

Matthias Eifler



$K_o = \int_0^1 |z(x)| dx$

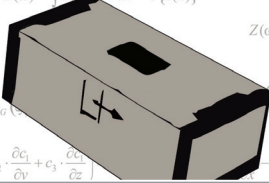
$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}$

$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x-\xi) \cdot s_G(\xi) \cdot d\xi, \int_{-\infty}^{\infty} s_G(\xi) \cdot d\xi = 1$

$Z(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x) e^{-i\omega x} dx = \mathfrak{F}\{z(x)\}$

$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x-\xi) \cdot s_G(\xi) \cdot d\xi, \int_{-\infty}^{\infty} s_G(\xi) \cdot d\xi = 1$

$\rho \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial t} + c_1 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial x} + c_2 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial v} + c_1 \cdot \frac{\partial c_2}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial c_1}{\partial x} + \frac{\partial c_2}{\partial v} + \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) \Bigg] +$



Modellbasierte Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen Produktspezifikation

Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik
Band 3

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 3

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 2016

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 978-3-95974-027-2

Kurzzusammenfassung

Messgeräte zur geometrischen Produktspezifikation werden mit Normalen nach DIN EN ISO 5436-1 und DIN EN ISO 25178-70 kalibriert. Dabei kommen meist künstliche Oberflächenstrukturen zum Einsatz. Aufgrund immer höherer Anforderungen ist für hochgenaue Messaufgaben allerdings eine praxisorientierte Kalibrierung erforderlich. Ein modellbasierter Ansatz zur Auslegung von Normalen, die eine solche praxisnahe Kalibrierung erlauben, wird im Rahmen dieser Arbeit ohne Einschränkung auf ein spezielles Messverfahren vorgestellt und untersucht. Dabei ermöglichen drei Säulen eine Verbesserung gegenüber konventionellen Normalen: die Berücksichtigung physikalischer Effekte bei der Messung, die Definition neuer Oberflächenstrukturen, als deren Ausgangspunkt reale Bauteiloberflächen dienen, sowie die Berücksichtigung fertigungstechnischer Effekte. Die neu generierten Normale werden mit virtuellen und realen Messungen auf ihren praktischen Einsatz hin untersucht. In diesem Rahmen werden auch neue Kalibrierstrategien, eine Unsicherheitsbilanz sowie ein allgemeiner Leitfaden zur Generierung von Normalen abgeleitet.

Short abstract

Measurement devices for the geometrical product specification are calibrated with measurement standards defined in ISO 5436-1 and ISO 25178-70. In doing so, mostly artificial surface structures are used. However, because of the increasing requirements a calibration in step with the actual practice is required for high-precision measurement tasks. An approach for the model-based design of measurement standards that enables such a practical calibration is introduced and examined within this work without limitation to a certain measurement procedure. Thereby, three aspects for an improvement towards conventional measurement standards can be identified: the consideration of physical effects that occur within the measurement process, the definition of new surface structures that are based on real engineering surfaces and the consideration of effects regarding the manufacturing process. The newly designed measurement standards are investigated according to their practical application using virtual and real measurements. In this context also new calibration strategies, an uncertainty analysis and a generic guideline for the generation of measurement standards are deduced.

Modellbasierte Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen Produktspezifikation

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Eifler

aus Koblenz

Kaiserslautern 2016

D386

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske
Tag der mündlichen Prüfung:	18. März 2016

„Das Aufblühen von Kunst und Wissenschaft ist das sicherste Zeichen, dass ein Land unter kluger Regierung glücklich, wohlhabend und reich ist.“

Friedrich II. von Preußen (1712-1786)

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Stipendiat und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik der Technischen Universität Kaiserslautern.

Dabei möchte ich mich insbesondere bei dem Lehrstuhl-Inhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit zu erstellen und durch viele Diskussionen und Ratschläge maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Weiterhin hat er mich in den letzten Jahren entscheidend gefördert und so auch wesentlich zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske für die Übernahme der Berichterstattung und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Ich möchte mich bei allen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für die schöne gemeinsame Zeit sowie die gute Zusammenarbeit bedanken. Im Rahmen meiner Tätigkeit habe ich dabei auch einige gute Freunde gefunden. Insbesondere hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Patrick Schäfer, der mich während meiner Diplomarbeit ermutigt hat, den Schritt in das Promotionsstudium zu wagen und immer für aufschlussreiche Diskussionen zur Verfügung stand.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 926: „Bauteiloberflächen – Morphologie auf der Mikroskala“.

Allen Personen, die mich im Rahmen der Herstellung der Normale unterstützt haben, sei hiermit nochmals ein herzlicher Dank ausgesprochen, allen voran Herrn Dipl.-Ing. Frank Schneider. Weiterhin bedanke ich mich bei allen Industriepartnern sowie der Physikalisch-technischen Bundesanstalt (PTB) für die angenehme Zusammenarbeit und die Unterstützung im Rahmen eines durchgeführten Ringvergleichs.

Zuletzt danke ich auch allen Personen aus meinem privaten Umfeld, die mich in den letzten Jahren ebenso unterstützt haben, insbesondere meinen Eltern Klaus und Claudia Eifler.

Abstract (English)

Measurement devices for the geometrical product specification are calibrated with measurement standards which are defined in ISO 5436-1 for profile measurements and in ISO 25178-70 for areal and profile measurements. With these measurement standards it is possible to examine different “metrological characteristics”. Usually, artificial surface structures are used for the calibration tasks which are not closely related to the later performed measurement task. In nowadays industry there are steadily increasing requirements for geometrical measurements that lead as well to more and more challenging calibration procedures. For high-precision measurement tasks a calibration in step with the actual practice is required.

In order to fulfill these requirements, new measurement standards and calibration strategies should be developed. Within this work, an approach for the generation of measurement standards that enable a calibration which is closely related to the actual practice is introduced and examined.

After an introduction (**chapter 1**) and the description of the current state of the art (**chapter 2**), three aspects for an improvement in comparison to conventional geometric measurement standards can be identified and analysed: virtual measurement, the design of new geometric structures and effects of the manufacturing process.

First, in **chapter 3** the physical effects that occur within the measurement and manufacturing process are analysed and considered within the later executed design of measurement standards. In order to incorporate these effects, a model-based design approach for measurement standards was developed. The according measurement processes are modelled. For this purpose completely different methods are used according to the measurement principle: signal processing, ray-tracing for optical measurement devices and computational fluid dynamics for the simulation of pneumatic measurement.

The second aspect, which is examined in **chapter 4**, is the design of new surface structures. The new geometries are based on real engineering surfaces and are therefore closer related to the later executed measurement task. With the developed model-based approach, different measurement standards for the use with stylus instruments are designed: For the calibration of the vertical axis, currently step height standards are used. A new approach based on the Abbott-curve is introduced and imaged with a designed measurement standard.

Measurement standards with a defined frequency spectrum are state of the art, but also not related to real measurement tasks. Within this work a transformation for an engineering surface is introduced that leads to a defined frequency spectrum.

Further, a new approach for a measurement standard which allows a combined calibration of waviness and roughness parameters is introduced. Within these examinations, it can be shown, that the Abbott-Curve, the profile itself and its frequency spectrum can serve as properties for a calibration of stylus instruments.

Considering optical measurement instruments as well new measurement standards are designed: For arbitrary optical topography measuring instruments a new linearity standard for the vertical axis is proposed which is based on the according 2D-transformation. This transformation was introduced within the examinations of the stylus instrument calibration.

For the new measurement principle of ellipso-height topometry (EHT) according measurement standards are designed that consider the special metrological characteristics and abilities of this measurement principle.

The industrial computer tomography (CT) is a promising measurement principle for the geometrical product specification. Because of the more and more increasing resolution a principle investigation for roughness measurement with CT is carried out. For this examination a roughness standard with the consideration of the physical properties of the CT measurement is proposed.

Further, two measurement standards for the calibration of the angle resolved scattering light sensor are developed. These standards image a certain A_q -value and can therefore be used for a calibration of the angle resolved scattering light sensor in step with the actual practice.

The third important measurement principle within the field of production measurement technology, the pneumatic distance measurement, is further examined: An existing measurement standard is analysed with the aid of virtual measurements and an improved geometry for calibration purposes is suggested which can be used for an absolute distance measurement.

As the third aspect, in **chapter 5** effects regarding the manufacturing process are examined, which should as well be considered within the design of the geometries. In a first step, the manufacturing methods for the new standards are selected regarding their suitability for the desired structures. After that, a method for the description of geometric effects which occur during the manufacturing with an ultra-precision turning process is proposed. This method uses the actual geometry of the tool which is determined by the aid of measurements.

The ultra-precision turning process itself is examined with a parameter study that evaluates the effect of different manufacturing parameters on the resulting roughness parameters. Experimentally, environmental influences on measurement standards

are examined. Thereby, the effects of different contaminations on the measurement results are characterized. Concluding, the practical realization of the measurement standards is described.

An important task is the verification of the manufactured standards. This task is examined in **chapter 6** and considered with different approaches. To examine the abilities of the newly designed measurement standards within their practical application, initially virtual measurements with the developed models are executed. The used models are implemented within the design process and are as well used for the simulation of different non-ideal behaviour in order to evaluate the abilities of the designed measurement standards.

Further, a verification based on actual measurements is executed, which are performed in accordance with developed calibration strategies in order to achieve a simple application of the measurement standards. With stylus instrument measurements it can be shown that the designed measurement standards meet their purpose for the calibration of roughness and waviness parameters, the Abbott-Curve and the frequency spectrum. With the measurement results of the frequency spectrum the transfer behavior of stylus instruments can be described generically.

The calibration method for the linearity calibration of optical topography measurement devices works for white-light interferometers and confocal microscopes which is proven with different measurement results. The calibration of the ellipso-height topometer is as well verified experimentally. In doing so, different material combinations are used. A CT of the designed computed tomography roughness standard is executed in order to investigate the practical abilities of this measurement principle. It can be shown that there are possibilities for the roughness measurement with the use of industrial CT measuring devices.

Afterwards, the standards for the angle resolved scattering light sensor are measured and verified as repeatable measurement results can be achieved.

The measurement standard for pneumatic distance sensors is verified with the according calibration strategy and a good compliance to the virtually achieved results is asserted.

An uncertainty analysis of the introduced approach is carried out. The uncertainty of the measurement process itself is already described in according literature. Thus, the uncertainty of the virtual considerations regarding the manufacturing process is examined in depth and can be described based on the measurement results of the tool's geometry. An uncertainty evaluation of the entire virtual signal chain leads to realistic values for the examined processes.

With the findings of the verification procedures it can be stated that the approach for a model-based generation of measurement standards works for all examined measurement principles. Summarising the results of the introduced approach, in **chapter 7** a generic guideline for the generation of measurement standards is deduced.

Zusammenfassung

Messgeräte zur Anwendung in der geometrischen Produktspezifikation werden mit Normalen kalibriert, die in DIN EN ISO 5436-1 für profilhafte Messungen und in DIN EN ISO 25178-70 für flächenhafte sowie profilhafte Messungen definiert sind. Mithilfe dieser Geometrienormale besteht die Möglichkeit, verschiedene „messtechnische Eigenschaften“ zu untersuchen.

Üblicherweise werden künstliche Oberflächenstrukturen, die in keiner engen Beziehung zur später ausgeführten Messaufgabe stehen, für Kalibrieraufgaben eingesetzt. In der heutigen industriellen Anwendung werden stetig steigende Anforderungen an die geometrischen Messungen gestellt, die zu immer größeren Herausforderungen im Rahmen von Kalibrierprozessen führen. Für Messaufgaben, die eine hohe Präzision voraussetzen, wird eine praxisnahe Kalibrierung benötigt.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sollten neue Geometrienormale und Kalibrierstrategien entwickelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ansatz eingeführt und untersucht, der die Entwicklung von Geometrienormalen, die eine Kalibrierung in Anlehnung an die industrielle Praxis ermöglichen, gestattet.

Nach einer Einführung (**Kapitel 1**) und der Darstellung des Stands der Technik (**Kapitel 2**) können drei Aspekte für eine Verbesserung im Vergleich gegenüber herkömmlichen Geometrienormalen identifiziert und untersucht werden: die virtuelle Messtechnik, die Auslegung neuer geometrischer Strukturen sowie fertigungstechnische Effekte.

Zunächst werden in **Kapitel 3** physikalische Effekte, die während des Mess- und Fertigungsprozesses auftreten, betrachtet und bei der Auslegung der Geometrienormale miteinbezogen. Zur Berücksichtigung dieser Effekte wird ein modellbasierter Ansatz für die Gestaltung von Geometrienormalen entwickelt. Die zugehörigen Messprozesse werden modelliert. Zu diesem Zweck werden in Anlehnung an das jeweilige Messprinzip völlig unterschiedliche Methoden eingesetzt: Signalverarbeitung, Ray-Tracing für optische Messgeräte und numerische Strömungsmechanik für die Simulation pneumatischer Messungen.

Der zweite Aspekt, der in **Kapitel 4** betrachtet wird, ist die eigentliche Auslegung neuer Oberflächenstrukturen. Die neuen Geometrien basieren auf realen Bauteiloberflächen und lehnen sich daher stärker an die später ausgeführte Messaufgabe an. Mit dem entwickelten modellbasierten Ansatz werden unterschiedliche Geometrienormale für den Einsatz von Tastschnittgeräten ausgelegt. Für die Kalibrierung der Höhenachse werden derzeit Tiefeneinstellnormale eingesetzt. Ein neuer Ansatz basierend auf der Abbott-Kurve wird eingeführt und mit einem entsprechenden Normal abgebildet.

Normale mit einem definierten Ortsfrequenzspektrum sind ebenfalls Stand der Technik, lehnen sich allerdings ebenso nicht an reale Messaufgaben an. In dieser Arbeit wird eine Transformation für technische Oberflächen eingeführt, die zu einem definierten Frequenzspektrum führt.

Weiterhin wird ein neuer Ansatz für ein Normal, das eine kombinierte Kalibrierung von Welligkeits- und Rauheitskenngößen gestattet, vorgestellt. Im Rahmen dieser Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die Abbott-Kurve, das Profil selbst und sein Frequenzspektrum als Eigenschaften und Größen für die Kalibrierung industrieller Tastschnittgeräte dienen können.

In Bezug auf optische Messgeräte werden ebenfalls neue Geometrienormale ausgelegt: Für beliebige optische Topographie-Messgeräte wird ein neues Linearitätsnormal für die Höhenachse vorgeschlagen, das auf der vorher eingeführten 2D-Transformation basiert.

Für das neue Messprinzip der Ellipso-Höhen-Topometrie (EHT) werden angepasste Normale ausgelegt, welche die speziellen metrologischen Eigenschaften und Fähigkeiten dieses Messprinzips berücksichtigen.

Die industrielle Computertomographie (CT) ist ein vielversprechendes Messprinzip zur geometrischen Produktspezifikation. Aufgrund der mehr und mehr zunehmenden Auflösung wird eine Grundlagenuntersuchung zur Rauheitsmessung mithilfe der CT durchgeführt. Für diese Untersuchung wird ein Raunormal vorgeschlagen, das die physikalischen Eigenschaften der CT-Messung berücksichtigt.

Weiterhin werden zwei Normale zur Kalibrierung des winkelauflösenden Streulichtensors entwickelt. Diese Normale bilden einen definierten A_q -Wert ab und können daher für eine Kalibrierung des winkelauflösenden Streulichtensors in Anlehnung an die tatsächliche messtechnische Praxis eingesetzt werden.

Das dritte wichtige Messprinzip im Bereich der Fertigungsmesstechnik, die pneumatische Abstandsmessung, wird ebenfalls untersucht: Ein vorhandenes Normal wird unter Zuhilfenahme virtueller Messungen analysiert und eine verbesserte Geometrie für Kalibriereinsätze vorgeschlagen, welche für eine absolute Abstandsmessung genutzt werden kann.

Als dritter Aspekt werden in **Kapitel 5** Effekte, die den Fertigungsprozess der Normale betreffen, untersucht, die ebenfalls innerhalb der Auslegung der Geometrien berücksichtigt werden sollten. In einem ersten Schritt werden unterschiedliche Fertigungsverfahren für die neuen Geometrienormale entsprechend ihrer Eignung für die gewünschten Oberflächenstrukturen ausgewählt. Danach wird eine Methode zur Beschreibung der geometrischen Effekte, die während der Fertigung mithilfe eines

Ultrapräzisions-Drehprozesses auftreten, vorgeschlagen. Dieses Schema benutzt dabei die tatsächliche Geometrie des Werkzeugs, die mithilfe von Messungen ermittelt wird.

Der Ultrapräzisions-Drehprozess selbst wird mit einer Parameterstudie untersucht, die den Effekt verschiedener Fertigungsparameter auf die resultierenden Rauheitsparameter analysiert. Umwelteinflüsse auf Normale werden experimentell untersucht. Dabei werden Effekte unterschiedlicher Verschmutzungsarten auf die Messergebnisse charakterisiert. Abschließend wird die praktische Umsetzung der Geometrienormale beschrieben.

Eine wichtige Aufgabe ist die Verifikation der gefertigten Normale. Dieser Aspekt wird in **Kapitel 6** untersucht und mithilfe unterschiedlicher Ansätze betrachtet. Um die Einsatzmöglichkeiten der neu ausgelegten Normale für die praktische Anwendung zu untersuchen, werden zunächst virtuelle Messungen mit den entwickelten Modellen ausgeführt. Die eingesetzten Modelle sind bereits in den Auslegungsprozess der Normale implementiert und werden ebenfalls für die Simulation verschiedener Nichtidealitäten genutzt, um die Fähigkeiten der ausgelegten Normale zu beurteilen.

Weiterhin wird eine Verifikation auf Basis von realen Messungen ausgeführt, die in Anlehnung an die entwickelten Kalibrierstrategien durchgeführt werden, welche wiederum zur einfachen Anwendung der zugehörigen Normale entwickelt wurden.

Mithilfe von Messungen mit Tastschnittgeräten kann gezeigt werden, dass die ausgelegten Normale ihrem Zweck entsprechen und eine Kalibrierung von Rauheits- und Welligkeitskenngrößen, der Abbott-Kurve sowie des Frequenzspektrums gestatten. Mit den Messergebnissen des Frequenzspektrums kann weiterhin das Übertragungsverhalten des jeweiligen Tastschnittgerätes generisch beschrieben werden.

