10,2 ±0,0	2,24 ±0,42	2,80 ±0,49	20,1 ±0,1
WLI 100x (1 Messung)	0,91	1,12	10,2	2,53	3,27	20,0

Typ PAS (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1			Soll-Datensatz 2		
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$P_{sm} / \mu m$
Soll-Größen	0,90	1,03	10	0,90	1,02	20
AFM (1 Messung)	0,72	0,83	10,0	0,82	0,95	19,8
KM 60x (4 Messungen)	2,33 ±0,00	2,56 ±0,01	10,1 ±0,0	1,15 ±0,01	1,34 ±0,02	20,2 ±0,1
KM 100x (4 Messungen)	0,98 ±0,02	1,14 ±0,02	10,1 ±0,0	1,08 ±0,04	1,24 ±0,05	20,4 ±0,0
WLI 100x (1 Messung)	1,06	1,23	10,4	1,10	1,28	20,6

Typ PRB (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	2,04	2,74	0,63	1,08
AFM (1 Messung)	2,63	3,21	1,25	1,62
KM 60x (4 Messungen)	2,05 ±0,09	3,15 ±0,28	0,41 ±0,02	0,74 ±0,04
KM 100x (4 Messungen)	2,46 ±0,03	3,29 ±0,04	0,94 ±0,05	1,54 ±0,09
WLI 100x (1 Messung)	2,32	3,10	0,86	1,08

Tabelle 20: Weitere Ergebnisse flächenhafter Normale nach DIN EN ISO 25178-70, Typen AGP, AGC, ASP, ACS, ARS, AFL, APC. Bei mehreren Messungen sind empirischer Mittelwert und empirische Standardabweichung angegeben

Typ AGP (DIN EN ISO 25178-70)							
	Soll-Datensatz 1						
	$d_1 / \mu m$	$d_2 / \mu m$	$d_3 / \mu m$	$d_4 / \mu m$	$l_1 / \mu m$	$l_2 / \mu m$	$\theta / ^\circ$
Soll-Größen	3	3	3	3	50	50	90
AFM (1 Messung, alle Rillenprofile)	2,36 ±0,02	2,19 ±0,04	2,09 ±0,05	1,95 ±0,03	47,6	45,4	85,5
KM 60x (4 Messungen, alle Rillenprofile)	0,52 ±0,80	0,71 ±0,87	1,40 ±1,56	0,56 ±0,74	50,2 ±0,3	50,3 ±0,2	89,4 ±0,21
KM 100x (4 Messungen, alle Rillenprofile)	4,45 ±0,34	3,42 ±0,23	3,37 ±0,51	4,42 ±0,25	51,4 ±0,6	51,1 ±0,4	89,3 ±0,35
WLI 100x (1 Messung, alle Rillenprofile)	3,00 ±0,19	2,88 ±0,09	3,08 ±0,11	3,28 ±0,13	50,9	50,5	89,3
	Soll-Datensatz 2						
	$d_1 / \mu m$	$d_2 / \mu m$	$d_3 / \mu m$	$d_4 / \mu m$	$l_1 / \mu m$	$l_2 / \mu m$	$\theta / ^\circ$
Soll-Größen	6	6	6	6	50	50	90
AFM (1 Messung, alle Rillenprofile)	3,29 ±0,08	3,28 ±0,13	3,07 ±0,13	3,75 ±0,04	49,1	51,5	84,4
KM 60x (4 Messungen, alle Rillenprofile)	10,29 ±0,84	10,22 ±0,28	10,41 ±0,30	10,30 ±0,18	55,3 ±0,8	55,7 ±0,3	89,3 ±0,59
KM 100x (4 Messungen, alle Rillenprofile)	0,59 ±0,56	0,16 ±0,60	0,65 ±0,34	0,34 ±0,55	56,8 ±1,8	55,9 ±0,6	88,6 ±0,30
WLI 100x (1 Messung, alle Rillenprofile)	5,78 ±0,18	5,34 ±0,70	5,93 ±0,37	5,90 ±0,16	54,9	55,7	88,4

Typ AGC (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$D_f / \mu m$	$d / \mu m$	$D_f / \mu m$	$d / \mu m$
Soll-Größen	25	3	25	6
AFM (1 Messung)	25,3	2,64 ±0,41	25,3	4,62 ±1,28
KM 60x (4 Messungen)	25,0 ±0,1	2,14 ±1,94	25,1 ±0,1	8,82 ±2,69
KM 100x (4 Messungen)	25,3 ±0,1	2,81 ±0,44	25,3 ±0,2	4,97 ±1,22
WLI 100x (1 Messung)	25,2	3,45 ±0,16	25,1	6,79

Typ ASP (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	1,18	2,36	7,13	8,35
KM 60x (4 Messungen)	1,18 ±0,01	2,89 ±0,04	13,11 ±0,46	14,37 ±0,43
KM 100x (4 Messungen)	1,09 ±0,01	2,37 ±0,01	10,23 ±0,24	11,22 ±0,26
WLI 100x (1 Messung)	1,37	2,71	8,32	9,92

Typ ACS (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	0,61	0,75	0,61	0,75
AFM (1 Messung)	0,55	0,66	0,66	0,83
KM 60x (4 Messungen)	2,48 ±0,09	3,14 ±0,10	2,10 ±0,07	2,50 ±0,11
KM 100x (4 Messungen)	0,61 ±0,00	0,76 ±0,00	0,69 ±0,00	0,86 ±0,00
WLI 100x (1 Messung)	0,62	0,76	0,71	0,88

Typ ARS (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	0,95	1,06	0,94	1,05
AFM (1 Messung)	0,91	1,02	1,05	1,19
KM 60x (4 Messungen)	2,38 ±0,01	3,09 ±0,02	2,05 ±0,02	2,42 ±0,03
KM 100x (4 Messungen)	0,90 ±0,01	1,01 ±0,01	1,11 ±0,01	1,25 ±0,01
WLI 100x (1 Messung)	1,07	1,15	1,11	1,27

Typ AFL (DIN EN ISO 25178-70)				
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	0	0	0	0
AFM (1 Messung)	0,037	0,043	0,076	0,088
KM 60x (4 Messungen)	0,014 ±0,000	0,018 ±0,000	0,014 ±0,000	0,018 ±0,000
KM 100x (4 Messungen)	0,014 ±0,004	0,037 ±0,017	0,009 ±0,000	0,011 ±0,000
WLI 100x (1 Messung)	0,009	0,011	0,009	0,012

Typ APC (DIN EN ISO 25178-70)						
	Soll-Datensatz 1		Soll-Datensatz 2a		Soll-Datensatz 2b	
	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen	0	0	0	0	0	0
AFM (1 Messung)	0,13	0,16	0,08	0,09	0,11	0,13
KM 60x (4 Messungen)	0,16 ±0,00	0,20 ±0,00	0,14 ±0,00	0,18 ±0,00	0,14 ±0,00	0,18 ±0,00
KM 100x (4 Messungen)	0,14 ±0,01	0,17 ±0,01	0,11 ±0,00	0,14 ±0,00	0,11 ±0,00	0,13 ±0,00
WLI 100x (1 Messung)	0,14	0,17	0,12	0,15	0,11	0,15

Anhang B: Weitere Ergebnisse von mittels Mikrofräsen hergestellten Kalibriernormalen ¹⁷

In den nachfolgenden Tabellen werden die weiteren Ergebnisse aus **Kapitel 2.2.2** dargelegt. Dabei sind jeweils die beschriebenen Auswerteparameter ermittelt worden. Die Vorverarbeitung ist separat in **Kapitel 2.2.2** erläutert.

Tabelle 21: Ergebnisse der Parameterstudie, Variation der Steuerdaten und resultierende Kenngrößen der Normale nach DIN EN ISO 25178-70

Typ nach DIN EN ISO 25178-70		PPS			ACS	
		$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$d / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen Datensatz 1		3,129	3,477	9,838	1,979	2,452
Abweichungen in Prozent		$\Delta S_a / S_{a,tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %	$\Delta MWA / A_{tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %
1	<i>TI L1 D1 A1</i>	-2,153 ±0,056	-2,115 ±0,058	-3,189 ±1,438	2,485 ±0,075	0,996 ±0,066
2	<i>TI L2 D1 A1</i>	-3,310 ±0,041	-3,001 ±0,040	-4,972 ±1,903	2,530 ±0,049	1,143 ±0,028
3	<i>TI L3 D1 A1</i>	-3,716 ±0,075	-3,056 ±0,072	-6,461 ±2,949	4,230 ±0,036	2,465 ±0,040
4	<i>TI L4 D1 A1</i>	-7,663 ±0,149	-5,021 ±0,340	-14,056 ±6,640	10,745 ±0,085	10,643 ±0,138
5	<i>TI L5 D1 A1</i>	-4,816 ±0,101	-0,818 ±0,115	-12,464 ±9,342	21,046 ±0,010	21,366 ±0,072
6	<i>TI L1 D2 A1</i>	-3,150 ±0,041	-3,088 ±0,040	-4,534 ±1,705	3,047 ±0,023	1,009 ±0,012
7	<i>TI L2 D2 A1</i>	-4,102 ±0,031	-3,809 ±0,030	-6,047 ±2,233	3,131 ±0,083	1,232 ±0,069
8	<i>TI L3 D2 A1</i>	-4,369 ±0,050	-3,671 ±0,048	-7,332 ±3,345	5,563 ±0,042	3,599 ±0,031
9	<i>TI L4 D2 A1</i>	-5,083 ±0,128	-2,906 ±0,128	-11,171 ±7,675	12,005 ±0,042	10,974 ±0,146
10	<i>TI L5 D2 A1</i>	-2,957 ±0,077	1,135 ±0,104	-13,160 ±9,090	23,186 ±0,196	23,414 ±0,293
11	<i>TI L1 D1 A2</i>	-3,020 ±0,055	-2,467 ±0,057	-3,565 ±1,266	-7,254 ±0,034	-8,758 ±0,036
12	<i>TI L2 D1 A2</i>	-3,094 ±0,034	-2,527 ±0,035	-3,512 ±1,056	-6,479 ±0,046	-7,950 ±0,051
13	<i>TI L3 D1 A2</i>	-3,201 ±0,033	-2,631 ±0,032	-3,815 ±1,165	-5,412 ±0,036	-7,036 ±0,014
14	<i>TI L4 D1 A2</i>	-3,192 ±0,054	-2,614 ±0,050	-3,608 ±1,270	-3,636 ±0,045	-5,366 ±0,036
15	<i>TI L5 D1 A2</i>	-3,686 ±0,079	-3,168 ±0,079	-4,233 ±1,529	-4,119 ±0,079	-6,992 ±0,026

¹⁷ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18b] Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: *Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography*. Procedia CIRP (71) 2018, S. 122-127.

Typ nach DIN EN ISO 25178-70		PPS			ACS	
		$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$	$d / \mu m$	$S_a / \mu m$	$S_q / \mu m$
Soll-Größen Datensatz 1		3,129	3,477	9,838	1,979	2,452
Abweichungen in Prozent		$\Delta S_a / S_{a,tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %	$\Delta MWA / A_{tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %	$\Delta S_q / S_{q,tar}$ in %
16	T1 L1 D2 A2	-4,046 ±0,074	-3,387 ±0,065	-5,017 ±1,135	-6,162 ±0,006	-8,167 ±0,009
17	T1 L2 D2 A2	-3,990 ±0,073	-3,314 ±0,069	-5,077 ±1,261	-5,734 ±0,022	-7,656 ±0,015
18	T1 L3 D2 A2	-4,002 ±0,133	-3,315 ±0,119	-5,241 ±1,381	-4,581 ±0,087	-6,727 ±0,082
19	T1 L4 D2 A2	-3,952 ±0,121	-3,267 ±0,103	-4,915 ±1,451	-2,684 ±0,063	-4,920 ±0,060
20	T1 L5 D2 A2	-4,238 ±0,070	-3,486 ±0,064	-4,905 ±1,476	-4,145 ±0,101	-7,479 ±0,079
21	T2 L1 D1 A1	-1,344 ±0,019	-0,913 ±0,016	-1,770 ±1,039	2,049 ±0,059	0,159 ±0,052
22	T2 L2 D1 A1	-1,419 ±0,053	-0,995 ±0,055	-1,973 ±1,168	1,692 ±0,061	-0,093 ±0,050
23	T2 L3 D1 A1	-1,713 ±0,014	-1,324 ±0,013	-2,551 ±1,359	2,359 ±0,243	0,208 ±0,119
24	T2 L1 D2 A1	-3,535 ±0,055	-2,401 ±0,055	-3,710 ±1,269	2,682 ±0,111	0,260 ±0,110
25	T2 L2 D2 A1	-3,733 ±0,074	-2,575 ±0,074	-3,874 ±1,370	2,217 ±0,058	-0,019 ±0,071
26	T2 L3 D2 A1	-3,900 ±0,067	-2,732 ±0,071	-4,815 ±1,768	2,469 ±0,168	0,058 ±0,151
27	T2 L1 D1 A2	-2,851 ±0,044	-2,530 ±0,046	-3,503 ±1,615	-0,662 ±0,149	-2,330 ±0,145
28	T2 L2 D1 A2	-2,937 ±0,158	-2,619 ±0,158	-3,537 ±1,680	-0,569 ±0,055	-2,207 ±0,021
29	T2 L3 D1 A2	-3,477 ±0,069	-3,121 ±0,068	-3,930 ±1,745	-0,293 ±0,056	-2,202 ±0,051
30	T2 L1 D2 A2	-4,895 ±0,124	-3,867 ±0,119	-5,123 ±1,668	0,752 ±0,151	-1,387 ±0,138
31	T2 L2 D2 A2	-5,235 ±0,115	-4,211 ±0,115	-5,532 ±1,779	0,478 ±0,097	-1,569 ±0,093
32	T2 L3 D2 A2	-5,642 ±0,076	-4,564 ±0,074	-5,950 ±1,822	0,206 ±0,085	-2,265 ±0,089