Die Kalibrierstrategie für die Linearität der Höhenachse optischer Topographie-Messgeräte funktioniert für Weißlichtinterferometer und konfokale Mikroskope, was ebenfalls mithilfe unterschiedlicher Messergebnisse gezeigt wird. Auch die Kalibrierung des Ellipso-Höhen-Topometers wird experimentell verifiziert. Hierbei werden auch verschiedene Materialkombinationen eingesetzt. Eine Computertomographie des ausgelegten CT-Rauheitsnormals wird ausgeführt, um die zugehörigen praktischen Fähigkeiten dieses Messprinzips für die Rauheitsmessung zu untersuchen. Es kann gezeigt werden, dass grundsätzlich Möglichkeiten zur Rauheitsmessung unter Anwendung industrieller CT-Messgeräte bestehen. Die Normale für den winkelauflösenden Streulichtsensor werden gemessen und verifiziert, wobei wiederholbare Messergebnisse erzielt werden können.

Das Normal für pneumatische Abstandssensoren wird mithilfe der zugehörigen Kalibrierstrategie verifiziert, wobei eine gute Übereinstimmung zu den virtuell erzielten Ergebnissen festgestellt werden kann.

Eine Unsicherheitsanalyse des eingeführten Ansatzes wird durchgeführt. Die Unsicherheit des Messprozesses selbst ist dabei in der Literatur hinreichend beschrieben. Daher wird die Unsicherheit der virtuellen Betrachtungen im Hinblick auf den Fertigungsprozess detailliert untersucht und kann auf Basis der Messergebnisse der Werkzeuggeometrie beschrieben werden. Eine Unsicherheitsanalyse der gesamten virtuellen Signalkette führt zu realistischen Werten für die untersuchten Prozesse.

Auf Basis der Ergebnisse der Verifikationen kann festgestellt werden, dass der Ansatz zur modellbasierten Auslegung von Geometrienormalen für alle untersuchten Messprinzipien funktioniert. Zur Zusammenfassung der Ergebnisse des eingeführten Ansatzes wird in **Kapitel 7** ein generischer Leitfaden zur Entwicklung von Normalen abgeleitet.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Charakterisierung von Gestaltabweichungen.....	4
2.2 Untersuchte Messverfahren	6
2.2.1 Tendenzen in der Messtechnik	6
2.2.2 Tastschnittverfahren	7
2.2.3 Ellipso-Höhen-Topometer	9
2.2.4 Konfokale Mikroskopie.....	13
2.2.5 Streulichtmessverfahren	15
2.2.6 Computertomographie	16
2.2.7 Pneumatische Abstandmessung.....	17
2.3 Modellbasierte Beschreibung von Messgeräten: physikalische Grundlagen...20	
2.3.1 Tendenz der virtuellen Messtechnik.....	20
2.3.2 Eingesetzte Signalverarbeitung	21
2.3.3 Refraktive und diffraktive Beschreibung von Licht	26
2.3.4 CFD, numerische Strömungsmechanik	29
2.4 Vorhandene Kalibrieransätze und -normale	33
2.4.1 Grundsätzliches zum Einsatz von Geometrienormalen	33
2.4.2 Messprinzip-unspezifische Kalibrierung.....	35
2.4.3 Verfahrensspezifische Vorschriften zur Kalibrierung.....	40
2.4.4 Werkstoffe und Fertigung von Geometrienormalen	47
3 Auswahl und Weiterentwicklung modellbasierter Techniken	50
3.1 Modellierung taktiler Messverfahren.....	51
3.2 Modellierung optischer Messverfahren.....	52
3.2.1 Modellierung optischer Topographie-Messgeräte	53
3.2.2 Modellierung der Ellipso-Höhen-Topometrie.....	54
3.2.3 Modellierung der Computertomographie.....	55
3.2.4 Modellierung des Streulichtensors	56
3.3 Modellierung pneumatischer Messverfahren.....	60

3.3.1 CFD, numerische Strömungsmechanik.....	60
3.3.2 Beschreibung der lateralen Filterwirkung	61
3.4 Modellierung der Auswertung von Messdaten	63
3.5 Modellierung von Fertigungsverfahren	64
4 Modellbasierte Auslegung neuer Kalibriernormale	66
4.1 Normale für die taktile Messtechnik.....	67
4.1.1 Ausgangspunkt R_k -Normal	71
4.1.2 Stetiges Linearitätsnormal für die z-Achse	72
4.1.3 Stetiges Normal für Ortsspektren	75
4.1.4 Kombiniertes Normal für Welligkeit und Rauheit	79
4.2 Normale für die optische Messtechnik	85
4.2.1 Normal zur Charakterisierung der Linearität der z-Achse.....	85
4.2.2 Ellipso-Höhen-Topometer-Normale.....	89
4.2.3 Normal für die industrielle Computertomographie (CT).....	91
4.2.4 Streulicht-Normale.....	93
4.3 Normale für die pneumatische Messtechnik.....	98
5 Untersuchung fertigungstechnischer Einflüsse	104
5.1 Auswahl von Fertigungsverfahren und Werkstoffen	104
5.2 Berechnung geometrischer Effekte bei der spanenden Fertigung.....	105
5.3 Parameterstudie der spanenden Fertigung	108
5.4 Untersuchung von Umwelteinflüssen auf Normale	110
5.5 Praktische Umsetzung der ausgelegten Geometrien.....	113
6 Normale in der Praxis - Kalibrierung sowie Unsicherheitsbetrachtung	118
6.1 Kalibrierstrategien und Verifikation	118
6.1.1 Normale für taktile Messgeräte.....	118
6.1.2 Normale für optische Messgeräte.....	136
6.1.3 Normale für pneumatische Messgeräte.....	148
6.2 Unsicherheitsbetrachtung	153
6.2.1 Unsicherheit des Fertigungsprozesses	154
6.2.2 Unsicherheit des Messprozesses.....	157
6.2.3 Unsicherheit der Auswertung	158

Inhaltsverzeichnis	XIII
7. Leitfaden zur modellbasierten Entwicklung von Normalen	162
8. Zusammenfassung und Ausblick	165
Anhang	169
Anhang A: Trennen von Gestaltabweichungen	169
Anhang B: Ergebnisse der nichtidealen taktilen Abtastungen	170
Anhang C: Ergebnisse der CT-Simulationen mit aRTist.....	173
Anhang D: Nichtideale Simulation des Streulichtensors, Ergebnisse.....	175
Tabellenverzeichnis	177
Abbildungsverzeichnis.....	178
Liste betreuter studentischer Arbeiten.....	180
Liste vorheriger Veröffentlichungen.....	181
Literaturverzeichnis	183
Lebenslauf des Verfassers	205

Formelzeichenverzeichnis

Kleinbuchstaben Lateinisch

a	Grenzwert Gleichverteilung
a_{arma}	Koeffizient ARMA-Modell
a_{RSK}	Faktor Redlich-Soave-Kwong Gleichung
b	absolutes Glied einer Geraden
b_{arma}	Koeffizient ARMA-Modell
b_{fit}	absolutes Glied einer gefitteten Geraden
b_{hist}	Breite der Histogramm-Abschnitte
b_{RSK}	Faktor Redlich-Soave-Kwong Gleichung
b_{tar}	Zielgröße absolutes Glied einer gefitteten Geraden
b_{tool}	Breite des Werkzeugs allgemein
$b_{tool,n}$	nominelle Breite des Werkzeugs
$b_{tool,ms}$	gemessene Breite des Werkzeugs
b_{Ψ}	absolutes Glied Ψ -Justiergerade
b_{Δ}	absolutes Glied Δ -Justiergerade
c	Strömungsgeschwindigkeit
c_1	Strömungsgeschwindigkeit in x -Richtung
c_1^{\prime}	Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit in x -Richtung
c_2	Strömungsgeschwindigkeit in y -Richtung
c_3	Strömungsgeschwindigkeit in z -Richtung
c_a	Faktor zur Korrektur der Filterwellenlänge
d	Distanz Matrizenoptik
d_b	strukturierendes Element abgebrochene Tastkugel
d_c	strukturierendes Element Kreisscheibe
d_l	Leuchtfleckdurchmesser Streulicht
d_l^*	nichtidealer Leuchtfleckdurchmesser Streulicht
d_M	Durchmesser der Messdüse
d_s	Abstand
d_{tip}	Tastspitzengeometrie
d_v	horizontale Strecke entsprechend der Voxelgröße
d_V	Durchmesser der Vordüse
dx	Differential in x -Richtung
dz	Differential in z -Richtung
e	spezifische innere Energie
f	Frequenz
fc	Funktion
f_b	Brennweite allgemein
f_c	Brennweite des Kollimators
f_{obj}	Brennweite des Objektivs

f_{lat}	Funktion zur Transformation der lateralen Achse
f_{ver}	Funktion zur Transformation der vertikalen Achse
g	Zählvariable
g_r	Grenzwert in x -Richtung bei der Darstellung der Fehlerfunktion
h	Histogramm der Winkelverteilung
h_{cal}	Soll-Höhenwert
h_{ms}	gemessener Höhenwert
i	Zählvariable
j	imaginäre Einheit
k	Zählvariable
k_e	Erweiterungsfaktor zur Berechnung der Unsicherheit
k_F	Korrekturfaktor Streulicht
k_{max}	Ordnung des autoregressiven Prozesses
k_{tar}	Korrekturfaktor Streuwinkelverteilung
k_x	Frequenz zur Radon-Rücktransformation
k_y	Frequenz zur Radon-Rücktransformation
k^*	turbulente kinetische Energie
l	Länge eines Profils
$ld1$	Linearitätsabweichung Typ 1
$ld2$	Linearitätsabweichung Typ 2
ld_{ISO}	Linearitätsabweichung gemäß DIN EN ISO 25178-603
ld_{ISO80}	Linearitätsabw. DIN EN ISO 25178-603, innere 80 % der Messpunkte
l_{max}	Ordnung Moving-Average Prozess
l_r	Auswertelänge Rauheitsprofil
l_{se}	Länge strukturierendes Element
l_w	Auswertelänge Welligkeitsprofil
m	Zählvariable
m_{act}	tatsächliche Steigung der Achsenlinearität
m_{err}	zur Linearitätsjustage eingesetzte Steigung
m_{fit}	gefittete Geradensteigung
m_G	Geradensteigung
m_{tar}	Zielgröße Steigung der Achsenlinearität
m_{Δ}	Steigung Justiergerade für Δ
m_{Ψ}	Steigung Justiergerade für Ψ
n	Zählvariable
n_{max}	Maximalwert der Zählvariable n
o	Zählvariable
p	Druck allgemein
p_c	kritischer Druck
p_I	Intensitätsverteilung Leuchtquelle
p'_I	Intensitätsverteilung nach Kollimator und Objektiv

p_M	Messdruck
p_{\min}	minimale Periodenlänge
p_{NL}	Parametersatz zur nichtidealen Transformation
p^s	Siededruck
p_U	Umgebungsdruck
p_V	Vordruck
px	Pixelbreite
\dot{q}_s	spezifische Strahlungswärme
q_ϕ	Quellenterm Erhaltungsgröße ϕ
r	Radius der Messdüse
r_e	Eckenradius
res	Residuum
r_{kol}	Radius des Kollimators
r_{tip}	Tastspitzenradius
r_{tool}	Werkzeugradius
$r_{tool,n}$	nomineller Werkzeugradius
s	Abstand zwischen Werkstück und Messdüse
\bar{s}	gemittelter Abstand zwischen Werkstück und Messdüse
s_{CFD}	mit CFD ermittelter Abstand zwischen Werkstück und Messdüse
s_E	strukturierendes Element morphologisches Filter
$s_{filtist}$	Abstand Werkstück-Messdüse durch geometrische Filterung der Istdaten
$s_{filsoll}$	Abstand Werkstück-Messdüse durch geometrische Filterung der Sollaten
s_G	Gewichtsfunktion eines Filters
$s_{G,B}$	Gewichtsfunktion einer Blende
s_{\max}	maximal zulässiger Abstand Werkstück – Messdüse
s_{mess}	gemessener Abstand zwischen Werkstück und Messdüse
s_r	Gewichtsfunktion zur Rauheitstransformation
s_w	Profil-Schwellwert für Transformation
t	Zeit
t_f	Transformationsfaktor Streulichtverteilung
t_M	Werkzeuggeometrie
$t_{M,id}$	ideale Werkzeuggeometrie
$t_{M,nid}$	nichtideale Werkzeuggeometrie
$t_{M,ms}$	gemessene Werkzeuggeometrie
t_s	Schichtdicke
u	Unsicherheit allgemein
u_{par}	Parameterunsicherheit
$u_{p,eva}$	Punktunsicherheit des Auswerteprozesses
$u_{p,ges}$	Gesamte Unsicherheit eines Messpunktes
$u_{p,manuf}$	Punktunsicherheit des Fertigungsprozesses
$u_{p,manuf,max}$	maximale Punktunsicherheit des Fertigungsprozesses

$u_{p, meas}$	Punktunsicherheit des Messprozesses
v	spezifisches Volumen
v_x	Kantenlänge eines Voxels
w	Filterlinie
x	x -Achsenposition
x_{err}	x -Koordinaten zur Darstellung der Fehlerfunktion
x_{ip}	interpolierte x -Koordinaten
$x_{G, id}$	x -Koordinaten ideale gaußförmige Streulichtverteilung
x_l	x -Koordinate Lichtquelle
x_{ms}	gemessene x -Koordinaten
$x_{ms, int}$	gemessene und interpolierte x -Koordinaten
\tilde{x}_{NL}	nichtideal transformierte x -Koordinaten
x_{ref}	Referenzpunkt x -Achse
x_{sen}	x -Koordinate Sensorzeile
\tilde{x}_{sen}	substituierte x -Koordinate Sensorzeile
x_{tip}	x -Koordinaten Tastkugel
x_l	x -Werte Werkzeuggeometrie
\tilde{x}	transformierte Daten Normalenfertigung
x^*	x -Koordinaten einer Einzelmessstrecke
y	y -Achsenposition
y^*	y -Koordinaten einer Einzelmessstrecke
y_l	y -Koordinate Lichtquelle
y_{sen}	y -Koordinate Sensorzeile
z	z -Achsenposition
z_0	Eingangsoberfläche für die virtuelle Fertigung
z_b	Grenzwert für nichtlineare z -Transformation
z_c	λ_c -gefiltertes Profil
z_e	Eingangsoberfläche für die virtuelle Messung
z_{err}	Höhenwerte der Fehlerfunktion
$z_{err, u}$	Höhenwerte der Fehlerfunktion in umgekehrter Reihenfolge
$z_{err, ges}$	Gesamtdarstellung Höhenwerte der Fehlerfunktion
$z_{e, id}$	ideal virtuell gefertigtes Profil
$z_{e, mid}$	nichtideal virtuell gefertigtes Profil
$z_{f, f}$	Formanteil eines Profils
z_G	rekonstruierte Oberfläche der virtuellen Fertigung
$z_{G, a}$	Zwischenprofil bei Berechnung der virtuellen Abtastung
$z_{G, nl}$	nichtlinear transformierte z -Koordinaten
z_{in}	Eingangsdaten ARMA-Prozess
z_{ip}	interpolierte z -Koordinaten
$z_{k, f}$	kurzweiliger Profilanteil
z_m	Mittellinie des Welligkeitsprofils

z_{ms}	gemessene z -Koordinaten
$z_{ms,flt}$	gemessene, gefilterte z -Koordinaten
$z_{ms,fit}$	gefittete Gerade in gemessene z -Koordinaten
$z_{ms,int}$	interpolierte Messdaten
\tilde{z}_{NL}	nichtideal transformierte z -Koordinaten
z_{out}	Ausgangsdaten ARMA-Prozess
$z_{r,0}$	transformiertes Rauheitsprofil
$z_{r,0,p}$	periodisch fortgesetztes transformiertes Rauheitsprofil
$z_{r,t}$	Rauheitsprofil zur Transformation
z_{ref}	Referenzpunkt z -Achse
$z_{r,z=0}$	Rauheitsprofil nach erstem Transformationsschritt
z_s	λ_s -gefiltertes Profil
z_{sp}	Topographie nach dem ersten Transformationsschritt (spaltenweise)
$z_{w,0}$	transformiertes Welligkeitsprofil
$z_{w,t}$	Welligkeitsprofil zur Transformation
z_{ze}	Topographie nach dem zweiten Transformationsschritt (zeilenweise)
\tilde{z}	transformierte Daten zur Normalenfertigung
z'	Ableitung von z
z^{**}	um den entsprechenden M -Wert korrigierte Ableitung von z
\tilde{z}_r	Radon-Transformierte von z

Großbuchstaben Lateinisch

A	Fläche
A_0	Amplitude der Fehlerfunktion
A_a	gemessene Ausgangsamplitude
A_e	tatsächliche Eingangsamplitude
\bar{A}_M	gemittelter engster Querschnitt der Messdüse
A_M	engster Querschnitt der Messdüse
A_{Ma}	Faktor Matrizenoptik
AOI	Einfallswinkel von Licht
A_q	Varianz der Streuwinkelverteilung
$A_{q,v}$	virtuell gemessene Varianz der Streuwinkelverteilung
$A_{q,act}$	tatsächlicher A_q -Wert
$A_{q,tar}$	Zielwert für A_q
$A_{q,ms}$	gemessener Wert für A_q
A_V	engster Querschnitt der Vordüse
B_{Ma}	Faktor Matrizenoptik
B_{MO}	Brechungsmatrix Matrizenoptik
C	Schnitttiefe Abbott-Kurve

C_a	Abbott-Kurven-Operator
C_{act}	Schnitttiefe tatsächliche Abbott-Kurve
$C_{c,act}$	Schnitttiefe transformierte 3D-Abbott-Kurve
C_{fit}	gefittete Schnitttiefe Soll-Abbott-Kurve
C_{Ma}	Faktor Matrizenoptik
C_{ms}	Schnitttiefe der gemessenen Abbott-Kurve
C_{tar}	Schnitttiefe Soll-Abbott-Kurve
D	Durchmesser
D_0	Anfangswert der Dioden beim Streulichtsensor
D_c	Durchmesser des Kollimators
D_{Ma}	Faktor Matrizenoptik
D_s	Trägermenge der morphologischen Filterung
E	Elektrische Feldstärke
F	Verteilungskurve Streuwinkel
F_c	Operator der λ_c -Filterung
$F_{G,id}$	ideal gaußförmige Verteilungskurve der Streuwinkel
F_S	Operator der λ_s -Filterung
G	2D-Fourier-Transformierte
G_f	Gerätefunktion (Messgeräteoperator)
$G_{f,SL}$	Gerätefunktion Streulichtsensor
H	Magnetische Feldstärke
H_{DFT}	Histogramm der Fourier-Transformierten
H'_{DFT}	Histogramm der geglätteten Fourier-Transformierten
H_k	Höhenkorrektur EHT
I	Strahlungsintensität
I_0	Anfangsintensität der Strahlung
I_l	Lichtintensität
$I_{l,0}$	Anfangsintensität der Lichtstrahlung
Ind	Indices einer Vektordarstellung
J_{el}	Jones-Vektor
$J_{el,0}$	normierter Jones-Vektor
K	Lichtintensität entlang des Kollimators
K_p	Rauheitskennwert allgemein
L_{MO}	Linienmatrix Matrizenoptik
M	Erwartungswert der Streuwinkelverteilung
M_f	Fertigungsoperator
M_{OA}	Jones-Matrix Objektarm EHT
Mr	Materialanteil
Mr_{act}	tatsächlicher Materialanteil
Mr_{tar}	Zielwert Materialanteil
$Mr1$	Materialanteil1 Wert

$Mr1_{act}$	tatsächlich gemessener Materialanteil1 Wert
$Mr1_{tar}$	Zielwert Materialanteil1
$Mr2$	Materialanteil2 Wert
$Mr2_{act}$	tatsächlich gemessener Materialanteil2 Wert
$Mr2_{tar}$	Zielwert Materialanteil2
M_{RA}	Jones-Matrix Referenzarm EHT
Mr_{ms}	gemessener Materialanteil
N	Brechzahl allgemein
N_0	Brechzahl Umgebungsmedium
N_1	Brechzahl Medium 1
N_2	Brechzahl Medium 2
NA	Numerische Apertur
P	Operator für Rauheitsparameter allgemein
R	universelle Gaskonstante
R_a	arithmetischer Mittenrauwert
$R_{a,cur}$	tatsächlicher arithmetischer Mittenrauwert
$R_{a,ms}$	gemessener arithmetischer Mittenrauwert
$R_{a,tar}$	Zielwert arithmetischer Mittenrauwert
R_b	Radius Übergangsfläche einer Brechung
Re	Reynolds-Zahl
Re_{krit}	kritische Reynolds-Zahl
R_k	Kernrautiefe
$R_{k,act}$	tatsächlich gemessene Kernrautiefe
$R_{k,tar}$	Zielwert Kernrautiefe
R_{ms}	gemessenes Übertragungsverhältnis beim EHT
R_p	Reflexionskoeffizient p -polarisiertes Licht
R_q	quadratischer Mittelrauwert
R_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe
$R_{pk,act}$	tatsächlich gemessene reduzierte Spitzenhöhe
$R_{pk,tar}$	Zielwert reduzierte Spitzenhöhe
$R_{q,tar}$	Zielwert quadratischer Mittelrauwert
R_s	Reflexionskoeffizient s -polarisiertes Licht
R_{rk}	reduzierte Riefentiefe
$R_{rk,act}$	tatsächlich gemessene reduzierte Riefentiefe
$R_{rk,tar}$	Zielwert reduzierte Riefentiefe
R_z	größte Höhe des Profils
$R_{z,cur}$	tatsächliche größte Höhe des Profils
$R_{z,ms}$	gemessener Wert größte Höhe des Profils
$R_{z,tar}$	Zielwert größte Höhe des Profils
S	komplexer Kontrast
S_a	arithmetischer Mittenrauwert flächenhaft

$S_{a,ms}$	gemessener arithmetischer Mittenrauwert flächenhaft
$S_{a,tar}$	Zielwert arithmetischer Mittenrauwert flächenhaft
S_q	quadratischer Mittelrauwert flächenhaft
$S_{q,ms}$	gemessener quadratischer Mittelrauwert flächenhaft
S_{qn}	S_q -Wert bei der Mittelung von n Topographien
S_{qR}	S_q -Wert des Rauschens
$S_{q,tar}$	Zielwert quadratischer Mittelrauwert flächenhaft
S_z	flächenhafte größte Höhe
$S_{z,tar}$	Zielwert flächenhafte größte Höhe
T	Temperatur
T_c	kritische Temperatur
T_{MO}	Translationsmatrix Matrizenoptik
T_r	reduzierte Temperatur
U_p	erweiterte Messunsicherheit eines Messpunktes
$\bar{U}F$	Übertragungsfunktion einer Achse
V	Kalibrierfaktor Ellipso-Höhen-Topometer
V_{kx}	Volumenkraft in x -Richtung
W_{sa}	arithmetische Mittenwelligkeit
$W_{sa,cur}$	tatsächliche arithmetische Mittenwelligkeit
$W_{sa,ms}$	gemessener Wert arithmetische Mittenwelligkeit
$W_{sa,tar}$	Zielwert arithmetische Mittenwelligkeit
X	Eingangsgröße zur Messung allgemein
Y	Messgröße allgemein
Z	Amplitude im Frequenzbereich
Z	Eingangsdatensatz der Topographie für die 3D-Transformation
Z_0	Amplitudenbetrag im Frequenzbereich zur Transformation
$Z_{0,e}$	Betrag Fourier-transformiertes Eingangsprofil zur virtuellen Messung
Z_e	Fourier-transformiertes Eingangsprofil zur virtuellen Messung
Z_G	Fourier-transformiertes virtuell gemessenes Profil
Z_c	Fourier-transformiertes virtuell gemessenes und gefiltertes Profil
Z_{in}	Eingangssignal ARMA-Prozess Frequenzbereich
Z _{ms}	gemessene 3D-Topographie
Z _{ms,int}	Fourier-transformiertes gemessenes und interpoliertes Profil
Z _{ms,filtr}	gemessene und gefilterte 3D-Topographie
Z _{out}	Ausgangssignal ARMA-Prozess Frequenzbereich
Z _p	vorverarbeitete 3D-Topographie
Z _{sp}	3D-Topographie nach erstem Transformationsschritt (spaltenweise)
Z _{ze}	3D-Topographie nach zweitem Transformationsschritt (zeilenweise)
Z	geglättete Amplitude im Frequenzbereich
Z^*	komplexe transformierte Amplitude im Frequenzbereich

Kleinbuchstaben Griechisch

α	Konstante beim Gauß-Filter
α_a	Temperaturausdehnungskoeffizient
α_s	Lichtstrahl-Winkel Matrizenoptik
α_z	Verstärkungskoeffizient der z -Achse
α_{z80}	Verstärkungskoeffizient der z -Achse, innere 80 % der Messpunkte
β	kritisches Druckverhältnis
γ	zugeordneter Winkel einer Diode des Streulichtensors
γ	Streuwinkel
γ_{act}	tatsächlicher Streuwinkel
γ_{NL}	Streuwinkel unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten
γ_{rec}	rekonstruierte Streuwinkel
$\gamma_{sort,act}$	sortierte und transformierte Streuwinkel
$\gamma_{sort,act,g}$	geglättete, sortierte und transformierte Streuwinkel
$\gamma_{t,act}$	transformierte tatsächliche Streuwinkel
δ	Exponent zur Rundungsoperation
ϵ	maximal zulässiges Residuum
ϵ_0	elektrische Feldkonstante
ϵ^*	Dissipation der turbulenten kinetischen Energie
κ	Adiabatenkoeffizient
λ	Wellenlänge
λ_c	Grenzwellenlänge Filter
$\lambda_{c,1}$	erste Grenzwellenlänge
$\lambda_{c,2}$	zweite Grenzwellenlänge
$\lambda_{dom,ms}$	gemessene dominante Welligkeitswellenlänge
$\lambda_{dom,tar}$	Zielwert dominante Welligkeitswellenlänge
λ_{DFT}	Grenzwellenlänge zur Glättung der Fourier-Transformierten
λ_s	kurze Grenzwellenlänge
λ_s^γ	kurze Grenzwellenlänge zur Glättung der Streuwinkelverteilung
λ_w	Wärmeleitfähigkeit
μ	dynamische Viskosität
μ_0	Permeabilitätskonstante
μ_a	Abschwächungskoeffizient Röntgenstrahlung
μ_s^k	k -tes statistisches Moment
ξ	Ortsvariable, z.B. Faltungsintegral
o	Parameter zur Radon-Rücktransformation
π	Kreiszahl
ϑ	Integrationskoordinate
ρ	Dichte
ρ_{el}	ellipsometrisches Verhältnis
$\rho_{el,cal}$	kalibriertes ellipsometrisches Verhältnis

σ	Standardabweichung
σ_{par}	Standardabweichung Rauheitskenngroße
τ	Transformationsvariable Linearitätsnormal
ν	Übertragungsverhältnis
ν_{id}	ideales, virtuelles Übertragungsverhältnis
ν_{nid}	nichtideales, virtuelles Übertragungsverhältnis
ϕ	skalare Erhaltungsgröße
φ	Winkel der Messdüse
φ_{tool}	Öffnungswinkel Werkzeugschneide
$\varphi_{tool,n}$	nomineller Öffnungswinkel Werkzeugschneide
$\varphi_{tool,ms}$	gemessener Öffnungswinkel Werkzeugschneide
χ	Histogramm Streulicht Laufvariable
χ_G	Faktor zum Schwellwert der Rauheitstransformation
ω	Kreisfrequenz
ω_a	azentrischer Faktor
ω_D	dimensionslose Ortsfrequenz
ω_M	dimensionsloses Druckverhältnis über die Vordüse
$\omega_{ms,int}$	Ortsfrequenzen des gemessenen und interpolierten Profils
ω_U	dimensionsloses Druckverhältnis über die Messdüse
ω_x	Ortsfrequenz in x -Richtung

Großbuchstaben Griechisch

Γ_ϕ	Diffusionskoeffizient Erhaltungsgröße ϕ
Δ	Ellipsometrischer Winkel
Δ_{adj}	justierter ellipsometrischer Winkel
Δd	Abweichung Leuchtfleckdurchmesser Streulichtsensor
Δ_{ms}	gemessener ellipsometrischer Winkel
Δpx	durch die Pixelbreite bedingte Punktunsicherheit
Δ_{ref}	Referenzgemessener ellipsometrischer Winkel
Δt	Zeitintervall
Δx	Messpunktabstand in x -Richtung
Δx_{err}	Diskretisierung in x -Richtung zur Darstellung der Fehlerfunktion
Δy	Messpunktabstand in y -Richtung
Δz	diskrete, numerische Ableitung von z
$\Delta z_{m,nid}$	Differenz ideal und nichtideal virtuell gefertigtes Profil
Δz_t	transformierte diskrete, numerische Ableitung von z
Δz_{rec}	rekonstruierte Ableitung von z
ΔC_{act}	Schnitt Höhenänderung in der Abbott-Kurve
ΔC_{tar}	Zielwert Schnitt Höhenänderung in der Abbott-Kurve

ΔH_k	Höhenkorrektur-Term EHT
$\Delta Mr1$	Abweichung Materialanteil1 Wert
$\Delta Mr2$	Abweichung Materialanteil2 Wert
ΔMr	Schrittweite Materialanteil
ΔR_k	prozentuale Abweichung Kernrautiefe
ΔR_{pk}	prozentuale Abweichung reduzierte Spitzenhöhe
ΔR_{vk}	prozentuale Abweichung reduzierte Riefentiefe
ΔT	Temperaturänderung
ΔX	Einzelabweichung einer Eingangsgröße der Messung
ΔY	Gesamtabweichung der Messgröße
$\Delta \gamma$	Winkelschrittweite zwischen Dioden
$\Delta \gamma_{NL}$	Verkippungswinkel des Streulichtensors
$\Delta \bar{v}$	mittlere Abweichung zwischen zwei Übertragungsfunktionen
$\Delta \varphi$	Winkeldiskretisierung pneumatische Abstandsmessung
$\Delta \varphi_{tool,ms}$	Messunsicherheit Öffnungswinkel der Werkzeugschneide
$\Delta \omega$	Schrittweite diskreter Frequenzen
Φ	Dissipationsfunktion
Ψ	Ellipsometrischer Winkel
Ψ_{adj}	justierter ellipsometrischer Winkel
Ψ_{ms}	gemessener ellipsometrischer Winkel
Ψ_{Lin}	Transformation der Linearität
Ψ_{ref}	Referenzgemessener ellipsometrischer Winkel
Ψ_t	Transformationsschritt

Operatoren

$dil(\cdot)$	morphologische Dilatation
$ero(\cdot)$	morphologische Erosion
$fx(\cdot)$	Abrundung
$Im(\cdot)$	Imaginärteil
$ind(\cdot)$	Index
$max(\cdot)$	Maximum
$min(\cdot)$	Minimum
$phase\{\cdot\}$	Phase einer komplexen Zahl
$Re(\cdot)$	Realteil
$round(\cdot)$	Rundung $round(i) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq i < 0,5 \\ 1 & \text{für } 0,5 \leq i \leq 1 \end{cases}$
τ	Transponierung
$\mathfrak{F}\{\cdot\}$	Fourier-Transformation
$\mathfrak{F}^{-1}\{\cdot\}$	inverse Fourier-Transformation

$\mathfrak{R}\{\cdot\}$	Radon-Transformation
$\mathfrak{R}^{-1}\{\cdot\}$	inverse Radon-Transformation
\ominus	morphologische Erosion
\oplus	morphologische Dilatation
∇	Nabla-Operator
*	komplexe Konjugation und Transponierung
$ \cdot $	Betrag
$\bar{\cdot}$	Mittelung

Abkürzungen

AFM	Rasterkraftmikroskop
ARMA	Auto-Regressive Moving-Average
CFD	Computational Fluid Dynamics
CM	Konfokales Mikroskop
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
EHT	Ellipso-Höhen-Topometer
FBK	Lehrstuhl für Fertigungstechnik & Betriebsorganisation, TU Kaiserslautern
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
ITF	Instrumenten-Übertragungsfunktion
KMG	Koordinatenmessgerät
MTS	Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik, TU Kaiserslautern
NA	Numerische Apertur
NMI	Nationales metrologisches Institut
PTB	Physikalisch-technische Bundesanstalt
SI	Internationales Einheitensystem (Système international d'unités)
TSG	Tastschnittgerät
UP	Ultrapräzision
WLI	Weißlichtinterferometer
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
i.d.R.	in der Regel
o.ä.	oder ähnliche(s)
u.a.	unter anderem
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Die Anforderungen an die geometrische Messtechnik steigen immer weiter [Sch09]. Einige dieser künftigen Anforderungen sind in verschiedenen „Roadmaps“ ([Man12], S. 3) [Imk12] zusammengefasst und Gegenstand von Kontroversen in der Wissenschaft.

Auch für Normale und virtuelle Messtechnik werden zukünftige Entwicklungen prognostiziert. So konstatieren Bosse, Koenders und Schmitt, dass für die Zukunft zu erwarten ist, dass durch „Modellierung der Messprozesse“ ([Bos09], S. 31) eine Verbesserung der Messunsicherheit sowie der Vergleichbarkeit zu erwarten ist ([Bos09], S. 31). Dass eine Abschätzung der Messunsicherheit sowie eine „Korrektur systematischer Fehler“ ([Sch08c], S. 298) mithilfe virtueller Messgeräte möglich ist, wurde vielfach festgestellt [Sch08c] [Sch09] [Bos09].

Die steigenden Anforderungen an Messungen führen dazu, dass auch die Kalibrierung verbessert werden muss ([Wec08], S. 288 f.) ([Koe11], S. 170). Nicht nur durch die weitere Verbreitung der 3D-Messtechnik sind neue Ansätze erforderlich: Die Kalibrierung muss eine möglichst große Ähnlichkeit zur späteren Messaufgabe aufweisen, um den hohen Anforderungen gerecht werden zu können, wozu neue Kalibriergeometrien benötigt werden ([See15], S. 44). Ebenfalls ergibt es Sinn, fertigungstechnische Einflüsse sowie die Interaktionen zwischen Geometrienormal und Messgerät während des Messprozesses zu berücksichtigen ([See15], S. 44). Diese drei „Säulen“, siehe **Abbildung 1**, sollen in Zukunft bei der Auslegung von Geometrienormalen mit einbezogen werden und werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

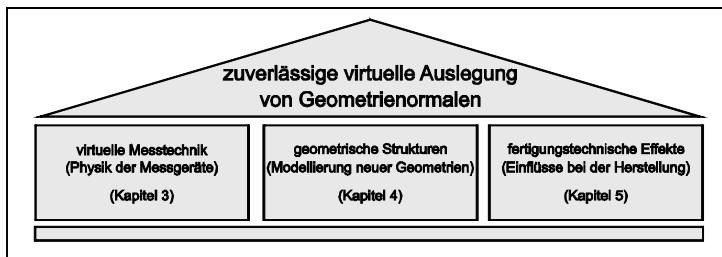


Abbildung 1: Neue Faktoren für die virtuelle Auslegung von Geometrienormalen

Ziel der Arbeit ist es, allgemeine Zusammenhänge zur Auslegung von anwendungsspezifischen Geometrienormalen zu erarbeiten. Nach Vorstellung der untersuchten Messverfahren, einiger physikalischer Ansätze zu deren Modellierung sowie derzeit genutzter Geometrienormale in **Kapitel 2** erfolgt zunächst in **Kapitel 3** eine Auswahl und Weiterentwicklung modellbasierter Beschreibungen der

untersuchten Messverfahren. Diese modellbasierten Beschreibungen stellen die erste Säule nach **Abbildung 1** dar.

Der virtuelle Messprozess umfasst dabei zusätzlich zu den physikalischen Effekten des Messprozesses auch die Beschreibung der Interaktion zwischen Probe und Messgerät ([Sch08c], S. 299). Verschiedene Messgeräte können abweichende Ergebnisse verursachen, da z.B. Nichtlinearitäten auftreten ([Neu11], S. 122). Die Rahmenbedingungen für entsprechende Betrachtungen haben sich durch immer leistungsfähigere Rechnersysteme verbessert ([Lau13], S. 14). Der Einsatz solcher Techniken wird im Zuge der Strategie Industrie 4.0 forciert, die eine immer weitere Vernetzung von Produktionsanlagen sowie eine fortschreitende Virtualisierung von Prozessen beinhaltet ([Sen13], S. 1). Eine Auslegung von Kalibriernormalen kann auch auf diese Weise erfolgen. Grundsätzlich wurde erkannt, dass die Anwendung virtueller Modellierungstechniken im Rahmen von Kalibrierprozessen sinnvoll ist ([Wec08], S. 289). Dies wird in der vorliegenden Arbeit für verschiedene Messverfahren und –prinzipien umfassend untersucht. Die eingesetzten Werkzeuge wie CFD (Computational Fluid Dynamics), Ray-Tracing und die Signalverarbeitung sind dabei grundsätzlich bekannt. Eine systematische Anwendung zur Auslegung von geometrischen Kalibriernormalen ist bisher allerdings nicht in größerem Umfang durchgeführt worden.