Anhang C: Weitere Ergebnisse des ARMAseI-Modells ¹⁸

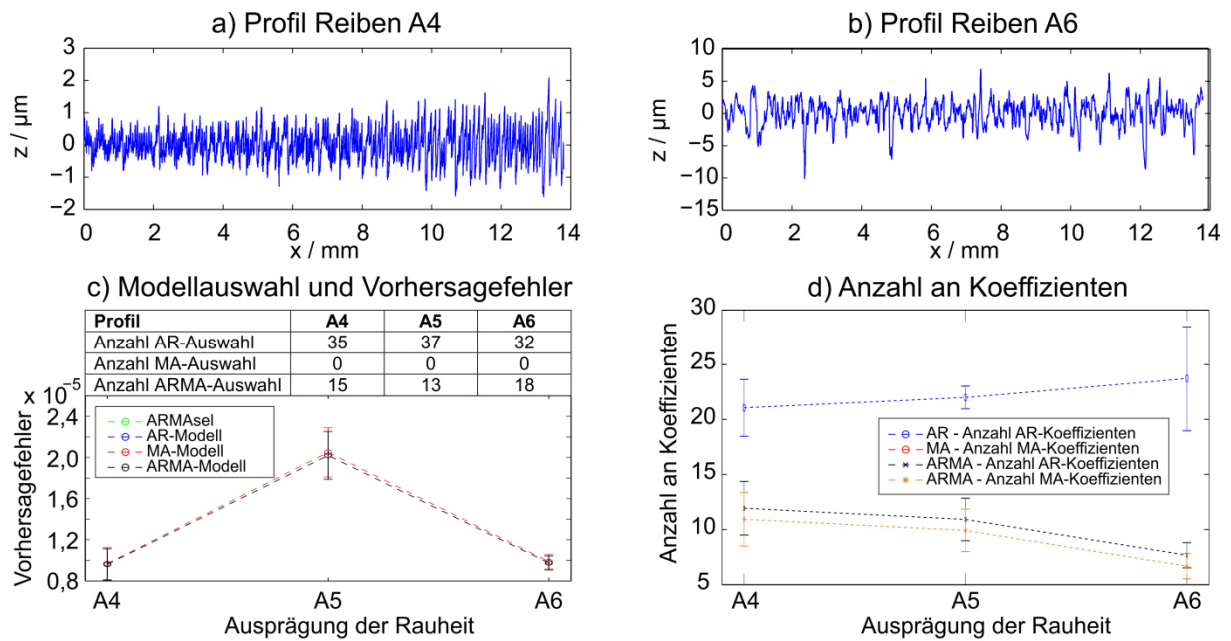


Abbildung 40: Anwendung des ARMAseI-Verfahrens für die Beschreibung von geriebenen Oberflächen, Profile, Modellauswahl sowie Koeffizientenanzahl

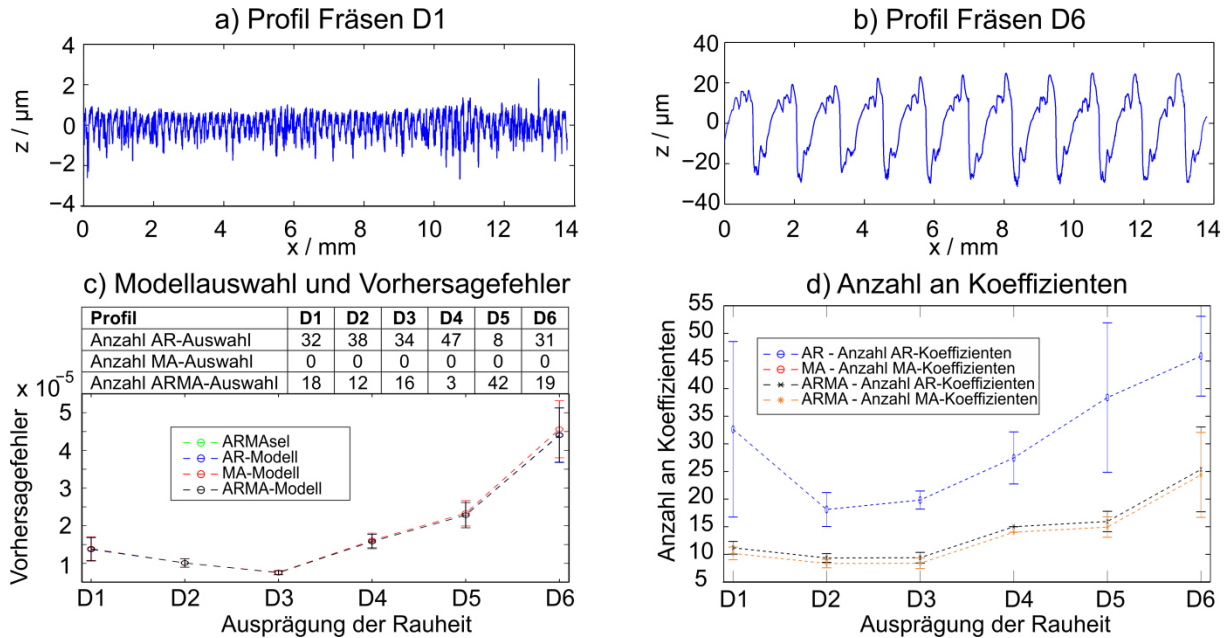


Abbildung 41: Anwendung des ARMAseI-Verfahrens für die Beschreibung von gefrästen Oberflächen, Profile, Modellauswahl sowie Koeffizientenanzahl

¹⁸ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Eif18a] Eifler, M.; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: *Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation*. Technologies (6) 2018, 1, 3.

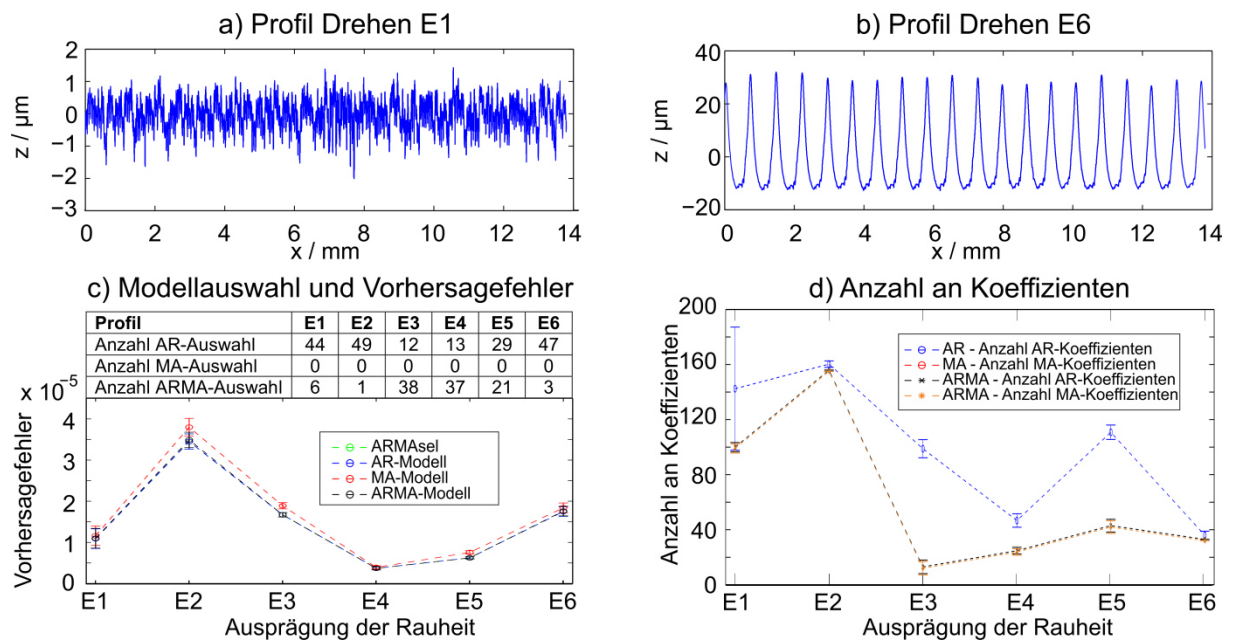


Abbildung 42: Anwendung des ARMAseI-Verfahrens für die Beschreibung von gedrehten Oberflächen, Profile, Modellauswahl sowie Koeffizientenzahl

Anhang D: Weitere Ergebnisse der Untersuchung funktioneller Rauheitskenngrößen ¹⁹

Tabelle 22: Ermittelte funktionelle Rauheitskenngrößen NanoFocus μ Surf, Proben A1-B3

Parameterauswertung Proben A1-B3 Konfokalmikroskop						
Probe	A1	A2	A3	B1	B2	B3
$R_k / \mu m$	0,615 $\pm 0,041$	0,647 $\pm 0,037$	0,348 $\pm 0,027$	2,582 $\pm 0,145$	0,395 $\pm 0,013$	0,814 $\pm 0,050$
$R_{pk} / \mu m$	0,308 $\pm 0,115$	0,349 $\pm 0,106$	0,212 $\pm 0,088$	0,748 $\pm 0,084$	0,137 $\pm 0,010$	0,248 $\pm 0,033$
$R_{vk} / \mu m$	3,764 $\pm 0,975$	2,527 $\pm 1,572$	2,066 $\pm 0,774$	1,659 $\pm 0,340$	0,942 $\pm 0,112$	1,839 $\pm 0,545$
$Mr_1 / \%$	10,336 $\pm 1,025$	10,857 $\pm 0,901$	11,184 $\pm 1,365$	7,384 $\pm 1,030$	8,386 $\pm 0,570$	7,495 $\pm 0,846$
$Mr_2 / \%$	85,754 $\pm 1,083$	88,444 $\pm 0,970$	87,245 $\pm 0,895$	86,865 $\pm 1,592$	80,100 $\pm 0,948$	81,265 $\pm 1,148$
$R_{pq} / \mu m$	0,255 $\pm 0,023$	0,275 $\pm 0,036$	0,149 $\pm 0,019$	0,874 $\pm 0,067$	0,147 $\pm 0,005$	0,282 $\pm 0,020$
$R_{mq} / \%$	89,303 $\pm 7,262$	92,428 $\pm 15,799$	92,051 $\pm 8,665$	62,107 $\pm 17,095$	80,357 $\pm 3,337$	85,491 $\pm 5,615$
$R_{vq} / \mu m$	5,574 $\pm 2,241$	5,494 $\pm 3,929$	3,728 $\pm 1,413$	1,478 $\pm 0,425$	0,972 $\pm 0,119$	2,120 $\pm 1,270$
$S_k / \mu m$	0,619	0,719	0,386	2,728	0,447	0,855
$S_{pk} / \mu m$	0,309	0,300	0,233	0,935	0,153	0,274
$S_{vk} / \mu m$	3,149	3,020	1,918	1,854	0,963	1,605
$S_{mr1} / \%$	11,964	10,579	11,093	7,522	8,272	7,741
$S_{mr2} / \%$	84,127	87,238	87,289	88,212	80,742	80,725
$S_{pq} / \mu m$	0,263	0,291	0,176	1,015	0,164	0,389
$S_{mq} / \%$	93,180	93,974	94,521	99,478	91,280	98,877
$S_{vq} / \mu m$	7,765	8,012	4,803	14,260	0,999	13,668

¹⁹ Ergebnisse und Inhalte dieses Kapitels wurden vorab veröffentlicht:

[Kla18] Klauer, K.; Eifler, M.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: *Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy*. Engineering Science and Technology, an International Journal (21) 2018, S. 302-313.