Auf Basis dieser modellhaften Überlegungen erfolgt im Rahmen von **Kapitel 4** die eigentliche Entwicklung neuer Geometrienormale. Einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Entwicklung neuer geometrischer Strukturen, die sich stärker an der Anwendung orientieren sollen. Häising erkannte bereits 1965, dass es sinnvoll ist „die praktischen Vorzüge der geometrischen Normale mit dem Charakter wirklicher Werkstückoberflächen zu vereinigen“ ([Häs65], S. 380). Bis heute aber sind Normale meist künstlich generierte Oberflächen, deren Charakter weit von der späteren Messaufgabe entfernt ist und es erfolgt keine systematische Auslegung. Es werden neue Geometrien vorgestellt (Säule 2), bei denen in der Regel eine gemessene Oberfläche zugrunde gelegt wird ([See15], S. 44).

Kapitel 5 beschäftigt sich mit fertigungstechnischen Einflüssen, welche die dritte Säule repräsentieren. Diverse neue und verbesserte Fertigungsprozesse arbeiten „mit Nanometer-Präzision“ ([Ehr11], S. 142); dies kann zur Optimierung der Geometrienormale und Kalibrierprozesse genutzt werden ([Ehr11], S. 150).

Die entwickelten Geometrienormale müssen bewertet werden. Ebenfalls sollten Überlegungen für den praktischen Einsatz erfolgen. In **Kapitel 6** werden dazu Messunsicherheiten und Kalibriervorgänge betrachtet. Dies erfolgt theoretisch mit Unsicherheitsbilanzen, durch virtuelle Messungen sowie durch reale Messergebnisse. Mithilfe dieser Betrachtungen können letztendlich eine Beurteilung

der Qualität der generierten Normale sowie eine Verifikation der getroffenen Annahmen erfolgen.

Letzter Schritt ist die Erstellung eines allgemeinen Leitfadens für die modellbasierte Entwicklung von Geometrienormalen, vgl. **Kapitel 7**. Abschließend soll, nach der Vorstellung spezieller Ansätze für Messverfahren, das Vorgehen wieder auf eine allgemeine Form zurückgeführt werden. Dabei werden ganzheitliche Prinzipien entwickelt, die ohne Festlegung auf ein bestimmtes Messverfahren eingesetzt werden können. Ziel ist eine möglichst allgemeine Darlegung und Optimierung einer modellbasierten Generierung von Normalen. Insgesamt kann die Arbeit dabei neue Ergebnisse liefern, die sinnvollerweise in eine Normung zu überführen sind.

2 Stand der Technik

Im Abschnitt „Stand der Technik“ werden die untersuchten Messverfahren, Ansätze zu deren virtueller Modellierung sowie derzeit genutzte Geometrienormale und Kalibrierstrategien vorgestellt.

2.1 Charakterisierung von Gestaltabweichungen

Die Norm DIN 8580 definiert, dass jedes Fertigungsverfahren „zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern“ ([8580], S. 4) dient. Mit dem Begriff Geometrie ist dabei auch die Oberfläche gemeint. Zur Definition der Oberfläche wurde von Stout et. al. folgendes festgestellt:

„The surface of a solid is that part of the solid that represents the boundaries between the solid body and its environment.“ ([Sto00], S. 11)

Auch in der Definition in DIN EN ISO 4287 repräsentiert die Oberfläche die Abgrenzung eines Körpers von seiner Umgebung ([4287], S. 7), nach Koenders und Seewig steht eher die Interaktion mit ihrer Umgebung im Vordergrund ([Koe13], S. 47).

Die Wichtigkeit der Oberfläche für ein Bauteil wird nach Leach dadurch klar, dass etwa 10% aller Bauteile aufgrund von Effekten versagen, die mit ihrer Oberfläche in Verbindung gebracht werden können ([Lea11a], S. 1). Die Bauteiloberfläche ist nach Blunt weiterhin für 90% aller Versagensfälle verantwortlich ([Blu03], S. 2). Dies zeigt übereinstimmend, dass die geometrische Produktspezifikation (GPS), die sich mit der Erfassung von Oberflächen beschäftigt, ein wichtiges Teilgebiet der Ingenieurwissenschaften ist.

Zwischen „idealer“ bzw. geometrischer Oberfläche und wirklicher Oberfläche treten immer Gestaltabweichungen auf, da kein Fertigungsprozess ohne Abweichungen arbeitet ([Bod92], S. 4). Die wirkliche Oberfläche ist dabei definiert als „Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihn umgebenden Medium trennt“ ([4760], S. 1). Die ideale Oberfläche gemäß den Vorgaben wird als geometrische Oberfläche bezeichnet ([4760], S. 1). Die Istoberfläche wird beschrieben als das „meßtechnische erfaßte, angenäherte Abbild der wirklichen Oberfläche eines Formelements“ ([4760], S. 1). Ausgehend davon sind Gestaltabweichungen „die Gesamtheit aller Abweichungen der Istoberfläche von der geometrischen Oberfläche“ ([4760], S. 1).

Die Charakterisierung dieser Gestaltabweichungen ist eine elementare Aufgabe der geometrischen Messtechnik. Zu diesem Zweck gibt es verschiedenste Messverfahren und -prinzipien (vgl. **Kapitel 2.2**).

DIN 4760 definiert ein Ordnungssystem sowie Begriffe für diese Gestaltabweichungen ([4760], S. 2). Eingeteilt werden die Gestaltabweichungen nach ihrer Größenordnung, vgl. **Abbildung 2** ([4760], S. 2). Formabweichungen sind Gestaltabweichungen 1. Ordnung, zu deren Feststellung die komplette Istoberfläche untersucht werden muss ([4760], S. 1). Gestaltabweichungen höherer Ordnung können schon bei der Betrachtung eines Ausschnittes der Ist-Oberfläche detektiert werden ([4760], S. 1). Welligkeit ist meist periodisch und wird als Gestaltabweichung 2. Ordnung bezeichnet, Rauheit repräsentiert die 3.-5. Ordnung ([4760], S. 1 f.). Die 6. Ordnung beschreibt „die durch den Aufbau der Materie bedingten Abweichungen“ ([4760], S. 1). Da meist nur bestimmte Gestaltabweichungen von Interesse sind, erfolgt eine Trennung nach Wellenlängen entsprechend der einzelnen Ordnungen. Hinweise zur Ausführung dieser Trennung sind in **Anhang A**: Trennen von Gestaltabweichungen gegeben.

Die genannten Gestaltabweichungen sollen zuverlässig detektiert werden können. Dazu müssen Messgeräte kalibriert werden. Unter Kalibrieren wird dabei das „Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Meßwert [...] und dem zugehörigen [...] richtigen Wert [...] der [...] Meßgröße“ ([1319-1], S. 22) verstanden. Auf Basis des Kalibriervorgangs ist es außerdem möglich, Messabweichungen vorherzusagen ([1319-1], S. 22).





Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits-, Abweichung, u.a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstücks, falsche Einspannung des Werkstücks, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen (siehe DIN 4761)	außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräsers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen Schuppen Kuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffs	

Abbildung 2: Gestaltabweichungen in DIN 4760 ([4760], S. 2)

Zur Ausführung dieser Kalibrierung können Geometrienormale genutzt werden ([1319-1], S. 22), welche in **Kapitel 2.4** betrachtet werden. Normale dienen dazu, Unsicherheitsbilanzen abzuleiten und eine entsprechende Korrektur des Messgerätes zu ermöglichen ([25178-70], S. 6).

Die Eigenschaft der „metrologischen Rückführbarkeit“ ([VIM10], S. 42) ist dabei ein zentrales Konzept in der Metrologie. Ist diese ausreichend erfüllt, so kann das gewonnene Messergebnis mithilfe einer „Kette von Kalibrierungen“ ([VIM10], S. 42) mit einem zugehörigen Referenzwert, der z.B. durch ein Normal verkörpert wird, in Verbindung gebracht werden ([VIM10], S. 42).

2.2 Untersuchte Messverfahren

Es wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung von Normalen verfolgt. Dies bedeutet auch, dass verschiedene Messverfahren und –prinzipien ihre Berücksichtigung finden. Die Messverfahren, deren Kalibrierprozesse untersucht werden, sind nachfolgend vorgestellt. Als Einführung wird ein Überblick über derzeitige Tendenzen in der Messtechnik gegeben, welche als Ausgangspunkt für spätere Überlegungen dienen. Anschließend werden die einzelnen Messprinzipien knapp erläutert.

2.2.1 Tendenzen in der Messtechnik

Die Ansprüche an Bauteile selbst sowie an die entsprechende Messtechnik wachsen weiter ([Sch09], S. 44). So wird immer häufiger verlangt, direkt in der Fertigung zu messen, um die geforderte Wertschöpfung zu erzielen ([Sch08a], S. 57 ff.).

Auch die Oberflächen selbst werden komplexer: Traditionell wurden für Oberflächen stochastische Muster gewählt, mittlerweile wird jedoch mehr und mehr dazu übergegangen, klar vorgegebene Strukturen zu erzeugen, um bestimmte Eigenschaften einer Oberfläche abzubilden ([Lea13a], S. 4 f.). Dabei können auch isotrope Strukturelemente vorliegen ([Peh11], S. 457). Somit ist klar, dass 2D-Messverfahren keine ausreichenden Informationen für viele funktionelle Oberflächen bereitstellen ([Lea13a], S. 4).

Nicht nur die Oberflächen selbst, auch die Messungen orientieren sich immer stärker an der Funktion des Bauteils ([Har13], S. 285) ([Sto00], S. 281 ff.). Dabei werden die Messdaten nicht nur mit den Solldaten verglichen, sondern in Anbetracht von Funktionsanforderungen an das Bauteil geprüft ([Har13], S. 288).

Traditionell wird Rauheit mithilfe von Tastschnittgeräten beurteilt ([Bod92], S. 2). Da es das am stärksten erforschte Messverfahren ist ([Man13], S. 133 f.), ist es für die industrielle Anwendung nach wie vor das gängigste Verfahren ([Lon96], S. 590) und zur Beurteilung vieler Oberflächen völlig ausreichend. Unter Umständen problematisch dabei ist, dass nur Informationen über einen einzigen Profilschnitt gewonnen werden: Wenn allerdings der Effekt der Statistik der Oberfläche verringert werden soll, bieten sich 3D-Topographiemessungen an ([Lea13a], S. 6). Mit einem Profil werden also nur selten zuverlässige Aussagen über eine Oberfläche getroffen ([Lon96], S. 590). Die Entwicklung neuer Messgeräte und Rechner hat zu einer Verbreitung der 3D-Technik geführt, welche aufgrund dieser vorherigen technischen Beschränkungen erst seit Ende der 80er-Jahre sinnvoll eingesetzt werden kann ([Lon96], S. 589). Wesentliche Beiträge zum Fortschritt der 3D-Messtechnik wurden von Stout et.al. [Sto00] und Blunt et. al. [Blu03] geliefert.

Da bei den immer komplexeren Oberflächen häufiger 3D-Messungen nötig sind, werden optische Verfahren immer interessanter ([Hoc05], S. 169) ([Lea04], S. 1246). Es ist schon seit langer Zeit die Tendenz zu erkennen, dass immer mehr optische Messgeräte für die Rauheitsmessung eingesetzt werden ([Bod92], S. 2).

Aus der stärkeren Verbreitung der 3D-Messung ergeben sich auch neue Herausforderungen für Kalibriernormale ([Blu05], S. 434), an denen diese Arbeit unter anderem ansetzen soll. Dabei werden drei grundsätzliche Messprinzipien untersucht: taktile, optische und pneumatische Messverfahren. Die einzelnen Verfahren zur Messung von Oberflächen werden nachfolgend vorgestellt.

2.2.2 Tastschnittverfahren

Das Tastschnittverfahren ist wohl die älteste Technik zur Erfassung von Profilschnitten und wird bereits seit den 1930er Jahren genutzt ([Sto00], S. xxi). Heute ist das Verfahren in DIN EN ISO 3274 [3274] profilhaft und in DIN EN ISO 25178-601 [25178-601] flächenhaft genormt.

Das Tastschnittverfahren ist immer noch eine sehr weit verbreitete Messtechnik ([Sto00], S. 30). Es basiert auf einem großen vorhandenen Erfahrungsschatz und so handelt es sich um das „metrologisch und physikalisch am besten verstandene“ ([Man13], S. 133 f.) Messverfahren. Nachteil des Verfahrens ist, dass es nur für profilhafte Messungen wirklich geeignet ist. Die Messung einer 3D-Topographie in entsprechender Auflösung ist in einer akzeptablen Messzeit nicht möglich ([Lea10], S. 126) ([Peh11], S. 457 f.).

Der grundsätzliche Aufbau eines taktile arbeitenden Sensors ist in **Abbildung 3** ([3274], S. 5) dargestellt. Bei der Messung wird eine Tastspitze mit dem Radius r_{tip} ,

die an einem Vorschubgerät befestigt ist, mit einer Messkraft über das Messobjekt geführt. Die Auslenkung dieser Tastspitze entlang des „Schnittes“ wird aufgenommen und führt auf das ertastete Profil ([Lon02], S. 708). Optional führt bei Gleitkufentastsystemen die Gleitkufe auf das Referenzprofil, das die langwelligen Komponenten aus dem gemessenen Profil entfernt ([Vol13b], S. 79). Das Signal wird gewandelt, verstärkt und digitalisiert, was auf das Gesamtprofil führt ([3274], S. 5). Nach der Entfernung der Nennform und Anwendung des λ_s -Filters (vgl. **Anhang A**: Trennen von Gestaltabweichungen) ergibt sich das Primärprofil ([3274], S. 4), das nach DIN EN ISO 4287 [4287] ausgewertet werden kann.

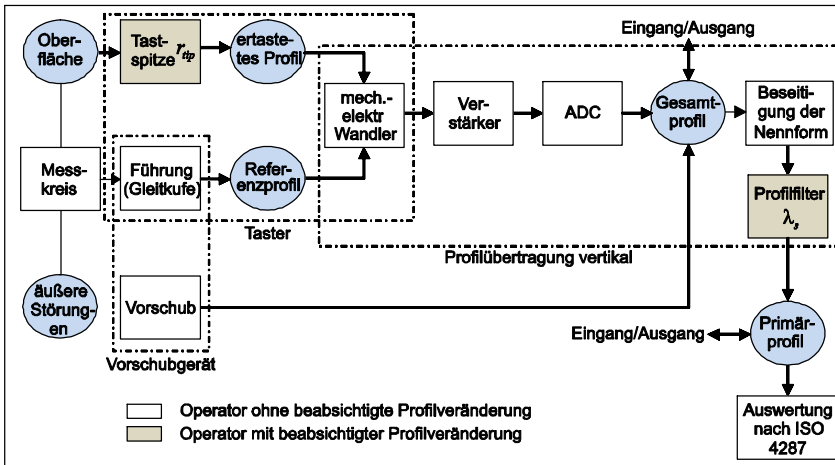


Abbildung 3: Taktiles Messgerät nach DIN EN ISO 3274 ([3274], S. 5) und Gröger ([Grö07], S. 30)

Der Messkreis des Verfahrens ist in **Abbildung 4** ([3274], S. 6) dargestellt. Dieser umfasst neben dem Taster und dem Vorschubgerät auch die Säule des Messgerätes, die Grundplatte, die Auflage des Werkstücks und das Werkstück selbst ([3274], S. 6). Das Verfahren eignet sich zur Detektion von Gestaltabweichungen verschiedener Wellenlängen: Rauheit, Form und Kontur können erfasst werden ([Frü98], S. 293).

Eingesetzt werden dabei auch kombinierte Form- und Rauheitsmessgeräte auf Basis der taktilen Technik [Vol13a]. Für eine detaillierte Ausführung des Messverfahrens wird auf einschlägige Literatur ([3274] [25178-601] [Bod92] [Grö07] [Lon02] [Vol13b]) verwiesen. Die Kalibrierung sowie die virtuelle Modellierung dieses Verfahrens werden später noch eingehender betrachtet (vgl. **Kapitel 2.4.3.1, 3.1 und 4.1**).

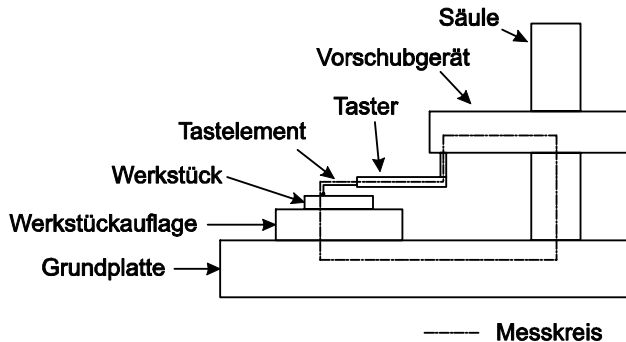


Abbildung 4: Messkreis des Tastschnittgeräts nach DIN EN ISO 3274 ([3274], S. 6)

2.2.3 Ellipso-Höhen-Topometer

Die Idee zum Messgerät des Ellipso-Höhen-Topometers (EHT) wurde von Leonhardt [Leo91] [Leo98] [Leo99] [Leo01] [Leo03] [Leo10] entwickelt und schaltet durch die Kombination von Weißlichtinterferometrie und Ellipsometrie ([Leo03], S. 513) einige Schwierigkeiten der konventionellen Weißlichtinterferometrie aus ([Leo10], S. 623).

Das untersuchte Gerät nutzt die Eigenschaften dieser beiden unterschiedlichen Messprinzipien ([Leo03], S. 513), die als grundlegende Verfahren zunächst separat erläutert werden, bevor ihre Kombination zum EHT beschrieben wird. Das Verfahren der Weißlichtinterferometrie wird später auch für separate Betrachtungen eingesetzt.

2.2.3.1 Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie stellt ein häufig genutztes, optisches Messverfahren dar ([Xie12], S. 229), das in der Norm DIN EN ISO 25178-604 [25178-604] beschrieben wird. Grundprinzip der Weißlichtinterferometrie ist die Messung der Oberfläche unter Anwendung von Weißlicht. Licht weist Welleneigenschaften auf, mit deren Einsatz sich z.B. Höheninformationen der Oberfläche gewinnen lassen ([Gro11b], S. 168).

Die Auflösung des Verfahrens in der Höhenachse ist extrem hoch und liegt im Nanometer-Bereich ([Dec95], S. 147 ff.), in lateraler Richtung hingegen liegt sie aufgrund von Beugungseffekten im Bereich der eingesetzten Wellenlänge ([Xie12], S. 230).

Beim interferometrischen Messprinzip fällt Licht auf einen Strahlteiler und wird in einen Strahl zum Messobjekt („Objektstrahl“) und einen Strahl zum Referenzspiegel („Referenzstrahl“) aufgeteilt ([25178-604], S. 27). Der Referenzstrahl wird vom Referenzspiegel zurückgeworfen und mit dem Objektstrahl, der seinerseits mit dem Messobjekt interagiert hat, zum Gesamtsignal überlagert ([25178-604], S. 26). Je

nach Phasenverschiebung der beiden Strahlen kann dann eine Verstärkung (konstruktive Interferenz) ([Dem13], S. 305) oder eine Abschwächung (destruktive Interferenz) ([Dem13], S. 306) auftreten. Das Gesamtsignal wird von einer Kamera erfasst, aus deren Intensitätssignal die Weglängendifferenz der beiden Strahlen extrem genau berechnet werden kann ([Gro11b], S. 168).