Tabelle 23: Ermittelte funktionelle Rauheitskenngrößen Hommel Nanoscan, Proben A1-B3

Parameterauswertung Proben A1-B3 Tastschnittgerät						
Probe	A1	A2	A3	B1	B2	B3
$R_k / \mu m$	0,526 ± 0,031	0,340 ± 0,018	0,228 ± 0,029	2,743 ± 0,110	0,294 ± 0,011	0,678 ± 0,095
$R_{pk} / \mu m$	0,257 ± 0,078	0,256 ± 0,142	0,197 ± 0,092	0,810 ± 0,126	0,092 ± 0,029	0,196 ± 0,047
$R_{vk} / \mu m$	3,424 ± 0,833	2,344 ± 1,413	2,081 ± 0,810	1,674 ± 0,244	1,077 ± 0,143	1,795 ± 0,494
$Mr_1 / \%$	9,905 ± 1,213	10,936 ± 1,172	12,105 ± 1,815	7,227 ± 1,013	6,479 ± 1,110	6,883 ± 1,403
$Mr_2 / \%$	83,631 ± 1,676	85,564 ± 1,647	85,542 ± 1,592	87,585 ± 1,188	71,436 ± 0,996	73,305 ± 2,184
$R_{pq} / \mu m$	0,220 ± 0,021	0,153 ± 0,020	0,108 ± 0,021	0,924 ± 0,086	0,097 ± 0,015	0,211 ± 0,034
$R_{mq} / \%$	88,648 ± 6,047	93,808 ± 2,004	91,302 ± 3,098	59,704 ± 17,518	71,545 ± 4,386	74,988 ± 8,060
$R_{vq} / \mu m$	5,204 ± 2,038	4,480 ± 2,879	3,563 ± 1,200	1,477 ± 0,318	0,987 ± 0,116	1,687 ± 0,852
$S_k / \mu m$	0,678	0,398	0,294	2,844	0,322	0,668
$S_{pk} / \mu m$	0,224	0,166	0,544	0,862	0,085	0,229
$S_{vk} / \mu m$	3,215	2,788	1,873	1,849	1,079	1,618
$S_{mr1} / \%$	7,743	9,940	17,981	7,429	5,932	6,003
$S_{mr2} / \%$	84,359	85,238	84,545	88,161	71,240	71,322
$S_{pq} / \mu m$	0,249	0,170	0,297	1,058	0,157	0,352
$S_{mq} / \%$	90,421	94,659	94,212	99,564	98,915	98,592
$S_{vq} / \mu m$	5,730	8,855	4,595	13,522	5,101	11,969

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: GPS-Normen nach DIN EN ISO 14638 [14638, S. 10]	2
Tabelle 2: Messergebnisse des Normals Typs PPS	17
Tabelle 3: Messergebnisse des Normals Typs PGC	18
Tabelle 4: Messergebnisse des Normals Typs PDG	19
Tabelle 5: Messergebnisse des Normals Typs APS	20
Tabelle 6: Messergebnisse des Normals Typs ACG	21
Tabelle 7: Messergebnisse des Normals Typs ASG	24
Tabelle 8: Soll-Geometrien, Definition der geometrischen Eigenschaften	26
Tabelle 9: Parameter zur Berechnung der Koordinaten der Werkzeugbahn	27
Tabelle 10: Vergleich der PSD-Funktion aus dem Profil und ARMAseI-Modell	50
Tabelle 11: Datenvorverarbeitung bei Untersuchung Hommel Nanoscan	74
Tabelle 12: Datenvorverarbeitung bei Untersuchung NanoFocus μ Surf	76
Tabelle 13: Bewertung der virtuellen, taktilen Abtastungen	81
Tabelle 14: Bewertung der virtuellen, optischen Abtastungen	82
Tabelle 15: Korrelation zwischen taktil und optisch erfassten Topographien	104
Tabelle 16: Amplituden der Proben A1-B3	107
Tabelle 17: Analyse der Korrelation der profilhaften Kenngrößen	110
Tabelle 18: Analyse der Korrelation der flächenhaften Kenngrößen	111
Tabelle 19: Weitere Ergebnisse profilhafter Normale	115
Tabelle 20: Weitere Ergebnisse flächenhafter Normale	117
Tabelle 21: Ergebnisse der Parameterstudie, Variation der Steuerdaten	120
Tabelle 22: Ermittelte funktionelle Rauheitskenngrößen NanoFocus μ Surf	124
Tabelle 23: Ermittelte funktionelle Rauheitskenngrößen Hommel Nanoscan	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung der Rauheitsmesstechnik in die Fertigungsmesstechnik....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses	6
Abbildung 3: Lichtmikroskop-Aufnahme einer mit DLW hergestellten Probe.....	13
Abbildung 4: Beispielhafte REM-Aufnahmen.....	14
Abbildung 5: Vergleich der gemessenen Topographien des Normals PPS.....	16
Abbildung 6: Vergleich der gemessenen Topographien des Normals ACS.....	22
Abbildung 7: Gemessenen Topographie WLI 100x Normal Typ ASG	23
Abbildung 8: Normale, Typen PPS und ACS nach DIN EN ISO 25178-70.....	25
Abbildung 9: Untersuchte Parameter zur Erzeugung von Steuerdaten	27
Abbildung 10: Mikrofräse LT Ultra MMC 600 H1 sowie Werkzeuge T1 und T2.....	28
Abbildung 11: Analyse des Parameters Bahnabstand.....	30
Abbildung 12: Analyse des Parameters Diskretisierung	32
Abbildung 13: Analyse des Parameters Neigungswinkel.....	33
Abbildung 14: Topographien sowie REM-Aufnahmen.	34
Abbildung 15: Schematische Darstellung der wirklichen Oberfläche.....	36
Abbildung 16: Untersuchter Satz von technischen Oberflächen Rubert 130	44
Abbildung 17: ARMAseI-Algorithmus bei geläpften Profilen	46
Abbildung 18: ARMAseI-Algorithmus bei geschliffenen Profilen.....	47
Abbildung 19: ARMAseI-Algorithmus bei horizontal gefrästen Profilen	47
Abbildung 20: Periodogramme bei Modellierung von Profilen	50
Abbildung 21: Berechnung von Testdaten aus dem ARMAseI-Modell	52
Abbildung 22: Übertragung von Oberflächen.....	53
Abbildung 23: Ansatz zur Verifizierung des ARMA-Modells	67
Abbildung 24: ARMA-Modell zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen	69
Abbildung 25: Effekt der Segmentierung bei der Ausrichtung	71
Abbildung 26: Übertragungsfunktionen Hommel Nanoscan	73
Abbildung 27: Übertragungsfunktionen NanoFocus µSurf.....	76
Abbildung 28: Übertragungseigenschaften mithilfe des Chirp-Normals.....	78
Abbildung 29: Ausschnitt des R_k -Normals.....	79
Abbildung 30: Rauschanteil in der Übertragungsfunktion.....	80
Abbildung 31: Reale Messung der Normale	81
Abbildung 32: Auswertung und Vorverarbeitung von Messdaten	84
Abbildung 33: Übersicht der Messbereiche und des Auswertebereichs	97
Abbildung 34: Auswerteroutine zur Ermittlung funktioneller Rauheitskenngrößen ...	98
Abbildung 35: Topographien der Zylinderlaufbahnen A1-B3	103
Abbildung 36: Abweichungsparameter nach Gleichung (59).....	105
Abbildung 37: Abweichungsparameter nach Gleichung (59).....	106
Abbildung 38: Abweichungen bei Messungen mit dem Konfokalmikroskop	108
Abbildung 39: Analyse aller Riefen der Proben A1-B3	109
Abbildung 40: ARMAseI-Verfahren bei geriebenen Profilen	122
Abbildung 41: ARMAseI-Verfahren bei gefrästen Profilen	122
Abbildung 42: ARMAseI-Verfahren bei gedrehten Profilen.....	123

Stellungnahme zur Autorenschaft

Die vorliegende Schrift enthält Ergebnisse, welche vorab veröffentlicht worden sind. Dies ist an entsprechender Stelle gekennzeichnet. Nachfolgend werden die betroffenen Publikationen mit einer Erläuterung zur Beteiligung des Autors aufgeführt:

- **Kapitel 2.2.1:** Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. Surface Topography: Metrology and Properties **6**, 2018, S. 024010

Der Autor führte die Messungen und Auswertungen sowie die Auslegung und Berechnung der Steuerdaten für die Fertigung durch. Die Proben wurden durch Julian Hering hergestellt.

- **Kapitel 2.2.2:** Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: *Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography*. Procedia CIRP **71**, 2018, S. 122-127.

Der Autor führte die Messungen und Auswertungen sowie die Berechnung der Steuerdaten für die Fertigung durch. Die Proben wurden durch Katja Klauer hergestellt. Die Versuchsplanung wurde durch Katja Klauer und den Autor gemeinsam erarbeitet.

- **Kapitel 3:** Eifler, M; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: *Model selection and quality estimation of time series models for artificial technical surface generation*. Technologies **6** (1) 2018, 3.

Der Autor implementierte die Anwendung des ARMAse1-Algorithmus und erzeugte die Testdaten für das neuronale Netz. Felix Ströer implementierte das neuronale Netz und wendete es auf die Testdaten an. Sebastian Rief führte die Messungen durch. Jörg Seewig unterstützte bei der Ausgestaltung des Gesamtkonzeptes.

- **Kapitel 4:** Keksel, A.; Eifler, M.; Seewig, J.: *Modeling of topography measuring instrument transfer functions by time series models*. Measurement Science and Technology, **29**, 2018, 095012.

Jörg Seewig und der Autor implementierten das grundlegende Konzept des Algorithmus, welcher von Andrej Keksel unter wissenschaftlicher Betreuung des Autors optimiert wurde. Andrej Keksel und der Autor führten die Messungen und Auswertungen durch.

- **Kapitel 5:** Klauer, K.; Eifler, M.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich J.C.: *Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy*. Engineering Science and Technology, an International Journal, **21**, 2018, S. 302-313.

Die Messungen wurden durch Katja Klauer unter wissenschaftlicher Betreuung des Autors durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten gemeinsam durch Katja Klauer und den Autor.

Liste betreuter studentischer Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten wurden unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors im Rahmen der vorgestellten Forschungstätigkeiten erstellt:

- (Klauer 2017) Klauer, Katja: Herausforderungen bei der Anwendung optischer Topographie-Messgeräte zur Erfassung funktionsorientierter Rauheitskenngrößen, Diplomarbeit, Juli 2017.
- (Keksel 2017) Keksel, Andrej: Ansätze zur mathematischen Modellierung des Übertragungsverhaltens von Topographie-Messgeräten, Masterarbeit, September 2017.
- (Ranker 2017) Ranker, Patrick: Entwicklung von Kalibrierstrategien für die Mikro-Computertomografie, Masterarbeit, Dezember 2017.

Liste vorheriger Veröffentlichungen

Nachfolgend sind alle bisherigen Veröffentlichungen des Autors (Stand: 10.07.2019) aufgeführt:

1. Schäfer, P.; Eifler, M.; Seewig, J.; Volk, R.: Pneumatische Abstandsmessung, Funktionen und potentielle Einsatzgebiete. *VDI Fachtagung Form- und Konturmesstechnik*, Leonberg, 4.-5. Juni 2013, S. 51-63.
2. Schäfer, P.; Eifler, M.; Seewig, J.: Pneumatische Abstandsmessung, Mathematische Beschreibung von Dynamik und Übertragungsverhalten. *werkstatttechnik online*, **103** (2013), 11/12, S. 904-910.
3. Seewig, J.; Eifler, M.: Periodic Gaussian filter according to ISO 16610-21 for closed profiles. *Precision Engineering* **38** (2014), 2, S. 439-442.
4. Pehnelt, S.; Dollinger, P.; Seewig, J.; Eifler, M.: Stabilisierung von Rauheitskennwerten durch Ausblenden von Stördaten. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift* **75** (2014), 4, S. 52-57.
5. Eifler, M.; Schäfer, P.; Seewig, J.: Entwicklung eines Geometrienormals zur Kalibrierung von pneumatischen Abstandssensoren. *28. Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik*, 18.-20. September 2014, Saarbrücken, S. 25-33.
6. Seewig, J.; Eifler, M.; Wiora, G.: Unambiguous evaluation of a chirp measurement standard. *Surface Topography: Metrology and Properties* **2** (2014), 045003.
7. Eifler, M.; Schäfer, P.; Seewig, J.: Modellbasierte Entwicklung eines Geometrienormals für pneumatische Abstandssensoren. *tm – Technisches Messen* **82** (2015), 2, S. 85-93.
8. Seewig, J.; Eifler, M.: Nahe an der Anwendung – Geometrienormale zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten. *qz – Qualität und Zuverlässigkeit* **60** (2015), 3, S. 44-46.
9. Raid, I.; Eifler, M.; Seewig, J.: Ellipso-Height-Topometry: White light interferometry with local material recognition. *Proceedings of the 15th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, 2.-5. März 2015, Charlotte, USA.
10. Eifler, M.; Schneider, F.; Bohley, M.; Aurich, J.C.; Seewig, J.: Contamination of roughness artefacts – impact on the measurement results. *Proceedings of euspen's 15th International Conference & Exhibition*, 1.-5. Juni 2015, Leuven, Belgien, S. 119-120.
11. Eifler, M.; Seewig, J.; Hering, J.; von Freymann, G.: Calibration of z-axis linearity for arbitrary optical topography measuring instruments. *Proceedings of SPIE 9525, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX*, 9525-163, 22.-25. Juni 2015, München.