Ein Grundaufbau des speziellen Verfahrens der Weißlichtinterferometrie nach de Groot ([Gro11a], S. 190), der das beschriebene interferometrische Messprinzip realisiert, wird in **Abbildung 5** ([Gro11a], S. 190) dargestellt. Das eingesetzte Mirau-Objektiv wird dabei mithilfe einer Scan-Einrichtung in z -Richtung verfahren ([Gro11a], S. 190). Wird mit einer solchen Rasterung verschiedener Höhenwerte entweder des Objektivs oder des Messobjekts eine Variation der Länge des Objektsstrahls herbeigeführt und die gemessene Intensität eines einzelnen Punktes über dem Höhenwert dargestellt, so ergibt sich das sogenannte „Korrelogramm“ ([Xie12], S. 230) ([Dec95], S. 148).

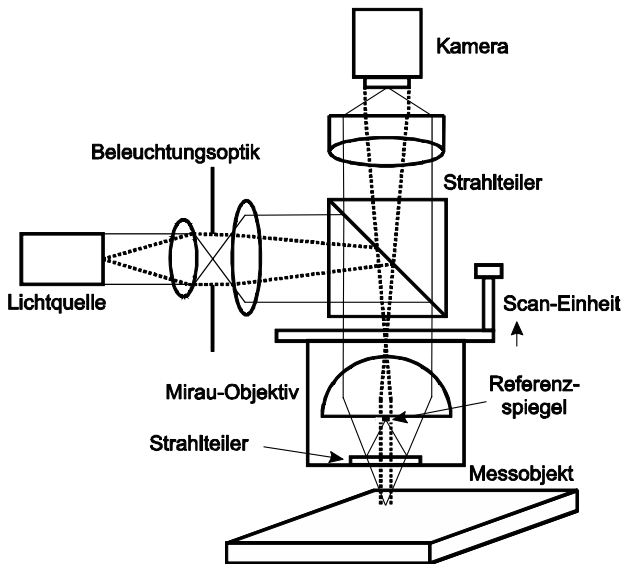


Abbildung 5: Grundaufbau eines Weißlichtinterferometers nach de Groot ([Gro11a], S. 190)

Zur Auswertung wird an jedem Messpunkt die Einhüllende des Korrelogramms berechnet ([Xie12], S. 230), die bereits eine Ermittlung des zugehörigen Höhenwertes auf Basis der Position ihres Maximums erlaubt ([Gro11a], S. 187). Diese Einhüllenden-Auswertung kann allerdings unerwünschte Abweichungen verursachen ([Gro11a], S. 198), so dass meist weiterhin eine Phasenauswertung

[Gro95] des Korrelogramms durchgeführt wird, mit der die Höhe des Topographiepunktes Nanometer-genau ermittelt werden kann ([Xie12], S. 230) ([Gro95], S. 389). Da die Phasenverschiebung der beiden Strahlen mit 2π periodisch ist ([25178-604], S. 28), liegt nach Lokalisierung der Einhüllenden die Periode zur Auswertung fest ([Xie12], S. 230) ([Gro11a], S. 198). Ergebnis der Auswertung ist die 3D-Topographie des Messobjekts $z(x, y)$ ([Gro95], S. 397).

Eine verfahrensbedingte Quelle für Abweichungen bei der Weißlichtinterferometrie ist die Tatsache, dass bei der Interaktion mit einer Oberfläche, die Materialkontraste aufweist, Phasenverschiebungen und so auch virtuelle Höhenabweichungen hervorgerufen werden ([Gao08], S. 2) ([25178-604], S. 31) ([Leo01], S. 413). Somit haben die optischen Materialeigenschaften einen Einfluss auf die gemessene Topographie, sobald mehr als ein Material vorliegt ([Gao08], S. 2).

Im folgenden Kapitel wird die Ellipsometrie beschrieben, mit der die Messung dieser Materialeigenschaften durchgeführt werden kann ([Bra95], S. 30). Für die grundsätzliche Thematik des weißlichtinterferometrischen Verfahrens wird weiterhin auf vorhandene Literatur verwiesen [Dec95] [Gro95] [Gro06] [Gro11a] [Xie12] [25178-604] [Ber08].

2.2.3.2 Ellipsometrie

Oberflächen können auch mit der Ellipsometrie untersucht werden, welche mithilfe der Polarisations-eigenschaft von Licht Informationen über das Messobjekt liefern kann ([Azz10], S. 16.2). Es werden zwei orthogonal zueinander stehende Polarisationszustände s und p genutzt, deren Reflexionskoeffizienten R_s und R_p , das sogenannte ellipsometrische Verhältnis ρ_{el} beschreiben ([Azz10], S. 16.2 f.):

$$\rho_{el} = \frac{R_p}{R_s}. \quad (1)$$

Dieses Verhältnis kann zur Charakterisierung der Oberfläche genutzt werden, ist allerdings auch von der eingesetzten Beleuchtung abhängig (von ihrer Wellenlänge λ und ihrem Einfallswinkel AOI) ([Azz10], S. 16.3). Da es sich bei dem Verhältnis ρ_{el} um eine komplexwertige Zahl handelt, kann es wie folgt ausgedrückt werden ([Azz10], S. 16.3):

$$\rho_{el} = \tan(\Psi) \cdot e^{j\Delta}. \quad (2)$$

Die Winkel Ψ und Δ werden als „ellipsometrische Winkel“ bezeichnet und geben entsprechend der Darstellung als komplexe Zahl das Verhältnis der Beträge ($\tan(\Psi)$) sowie die Phase (Δ) zwischen den beiden komplexen Reflexionskoeffizienten an ([Azz10], S. 16.3).

Ein typischer Aufbau eines Ellipsometers sieht einen Strahlengang zunächst durch einen Polarisator und einen Kompensator vor ([Hum05], S. 10). Die zu messende Oberfläche wird dann mit dem Winkel AOI und einer nunmehr festgelegten Polarisation beleuchtet ([Hum05], S. 10). Der von der Oberfläche reflektierte Strahl hat eine neue Polarisation, welche, nachdem sie hinter einem Analysator gemessen wurde, Aussagen über das Material der Oberfläche ermöglicht ([Hum05], S. 10).

Materialeigenschaften können dann folgendermaßen ermittelt werden: Wird z.B. das Auftreffen von Licht auf ein Medium 1 untersucht ([Azz87], S. 270 f.), so ergibt sich für die komplexe Brechzahl dieses Mediums ([Azz87], S. 274):

$$N_1 = N_0 \tan(AOI) \cdot \sqrt{1 - \frac{4\rho_{el}}{(1 + \rho_{el})^2} \sin^2(AOI)}, \quad (3)$$

wobei N_0 die Brechzahl des Umgebungsmediums, in der Regel Luft, beschreibt ([Azz87], S. 274). Die entsprechenden Modelle werden in **Kapitel 3.2.2** erläutert.

2.2.3.3 Kombination zum Ellipso-Höhen-Topometer (EHT)

Ein Problem der Weißlichtinterferometrie wurde aufgezeigt: Materialkontraste auf dem Messobjekt können zu einer verfälschten Erfassung der Topographie führen, da Phasensprünge des Lichts auftreten ([Gao08], S. 2).

Abhilfe kann dabei eine Kombination der beiden zuvor genannten Verfahren schaffen, was von Leonhardt 1991 als „Mikro-Ellipso-Höhen-Profilometrie“ [Leo91] vorgestellt und später zur Topometrie erweitert wurde [Leo98] [Leo99] [Leo01] [Leo03] [Leo10].

Ziel ist dabei eine Korrektur der auftretenden Phasensprünge mithilfe der durch die Ellipsometrie zusätzlich bereitgestellten Information ([Leo99], S. 113). Besonderheit des Messgerätes ist die Tatsache, dass eine Erfassung sowohl von 3D-Topographie $z(x, y)$, als auch der Materialcharakteristika $\Delta(x, y)$ sowie $\Psi(x, y)$ zeitgleich und ortsgleich durchgeführt wird ([Leo03], S. 513). Zur angestrebten Materialerkennung und Korrektur der Topographie dienen die aus diesen Daten ermittelte ortsaufgelöste Brechzahl $N(x, y)$ und Schichtdicke $t_s(x, y)$ ([Leo03], S. 513).

Der eingesetzte Messaufbau wird in **Abbildung 6** ([Leo03], S. 514) dargestellt. Nach Leonhardt liegt dem Aufbau das folgende Funktionsprinzip zugrunde: Polarisiertes Licht fällt auf einen Strahlteiler und trifft danach auf einen Referenzspiegel bzw. unter einem Winkel AOI auf das Messobjekt ([Leo03], S. 514). Anschließend werden die Strahlen überlagert und durchlaufen einen Analysator, bevor sie auf die CCD-Kamera treffen ([Leo03], S. 514). Das Messobjekt kann mithilfe eines Piezo-Kristalls in der Höhe verfahren werden ([Leo03], S. 514).

Für weitere grundsätzliche Ausführungen zum Messprinzip sei auf die Veröffentlichungen von Leonhardt verwiesen [Leo91] [Leo98] [Leo99] [Leo01] [Leo03] [Leo10].

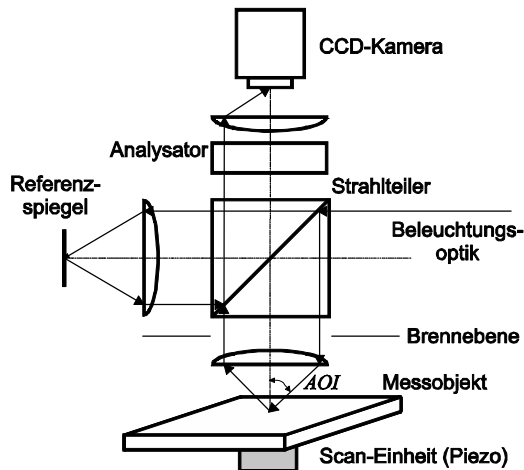


Abbildung 6: Prinzip des EHT nach Leonhardt ([Leo03], S. 514)

2.2.4 Konfokale Mikroskopie

Für eine Reihe messtechnischer Anwendungen eignet sich die konfokale Mikroskopie, mit der auch steile Kanten erfasst werden können ([Art11], S. 237). Beim Grundprinzip der konfokalen Mikroskopie fällt ein feiner Lichtstrahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel bzw. Strahlteiler und das Objektiv auf das Messobjekt, wo das Licht reflektiert wird ([25178-602], S. 23 f.). Am Spiegel erfolgt eine Umlenkung des Strahls, bevor er auf eine Lochblende trifft, hinter der sich ein Detektor befindet ([25178-602], S. 23 f.). Die einzelnen optischen Komponenten sind dabei so angeordnet, dass bei einem fokussierten Lichtpunkt auf der Oberfläche das meiste Licht durch die Lochblende fällt ([25178-602], S. 24).

Ein Beispiel für den Aufbau eines solchen Messgeräts zur Topographie-Erfassung wird in **Abbildung 7** ([Art11], S. 254) dargestellt. Darin wird das beschriebene Grundprinzip umgesetzt und ein axiales Scan-System, z.B. ein Piezo-Aktuator ([Hoc05], S. 178) eingesetzt, mit dem das Objektiv in z -Richtung bewegt werden kann ([Art11], S. 254).

Wird ein Bilderstapel in verschiedenen Höhenpositionen der Objektivlinse aufgenommen und die Intensität für ein einzelnes Pixel über der Scan-Position

aufgetragen, ergibt sich die sogenannte Konfokalkurve, anhand deren Maximum eine Zuordnung eines Höhenwertes zum Messpunkt erfolgt ([Art11], S. 240 f.) ([Lea10], S. 135 f.). Aus einzelnen Messpunkten kann dann zum Beispiel eine Topographie-Messung zusammengesetzt werden ([Art11], S. 241).

Zur schnellen Messung wird eine durchlöchernte „Scanning Disc“, z.B. eine Nipkow Scheibe eingesetzt, die entlang einer Trajektorie viele kleine „Lochblenden“ zur Messung zur Verfügung stellt ([Art11], S. 253). Rotiert die Scheibe, kann eine sehr schnelle Erfassung der Oberfläche erfolgen, wobei eine CCD-Kamera die gemessenen Intensitäten detektiert ([Art11], S. 253).

Polarisator und Analysator dienen dazu, die Lichtanteile, die kein Pinhole passieren, vor der Auswertung herauszufiltern ([Art11], S. 253).

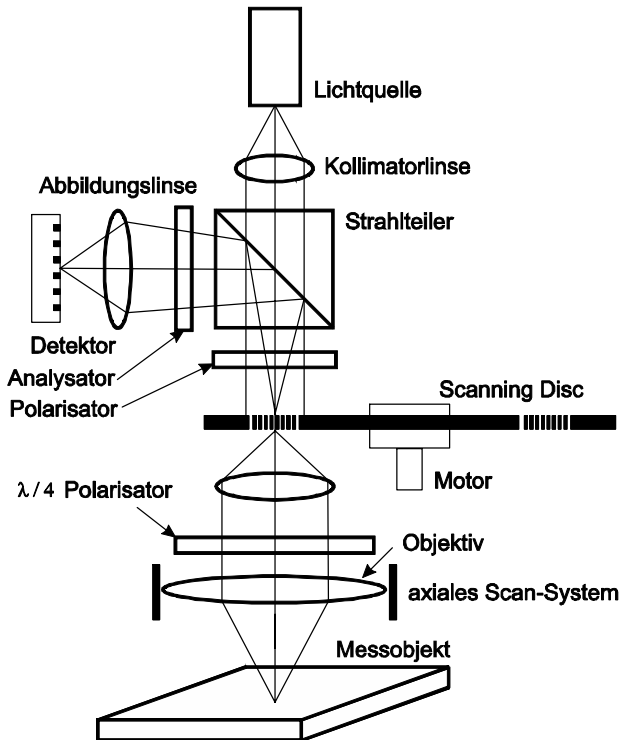


Abbildung 7: Konfokales Mikroskop Typ „Disc Scanning“ (DSCM)
nach Artigas ([Art11], S. 254)

2.2.5 Streulichtmessverfahren

Der Bedarf an Sensoren zur Geometrieerfassung, die in der Fertigungsumgebung eingesetzt werden können, steigt immer weiter ([See09], S. 1). Vorschriften zur Anwendung der Streulichtmesstechnik sind in der Empfehlung VDA 2009 gegeben [VDA09]. Da beim Einsatz der winkelauflösenden Streulichtmesstechnik keine direkte Messung der Geometrie, sondern stattdessen eine Charakterisierung der Winkelverteilung durchgeführt wird, zeichnet sie sich durch die hierzu benötigte hohe Robustheit aus ([VDA09], S. 2 f.). Diese Erfassung der Winkel unterscheidet das Verfahren von den bisher vorgestellten Messprinzipien.

Charakteristisch bei der Streulicht-Technik ist die Tatsache, dass ein integraler Ausschnitt der Topographie mit einer Messung bewertet werden kann ([Vor11], S. 287). Als Grundprinzip liegt dem Messverfahren die Tatsache zugrunde, dass es einen Zusammenhang zwischen der Rauheit einer Oberfläche und ihrer Lichtstreuung gibt ([Vor11], S. 287).

Der Aufbau des winkelauflösenden Streulichtsenors wird in **Abbildung 8** ([VDA09], S. 3) gezeigt. Licht wird kollimiert und trifft auf das Messobjekt, wo es gestreut wird ([VDA09], S. 3). Anschließend trifft das Licht dann auf eine Diodenzeile, deren einzelne Intensitäten eine Aussage über die Winkelverteilung der Oberfläche erlauben, wobei jede Diode einem definierten Winkel γ zugeordnet werden kann ([VDA09], S. 3).

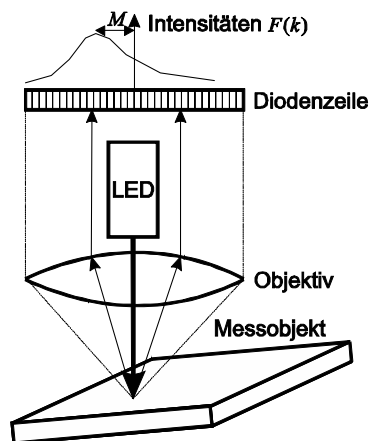


Abbildung 8: Anordnung des winkelauflösenden Streulichtsenors nach VDA 2009 ([VDA09], S. 3)

Ein Parameter zur Beurteilung der Rauheit ist die Varianz der Streuwinkelverteilung A_q ([VDA09], S. 5). Diese ist mit dem Korrekturfaktor k_F , den Streuwinkeln

$\vec{\gamma}' = \tan(\vec{\gamma})$ (bedingt durch das eingesetzte $f-\Theta$ -Objektiv), $\vec{\gamma}' = (\gamma'_i)$, $i=1,2,\dots,n$ sowie der zugehörigen normierten Verteilungskurve $\vec{F}(\gamma') = (F(\gamma'_i))$, $i=1,2,\dots,n$ (bzw. $F(k)$ für die k -te Diode) und ihrer mittleren Lage M wie folgt definiert ([VDA09], S. 4 f.):

$$A_q = k_F \cdot \sum_{i=1}^n (\gamma'_i - M)^2 \cdot F(\gamma'_i). \quad (4)$$

Detaillierte Ausführungen zur Streulichtmesstechnik sind in der Literatur vorhanden [See09] [Vor11].

2.2.6 Computertomographie

Das traditionell aus dem medizinischen Bereich stammende, zerstörungsfrei arbeitende Verfahren der Computertomographie (CT) wurde in jüngerer Zeit für den industriellen Einsatz entdeckt ([Bar07], S. 495). Besonderheit der CT ist die Möglichkeit, auch Strukturen im Inneren von Bauteilen zu erfassen ([Car12], S. 491). Die Technik ist vor allem für den Bereich der Koordinatenmesstechnik interessant ([Bar13], S. 1 f.).

Der grundlegende Aufbau der entsprechenden Messeinrichtung nach VDI 2630 ist in **Abbildung 9** ([VDI14], S. 3) gezeigt. Röntgenstrahlen treten aus einer Quelle aus und durchdringen geradlinig das Messobjekt, welches bei der industriellen Messtechnik auf einem Rotationstisch angebracht ist ([Bar07], S. 495). Ein Detektor ermittelt Informationen zur Abschwächung der Strahlung durch das Messobjekt, die der Auswerteeinheit zugeführt wird ([Bar07], S. 495).