12. Schneider, F.; Eifler, M.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Entwicklung und Fertigung von Kalibriernormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen – Praxisnahe Kalibrierung von Messgeräten. *VDI-Z* **157** (2015), 7-8, S. 32-34.
13. Schneider, F.; Eifler, M.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich J.C.: Entwicklung und Fertigung von Geometrienormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen. *Unter Span* 2015, 2, S. 23-24.
14. Raid, I.; Eifler, M.; Kusnezowa, T.; Seewig, J.: Calibration of Ellipso-Height-Topometry with Nanoscale Gratings of Varying Materials. *Optik* **126** (2015), 23, S. 4691-4596.
15. Eifler, M.; Ballach, F.; Stoschus, H.; Seewig, J.; Christoph, R.; Schneider, F.; Aurich, J.C.: Neue Anwendungen – Rauheitsmessung mit Computertomographie. *qz – Qualität und Zuverlässigkeit* **61** (2016), 1, S. 50-53.
16. Seewig, J.; Eifler, M.; Schneider, F.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: A model-based approach for the calibration and traceability of the angle resolved scattering light sensor. *Surface Topography: Metrology and Properties* **4** (2016), 024010.
17. Eifler, M.: Modellbasierte Entwicklung von Geometrienormalen zur geometrischen Produktspezifikation, Dissertation. In: Seewig, J. (Hrsg.): *Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik* (3), Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2016.
18. Seewig, J.; Eifler, M.; Schneider, F.; Aurich, J.C.: Design and verification of geometric roughness standards by reverse engineering. *Procedia CIRP* **45** (2016), S. 259-262.
19. Eifler, M.; Schneider, F.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: Manufacturing of new roughness standards for the linearity of the vertical axis - Feasibility study and optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal* **4** (2016), S. 1993-2001.
20. Klauer, K.; Eifler, M.; Schneider, F.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Ageing of roughness artefacts – impact on the measurement results. *Proceedings of euspen's 17th International Conference & Exhibition*, 29. Mai - 2. Juni 2017, Hannover, S. 403-404.
21. Seewig, J.; Eifler, M.: Calibration of areal surface topography measuring instruments. Proceedings of SPIE 10449, *Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering*, 1044911, 5.-7. April 2017, Singapur.
22. Torner, F.M., Karatas, A.; Eifler, M.; Raid, I.; Seewig, J.: Application of GPU-based, highly parallelized algorithms for the estimation of electromagnetic multi-layer interactions. Proc. SPIE Vol. 10329, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*, 1032922, 26.-29. Juni 2017, München.
23. Ströer, F.; Hering, J.; Eifler, M.; Raid, I.; von Freymann, G.; Seewig, J.: Ultrafast 3D high precision print of micro structures for optical instrument calibration procedures. *Additive Manufacturing* **18** (2017), S. 22-30.

24. Rief, S.; Ströer, F.; Kieß, S.; Eifler, M.; Seewig, J.: An Approach for the Simulation of Ground and Honed Technical Surfaces for Training Classifiers. *Technologies* **5** (2017), 4, 66.
25. Eifler, M.; Ströer, F.; Rief, S.; Seewig, J.: Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation. *Technologies* **6** (2018), 1, 3.
26. Hering, J.; Eifler, M.; Hofherr, L.; Ziegler, C.; Seewig, J.; von Freymann G.: Two-photon laser lithography in optical metrology. Proc. SPIE Vol. 10544, *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XI*, 1054412, 28.-31. Januar 2018, San Francisco.
27. Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study. *Surface Topography: Metrology and Properties* **6** (2018), 024010.
28. Klauer, K.; Eifler, M.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich J.C.: Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy. *Engineering Science and Technology, an International Journal* **21** (2018), S. 302-313.
29. Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: Calibration sample for arbitrary metrological characteristics of optical topography measuring instruments. *Optics Express* **26** (2018), 13, S. 16609-16623.
30. Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography. *Procedia CIRP* **71** (2018), S. 122-127.
31. Seewig, J.; Eifler, M.; Bauer, W.; Wiora, G.: Das faire Datenblatt - Der heutige Stand und die Zukunft. 6. *VDI-Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen*, 6.-7. Juni 2018, Frankenthal, VDI-Berichte 2326, S. 81-84.
32. Seewig, J.; Eifler, M.; Bauer, W.: Praxisgerechte Kalibrierung nach ISO 25178-700 - Eine Übersicht. 2. *VDI-Fachtagung Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik*, 6.-7. Juni 2018, Frankenthal, VDI-Berichte 2326, S. 213-216.
33. Keksel, A.; Eifler, M.; Seewig, J.: Modeling of topography measuring instrument transfer functions by time series models. *Measurement Science and Technology* **29** (2018), 095012.
34. Eifler, M.; Klauer, K.; Volk, R.; Feifel, S.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Verschleiß von Raunormalen - Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der taktilen Abtastung. *werkstatttechnik online* **108** (2018),11/12, S. 749-754.
35. Eifler, M.; Hering, J.: Universalnormal zur Überprüfung metrologischer Eigenschaften – Eines für alle. *Quality Engineering* 01.2019, S. 36-37.
36. Eifler, M.; Keksel, A.; Seewig, J.: Comparison of material measures for the determination of transfer characteristics of surface topography measuring instruments. *Surface Topography: Metrology and Properties* **7** (2019), 015024.

37. Eifler, M.; Hering, J.; Ströer, F.; Seewig, J.; von Freymann, G.: Flächenhafte Messgeräte mit nur einer Probe kalibrieren. *Mikroproduktion* 02/2019, S. 22-25.
38. Eifler, M.; Garretson, I.C.; Linke B.S.; Das, J.; Torner, F.; Seewig, J.: Effects of vibratory finishing of 304 stainless steel samples on areal roughness parameters: A correlational analysis for anisotropy parameters. *Journal of Materials Processing Technology* **273** (2019), 116256.
39. Klauer, K.; Eifler, M.; Stelzer, G.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Design and machining of a calibration artefact for an angle-resolved scattering light sensor. *Proceedings of euspen's 19th International Conference & Exhibition*, 3.-7. Juni 2019, Bilbao, Spanien, S. 270-273.
40. Eifler, M.; Ströer, F.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: User-oriented evaluation of the metrological characteristics of areal surface topography measuring instruments. Proc. SPIE Vol. 11056, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, 11056Y, 24.-27. Juni 2019, München.
41. Karatas, A.; Kölsch, D.; Schmidt, S.; Eifler, M.; Seewig, J.: Development of a convolutional autoencoder using deep neuronal networks for defect detection and generating ideal references for cutting edges. Proc. SPIE Vol. 11056, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, 1105623, 24.-27. Juni 2019, München.

Literaturverzeichnis

- 13565-1 DIN EN ISO 13565-1: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen (ISO 13565-1 : 1996); Deutsche Fassung EN ISO 13565-1 : 1997*: Beuth Verlag. Berlin. April 1998
- 13565-2 DIN EN ISO 13565-2: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve (ISO 13565-2: 1996); Deutsche Fassung EN ISO 13565-2:1997*: Beuth Verlag. Berlin. April 1998
- 13565-3 DIN EN ISO 13565-3: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften. Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve*: Beuth Verlag. Berlin. August 2000
- 14406 DIN EN ISO 14406: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Erfassung (ISO 14406:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14406:2010*: Beuth Verlag. Berlin. April 2011
- 14638 DIN EN ISO 14638: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Matrix-Modell (ISO 14638:2015), Deutsche Fassung EN ISO 14638:2015*: Beuth Verlag. Berlin. Dezember 2015
- 16610-1 DIN EN ISO 16610-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-1:2015*: Beuth Verlag. Berlin. November 2015
- 16610-21 DIN EN ISO 16610-21: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011); Deutsche Fassung EN ISO 16610-21:2012*: Beuth Verlag. Berlin. Juni 2013
- 16610-22 DIN EN ISO 16610-22: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 22: Lineare Profilfilter: Spline-Filter (ISO 16610-22:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-22:2015*: Beuth Verlag. Berlin. April 2016
- 16610-31 DIN EN ISO 16610-31: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 31: Robuste Profilfilter: Gaußsche Regressionsfilter (ISO 16610-31:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16610-31:2016*: Beuth Verlag. Berlin. März 2017

- 16610-60 DIN EN ISO 16610-60: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 60: Lineare Flächenfilter - Grundlegende Konzepte (ISO 16610-60: 2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-60:2015*: Beuth Verlag. Berlin. März 2016
- 16610-61 DIN EN ISO 16610-61: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 61: Lineare Flächenfilter - Gauß-Filter (ISO/DIS 16610-61:2012); Deutsche Fassung prEN ISO 16610-61:2012*: Beuth Verlag. Berlin. April 2016
- 16610-71 DIN EN ISO 16610-71: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 71: Robuste Flächenfilter: Gaußsche Regressionsfilter (ISO 16610-71:2014); Deutsche Fassung EN ISO 16610-71:2014*: Beuth Verlag. Berlin. Dezember 2014
- 16610-85 DIN EN ISO 16610-85: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 85: Morphologische Flächenfilterung: Segmentierung (ISO 16610-85:2013); Deutsche Fassung EN ISO 16610-85:2013*: Beuth Verlag. Berlin. Mai 2013
- 25178-1 DIN EN ISO 25178-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 25178-1:2016*: Beuth Verlag. Berlin. Dezember 2016
- 25178-2 DIN EN ISO 25178-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25178-2:2012*: Beuth Verlag. Berlin. September 2012
- 25178-3 DIN EN ISO 25178-3: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 3: Spezifikationsoperatoren (ISO 25178-3:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25178-3:2012*: Beuth Verlag. Berlin. November 2012
- 25178-600 DIN EN ISO 25178-600: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 600: Merkmale für flächentopographische Messverfahren, (ISO/DIS 25178-600:2017); Deutsche und englische Fassung peEN ISO 25178-600:2017*: Beuth Verlag. Berlin. Juni 2017
- 25178-601 DIN EN ISO 25178-601: *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*: Beuth Verlag. Berlin. Januar 2011
- 25178-602 DIN EN ISO 25178-602: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde)*

- (ISO 25178-602:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-602:2010: Beuth Verlag. Berlin. Januar 2011
- 25178-603 DIN EN ISO 25178-603: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 603: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (phasenschiebende interferometrische Mikroskopie) (ISO 25178-603:2013); Deutsche Fassung EN ISO 25178-603:2013*: Beuth Verlag. Berlin. Februar 2014
- 25178-604 DIN EN ISO 25178-604: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie) (ISO 25178-604:2013); Deutsche Fassung EN ISO 25178-604:2013*: Beuth Verlag. Berlin. Dezember 2013
- 25178-70 DIN EN ISO 25178-70: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen (ISO 25178-70:2014); Deutsche Fassung EN ISO 25178-70:2014*: Beuth Verlag. Berlin. Juni 2014
- 25178-700 ISO WD 25178-700: *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 700: Calibration and verification of areal topography measuring instruments (ISO WD 25178-700.3:2016(E))*. 2016
- 3274 DIN EN ISO 3274: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274 : 1996); Deutsche Fassung EN ISO 3274 : 1997*: Beuth Verlag. Berlin. April 1998
- 4287 DIN EN ISO 4287: *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*: Beuth Verlag. Berlin. Juli 2010
- 4288 DIN EN ISO 4288: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS), Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, (ISO 4288: 1996); Deutsche Fassung EN ISO 4288: 1997*: Beuth Verlag. Berlin. April 1998
- 4760 DIN 4760: *Gestaltabweichungen Begriffe Ordnungssystem, DIN 4760*: Beuth Verlag. Berlin. Juni 1982
- 5436-1 DIN EN ISO 5436-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale Teil 1: Maßverkörperungen (ISO 5436-1:2000)*: Beuth Verlag. Berlin. November 2010

- 8580 DIN 8580: *Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung*: Beuth Verlag. Berlin. September 2003
- Aka70 AKAIKE, H.: *Statistical Predictor Identification*. In: *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 22 (1970), Nr. 2, S. 203-217
- Ara17 ARANTES, L. José; FERNANDES, K. Alves; SCHRAMM, C. Rafael; LEAL, J. Eduardo Silveira; PIRATELLI-FILHO, A.; FRANCO, S. Domingues; ARENCIBIA, R. Valdés: *The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 209 (2017), Nr. 4, S. 1936
- Bak03 BAKOLAS, V.: *Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces*. In: *Wear* 254 (2003), 5-6, S. 546-554
- Bel12 BELLON, C.; DERESCH, A.; GOLLWITZER, C.; JAENISCH, G.-R.: *Radiographic Simulator aRTist: Version 2*. In: South African Institute for Non-Destructive Testing (SAINT) (Hrsg.): *Proceedings 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012*
- Ben74 BENDELI, A.; DURUZ, J.; THWAITE, E. G.: *A Surface Simulator for the Precise Calibration of Surface Roughness Measuring Equipment*. In: *Metrologia* 10 (1974), Nr. 4, S. 137-143
- Big07 BIGERELLE, M.; IOST, A.: *A numerical method to calculate the Abbott parameters: A wear application*. In: *Tribology International* 40 (2007), Nr. 9, S. 1319-1334
- Big17 BIGERELLE, M.; MARTEAU, J.; BLATEYRON, F.: *Assessing the discriminating power of roughness parameters using a roughness databank*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 5 (2017), Nr. 2, S. 25002
- Bis16 BISCHOF, R.; SCHNEIDER, F.; KUHN, C.; AURICH, J. C.; MÜLLER, R.: *Simulation of micro-cutting considering finite deformation crystal plasticity*. In: *PAMM* 16 (2016), Nr. 1, S. 305-306
- Bla13 BLATEYRON, F.: *The Areal Field Parameters*. In: LEACH, R. K. (Hrsg.): *Characterisation of areal surface texture*. Berlin, New York: Springer, 2013, S. 15-43
- Bla16 BLATEYRON, F.: *Segmentation and feature parameters - A corrected definition of watershed segmentation and feature parameters defined in ISO 25178-2*. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Surface Metrology* 4th-7th April 2016, Poznan University of Technology, Poland (2016)
- Blu03 BLUNT, L. (Hrsg.); JIANG, X. (Hrsg.): *Advanced techniques for assessment surface topography: Development of a basis for 3D surface texture standards "SURFSTAND"*. London: Kogan Page Science, 2003

- Blu05 BLUNT, L.; JIANG, X.; SCOTT, P.: *Advances in Micro and Nano-Scale Surface Metrology*. In: *Key Engineering Materials* (2005), 295-296, S. 431-436
- Bod00 BODSCHWINNA, H.: *Oberflächenmesstechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen*. Aachen: Shaker, 2000 (Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover)
- Bod92 BODSCHWINNA, H.; HILLMANN, W.: *Oberflächenmesstechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis*. 1. Aufl. Berlin, Köln: Beuth, 1992 (Beuth-Kommentare)
- Boh94 BOHLMANN, H.: *Fertigungsbezogenes Auswerteverfahren für die prozeßnahe Rauheitsmessung an spanend hergestellten Oberflächen*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 1994 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik 431)
- Bos09 BOSSE, H.; KOENDERS, L.; SCHMITT, R.: *Von Mikro zu Nano: Roadmap Fertigungstechnik 2020 (Teil 3)*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 54 (2009), Nr. 7, S. 28-31
- Bre04 BREITMEIER, U.: White Light Interferometer for Engine Cylinder Topography Measurement. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part I*. Aachen: Shaker, 2004, S. 135-144
- Bro00 BROERSEN, P.M.T.: *Facts and fiction in spectral analysis*. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 49 (2000), Nr. 4, S. 766-772
- Bro02 BROERSEN, P.M.T.: *Automatic spectral analysis with time series models*. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51 (2002), Nr. 2, S. 211-216
- Bro93 BROERSEN, P. M.; WENSINK, H. E.: *On Finite Sample Theory for Autoregressive Model Order Selection*. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 41 (1993), Nr. 1, S. 194
- Bro98 BROERSEN, P.M.T.: *The quality of models for ARMA processes*. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 46 (1998), Nr. 6, S. 1749-1752
- Buj10 BUJ CORRAL, I.; CALVET, J. Vivancos; SALCEDO, M. Coba: *Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50 (2010), Nr. 7, S. 621-629
- Che13 CHEN, Y.; ZHANG, X.; LUO, T.; LIU, X.; HUANG, W.: *Fabrication and characterization of areal roughness specimens for applications in*

- scanning probe microscopy*. In: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), Nr. 5, S. 55402
- Chi00 CHIFFRE, L. de; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J.; HANSEN, H. N.: *Quantitative Characterisation of Surface Texture*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2000), Nr. 2, S. 635-652
- Dai04 DAI, G.; JUNG, L.; POHLENZ, F.; DANZEBRINK, H.-U.; KRÜGER-SEHM, R.; HASCHE, K.; WILKENING, G.: *Measurement of micro-roughness using a metrological large range scanning force microscope*. In: *Measurement Science and Technology* 15 (2004), Nr. 10, S. 2039-2046
- Dai06 DAI, G.; POHLENZ, F.; XU, M.; KOENDERS, L.; DANZEBRINK, H.-U.; WILKENING, G.: *Accurate and traceable measurement of nano- and microstructures*. In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), Nr. 3, S. 545-552
- Dec95 DECK, L.; GROOT, P. de: *High-speed non-contact profiler based on scanning white light interferometry*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35 (1995), Nr. 2, S. 147-150
- Dee14 DEEPAK LAWRENCE, K.; SHANMUGAMANI, R.; RAMAMOORTHY, B.: *Evaluation of image based Abbott–Firestone curve parameters using machine vision for the characterization of cylinder liner surface topography*. In: *Measurement* 55 (2014), S. 318-334
- Dob13 DOBRZAŃSKI, P.; PAWLUS, P.: *Modification of Robust Filtering of Stratified Surface Topography*. In: *Metrology and Measurement Systems* 20 (2013), Nr. 1, S. 107-118
- Ehr11 EHRET, G.; SCHULZ, M.; BRAND, U.; KOENDERS, L.; KRÜGER-SEHM, R.; DZIOMBA, T.; DAI, G.; FELGNER, A.; MEEß, R.: *Optische und taktile Oberflächencharakterisierung auf der nm-Skala*. In: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): *PTB Mitteilungen 2.2011: Themenschwerpunkt Nanometrologie*, 2011, S. 142-151
- Eif14 EIFLER, M.; SCHÄFER, P.; SEEWIG, J.: *Entwicklung eines Geometriennormals zur Kalibrierung von pneumatischen Abstandssensoren*, Bd. 28. In: Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik e.V. (Hrsg.): *AHMT 2014, 28. Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik*. Aachen: Shaker, 2014, S. 25-33
- Eif15a EIFLER, M.; SCHÄFER, P.; SEEWIG, J.: *Modellbasierte Entwicklung eines Geometriennormals für pneumatische Abstandssensoren*. In: *tm - Technisches Messen* 82 (2015), Nr. 2, S. 85-93
- Eif15c EIFLER, M.; SEEWIG, J.; HERING, J.; FREYMAN, G. von: *Calibration of z-axis linearity for arbitrary optical topography measuring instruments*. In:

- SPIE Conference Volume 9525: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX* (2015), S. 952510
- Eif16a EIFLER, M.: *Modellbasierte Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen Produktspezifikation*. Dissertation. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2016 (Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik 3)
- Eif16b EIFLER, M.; SCHNEIDER, F.; SEEWIG, J.; KIRSCH, B.; AURICH, J. C.: *Manufacturing of new roughness standards for the linearity of the vertical axis – Feasibility study and optimization*. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19 (2016), Nr. 4, S. 1993-2001
- Eif18a EIFLER, M.; STRÖER, F.; RIEF, S.; SEEWIG, J.: *Model Selection and Quality Estimation of Time Series Models for Artificial Technical Surface Generation*. In: *Technologies* 6 (2018), Nr. 1, S. 3
- Eif18b EIFLER, M.; KLAUER, K.; KIRSCH, B.; SEEWIG, J.; AURICH, J. C.: *Micro-milling of areal material measures – influences on the resulting surface topography*. In: *Procedia CIRP* 71 (2018), S. 122-127
- Eif18c EIFLER, M.; HERING, J.; FREYMAN, G. von; SEEWIG, J.: *Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 6 (2018), Nr. 2, S. 24010
- Eif18d EIFLER, M.; HERING, J.; FREYMAN, G. von; SEEWIG, J.: *Calibration sample for arbitrary metrological characteristics of optical topography measuring instruments*. In: *Optics express* 26 (2018), Nr. 13, S. 16609-16623
- Eva99 EVANS, C.; BRYAN, J. B.: *"Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48 (1999), Nr. 2, S. 541-556
- Fel16 FELDMANN, C.; PUMPE, A.: *3D-Druck - Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit: Entscheidungsunterstützung für Unternehmen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, op. 2016 (Essentials)
- Fen02 FENG, C.-X.; WANG, X.; YU, Z.: *Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 21 (2002), Nr. 5, S. 395-408
- For13a FOREMAN, M. R.; GIUSCA, C. L.; COUPLAND, J. M.; TÖRÖK, P.; LEACH, R. K.: *Determination of the transfer function for optical surface topography measuring instruments—a review*. In: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), Nr. 5, S. 52001

- For13b FOREMAN, M. R.; GIUSCA, C. L.; TÖRÖK, P.; LEACH, R. K.: *Phase-retrieved pupil function and coherent transfer function in confocal microscopy*. In: *Journal of microscopy* 251 (2013), Nr. 1, S. 99-107
- For13c FORBES, A. B.: Areal Form Removal. In: LEACH, R. K. (Hrsg.): *Characterisation of areal surface texture*. Berlin, New York: Springer, 2013, S. 107-128
- Fra15 FRANCO, L. Alberto; SINATORA, A.: *3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp*. In: *Precision Engineering* 40 (2015), S. 106-111
- Frü05 FRÜHAUF, J.; KRÖNERT, S.: *Wet etching of silicon gratings with triangular profiles*. In: *Microsystem Technologies* 11 (2005), Nr. 12, S. 1287-1291
- Frü12 FRÜHAUF, J.; KRÜGER-SEHM, R.; FELGNER, A.; DZIOMBA, T.: *Areal Roughness Standards*. In: *Proceedings of the 12th euspen International Conference Stockholm* (2012), S. 133-136
- Frü16 FRÜHAUF, J.; GÄRTNER, E.; KOENDERS, L.; FELGNER, A.: *Vergleichsproben aus Silizium für die Flächenrauheit*. In: *tm - Technisches Messen* 83 (2016), Nr. 12
- Fuj11 FUJII, A.; SUZUKI, H.; YANAGI, K.: *Development of measurement standards for verifying functional performance of surface texture measuring instruments*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 311 (2011), S. 12009
- Gao08 GAO, F.; LEACH, R. K.; PETZING, J.; COUPLAND, J. M.: *Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers*. In: *Measurement Science and Technology* 19 (2008), Nr. 1, S. 15303
- Gao16 GAO, Y.; URBASSEK, H. M.: *Scratching of nanocrystalline metals: A molecular dynamics study of Fe*. In: *Applied Surface Science* 389 (2016), S. 688-695
- Gem16 GEMBARSKI, P. Christoph: *Das Potential der Produktindividualisierung*. In: LACHMAYER, Roland; LIPPERT, Rene Bastian; FAHLBUSCH, Thomas (Hrsg.): *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 71-85
- Giu12a GIUSCA, C. L.; LEACH, R. K.; HELERY, F.: *Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 2. Amplification, linearity and squareness*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 6, S. 65005
- Giu12b GIUSCA, C. L.; LEACH, R. K.; HELERY, F.; GUTAUSKAS, T.; NIMISHAKAVI, L.: *Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part 1. Measurement noise and residual flatness*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 3, S. 35008

- Giu13 GIUSCA, C. L.; LEACH, R. K.: *Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 3. Resolution*. In: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), Nr. 10, S. 105010
- Gro06 GROOT, P. de; Colonna de Lega, X.: *Intrepreting interferometric height measurements using the instrument transfer function*: In: *Proceedings of FRINGE 2005*, Stuttgart, Springer Verlag, Berlin, 2006, S. 30-37
- Gro13 GROH, A.; KRISTEK, M.; SEEWIG, J.: *Mathematische Einpassverfahren zur Charakterisierung von Formelementen*. In: *Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): 5. VDI-VDE-Fachtagung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2013: Normgerechte Auswertung, Charakterisierung und Tolerierung von Rauheit und Mikroformelementen; Nürtingen, 23. und 24. Oktober 2013*. Düsseldorf: VDI-Verl., 2013 (VDI-Berichte, 2194).
- Gro17 GROOT, P. de: *The Meaning and Measure of Vertical Resolution in Optical Surface Topography Measurement*. In: *Applied Sciences* 7 (2017), Nr. 1, S. 54
- Gro95 GROOT, P. de; DECK, L.: *Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain*. In: *Journal of Modern Optics* 42 (1995), Nr. 2, S. 389-401
- Gu90 GU, X.; HUANG, Y.: *The modelling and simulation of a rough surface*. In: *Wear* 137 (1990), Nr. 2, S. 275-285
- Hai97 HAITJEMA, H.: *International comparison of depth-setting standards*. In: *Metrologia* 34 (1997), S. 161-167
- Hai98 HAITJEMA, H.: *Uncertainty analysis of roughness standard calibration using stylus instruments*. In: *Precision Engineering* 22 (1998), Nr. 2, S. 110-119
- Ham99 HAMILTON, S.: *Taking Moore's law into the next century*. In: *Computer* 32 (1999), Nr. 1, S. 43-48
- Har13 HARTMANN, W.; WECKENMANN, A.: *Function-Oriented Dimensional Metrology - More than Determining Size and Shape*. In: *AMA Service GmbH (Hrsg.): AMA Conferences 2013 - SENSOR // SENSORS 2013, 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology*. Wunstorf: AMA Service GmbH, op. 2013, S. 285-290
- Häs65 HÄSING, J.: *Herstellung und Eigenschaften von Referenznormalen für das Einstellen von Oberflächenmeßgeräten: (Mitteilung aus der Physikalisch-technischen Bundesanstalt)*. In: *Werkstatttechnik* 55 (1965), Nr. 8, S. 380-382
- He14 HE, L.; EVANS, C. J.; DAVIES, A.: *Spatial content analysis for precision surfaces with the area structure function*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 2 (2014), Nr. 1, S. 14010