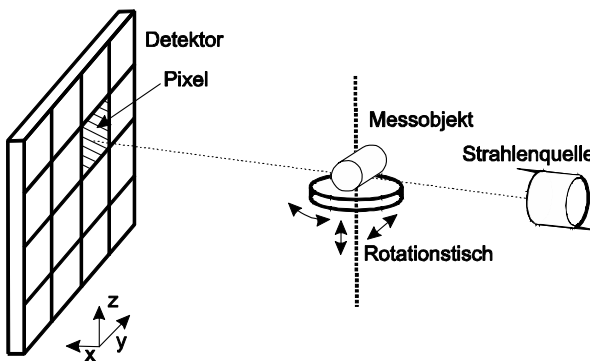


Abbildung 9: Grundaufbau industrielle CT-Anlage nach VDI 2630, Blatt 1.1 ([VDI14], S. 3)

Die Restintensität $I(x)$ der Strahlung ist nach dem Beer-Lambert-Gesetz von dem Abschwächungskoeffizienten des durchdrungenen Materials μ_a sowie der Anfangsintensität I_0 abhängig ([Kru11], S. 825):

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu_a \cdot x} . \quad (5)$$

In der Auswertung wird die Geometrie mit dem ortsaufgelösten Abschwächungskoeffizienten rekonstruiert, was Aufschluss über die vorhandenen Materialien zulässt ([VDI14], S. 25). Diese Auswertung ist ein gutes Beispiel für die Anwendung der Radon-Transformation, da der gemessene 3D-Körper auf Basis verschiedener 2D-Projektionen des rotierenden Messobjektes gewonnen wird ([Car12], S. 491).

Das Verfahren funktioniert sicher im industriellen Bereich: Abweichungen des CT-Verfahrens liegen im Regelfall unterhalb der Voxelgröße ([Car12], S. 494). Der Begriff „Voxel“ bezeichnet dabei die diskretisierten Volumenelemente der Abbildung ([Buz08], S. 219). Erste Begriffe und Vorschriften zum industriellen Einsatz finden sich in der VDI Richtlinie 2630 Blatt 1.1 [VDI14], weitere Informationen in einschlägiger Literatur [Bar07] [Buz08] [Car12] [Kru11] [Bar13].

2.2.7 Pneumatische Abstandmessung

Müssen Messaufgaben in rauen Umgebungen, wie bei der Inprozessmesstechnik, gelöst werden, eignet sich die pneumatische Abstandsmessung ([Sch13a], S. 51). Bei diesem Verfahren ist im Messprozess bereits eine Reinigung des Messobjektes inbegriffen ([Sch13a] S. 51) ([Lem88], S. 50). Das Messprinzip ist dabei schon lange bekannt und war Gegenstand verschiedener Untersuchungen [Wie70] [Sch67].

Heute können Strömungen dank Hochleistungsrechnern mit neuen Ansätzen untersucht werden ([Lau13], S. 14). Die entsprechenden Verfahren zur Modellierung werden im Rahmen von **Kapitel 3** eingehend beschrieben. Typisches Einsatzgebiet des Verfahrens ist die Messung von Durchmessern im Fertigungsprozess sowohl von Bohrungen ([Wie70], S. 157) als auch von Wellen ([Wie70], S. 151).

Bei der pneumatischen Abstandsmessung werden die Strömungsgrößen Druck oder Strömungsgeschwindigkeit erfasst, um hieraus die Änderung des Abstands zwischen Messobjekt und Sensor zu ermitteln ([Tru84], S. 80). Dies geschieht unter Ausnutzung des physikalischen Zusammenhangs, dass viele Strömungsgrößen, wie z.B. der Massenstrom, in sehr starker Abhängigkeit zum Betrag des engsten Strömungsquerschnitts stehen ([Wie70], S. 16). Soll eine Abstandsänderung mithilfe eines pneumatischen Abstandssensors erfasst werden können, muss sie zu einer Veränderung der engsten Querschnittsfläche führen ([Tru84], S. 80). Der

Messaufbau zum Einsatz pneumatischer Sensoren unter Angabe der engsten Querschnitte von Vor- und Messdüse ist in **Abbildung 10** ([Eif14], S. 26) dargestellt.

Der angegebene Aufbau mit zwei Düsen entspricht dem Druckmessverfahren ([Wie70], S. 47 f.). Bei diesem Aufbau wird die Vordüse, welche die engste Querschnittsfläche A_V aufweist, mit gefilterter und einen Vordruck p_V aufweisender Luft durchströmt (vgl. **Abbildung 10** ([Eif14], S. 26)). Von Relevanz ist dabei der Messdruck p_M hinter der Vordüse, welcher auch vom engsten Querschnitt im Bereich der Messdüse A_M beeinflusst wird ([Wie70], S. 47).

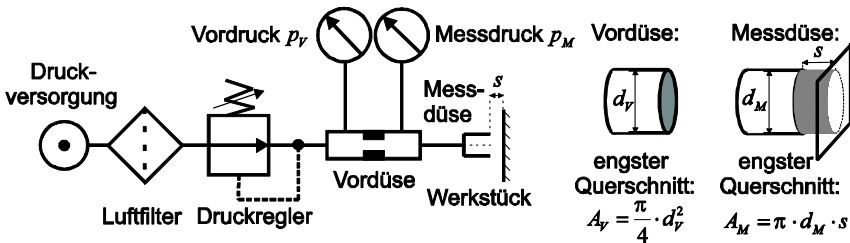


Abbildung 10: Modellbildung und Nomenklatur pneumatischer Abstandssensoren ([Eif14], S. 26)

Für die engsten Querschnitte der beiden Düsen gilt ([Wie70], S. 37):

$$A_V = \frac{\pi}{4} \cdot d_V^2, \quad A_M = \pi \cdot d_M \cdot s, \quad (6)$$

wobei der Messbereich nach oben durch

$$s_{\max} = \frac{d_M}{4} \quad (7)$$

begrenzt wird, da ab diesem Wert A_M nicht mehr zwischen Messdüse und Werkstück abgebildet wird ([Wie70], S. 36 f.). Diese Beschreibung führt dazu, dass zwischen dem zu messenden Abstand s von der Oberfläche des Werkstücks zum Ausgang der Messdüse und dem dimensionslosen Quotienten p_M / p_V aus Mess- und Vordruck eine eindeutige Zuordnung ausgeführt werden kann, die nachfolgend als pneumatische Kennlinie bezeichnet wird ([Wie70], S. 49). Nach Wiemer kann die ideale pneumatische Kennlinie berechnet werden, wenn die engsten Querschnittsflächen A_M und A_V , der dem genutzten Arbeitsmedium zugeordnete Adiabatenkoeffizient κ und die Druckkoeffizienten aus Umgebungs- p_U und Messdruck p_M , sowie aus Mess- und Vordruck

$$\omega_U = p_U / p_M, \quad \omega_M = p_M / p_V \quad (8)$$

bekannt sind ([Wie70], S. 47 ff.). In beiden Düsen kann jeweils eine Über- bzw. Unterschallströmung auftreten, so dass nach Wiemer vier Strömungsfälle des Sensors unterschieden werden müssen ([Wie70], S. 47 ff.). Für die untersuchten Einsatzgebiete erfolgt ein Betrieb der Vordüse unter Anwendung einer Unterschallströmung sowie der Messdüse unter Anwendung einer Überschallströmung ([Eif14], S. 26). Dann kann ω_U durch das „kritische Druckverhältnis“ β ausgedrückt werden:

$$\omega_U = \beta, \quad (9)$$

das für Luft etwa einen Wert von $\beta = 0,53$ aufweist und somit das Druckgefälle über die Messdüse festlegt ([Eif14], S. 26). Für diesen Einsatzfall ergibt sich eine reibungsfreie Darstellung der Kennlinie unter den getroffenen Annahmen wie folgt ([Wie70], S. 48) ([Eif15a], S. 86):

$$s = \frac{d_V^2}{4 \cdot d_M} \cdot \frac{1}{\omega_M} \cdot \frac{\sqrt{(\omega_M^{2/\kappa} - \omega_M^{(\kappa+1)/\kappa})}}{\sqrt{(\beta^{2/\kappa} - \beta^{(\kappa+1)/\kappa})}}. \quad (10)$$

Ein Beispiel für eine solche Kennlinie ist als Funktion

$$\omega_M = p_M / p_V = f(s) \quad (11)$$

in **Abbildung 11** ([Eif14], S. 27) gezeigt, wobei sich die Beschränkungen im Einsatz dieser Messtechnik in Abhängigkeit der beiden Düsendurchmesser beschreiben lassen ([Eif14], S. 27). Für Messungen genutzt wird der lineare Bereich der pneumatischen Kennlinie ([Wie70], S. 48).

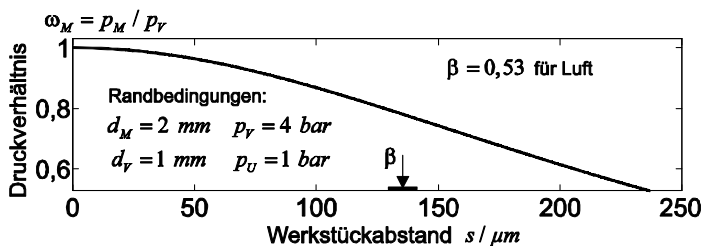


Abbildung 11: Pneumatische Kennlinie, Beispiel ([Eif14], S. 27)

Nachdem die einzelnen Messverfahren erläutert wurden, werden einige physikalische Grundlagen der Messprinzipien dargestellt, die als Basis für die später beschriebenen Modellierungsansätze dienen.

2.3 Modellbasierte Beschreibung von Messgeräten: physikalische Grundlagen

Es werden nachfolgend Zusammenhänge zu physikalischen Effekten bei den betrachteten Messprinzipien vorgestellt. Diese bilden die Grundlage für die spätere Betrachtung der virtuellen Messtechnik (Säule 1 nach **Abbildung 1**). Dabei soll vor allem herausgestellt werden, dass, je nach Messprinzip, völlig unterschiedliche physikalische Effekte auftreten und somit zur späteren Modellierung verschiedenste Techniken genutzt werden müssen. Nach dieser Vorstellung der Grundlagen wird im folgenden **Kapitel 3** die Auswahl sowie die Weiterentwicklung einzelner Verfahren für die spezielle Anwendung der Normalen-Entwicklung diskutiert.

Nach einem Überblick über allgemeine Tendenzen werden später genutzte Grundlagen der Signalverarbeitung gezeigt, die häufig zur Modellierung von Messprozessen eingesetzt werden. Anschließend werden die spezifischen Optionen der refraktiven und diffraktiven Beschreibung optischer Systeme im Hinblick auf optische Messverfahren sowie der Strömungsberechnung für die pneumatische Messtechnik vorgestellt.

2.3.1 Tendenz der virtuellen Messtechnik

Schmitt beschreibt als Ziel des Einsatzes von virtuellen Messverfahren die Gewinnung von Informationen „zur Entwicklung neuartiger Messsysteme, Analyse und Optimierung bestehender Verfahren sowie die Bestimmung der Messunsicherheit und modellbasierten Korrektur systematischer Abweichungen“ ([Sch08c], S. 298).

Der Grundablauf virtueller Messprozesse ist in **Abbildung 12** ([Sch08c], S. 299) schematisch dargestellt. Berücksichtigt werden müssen demnach nicht nur Messgeräte, sondern auch der Prüfling und die Interaktion dieser beiden Komponenten ([Sch08c], S. 299). Somit ist ersichtlich, dass sich zur Entwicklung von Geometrienormalen ebenfalls virtuelle Messverfahren eignen, denn nicht nur das Messgerät selbst, sondern auch der Prüfling kann Gegenstand einer durchgeführten Optimierung eines Messablaufs sein ([Wec08], S. 289).

Grundsätzlich ist die „virtuelle Messung“ ein recht neues Gebiet, da die entsprechenden Rechenkapazitäten, die für solche komplexe Betrachtungen erforderlich sind, noch nicht sehr lange zur Verfügung stehen ([Lau13], S. 14). Es gibt in den letzten Jahren sehr vielfältige Entwicklungen in diesem Bereich, von denen einige von Schmitt et. al. [Sch08c] zusammengefasst wurden. Heute immer

häufiger durchgeführte funktionsorientierte Messungen ermöglichen z.B. den Einsatz einer virtuelle Prüfung von Bauteilen ([Har13], S. 285).

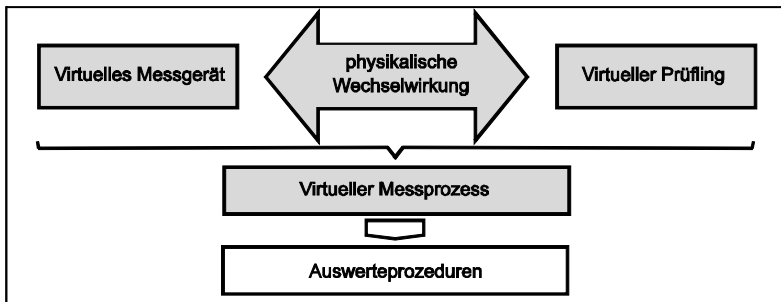


Abbildung 12: Virtueller Messprozess nach Schmitt et. al. ([Sch08c], S. 299)

Beispiele für Anwendungen sind das virtuelle Rasterkraftmikroskop (AFM), mit dem auch virtuelle Kalibriervorgänge simuliert wurden [Xu11], das virtuelle Weißlichtinterferometer [Sch08b], Ansätze virtueller taktiler Messtechnik zur Charakterisierung der Messunsicherheit [Sch99] sowie virtuelle Computertomographie-Geräte [Bel07] [Hil08] [Hop08] [Rei08]. Die Anwendungen dieses Vorgehens sind also sehr vielfältig. Einige physikalische Grundlagen für die spätere Anwendung der modellbasierten Betrachtung von Messvorgängen werden nachfolgend vorgestellt.

2.3.2 Eingesetzte Signalverarbeitung

Zur virtuellen Erprobung von Messverfahren und Auswertestrategien kann häufig eine signaltheoretische Modellierung der Messeinrichtung ausgeführt werden ([Sch08c], S. 302). Die Verarbeitung von Messdaten wird dabei heute ohnehin in aller Regel virtuell am Rechner ausgeführt ([Sch08c], S. 299).

Die eingesetzten Werkzeuge, die für spätere Betrachtungen genutzt werden, lassen sich in die drei Gruppen Filter, Transformationen sowie Berechnung von Oberflächenkennwerten einteilen. Einige dieser für spätere Betrachtungen elementaren Operationen werden nachfolgend vorgestellt.

2.3.2.1 Filter

Filterung muss z.B. zur Trennung unterschiedlicher Gestaltabweichungen (vgl. **Abbildung 2** ([4760], S. 2)) eingesetzt werden (vgl. **Anhang A**) ([Bod92], S. 86). Zur Auswertung von Messdaten kommen häufig lineare Profilfilter zum Einsatz, deren Implementierung z.B. mithilfe der Berechnung eines Faltungsintegrals möglich ist ([See12], S. 201):

$$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x-\xi) \cdot s_G(\xi) \cdot d\xi, \quad \int_{-\infty}^{\infty} s_G(\xi) \cdot d\xi = 1. \quad (12)$$

Dabei erfolgt anhand der Gewichtsfunktion $s_G(x)$ eine Gewichtung des Profils $z(x)$, was nach Integration auf die Filterlinie $w(x)$ führt (gleitende Mittelwertbildung) ([See12], S. 201). Filter sind in der Normenreihe DIN EN ISO 16610 standardisiert, zu der ein Überblick in DIN EN ISO 16610-1 gegeben wird [16610-1], und unterscheiden sich u.a. in ihrer Gewichtsfunktion. Ein sehr häufig genutztes, lineares Filter ist das Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-21, dessen Gewichtsfunktion $s_G(x)$ die Form einer Gauß-Funktion aufweist ([16610-21], S. 6 f.):

$$s_G(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_c} \cdot e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_c} \right)^2}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \approx 0,4697, \quad (13)$$

wobei λ_c der Wellenlänge entspricht, die aufgrund des gegebenen Wertes der Konstante α noch zu 50% übertragen wird, und x die Koordinate ab dem Zentrum von $s_G(x)$ ist ([16610-21], S. 6). Da an den Rändern eines Profils die Gewichtsfunktion nicht vollständig abgebildet werden kann, treten Endeffekte auf ([See14b], S. 440), die in ISO/DTS 16610-28 behandelt werden [16610-28]. Für beliebig kleine geschlossene Profile kann eine Anwendung des Gauß-Filters erfolgen, wenn ein periodischer Fortsatz der Gewichtsfunktion vorausgesetzt wird ([See14b], S. 442).

Ein ebenfalls genutztes Filter ist das lineare Splinefilter [16610-22]; für inhomogene Strukturen, wie gehobte Oberflächen, kann außerdem das robuste Gauß-Filter nach ISO/TS 16610-31 [16610-31] eingesetzt werden [See13a] [See05]. Die beiden letztgenannten Filter beinhalten dabei bereits von sich aus eine Korrektur von möglichen Endeffekten ([16610-28], S. 13).

Eine weitere interessante Gruppe sind die morphologischen Filter, deren Grundlagen in DIN EN ISO 16610-40 [16610-40] und deren Anwendung unter Voraussetzung eines kreisförmigen oder horizontal geraden strukturierenden Elements in DIN EN ISO 16610-41 [16610-41] standardisiert sind.

Basisoperationen der morphologischen Bildverarbeitung sind die Erosion und die Dilatation, was bedeutet, dass jeder beliebige morphologische Verarbeitungsschritt aus Kombinationen dieser beiden Operationen dargestellt werden kann ([Soi98], S. 51). Die Grundoperationen werden für die spezielle Anwendung im Bereich der Oberflächenmesstechnik als Erosion des Oberflächenprofils $z(x)$ mit einem beliebigen strukturierenden Element $s_E(x)$ ([Pue05], S. 666):

$$ero(z(x)) = z(x) \odot s_E(x) = \min_{\xi \in D_s} \{z(x+\xi) - s_E(\xi)\}, \quad (14)$$

sowie analog als Dilatation ([Pue05], S. 666):

$$dil(z(x)) = z(x) \oplus s_E(x) = \max_{\xi \in D_s} \{z(x - \xi) + s_E(\xi)\} \quad (15)$$

und allgemein in entsprechender Literatur (z.B. [Soi98], S. 51 ff.) definiert. Die Variable D_s beschreibt dabei die sogenannte Trägermenge, die im Bereich des strukturierenden Elementes abgebildet wird ([Pue05], S. 666). Wichtige Kombinationen dieser beiden Grundoperationen sind die „morphologische Öffnung“, bei der erst eine Erosion und dann eine Dilatation unter Anwendung des punktgespiegelten strukturierenden Elements ausgeführt wird ([Soi98], S. 96), sowie die Schließung, bei der zunächst eine Dilatation und danach die Erosion unter Anwendung des punktgespiegelten strukturierenden Elements erfolgt ([Soi98], S. 98).

Anwendungen für verschiedene Filter werden später gezeigt. Eine allgemeine und detaillierte Übersicht zu vorhandenen und industriell eingesetzten Filterverfahren kann in vorhandener Literatur [16610-1] [See13a] [See13c] nachvollzogen werden.

2.3.2.2 Transformationen

Ein elementares Werkzeug in der Signalverarbeitung ist die Fourier-Transformation, mit der ein Profil $z(x)$ in die einzelnen Amplituden $Z(\omega)$ der jeweiligen Ortsfrequenzen $\omega = 2\pi f$ überführt werden kann ([See13c], S. 98). Die Anwendung der Fourier-Transformation ist demnach immer dann interessant, wenn eine Untersuchung von frequenzabhängigen Eigenschaften wie z.B. dem Übertragungsverhalten ([Kie05], S. 89 ff.) durchgeführt werden soll.

In der Literatur wird die Transformation kontinuierlich folgendermaßen definiert ([See13c], S. 99) ([Mer10], S. 43):

$$Z(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x)e^{-j\omega x} dx = \mathfrak{F}\{z(x)\}. \quad (16)$$

Da z.B. Messdaten diskretisiert vorliegen, wird eine ortsdiskrete Formulierung der Fourier-Transformierten benötigt, die analog als Summe anstatt als Integral mit der diskreten Oberfläche $z(n)$ sowie der periodischen Fourier-Transformierten $Z(k\Delta\omega)$ formuliert werden kann ([Mer10], S. 82) ([See13c], S. 98).

Wenn k und n entsprechende Zählvariablen zur Diskretisierung seien, wobei $k \in \mathbb{N}$, $n \in \mathbb{N}$, dann gilt analog ([See13c], S. 98):

$$Z(k \cdot \Delta\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} z(n)e^{-jn\Delta\omega} \Delta x = \mathfrak{F}\{z(n)\}. \quad (17)$$

Zur verkürzten Darstellungsweise werden nachfolgend die Operatoren $\mathfrak{F}\{\cdot\}$ sowie $\mathfrak{F}^{-1}\{\cdot\}$ verwendet. Die Rücktransformation führt wieder auf die Oberfläche $z(x)$ ([See13c], S. 98) ([Buz08], S. 118):

$$z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) e^{j\omega x} d\omega = \mathfrak{F}^{-1}\{Z(\omega)\}, \quad (18)$$

$$z(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} Z(k \cdot \Delta\omega) e^{jk\Delta\omega x} \Delta\omega = \mathfrak{F}^{-1}\{Z(k \cdot \Delta\omega)\}. \quad (19)$$

Eine weitere wichtige Integral-Transformation ist die Radon-Transformation, bei der „die Menge aller Parallelprojektionen“ ([Bey02], S. 472) berechnet wird. Für einen gegebenen Datensatz $z(x, y)$ wird die Radontransformierte $\tilde{z}_r(m_G, b)$ berechnet, indem Geraden mit unterschiedlichen Werten von Steigung m_G und absolutem Glied b in der Datenebene aufgespannt werden und anschließend eine Integration entlang dieser Geraden durchgeführt wird ([Tof96], S. 3):

$$\tilde{z}_r(m_G, b) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x, m_G x + b) dx = \mathfrak{R}\{z(x, y)\}. \quad (20)$$

Zur Rücktransformation werden zur Nutzung des „Fourier-Scheiben-Theorems“ folgende Parameter benötigt ([Tof96], S. 101):

$$o = -\frac{k_x}{k_y}, \quad b = y - m_G \cdot x, \quad (21)$$

wobei k_x und k_y Frequenzen bezeichnen. Damit sind die 2D-Fouriertransformierte $G(k_x, k_y)$ der im Ortsbereich dargestellten 3D-Topographie $z(x, y)$ und die 1D-Fouriertransformierte des Datensatzes $\tilde{z}_r(m_G, b)$ analog zu interpretieren ([Tof96], S. 101):

$$G(-ok_y, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{z}_r(m_G, b) e^{-j2\pi k_y b} dy. \quad (22)$$

Die eigentliche Rücktransformation kann somit als Fourier-Rücktransformation ausgeführt werden ([Tof96], S. 101):

$$z(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) e^{j2\pi(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y = \mathfrak{R}^{-1}\{\tilde{z}_r(m_G, b)\}. \quad (23)$$

Diese Radon-Rücktransformation wird z.B. bei der Rekonstruktion von Aufnahmen der Computer-Tomographie (CT) genutzt, da bei der Messung stets die Radon-Transformierte erfasst wird ([Bey02], S. 474).

2.3.2.3 Berechnung von Oberflächenkennwerten

Wie in **Abbildung 12** ([Sch08c], S. 299) dargestellt, müssen die „Messdaten“ des virtuellen Messprozesses einer Auswertung unterzogen werden, die, wie bei realen Daten, ohnehin virtuell ausgeführt wird ([Sch08c], S. 299). So werden auf Basis von

vorverarbeiteten und gefilterten Daten in der Regel normativ vorgegebene Kenngrößen ermittelt, z.B. die 2D-Kenngrößen nach DIN EN ISO 4287 wie R_a und R_z [4287].

Einige wichtige Rauheitsparameter nach DIN EN ISO 4287 sind der arithmetische Mittelrauwert R_a ([4287], S. 15):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx, \quad (24)$$

definiert für ein Profil $z(x)$ der Länge l ; der quadratische Mittelrauwert R_q ([4287], S. 15):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx} \quad (25)$$

sowie die „Größte Höhe des Profils“ ([4287], S. 14) R_z , die für eine Einzelmessstrecke $z(x^*)$ ermittelt wird ([4287], S. 12):

$$R_z = \left| \max(z(x^*)) \right| + \left| \min(z(x^*)) \right|, \text{ für } \max(z(x^*)) > 0 \wedge \min(z(x^*)) < 0. \quad (26)$$

Problematisch bei der Bewertung von Oberflächen mit Amplitudenkenngrößen ist die Tatsache, dass sie nicht immer eine eindeutige Aussage über das Funktionsverhalten liefern ([Bod92], S. 36) ([Wie11], S. 7). Aus diesem Grund wurde mit der Normenreihe DIN EN ISO 13565 ein Instrumentarium geschaffen, um Oberflächen auf Basis der Materialanteilkurve (Abbott-Kurve) zu bewerten [13565-1] [13565-2]. Bei dieser Materialanteilkurve wird der Materialanteil Mr für gedachte Schnitte auf verschiedenen Profilhöhen z aufgetragen ([4287], S. 19):

$$Mr = fc(z), \quad (27)$$

was bedeutet, dass sie die „Summenhäufigkeitskurve der Ordinatenwerte $z(x)$ “ ([4287], S. 19) repräsentiert. DIN EN ISO 13565-2 definiert die R_k -Parameter für plateauartige Oberflächen [13565-2]. Basierend auf einer Ausgleichsgeraden, die „40% aller gemessenen Profilpunkte einschließt“ ([13565-2], S. 3) und „den geringsten Anstieg aufweist“ ([13565-2], S. 3), wird die Materialanteilkurve in drei Abschnitte unterteilt ([13565-2], S. 3): die Kernrautiefe R_k , welche die mechanische Tragfähigkeit einer Oberfläche repräsentiert, die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} , charakteristisch für die Reibungseigenschaften sowie die reduzierte Riefentiefe R_{vk} , die z.B. Aussagen über das Ölrückhaltevolumen gestattet [13565-2] ([Wie11], S. 7).

Da 2D Parameter allerdings keine Option zur Beurteilung von 3D-strukturierten Oberflächen sind, müssen zu diesem Zweck eigene 3D-Parameter eingesetzt

werden ([Sto00], S. 216). In verschiedenen Forschungsprojekten wurden entsprechende Parameter erarbeitet [Sto00] [Blu03], welche heute in der Norm DIN EN ISO 25178-2 [25178-2] definiert sind. Die Anwendung von funktionsorientierten Parametern wird dabei auch für den 3D-Bereich in Zukunft von Interesse sein ([Tan12], S. 31 ff.).

Es gelten analoge Definitionen für den arithmetischen Mittelrauwert S_a der Fläche A ([25178-2], S. 13):

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy, \quad (28)$$

den quadratischen Mittelrauwert S_q der Fläche A ([25178-2], S. 12):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}, \quad (29)$$

die „maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche“ ([25178-2], S. 13) unter Voraussetzung des Definitionsbereichs $z(x^*, y^*)$:

$$S_z = \left| \max(z(x^*, y^*)) \right| + \left| \min(z(x^*, y^*)) \right|, \text{ für } \max(z(x^*, y^*)) > 0 \wedge \min(z(x^*, y^*)) < 0 \quad (30)$$

sowie die Flächenmaterialanteilkurve und die darauf basierenden Parameter ([25178-2], S. 16 ff.).

Die dargestellten Operationen sind nur einige Grundlagen, die später ihre Anwendung finden. Für einen vollständigeren Überblick über das Gebiet der Signalverarbeitung kann auf weiterführende Literatur verwiesen werden [Mer10] [Kie05] [Opp10].

2.3.3 Refraktive und diffraktive Beschreibung von Licht

Licht kann, wie bereits in **Kapitel 2.2** gezeigt wurde, für viele unterschiedliche Messverfahren genutzt werden. Interessant ist dabei, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchen-Eigenschaften aufweist ([Mes08], S. 28 f.). Je nach Messprinzip werden unterschiedliche Charakteristiken des Lichts genutzt: z.B. die Reflexion bei der Streulichtmesstechnik oder die Interferenz bei der Weißlichtinterferometrie.

Entsprechend gibt es auch unterschiedliche Kategorien zur Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge von Licht: die refraktive Beschreibung auf Basis der Lichtbrechung und die diffraktive Beschreibung auf Basis der Beugung ([Dem13], S. 389).

Zunächst sei hierzu eine kurze Beschreibung der geometrischen Optik dargelegt: Eine Modellierung der refraktiven Effekte kann mithilfe der Matrizenoptik erfolgen, wobei sich die geradlinige Ausbreitung von Licht zu Nutze gemacht wird ([Mes08], S. 20) ([Dem13], S. 287 ff.).

Charakterisiert wird ein Lichtstrahl dabei auf Basis zweier Parameter: seinem Abstand d_s sowie seinem Winkel α_s , jeweils bezogen auf die Symmetrieachse ([Mes08], S. 20).

Bei kleinen Werten von d_s und α_s kann eine Linearisierung erfolgen, wobei diese als paraxiale Näherung bekannt ist ([Mes08], S. 20 ff.) ([Dem13], S. 287):

$$\alpha_s \approx \tan(\alpha_s) \approx \sin(\alpha_s). \quad (31)$$

Die Transformation eines Vektors $(d_{s,1}, \alpha_{s,1})$ durch ein refraktives Bauteil kann in Form einer Matrix-Multiplikation ausgedrückt werden ([Mes08], S. 22):

$$\begin{pmatrix} d_{s,2} \\ \alpha_{s,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{Ma} & B_{Ma} \\ C_{Ma} & D_{Ma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_{s,1} \\ \alpha_{s,1} \end{pmatrix}, \quad (32)$$

wobei eine „ABCD-Matrix“ genutzt wird, um die beiden neuen Parameter des Lichtstrahls zu berechnen ([Rei05], S. 102 ff.) ([Dem13], S. 287 ff.). Z.B. können so eine Translation mit der Entfernung d ([Mes08], S. 23):

$$T_{MO} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (33)$$

die Transformation durch eine Linse, die die Brennweite f_b aufweist ([Dem13], S. 289):

$$L_{MO} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_b & 1 \end{pmatrix} \quad (34)$$

oder die Brechung zwischen Medien der Brechzahlen N_1 und N_2 sowie dem Radius R_b der Übergangsfläche ([Mes08], S. 23):

$$B_{MO} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N_1 - N_2}{N_2 \cdot R_b} & \frac{N_1}{N_2} \end{pmatrix} \quad (35)$$

dargestellt werden. Unter Anwendung des sogenannten Ray-Tracing [Gla00] können viele optische Phänomene beschrieben werden. Alternativ hierzu kann eine Beschreibung als Welle gewählt werden, da Licht einige Eigenschaften aufweist, die

mit der strahlenoptischen Betrachtung nicht beschrieben werden können ([Mes08], S. 35).

Eine vollständige und allgemeingültige Formulierung jedweder bekannter Zusammenhänge elektromagnetischer Felder ist mit den vier Maxwell-Gleichungen, der Definition der Lorentzkraft sowie der Bewegungsgleichung von Newton allgemein bekannt ([Dem13], S. 136). Die vier Maxwell-Gleichungen umfassen für die Formulierung der Optik:

- 1) das Induktionsgesetz mit der elektrischen Feldstärke E , der magnetischen Feldstärke H sowie der Permeabilitätskonstante μ_0 ([Mes08], S. 39 f.):

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}; \quad (36)$$

- 2) die Formulierung, dass die Rotation der magnetischen Feldstärke als Strom interpretiert werden kann ([Mes08], S. 39 f.):

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} N^2, \quad (37)$$

wobei N die Brechzahl des Mediums und ε_0 die elektrische Feldkonstante beschreibt;

- 3) die Quellenfreiheit des elektrischen Feldes im Vakuum ([Mes08], S. 39 ff.):

$$\nabla \cdot (N^2 E) = 0; \quad (38)$$

- 4) sowie die allgemein gültige Quellenfreiheit des magnetischen Feldes ([Mes08], S. 39):

$$\nabla \cdot H = 0. \quad (39)$$

Eine Eigenschaft der Lichtwellen ist deren Polarisation, welche „die Lage der Feldvektoren im Raum“ ([Rei05], S. 16) beschreibt.

Diese Polarisation kann mithilfe von Jones-Vektoren beschrieben werden ([Dem13], S. 290), die über die ellipsometrischen Winkel (vgl. **Kapitel 2.2.3.2**) ausgedrückt werden können, wenn eine allgemeine Darstellung der Polarisation in elliptischer Form gewählt wird ([Hum05], S. 7):

$$J_{ei} = \begin{pmatrix} \sin(\Psi) \cdot e^{i\Lambda} \\ \cos(\Psi) \end{pmatrix}. \quad (40)$$

2.3.4 CFD, numerische Strömungsmechanik

Die numerische Strömungsmechanik oder „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) kann, wie viele andere Modellierungsansätze, nur unter Anwendung von Hochleistungsrechnern für industrielle Anwendungen genutzt werden und ist daher ein noch junges Teilgebiet der Ingenieurwissenschaften ([Lau13], S. 14 ff.).

Ziel dieser Vorgehensweise ist es „Strömungsvorgänge mit Hilfe von Digitalcomputern zu simulieren“ ([Lau13], S. 1). Betrachtet werden dabei verschiedene Größen der Strömung wie Geschwindigkeit c , Temperatur T , Druck p und Dichte ρ ([Oer11], S. 206).

In diesem Kapitel werden kurz einige Grundlagen des Verfahrens erläutert. Für eine tiefere Betrachtung wird auf die entsprechende Literatur [Oer11] [Lau13] [Fer08] verwiesen. Dort wird die Thematik der numerischen Strömungsmechanik eingehend behandelt. In **Kapitel 4.3** wird im Rahmen der Entwicklung eines Pneumatik-Normals eine Anwendung von CFD sowie die Ableitung eines entsprechenden Normals auf Basis von Simulationsergebnissen erläutert.

Die Grundgleichungen der Strömungsmechanik werden durch die Erhaltung der Größen „Masse, Impuls und Energie“ ([Oer11], S. 206) gegeben. Wenn die zeitabhängige Massenbilanz für ein beliebiges, durchströmtes, infinitesimal kleines Kontrollvolumen aufgestellt wird, kann die Kontinuitätsgleichung für den kartesischen Koordinatenraum formuliert werden ([Oer11], S. 207 ff.):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_3)}{\partial z} = 0. \quad (41)$$

Dabei beschreiben ρ die Dichte des Fluids, t die Zeit und c_1, c_2, c_3 die Strömungsgeschwindigkeit in die x -, y - bzw. z -Richtung [Oer11]. Kann die Annahme getroffen werden, dass das untersuchte Medium näherungsweise inkompressibel ist ($\rho = \text{const.}$), kann die Gleichung entsprechend einfacher ausgedrückt werden ([Oer11], S. 208). Für die detaillierte Herleitung sei z.B. auf ([Oer11], S. 207 ff.) verwiesen.

Auf demselben Weg kann die Impulsbilanz um ein Volumenelement abgeleitet werden ([Oer11], S. 209 ff.). Dabei sind neben ein- und austretendem Impuls auch Normal- und Schubspannungen sowie Volumenkräfte aufzusummieren, da diese ebenfalls einen Einfluss auf den Impuls haben ([Oer11], S. 210 ff.).

Wird die Bilanz vereinfacht, ergibt sich für die x -Richtung die Navier-Stokes Gleichung ([Oer11], S. 216):

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial t} + c_1 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial x} + c_2 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial y} + c_3 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) = V_{kx} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \cdot \left(2 \cdot \frac{\partial c_1}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial x} + \frac{\partial c_2}{\partial y} + \frac{\partial c_3}{\partial z} \right) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial y} + \frac{\partial c_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial z} + \frac{\partial c_3}{\partial x} \right) \right]. \quad (42)$$

V_{kx} beschreibt eine mögliche Volumenkraft und μ die dynamische Viskosität [Oer11]. Die Gleichung kann jeweils analog für die y - und z -Richtung formuliert werden ([Oer11], S. 216).