- Her18 HERING, J.; EIFLER, M.; SEEWIG, J.; FREYMAN, G. von; HOFHERR, L.; ZIEGLER, C.: Two-photon laser lithography in optical metrology. In: FREYMAN, G. von; SCHOENFELD, W. V.; RUMPF, R. C. (Hrsg.): *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XI* (Proc. of SPIE, 10544), S. 1054412
- Hil97 HILLMANN, W.; JÄGER, V.; KRYSSTEK, M.: *Superfeine Rauhnormale: ... mit unregelmäßigem Profil zum Kalibrieren von mechanisch und optisch antastenden Oberflächenmeßgeräten*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 42 (1997), Nr. 1, S. 76-79
- Hoh15 HOHMANN, J. K.; RENNER, M.; WALLER, E. H.; FREYMAN, G. von: *Three-Dimensional μ -Printing: An Enabling Technology*. In: *Advanced Optical Materials* 3 (2015), Nr. 11, S. 1488-1507
- Hu92 HU, Y. Z.; TONDER, K.: *Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and fourier analysis*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32 (1992), 1-2, S. 83-90
- Hüs16a HÜSER, D.; THOMSEN-SCHMIDT, P.; MEEß, R.: *Uncertainty of Cutting Edge Roughness Estimation Depending on Waviness Filtration*. In: *Procedia CIRP* 45 (2016), S. 263-266
- Hüs16b HÜSER, D.; HÜSER, J.; RIEF, S.; SEEWIG, J.; THOMSEN-SCHMIDT, P.: *Procedure to approximately estimate the uncertainty of material ratio parameters due to inhomogeneity of surface roughness*. In: *Measurement Science and Technology* 27 (2016), Nr. 8, S. 85005
- Jac17 JACOBS, T. D. B.; JUNGE, T.; PASTEWKA, L.: *Quantitative characterization of surface topography using spectral analysis*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 5 (2017), Nr. 1, S. 13001
- Jia07 JIANG, X.; SCOTT, P. J.; WHITEHOUSE, D. J.; BLUNT, L.: *Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift*. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463 (2007), Nr. 2085, S. 2071-2099
- Jia10 JIANG, X.: *Robust solution for the evaluation of stratified functional surfaces*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010), Nr. 1, S. 573-576
- Joh16 JOHANNKNECHT, F.; LIPPERT, R. Bastian: *Nachhaltigkeit und Business-Cases*. In: LACHMAYER, Roland; LIPPERT, Rene Bastian; FAHLBUSCH, Thomas (Hrsg.): *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 31-44
- Joh49 JOHNSON, N. L.: *Systems of frequency curves generated by methods of translation*. In: *Biometrika* 36 (1949), 1-2, S. 149-176

- Kar12 KARPUSCHEWSKI, B.; PIEPER, H.-J.; WELZEL, F.; RISSE, K.: *Alternative strategies in finishing cylinder running surfaces*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012), Nr. 1, S. 559-562
- Kay81 KAY, S. M.; MARPLE, S. L.: *Spectrum analysis: A modern perspective*. In: *Proceedings of the IEEE* 69 (1981), Nr. 11, S. 1380-1419
- Kef15 KEFERSTEIN, C. P.: *Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2015
- Kek18 KEKSEL, A.; EIFLER, M.; SEEWIG, J.: *Modeling of topography measuring instrument transfer functions by time series models*. In: *Measurement Science and Technology* 29 (2018), Nr. 9, S. 95012
- Kla18 KLAUER, K.; EIFLER, M.; SEEWIG, J.; KIRSCH, B.; AURICH, J. C.: *Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy*. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal* 21 (2018), Nr. 3, S. 302-313
- Klo05 KLOCKE, F.; KÖNIG, W.: *Schleifen, Honen, Läppen*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2005 (VDI-Buch / Fritz Klocke; Wilfried König ; Bd. 2)
- Klo07 KLOCKE, F.; KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Frasen, Bohren*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2007
- Koe04 KOENDERS, L.; ANDREASEN, J. L.; CHIFFRE, L. de; JUNG, L.; KRÜGER-SEHM, R.: *EUROMET.L-S11 comparison on surface texture*. In: *Metrologia* 41 (2004), 1A, S. 4001
- Koe11 KOENDERS, L.; DAI, G.; DZIOMBA, T.; FELGNER, A.; FLÜGGE, J.; KUETGENS, U.: Von konventionellen zu kristallinen Normalen: Über die Nutzung kristalliner Strukturen für die Nanometrologie. In: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): *PTB Mitteilungen 2.2011: Themenschwerpunkt Nanometrologie*, 2011, S. 170-179
- Kro16 KROLCZYK, G. M.; MARUDA, R. W.; NIESLONY, P.; WIECZOROWSKI, M.: *Surface morphology analysis of Duplex Stainless Steel (DSS) in Clean Production using the Power Spectral Density*. In: *Measurement* 94 (2016), S. 464-470
- Krü04 KRÜGER-SEHM, R.; DZIOMBA, T.; DAI, G.: Profile Assessment of Nano Roughness Standards by Contact and Non-contact Methods, Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz , Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 31-40
- Krü05 KRÜGER-SEHM, R.; FRÜHAUF, J.; DZIOMBA, T.: Determination of the short wavelength cutoff of interferential and confocal microscopes. In: THOMAS, T.; Rosén, B.G., Zahouani, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th*

- International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, 2005, S. 21-27*
- Krü07 KRÜGER-SEHM, R.; BAKUCZ, P.; JUNG, L.; WILHELMS, H.: *Chirp-Kalibriernormale für Oberflächenmessgeräte (Chirp Calibration Standards for Surface Measuring Instruments)*. In: *tm - Technisches Messen* 74 (2007), Nr. 11, S. 572-576
- Kry04a KRYSTEK, M.: *Die digitale Implementierung des Profilfilters nach DIN EN ISO 11562*. 1. Aufl. Berlin [u.a.]: Beuth, 2004
- Kry04b KRYSTEK, M.: Morphological filters in surface texture analysis, Part I. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part I*. Aachen: Shaker, 2004, S. 43-55
- Kus17 KUSNEZOWA, T.: *Möglichkeiten und Herausforderungen bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen*. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2017 (Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik 5)
- Lac16 LACHMAYER, R.; LIPPERT, R. Bastian: Einleitung. In: LACHMAYER, Roland; LIPPERT, Rene Bastian; FAHLBUSCH, Thomas (Hrsg.): *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1-3
- Lau13 LAURIEN, E.; OERTEL, H.: *Numerische Strömungsmechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- Lea02a LEACH, R. K.; CROSS, N.: *Low-cost traceable dynamic calibration of surface texture measuring instruments*. In: *Measurement Science and Technology* 13 (2002), Nr. 1, N1-N4
- Lea02b LEACH, R. K.; HART, A.: *A comparison of stylus and optical methods for measuring 2D surface texture: NPL Report CBTLM 15*. Teddington, 2002
- Lea04 LEACH, R.: *Some issues of traceability in the field of surface topography measurement*. In: *Wear* 257 (2004), Nr. 12, S. 1246-1249
- Lea10 LEACH, R.; HAITJEMA, H.: *Bandwidth characteristics and comparisons of surface texture measuring instruments*. In: *Measurement Science and Technology* 21 (2010), Nr. 3, S. 32001
- Lea11 LEACH, R.; GIUSCA, C.: *4 Calibration of Optical Surface Topography Measuring instruments*. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 49-70
- Lea13a LEACH, R.: *1 Introduction to Surface Topography*. In: LEACH, R. K. (Hrsg.): *Characterisation of areal surface texture*. Berlin, New York: Springer, 2013, S. 1-13

- Lea14a LEACH, R.: *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 2014 (Micro and nano technologies)
- Lea14b LEACH, R.; GIUSCA, C.; RICKENS, K.; RIEMER, O.; RUBERT, P.: *Development of material measures for performance verifying surface topography measuring instruments*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 2 (2014), Nr. 2, S. 25002
- Lea15a LEACH, R.; EVANS, C.; HE, L.; DAVIES, A.; DUPARRÉ, A.; HENNING, A.; JONES, C. W.; O'CONNOR, D.: *Open questions in surface topography measurement: A roadmap*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 3 (2015), Nr. 1, S. 13001
- Lea15b LEACH, R.; GIUSCA, C.; GUTTMANN, M.; JAKOBS, P.-J.; RUBERT, P.: *Development of low-cost material measures for calibration of the metrological characteristics of areal surface texture instruments*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015), Nr. 1, S. 545-548
- Lea15c LEACH, R. K.; GIUSCA, C. L.; HAITJEMA, H.; EVANS, C.; JIANG, X.: *Calibration and verification of areal surface texture measuring instruments*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015), Nr. 2, S. 797-813
- Leh12 LEHMANN, P.; XIE, W.; NIEHUES, J.: *Transfer characteristics of rectangular phase gratings in interference microscopy*. In: *Optics Letters* 37 (2012), Nr. 4, S. 758-760
- Leo03 LEONHARDT, K.; DROSTE, U.; TIZIANI, H. J.: *Interferometry for Ellipso-Height-Topometry - Part 1: Coherence scanning on the base of spatial coherence*. In: *Optik* 113 (2003), Nr. 12, S. 513-519
- Leo10 LEONHARDT, K.: *Interferometry for ellipso-height-topometry - Part 2: Measurement of the ellipsometric data, material identification, and correction of the measured height*. In: *Optik* 121 (2010), S. 623-632
- Leo14 LEONHARDT, K.: *Interferometry for Ellipso-Height-Topometry part 3: Correction of the aspect errors and reduction of the dispersion of the ellipsometric parameters*. In: *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 125 (2014), Nr. 18, S. 5286-5294
- Lew95 LEWIS, J. P.: *Fast Template Matching*. In: *Vision Interface* (1995), S. 120-123
- Man10 MANESH, K. K.; RAMAMOORTHY, B.; SINGAPERUMAL, M.: *Numerical generation of anisotropic 3D non-Gaussian engineering surfaces with specified 3D surface roughness parameters*. In: *Wear* 268 (2010), 11-12, S. 1371-1379
- Man12 MANSKE, E.; JÄGER, G.; HAUSOTTE, T.; FÜBL, R.: *Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 7, S. 74001

- Mar97 MARUO, S.; NAKAMURA, O.; KAWATA, S.: *Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization*. In: *Optics Letters* 22 (1997), Nr. 2, S. 132
- Mat11 MATHIA, T. G.; PAWLUS, P.; WIECZOROWSKI, M.: *Recent trends in surface metrology*. In: *Wear* 271 (2011), 3-4, S. 494-508
- Mat18 Mathworks: *Power Spectral Density Estimates Using FFT: MatLab R 2017b Documentation - Signal Processing Toolbox*. URL <https://de.mathworks.com/help/signal/ug/power-spectral-density-estimates-using-fft.html#d119e21649>. – Aktualisierungsdatum: 2018-01-17
- Mau13 MAUCH, F.; LYDA, W.; OSTEN, W.; LEHMANN, P. H.; OSTEN, W.; ALBERTAZZI, A.: *Model-based assistance system for confocal measurements of rough surfaces*. In: *SPIE Optical Metrology 2013: SPIE, 2013 (SPIE Proceedings)*, 87880U-87880U-9
- Mee11 MEEß, R.; MEHLSTÄUBLER, T.; WEIMANN, T.: *Fertigungsverfahren für die Nanometrologie*, 121, Heft 2. In: *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): PTB Mitteilungen 2.2011: Themenschwerpunkt Nanometrologie*, 2011, S. 180-187
- Mer10 MERTINS, A.: *Signaltheorie: Grundlagen der Signalbeschreibung, Filterbänke, Wavelets, Zeit-Frequenz-Analyse, Parameter- und Signalschätzung ; mit 5 Tabellen*. 2. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- Mey14 MEYER, M.: *Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. 7., verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- Mic93 MICHALSKI, J.; PAWLUS, P.: *Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces*. In: *Wear* 161 (1993), 1-2, S. 135-143
- Nem09 NEMOTO, K.; YANAGI, K.; AKETAGAWA, M.; YOSHIDA, I.; UCHIDATE, M.; MIYAGUCHI, T.; MARUYAMA, H.: *Development of a roughness measurement standard with irregular surface topography for improving 3D surface texture measurement*. In: *Measurement Science and Technology* 20 (2009), Nr. 8, S. 84023
- Nou14 NOUIRA, H.; SALGADO, J.-A.; EL-HAYEK, N.; DUCOURTIEUX, S.; DELVALLÉE, A.; ANWER, N.: *Setup of a high-precision profilometer and comparison of tactile and optical measurements of standards*. In: *Measurement Science and Technology* 25 (2014), Nr. 4, S. 44016
- Ogi89 OGILVY, J. A.; FOSTER, J. R.: *Rough surfaces: gaussian or exponential statistics?* In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 22 (1989), S. 1243-1251

- Oki16 OKIDA, J.; TAYAMA, T.; SHIMAMOTO, Y.; NAKATA, S.: *Application of Chip Formation Simulation to Development of Cutting Tools*. In: *SEI Technical Review* 82 (2016), April, S. 46-51
- Pat12 PATTERSON, K. D.: *Unit roots tests in time series*. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012 (Palgrave texts in econometrics)
- Pat78 PATIR, N.: *A numerical procedure for random generation of rough surfaces*. In: *Wear* 47 (1978), Nr. 2, S. 263-277
- Paw08a PAWLUS, P.: *Simulation of stratified surface topographies*. In: *Wear* 264 (2008), 5-6, S. 457-463
- Paw08b PAWLUS, P.; GRABON, W.: *The method of truncation parameters measurement from material ratio curve*. In: *Precision Engineering* 32 (2008), Nr. 4, S. 342-347
- Paw09 PAWLUS, P.; CIESLAK, T.; MATHIA, T.: *The study of cylinder liner plateau honing process*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), Nr. 20, S. 6078-6086
- Paw14 PAWLUS, P.; REIZER, R.; LENART, A.: *Comparison of parameters describing stratified surface topography*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 483 (2014), S. 12021
- Peh11 PEHNELT, S.; OSTEN, W.; SEEWIG, J.: *Vergleichende Untersuchung optischer Oberflächenmessgeräte mit einem Chirp-Kalibriernormal*. In: *tm - Technisches Messen* 78 (2011), Nr. 10, S. 457-462
- PTB12 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): *Jahresbericht 2012: Annual Report*. Braunschweig, Berlin, 2012
- Pue02 PUENTE LEÓN, F.: *Evaluation of Honed Cylinder Bores*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002), Nr. 1, S. 503-506
- Pue05 PUENTE LEÓN, F.; BEYERER, J.: *Oberflächencharakterisierung durch morphologische Filterung*. In: *tm - Technisches Messen* 72 (2005), Nr. 12, S. 663-670
- Rai13 RAID, I.; KUSNEZOWA, T.; SEEWIG, J.: *Application of ordinary kriging for interpolation of micro-structured technical surfaces*. In: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), Nr. 9, S. 95201
- Rai14 RAID, I.; SEEWIG, J.; FRÖLICH, D.; SAUER, B.; MAYER, P.; SCHNEIDER, F.; AURICH, J. C.: *Kinematische Simulation gedrehter Wellenauflflächen: Funktionsorientierte Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter auf Drallstrukturen*. In: *wt Werkstatttechnik online* 104 (2014), Nr. 5, S. 279-287
- Rai15 RAID, I.; EIFLER, M.; KUSNEZOWA, T.; SEEWIG, J.: *Calibration of Ellipso-Height-Topometry with Nanoscale Gratings of Varying Materials*. In:

- Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 126 (2015), Nr. 23, S. 4591-4596
- Rei08 REITER, M.; CHYBA, B.; KASTNER, J.; KUNZMANN, S.; LETTENBAUER, H.; MANTLER, M.: *Simulation eines industriellen 3D Röntgen Computertomographen zur verbesserten Geometriebestimmung: DACH-Jahrestagung 2008: ZfP in Forschung Entwicklung und Anwendung, St. Gallen*
- Rie17 RIEF, S.; SEEWIG, J.; HÜSER, D.: Einflüsse der Oberflächenstruktur auf die Streuung von Rauheitskennwerten: Praxisrelevante Untersuchungen. In: GRÖGER, Sophie; WEIßGERBER, Marco (Hrsg.): *XIV. Internationales Oberflächenkolloquium: 30.01.-01.02.2017, Technische Universität Chemnitz*. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2017, S. 105-114
- Ros08 ROSEN, B.-G.; ANDERBERG, C.; OHLSSON, R.: *Parameter correlation study of cylinder liner roughness for production and quality control*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 222 (2008), Nr. 11, S. 1475-1487
- San97 SANDOZ, P.: *Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry*. In: *Optics Letters* 22 (1997), Nr. 14, S. 1065
- Sch08 SCHÜBLER, H. W.: *Digitale Signalverarbeitung 1: Analyse Diskreter Signale Und Systeme*. Dordrecht: Springer, 2008
- Sch08a SCHMITT, R.; DAMM, B. Eric: *Prüfen und Messen im Takt - Wie Sie mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 53 (2008), Nr. 9, S. 57-59
- Sch08b SCHMITT, R.; KOERFER, F.; BICHMANN, S.: *Modellierung optischer Messprozesse: Untersuchung der Interferenzmikroskopie mittels Simulation*. In: *tm - Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 4, S. 230-236
- Sch08c SCHMITT, R.; KOERFER, F.; SAWODNY, O.; ZIMMERMANN, J.; KRÜGER-SEHM, R.; XU, M.; DZIOMBA, T.; KOENDERS, L.; GOCH, G.; TAUSENDFREUND, A.; PATZELT, S.; SIMON, S.; ROCKSTROH, L.; BELLON, C.; STAUDE, A.; WOIAS, P.; GOLDSCHMIDTBÖING, F.; RABOLD, M.: *Virtuelle Messgeräte: Definition und Stand der Entwicklung*. In: *tm - Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 5, S. 298-310
- Sch09 SCHMITT, R.; JATZKOWKI, P.; NISCH, S.: *Grösser, genauer und integrierter: Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 Teil 5*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 54 (2009), Nr. 9, S. 44-47
- Sch13a SCHÄFER, P.; EIFLER, M.; SEEWIG, J.: *Pneumatische Abstandsmessung: Mathematische Beschreibung von Dynamik und Übertragungsverhalten*. In: *wt Werkstatttechnik online* 103 (2013), 11/12, S. 904-910

- Sch13b SCHÄFER, P.; BROSCART, D.; SEEWIG, J.: *Aktive Schwingungsdämpfung eines Weißlichtinterferometers*. In: *tm - Technisches Messen* 80 (2013), Nr. 1, S. 16-20
- Sch15a SCHNEIDER, F.; EIFLER, M.; KIRSCH, B.; SEEWIG, J.; AURICH, J. C.: *Praxisnahe Kalibrierung von Messgeräten: Entwicklung und Fertigung von Kalibriernormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen*. In: *VDI-Z* 157 (2015), 7-8, S. 32-34
- Sch15b SCHNEIDER, F.; EIFLER, M.; KIRSCH, B.; SEEWIG, J.; AURICH, J. C.: *Entwicklung und Fertigung von Geometrienormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen*. In: *Unter Span* (2015), Nr. 2, S. 23-24
- Sch15c SCHÄFER, P.: *Modellbasierte Entwicklung pneumatischer Abstandssensoren für prozessintegrierte Messungen: Dissertation*. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2015 (Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik 2)
- Sch17 SCHWARZER, F.; VOLK, R.: Eignungsprüfung konfokaler Sensoren zur Rauheitsmessung. In: GRÖGER, Sophie; WEIßGERBER, Marco (Hrsg.): *XIV. Internationales Oberflächenkolloquium: 30.01.-01.02.2017, Technische Universität Chemnitz*. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2017, S. 115-121
- Sch99 SCHWENKE, H.; TRAPET, E.: *Abschätzung von Messunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmesstechnik: Dissertation*. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1999 (PTB-Bericht F-36)
- Sco06 SCOTT, P. J.: *The case of surface texture parameter RSm*. In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), Nr. 3, S. 559-564
- See00 SEEWIG, J.: *Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltabweichungen technischer Oberflächen: Dissertation*. Aachen: Shaker Verlag, 2000 (Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover)
- See05 SEEWIG, J.: *Linear and robust Gaussian regression filters*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 13 (2005), S. 254-257
- See09 SEEWIG, J.; BEICHERT, G.; BRODMANN, R.; BODSCHWINNA, H.; WENDEL, M.: Extraction of Shape and Roughness using Scattering Light. In: *SPIE Europe Optical Metrology: SPIE, 2009 (SPIE Proceedings)*, 73890N-11
- See12 SEEWIG, J.: Anwendung von Filtern nach ISO 16610 an unterbrochenen Oberflächenprofilen. In: DIETZSCH, Michael; GRÖGER, Sophie (Hrsg.): *XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. Treffen "Industry meets standardization and science" - IMSAS*. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 200-209

- See13a SEEWIG, J.: The Uncertainty of Roughness Parameters. In: AMA Service GmbH (Hrsg.): *AMA Conferences 2013 - SENSOR // SENSORS 2013, 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology*. Wunstorf: AMA Service GmbH, op. 2013, S. 291-296
- See13b SEEWIG, J.: 4 Areal Filtering Methods. In: LEACH, R. K. (Hrsg.): *Characterisation of areal surface texture*. Berlin, New York: Springer, 2013, S. 67-106
- See13c SEEWIG, J.; RAID, I.; WIEHR, C.; GEORGE, B. A.: Robust evaluation of intensity curves measured by confocal microscopies. In: LEHMANN, Peter H.; OSTEN, Wolfgang; ALBERTAZZI, Armando (Hrsg.): SPIE, 2013 (SPIE Proceedings), 87880T
- See13d SEEWIG, J.; GROH, A.: Praxisgerechte Auswahl linearer und robuster Filter. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *5. VDI-VDE-Fachtagung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2013: Normgerechte Auswertung, Charakterisierung und Tolerierung von Rauheit und Mikroformelementen; Nürtingen, 23. und 24. Oktober 2013*. Düsseldorf: VDI-Verl., 2013 (VDI-Berichte, 2194).
- See14 SEEWIG, J.; EIFLER, M.; WIORA, G.: *Unambiguous evaluation of a chirp measurement standard*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 2 (2014), Nr. 4, S. 45003
- See15 SEEWIG, J.; EIFLER, M.: *Nahe an der Anwendung - Geometrienormale zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 60 (2015), Nr. 3, S. 44-46
- See16a SEEWIG, J.; EIFLER, M.; SCHNEIDER, F.; AURICH, J. C.: *Design and Verification of Geometric Roughness Standards by Reverse Engineering*. In: *Procedia CIRP* 45 (2016), S. 259-262
- See16b SEEWIG, J.; EIFLER, M.; SCHNEIDER, F.; KIRSCH, B.; AURICH, J. C.: *A model-based approach for the calibration and traceability of the angle resolved scattering light sensor*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 4 (2016), S. 24010
- See17 SEEWIG, J.; EIFLER, M.: Calibration of areal surface topography measuring instruments. In: Anand K. Asundi (Hrsg.): *Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering, 2017* (Proceedings of SPIE, 10449), S. 1044911
- See18a SEEWIG, J.; EIFLER, M.; BAUER, W.: Praxisgerechte Kalibrierung nach ISO 25178-700 - Eine Übersicht. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *6. VDI-Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen 2018, 2. VDI-Fachtagung Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik 2018*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2018 (VDI Berichte, 2326), S. 213-216
- See18b SEEWIG, J.; EIFLER, M.; BAUER, W.; WIORA, G.: Das faire Datenblatt - Der heutige Stand und die Zukunft. In: Verein Deutscher Ingenieure

- (Hrsg.): *6. VDI-Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen 2018, 2. VDI-Fachtagung Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik 2018*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2018 (VDI Berichte, 2326), S. 81-84
- Sen13 SENDLER, U.: 1 Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: SENDLER, Ulrich (Hrsg.): *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Berlin: Springer-Vieweg, 2013 (Xpert.press).
- Son05 SONG, J.; MA, L.; WHITENTON, E.; VORBURGER, T.: *2D and 3D Surface Texture Comparisons Using Autocorrelation Functions*. In: *Key Engineering Materials* 295-296 (2005), S. 437-440
- Son06 SONG, J.; VORBURGER, T.; RENEGAR, T.; RHEE, H.; ZHENG, A.; MA, L.; LIBERT, J.; BALLOU, S.; BACHRACH, B.; BOGART, K.: *Correlation of topography measurements of NIST SRM 2460 standard bullets by four techniques*. In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), Nr. 3, S. 500-503
- Sto00 STOUT, K.: *Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions*. Rev. repr. London: Penton Press, 2000
- Str17 STRÖER, F.; HERING, J.; EIFLER, M.; RAID, I.; FREYMAN, G. von; SEEWIG, J.: *Ultrafast 3D High Precision Print of Micro Structures for Optical Instrument Calibration Procedures*. In: *Additive Manufacturing* 18 (2017), December, S. 22-30
- Su17 SU, R.; WANG, Y.; COUPLAND, J.; LEACH, R.: *On tilt and curvature dependent errors and the calibration of coherence scanning interferometry*. In: *Optics express* 25 (2017), Nr. 4, S. 3297-3310
- Tea82 TEAGUE, E. C.; SCIRE, F. E.; VORBURGER, T. V.: *Sinusoidal Profile Precision Roughness Specimens*. In: *Wear* 83 (1982), Nr. 1, S. 61-73
- Ter17 TERESCHENKO, S.; LEHMANN, P.; GOLLOR, P.; KUEHNHOLD, P.: *Vibration compensated high-resolution scanning white-light Linnik-interferometer*. In: LEHMANN, Peter; OSTEN, Wolfgang; ALBERTAZZI GONÇALVES, Armando (Hrsg.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X: SPIE, 2017 (SPIE Proceedings)*, S. 1032940
- Tod17 TODHUNTER, L. D.; LEACH, R. K.; LAWES, S.D.A.; BLATEYRON, F.: *Industrial survey of ISO surface texture parameters*. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 19 (2017), S. 84-92
- Tor17a TORNER, F. M.; DAS, J.; STELZER, G.; LINKE, B.; SEEWIG, J.: *Fundamental Analysis of the Usability of an Angle-Resolved Scattered Light Sensor for Monitoring Vibratory Finishing Processes Based on Ray Tracing Simulations*. In: *Applied Mechanics and Materials* 869 (2017), S. 115-127

- Tor17b TORNER, F. M.; KARATAS, A.; EIFLER, M.; RAID, I.; SEEWIG, J.: Application of GPU-based, highly parallelized algorithms for the estimation of electromagnetic multi-layer interactions. In: LEHMANN, Peter; OSTEN, Wolfgang; ALBERTAZZI GONÇALVES, Armando (Hrsg.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*: SPIE, 2017 (SPIE Proceedings), S. 1032922
- Tor18 TORNER, F. M.: *Entwicklung virtueller, optischer Sensoren zur Charakterisierung geometrischer Oberflächen*. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2018 (Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik 6)
- Tos16 TOSELLO, G.; HAITJEMA, H.; LEACH, R. K.; QUAGLIOTTI, D.; GASPARIN, S.; HANSEN, H. N.: *An international comparison of surface texture parameters quantification on polymer artefacts using optical instruments*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016), Nr. 1, S. 529-532
- Uch04 UCHIDATE, M.; SHIMIZU, T.; IWABUCHI, A.; YANAGI, K.: *Generation of reference data of 3D surface texture using the non-causal 2D AR model*. In: *Wear* 257 (2004), Nr. 12, S. 1288-1295
- Uch11 UCHIDATE, M.; YANAGI, K.; YOSHIDA, I.; SHIMIZU, T.; IWABUCHI, A.: *Generation of 3D random topography datasets with periodic boundaries for surface metrology algorithms and measurement standards*. In: *Wear* 271 (2011), 3-4, S. 565-570
- Uns99 UNSER, M.: *Splines: A perfect fit for signal and image processing*. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 16 (1999), Nr. 6, S. 22-38
- VDI10 VDI/VDE-RICHTLINIEN 2655 Blatt 1.2: *Optische Messtechnik an Mikrotopografien Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung*: Beuth Verlag. Berlin. Oktober 2010
- Vol13 VOLK, R.; FEIFEL, S.: Full scale calibration of a combined tactile contour and roughness measurement device. In: *The 11th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments*, 2013
- Vor07 VORBURGER, T. V.; RHEE, H.-G.; RENEGAR, T. B.; SONG, J.-F.; ZHENG, A.: *Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007), 1-2, S. 110-118
- Wat82 WATSON, W.; SPEDDING, T. A.: *The time series modelling of non-gaussian engineering processes*. In: *Wear* 83 (1982), Nr. 2, S. 215-231
- Wec13 WECKENMANN, A.; HARTMANN, W.: *Function-oriented Measurements – The Path from Macro to Micro and Nano Range*. In: *Procedia Engineering* 63 (2013), S. 861-872

- Wec15 WECKENMANN, A.; HARTMANN, W.: *A model- and simulation-based approach for tolerancing and verifying the functional capability of micro/nano-structured workpieces*. In: *Measurement* 76 (2015), S. 70-79
- Wen15 WENDEL, M.: *Qualifizierung eines Streulichtensors und Untersuchung erster Ansätze zur dreidimensionalen Streulichterfassung: Dissertation*. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2015 (Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik 1)
- Wer06 WERNER, M.: *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB: Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen ; mit 67 Tabellen*. 3., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006 (Studium Technik)
- Whi11 WHITEHOUSE, D. J.: *Handbook of surface and nanometrology*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011
- Whi16 WHITEHOUSE, D. J.: *Undefined freeform surfaces having deterministic structure: Issues of their characterization for functionality and manufacture*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 4 (2016), Nr. 3, S. 35001
- Whi82 WHITEHOUSE, D. J.: *The Parameter Rush - Is there a Cure?* In: *Wear* 83 (1982), Nr. 1, S. 75-78
- Whi83 WHITEHOUSE, D. J.: *The Generation of Two Dimensional Random Surfaces Having a Specified Function*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 32 (1983), Nr. 1, S. 495-498
- Wie11 WIEHR, C.; SEEWIG, J.: 3D-Kenngrößen nach ISO 25178. In: WANNER, Alexander (Hrsg.): *Fortschritte in der Metallographie: Vortragstexte der 45. Metallographie-Tagung*. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2011
- Wu00 WU, J.-J.: *Simulation of rough surfaces with FFT*. In: *Tribology International* 33 (2000), Nr. 1, S. 47-58
- Wu04 WU, J.-J.: *Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT*. In: *Tribology International* 37 (2004), Nr. 4, S. 339-346
- Xie12 XIE, W.; LEHMANN, P.; NIEHUES, J.: *Übertragungsverhalten von tiefenscannenden Weißlichtinterferometern*. In: *tm - Technisches Messen* 79 (2012), Nr. 4, S. 229-237
- Xie16 XIE, W.; LEHMANN, P.; NIEHUES, J.; TERESCHENKO, S.: *Signal modeling in low coherence interference microscopy on example of rectangular grating*. In: *Optics express* 24 (2016), Nr. 13, S. 14283-14300
- Xie17 XIE, W.; HAGEMEIER, S.; BISCHOFF, J.; MASTYLO, R.; MANSKE, E.; LEHMANN, P.: *Transfer characteristics of optical profilers with respect to rectangular edge and step height measurement*. In: LEHMANN, Peter;

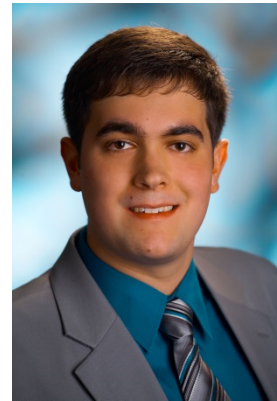
- OSTEN, Wolfgang; ALBERTAZZI GONÇALVES, Armando (Hrsg.): SPIE, 2017 (SPIE Proceedings), S. 1032916
- Yas08 YASHCHUK, V. V.; MCKINNEY, W. R.; TAKACS, P. Z.: *Binary pseudorandom grating standard for calibration of surface profilometers*. In: *Optical Engineering* 47 (2008), Nr. 7, S. 73602
- You91 YOU, S. J.; EHMANN, K. F.: *Computer synthesis of three-dimensional surfaces*. In: *Wear* 145 (1991), Nr. 1, S. 29-42

Lebenslauf des Verfassers

Matthias Eifler

Geburtsjahr 1990

Staatsangehörigkeit deutsch



Berufserfahrung

- Opti-Cal GmbH, Kaiserslautern**
Seit 01 / 2018 Geschäftsführer
- University of California at Davis, USA**
10 / 2018 Visiting researcher
08 / 2017-10 / 2017 Visiting researcher
- Dekanat MV, TU Kaiserslautern**
Seit 08 / 2016 Studiengangsmanager
- Dr. Eifler Fertigungsmesstechnik, Kaiserslautern**
Seit 07 / 2016 Inhaber
- Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik, TU Kaiserslautern**
Seit 03 / 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Post-Doktorand
02 / 2014 - 03 / 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand
08 / 2013 - 01 / 2014 Wissenschaftliche Hilfskraft
- WEIDMANN Plastics Technology AG, Rüti, Schweiz**
04 / 2012 - 06 / 2012 Praktikum Qualitätsmanagement
- Bertrandt Ingenieurbüro GmbH, Köln**
11 / 2011 - 01 / 2012 Praktikum Technische Berechnung
- SCHOTTEL GmbH, Spay**
02 / 2011 - 03 / 2011 Praktikum Qualitätssicherung
08 / 2010 Praktikum Reparatur
03 / 2010 Praktikum Montage
08 / 2009 - 10 / 2009 Grundpraktikum

Akademischer & schulischer Werdegang**IUBH School of Business and Management, Bad Honnef**

05 / 2014 - 04 / 2016 Fernstudium Master of Business Administration (M.B.A.),
sehr gut (1,3)

Technische Universität Kaiserslautern

03 / 2013 - 03 / 2016 Promotion im Bereich Messtechnik: „Modellbasierte
Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen
Produktspezifikation“ Doktor-Ingenieur, sehr gut (1,0)

04 / 2009 - 01 / 2013 Studium Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.), mit Auszeichnung (1,1)
Schwerpunktfächer: Anlagenbau & Produktionstechnik

Kurfürst-Balduin Gymnasium, Münstermaifeld

08 / 2000 - 03 / 2009 Allgemeine Hochschulreife (2,2)

Auszeichnungen

2014 Preis der Hannelore und Manfred J. Lenhart-Namensstiftung
2013 Preis der Stiftung Pfalzmetall

Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik

bereits veröffentlicht wurden

- 1 Wendel, M.: Qualifizierung eines Streulichtensors und Untersuchung erster Ansätze zur dreidimensionalen Streulichterfassung
2015, ISBN 978-3-95974-006-7 € 39,-
- 2 Schäfer, P.: Modellbasierte Entwicklung pneumatischer Abstandssensoren für prozessintegrierte Messungen
2015, ISBN 978-3-95974-009-8 € 39,-
- 3 Eifler, M.: Modellbasierte Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen Produktspezifikation
2016, ISBN 978-3-95974-027-2 € 39,-
- 4 Arnecke, P.: A measurement method for characterising micro lead on ground shaft surfaces
2017, ISBN 978-3-95974-047-0 € 39,-
- 5 Kusnezowa, T.: Möglichkeiten und Herausforderungen bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen
2017, ISBN 978-3-95974-050-0 € 39,-
- 6 Torner, F. M.: Entwicklung virtueller, optischer Sensoren zur Charakterisierung geometrischer Oberflächen
2018, ISBN 978-3-95974-085-2 € 39,-
- 7 Alapurath George, B.: Web-Based Reference Software For Characterisation Of Surface Roughness
2018, ISBN 978-3-95974-095-1 € 39,-
- 8 Wiehr, C.: Anwenderunterstützung bei der Nutzung und Überprüfung von optischen 3D-Oberflächenmessgeräten
2019, ISBN 978-3-95974-110-1 € 39,-
- 9 Eifler, M.: Tendenzen und Herausforderungen in der geometrischen Produktspezifikation am Beispiel der Rauheitsmesstechnik
2019, ISBN 978-3-95974-117-0 € 39,-

ISBN: 978-3-95974-117-0
ISSN: 2365-9742

Kurzfassung

Die geometrische Produktspezifikation steht - wie viele andere Industriezweige - vor einschneidenden Veränderungen. Durch Digitalisierung und Automatisierung ändern sich viele industrielle Rahmenbedingungen. Ziel dieser Arbeit ist es, die derzeitigen Trends für die industrielle Rauheitsmesstechnik systematisch zusammenzutragen. Basierend auf diesen Veränderungen werden korrespondierende eigene Forschungsarbeiten vorgestellt, welche an die gezogenen Schlussfolgerungen anknüpfen. Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Betrachtung technischer Oberflächen gewählt, welcher zunächst die fertigungstechnische Erzeugung deterministischer Rauheitsstrukturen analysiert. Anschließend werden die Beschreibung der resultierenden Topographiemerkmale mittels mathematischer Modelle und deren messtechnische Erfassung durch typische Topographie-Messgeräte untersucht. Weiterhin wird die hierauf aufbauende Charakterisierung der Oberfläche thematisiert, welche durch die Anwendung der Operationen Einpassung, Interpolation, Filterung und Berechnung von Rauheitskenngrößen gekennzeichnet ist.

Abstract

The Geometrical Product Specification faces, just as many other industrial branches, significant changes. Caused by digitalization and automation many industrial frameworks change. The objective of this work is a systematic collection of the current trends in industrial roughness metrology. Based on these changes, corresponding examinations are introduced which are based on the drawn conclusions. In doing so, a holistic approach for the examination of technical surfaces is chosen that initially analyzes the manufacturing of deterministic rough surface structures. Subsequently, the description of the resulting topographic features with the aid of mathematical models and their metrological characterization with typical topography measuring instruments are examined. Building on this, the characterization of the surface is addressed based on the operations fitting, interpolation, filtering and calculation of roughness parameters.