Für die Energiegleichung sind verschiedene Arten von Energie zu berücksichtigen: ein- sowie ausströmende Energie, Wärmeleitung, Arbeit am infinitesimalen Volumenelement und Arbeit durch Volumenkräfte ([Oer11], S. 258). Somit ergibt sich unter Anwendung der Energiebilanz folgende Gleichung ([Oer11], S. 263):

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial e}{\partial t} + c_1 \cdot \frac{\partial e}{\partial x} + c_2 \cdot \frac{\partial e}{\partial y} + c_3 \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right) - p \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial x} + \frac{\partial c_2}{\partial y} + \frac{\partial c_3}{\partial z} \right) + \rho \cdot \dot{q}_s + \mu \cdot \Phi = 0, \quad (43)$$

mit der inneren Energie des Fluids in ihrer spezifischen Form e , der in Kelvin anzugebenden Temperatur T , der Wärmeleitfähigkeit λ_w , der Strahlungswärme \dot{q}_s , die ebenfalls spezifisch einzusetzen ist, sowie der Dissipationsfunktion Φ , die von den Strömungsgeschwindigkeiten abhängig ist ([Oer11], S. 263):

$$\Phi = 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial c_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_2}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_3}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial c_2}{\partial x} + \frac{\partial c_1}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_3}{\partial y} + \frac{\partial c_2}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_1}{\partial z} + \frac{\partial c_3}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\partial c_1}{\partial x} + \frac{\partial c_2}{\partial y} + \frac{\partial c_3}{\partial z} \right)^2. \quad (44)$$

Alle Erhaltungsgleichungen haben eine ähnliche Form und können daher in eine allgemeine Gleichung überführt werden, die für eine beliebige skalare Erhaltungsgröße ϕ mit dem Quellenterm q_ϕ und dem Diffusionskoeffizienten Γ_ϕ formuliert wird ([Fer08], S. 11 f.):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_1\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_2\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_3\phi)}{\partial z} = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \left(\Gamma_\phi \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} + \frac{\partial\phi}{\partial y} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) \right) + q_\phi. \quad (45)$$

Einen weiteren Zusammenhang zur Lösung dieses Gleichungssystems stellt die thermodynamische Zustandsgleichung dar, die einen Zusammenhang zwischen den Stoffgrößen Druck p , Temperatur T sowie dem spezifischen Volumen v herstellt ([Bae12], S. 185):

$$p = p(v, T). \quad (46)$$

Das spezifische Volumen ist dabei als Kehrwert der Dichte definiert ([Bae12], S. 19):

$$v = \frac{1}{\rho}. \quad (47)$$

Die einfachste dieser Gleichungen ist das ideale Gasgesetz mit der universellen Gaskonstante R ([Bae12], S. 185) ([Fer08], S. 369):

$$p = \frac{R \cdot T}{v} = \rho \cdot R \cdot T. \quad (48)$$

Eine Berücksichtigung weiterer Faktoren erfolgt bei den Realgasgleichungen, wie den kubischen Zustandsgleichungen, von denen es viele Varianten gibt, (vgl. [Bae12], S. 194 ff.). Eine häufig genutzte Zustandsgleichung ist die Redlich-Kwong-Soave Gleichung ([Soa72], S. 1197):

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b_{RSK}} - \frac{a_{RSK}(T)}{v(v + b_{RSK})}. \quad (49)$$

Die beiden Faktoren a_{RSK} und b_{RSK} werden dabei in Abhängigkeit der reduzierten Temperatur T_r , die das Verhältnis zur kritischen Temperatur T_c angibt ($T_r = T / T_c$) ([Soa72], S. 1202), dem kritischen Druck p_c sowie dem azentrischen Faktor ω_a ermittelt ([Soa72], S. 1198, S. 1202):

$$a_{RSK}(T) = 0,42747 \cdot \frac{R^2 \cdot T_c^2}{p_c} \cdot \left(1 + (0,48 + 1,574 \cdot \omega_a - 0,176 \cdot \omega_a^2) \cdot (1 - \sqrt{T_r})\right)^2, \quad (50)$$

$$b_{RSK} = 0,08644 \cdot R \cdot T_c / p_c. \quad (51)$$

Der azentrische Faktor kann in Abhängigkeit des Siededrucks p^S , der unter der Randbedingung einer reduzierten Temperatur von 0,7 eingesetzt wird, beschrieben werden ([Pol01], S. 2.23):

$$\omega_a = -\log_{10} \left(\frac{p^S(T_r = 0,7)}{p_c} \right) - 1. \quad (52)$$

Mit den vorgestellten Grundgleichungen ist im Prinzip jede beliebige Strömung beschrieben. Problematisch ist allerdings der hohe Rechenaufwand, da z.B. zur Abbildung des Phänomens der Turbulenz eine enorm feine Auflösung erforderlich wäre ([Lau13], S. 161). Kriterium zur Beurteilung der Turbulenz ist die dimensionslose Reynolds-Zahl ([Lau13], S. 32 f.):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot c_1 \cdot D}{\mu} = \frac{\rho \cdot c_1^2}{\mu \cdot \frac{c_1}{D}}, \quad (53)$$

mit der Dichte ρ , der Strömungsgeschwindigkeit c_1 in x -Richtung, der dynamischen Viskosität μ des Strömungsmediums sowie dem Strömungsdurchmesser D . Ab einem Wert von $\text{Re}_{\text{krit}} \approx 2300$ wird von einer turbulenten, sonst von einer laminaren Strömung gesprochen ([Lau13], S. 33).

Das Auftreten von Turbulenz kann mit „Schwankungen der Strömungsgrößen“ ([Oer11], S. 127) umschrieben werden, was eine Beschreibung anhand der zeitabhängigen Mittelung der Erhaltungsgleichungen ermöglicht ([Lau13], S. 166 f.). Somit kann der zeitliche Mittelwert \bar{c}_i der Größe c_i entlang einer Koordinate ϑ wie folgt berechnet werden ([Lau13], S. 166 f.):

$$\bar{c}_i(x, y, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \bar{c}_i(x, y, z, \vartheta) d\vartheta; \quad i = 1, 2, 3. \quad (54)$$

Problematisch ist dabei, dass in den Navier-Stokes-Gleichungen sowie der Energiegleichung nichtlineare Terme auftreten, die bei der Mittelwertberechnung zum Auftreten von Zusatztermen führen ([Lau13], S. 167 f.). Wird beispielsweise die folgende Ableitung der Größe c_1^2 mit Mittelwert \bar{c}_1 und Schwankung c_1' berechnet, ergibt sich ([Lau13], S. 167):

$$\frac{\overline{\partial c_1^2}}{\partial x} = \frac{\overline{\partial(\bar{c}_1 + c_1') \cdot (\bar{c}_1 + c_1')}}{\partial x} = \frac{\partial(\bar{c}_1^2 + 2\bar{c}_1 \cdot \overline{c_1'} + \overline{c_1'^2})}{\partial x} = \frac{\partial \bar{c}_1^2}{\partial x} + \frac{\partial \overline{c_1'^2}}{\partial x}. \quad (55)$$

Diese Zusatzterme treten entsprechend in allen Raumrichtungen auf und werden für die Erhaltungsgleichungen mit den Begriffen Reynolds-Spannungen bzw. Reynolds-Flüsse beschrieben ([Lau13], S. 168). Diese zunächst unbekanntes Terme führen dazu, dass die gemittelten Erhaltungsgleichungen „nicht geschlossen“ ([Fer08], S. 346) gelöst werden können und sogenannte Turbulenzmodelle zu deren Modellierung eingesetzt werden müssen ([Fer08], S. 347 f.). Häufig genutzt wird das $k^* - \varepsilon^*$ -Modell ([Fer08], S. 348 ff.).

Weiterhin muss konstatiert werden, dass es sich bei den Grundgleichungen nicht nur um nichtlineare, sondern auch um partielle und gekoppelte Differentialgleichungen handelt, deren Lösung komplex ist. Zur Lösung im Rechner ist sowohl eine örtliche ([Lau13], S. 59 ff.) als auch zeitliche ([Lau13], S. 63 ff.) Diskretisierung erforderlich. Entsprechende Algorithmen zur Lösung werden ebenfalls in der Literatur vorgestellt, z.B. ([Fer08], S. 83 ff.).

2.4 Vorhandene Kalibrieransätze und -normale

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über vorhandene Geometrienormale sowie die zugehörigen Kalibrierstrategien gegeben. Dieser umfasst grundlegende Informationen zum Einsatz von Geometrienormalen, eine Vorstellung derzeit als Normal eingesetzter Geometrien, welche jeweils nach Gesichtspunkten betrachtet werden, die verfahrensspezifisch und verfahrenunspezifisch sind, sowie vorhandene Fertigungsprinzipien und Werkstoffe bei Geometrienormalen. Der Überblick beschränkt sich auf später betrachtete Einsatzfälle und erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.4.1 Grundsätzliches zum Einsatz von Geometrienormalen

Nachdem bereits in der Einleitung die Motivation zur Verbesserung der vorhandenen Geometrienormale erläutert wurde, sollen der Begriff und der Zweck dieser Normale definiert werden. Geometrienormale werden zum Kalibrieren und Justieren von Messeinrichtungen sowie zur Abschätzung der vorliegenden Messunsicherheit genutzt ([25178-70], S. 6). Eine Definition des Normals wird unter anderem in der Norm DIN 1319-1 vorgegeben:

„Meßgerät (4.1), Meßeinrichtung (4.2) oder Referenzmaterial (4.6), die den Zweck haben, eine Einheit oder einen oder mehrere bekannte Werte einer Größe darzustellen, zu bewahren oder zu reproduzieren, um diese an andere Meßgeräte durch Vergleich weiterzugeben.“ ([1319-1], S. 20)

Konkreter in Bezug auf den hier untersuchten Einsatzfall definiert die Norm DIN EN ISO 25178-70 den Begriff der Maßverkörperung, der eine analoge Bedeutung zum Begriff des geometrischen Kalibriernormals hat ([25178-70], S. 5):

„[...] Werkstück, mit dem in stets gleich bleibender Weise während seines Gebrauchs Messgrößen einer oder mehrerer gegebener Arten jeweils mit einem zugewiesenen Größenwert wiedergegeben oder geliefert werden“ ([25178-70], S. 5)

Elementar beim Einsatz von Normalen ist die bereits in **Kapitel 2.1** erläuterte „Rückführung“, deren Definition sich in ([VIM10], S. 42) sowie ([JCG12], S. 29) findet. Das Grundscheema zur Rückführung an Normalen wird anhand eines mehrstufigen Ansatzes in **Abbildung 13** (Beispiel nach Leach ([Lea13b], S. 409), dargestellt als Kalibriertpyramide nach ([Ski08], S. 9)) verdeutlicht.

Entscheidend ist dabei, dass mit der sogenannten Rückführungskette eine lückenlose Verknüpfung zwischen der SI-Einheitendefinition sowie deren praktischem Einsatz beim industriellen Anwender ermöglicht wird ([Lea13b], S. 408).

Zuständig für die Festlegung der Einheiten sind die nationalen metrologischen Institute (NMI), was bedeutet, dass in Deutschland die Physikalisch-technische Bundesanstalt für „die Weiterentwicklung des SI-Einheitensystems sowie die Weitergabe der SI-Einheiten“ ([Mee11], S. 180) sorgt und in diesem Rahmen auch im Bereich der Auslegung von Normalen tätig ist ([Ehr11], S. 143).

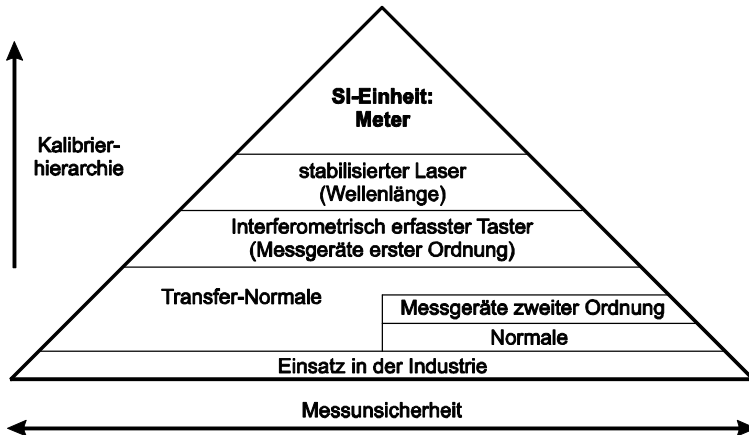


Abbildung 13: Beispiel zur Rückführung mit Normalen nach Leach ([Lea13b], S. 409), dargestellt unter Anwendung des Konzeptes der Kalibrierpyramide nach ([Ski08], S. 9)

Ausgehend von dieser Einheitendefinition erfolgen mit absteigender Kalibrierhierarchie ([JCG12], S. 29) weitere Kalibrierungen bis hin zur Anwendung im industriellen Einsatz. Die Kalibrierpyramide (vgl. [Ski08], S. 9) veranschaulicht diese Kalibrierhierarchie von Normalen der nationalen metrologischen Institute bis hin zur Anwendung der industriellen „Prüf- und Messmittel“ ([Ski08], S. 9). Die Kalibrierunsicherheit wird dabei ausgehend von der Definition des Meters mit jedem Schritt größer ([Ski08], S. 8 f.) ([JCG12], S. 29).

Weitere Beispiele für Kalibrierhierarchien bzw. Rückführungsketten finden sich in der Literatur [Dai05a] ([Hai00], S. 239) ([Dan06], S. 862). Dabei ist zu beachten, dass die Rückführung für jegliche Achsen gewährleistet sein muss ([Lon96], S. 597). Da es unterschiedlichste Messgeräte gibt, die für ihre jeweilige Messaufgabe eingesetzt werden, ist es zwingend erforderlich, zur Kalibrierung verschiedene Normalen mit einem „eingeschränkten Anwendungsbereich“ ([5436-1], S. 3) zu nutzen ([5436-1], S. 3).

Diese große Auswahl an Normalen für Kalibrieraufgaben kann dabei nach unterschiedlichen Kriterien wie den zu kalibrierenden Messgerätemerkmalen oder

den Achsen (lateral/horizontal) unterteilt werden. Ein Überblick über häufig genutzte Normale, die Basis für spätere Weiterentwicklungen sind, wird nachfolgend gegeben. Dabei wird sich im Wesentlichen auf jene Normale beschränkt, deren Eigenschaften Gegenstand der späteren Betrachtungen sind.

Ebenfalls erfolgt eine Einschränkung auf physikalisch greifbare Normale. Neben diesen gibt es auch Software-Normale, welche in DIN EN ISO 5436-2 für taktile Anwendungen standardisiert sind [5436-2]. Diese dienen dazu, eine „Prüfung der Software von Messgeräten“ ([5436-2], S. 4) auszuführen und sind ebenfalls Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten verschiedener Institute [Blu08] [Bui04].

2.4.2 Messprinzip-unspezifische Kalibrierung

Im Rahmen der im folgenden Abschnitt erläuterten Grundprinzipien zur messprinzip-unspezifischen Kalibrierung werden diese in vier Kategorien unterteilt: die Kalibrierung der Höhenachse, die Kalibrierung von Rauheitskenngrößen, die Kalibrierung der lateralen Achse(n) sowie die Kalibrierung des Übertragungsverhaltens.

2.4.2.1 Kalibrierung der z-Achse (Höhenachse)

Zunächst wird die Kalibrierung der Höhenachse dargelegt. Normativ wird festgelegt, dass zur „Kalibrierung der vertikalen Profilkomponente von Tastschnittgeräten“ ([5436-1], S. 4) Tiefeneinstellnormale (Typ A nach DIN EN ISO 5436-1) genutzt werden ([5436-1], S. 4). Für die Kalibrierung von anderen und durch andere Messprinzipien eignet sich ebenfalls das Tiefeneinstell- bzw. Stufenhöhennormal, das allgemein auch in DIN EN ISO 25178-70 ([25178-70], S. 12 f.) definiert wird, z.B. für das Weißlichtinterferometer ([Gao08], S. 4) ([Bra95], S. 25 ff.). Weiterhin kann es zur Kalibrierung anderer optischer Messgeräte und von Rastersondenmikroskopen genutzt werden ([Bar11], S. 9). Das Normal weist dabei eine oder mehrere Rillen, rechteckig oder rund, mit einer definierten Tiefe auf, deren Auswertebereiche zur Ermittlung der Rillentiefe genormt sind ([5436-1], S. 4 ff.) ([25178-70], S. 12 f.). Wichtig bei diesem Typ von Normalen ist dabei eine gleichmäßige Ausprägung der Rillen bzw. Stufen ([Dai06], S. 547).

Ziel beim Einsatz von Tiefeneinstellnormalen ist eine Beurteilung der Linearität der z-Achse, wozu ein Vergleich zwischen Soll- und Ist-Höhen der Stufen genutzt werden kann ([Lea11b], S. 60) ([Giu12b], S. 3). Das Kriterium der Linearität ist z.B. in der DIN EN ISO 25178-600 Serie definiert (vgl. z.B. [25178-603], S. 12). Die Stufenhöhe ist entsprechend des Messbereichs der zu kalibrierenden Messgeräte sehr unterschiedlich: Von Brand et. al. wurde ein Tiefeneinstellnormal mit Stufenhöhen von bis zu $900\ \mu\text{m}$ vorgestellt [Bra99] [Bra00]. Aufgrund der immer

höheren Auflösungen der Messgeräte gibt es aber auch eine Forschungstätigkeit im Bereich sehr kleiner Stufen bis hin zu monoatomarer Stufenhöhe ([Koe05], S. 252) ([Koe11], S. 176). Tiefeneinstellnormale werden heute mit einer extrem hohen Genauigkeit eingesetzt: In einem Ringvergleich, dessen Ergebnisse 2003 veröffentlicht wurden [Koe03], wurden verschiedene Messprinzipien angewendet, um die Qualität von Tiefeneinstellnormalen zu überprüfen - es kamen neben Tastschnittgeräten auch diverse optisch arbeitende Verfahren und Messgeräte auf Basis der Rastersondenmikroskopie zum Einsatz ([Koe03], S. 9). Bei der Messung von Stufenhöhen von $7-800\text{ nm}$ traten in den meisten Fällen erweiterte Unsicherheiten in der Größenordnung maximal weniger Nanometer auf ([Koe03], S. 12 ff.) und so wurde konstatiert, dass mit modernen Messgeräten eine hochpräzise Vermessung der Stufen durchgeführt werden kann ([Koe03], S. 23). Bei Einpassung einer Geraden in die Messergebnisse lagen die Abweichungen der Steigung zu den Solldaten üblicherweise im Bereich $<1\%$, der maximale Offset zu den Solldaten betrug ca. 1 nm ([Koe04], S. 143 f.).

Zu ähnlichen Ergebnissen in Bezug auf Reproduzierbarkeit kam ein Ringvergleich des kroatischen Metrologie-Institutes 2011 [Bar11]. Hier wurden ebenfalls bei der Messung kleiner Stufen, die nach DIN EN ISO 5436-1 ausgewertet werden konnten, Unsicherheiten im Nanometer-Bereich erzielt ([Bar11], S. 4 ff.).

Problematisch ist die Praxis, die Kalibrierung und Justierung eines Messgerätes auf Basis nur einer Höhenstufe durchzuführen, da so bei weitem nicht alle Linearitätsabweichungen detektiert werden können ([Lea11b], S. 60) ([Neu11], S. 122). Es ist daher bekannt, dass eine ausreichende Anzahl verschiedener Höhenstufen gemessen werden muss, damit zuverlässige Informationen gewonnen werden können ([Lea11b], S. 60 f.) ([Giu12b], S. 3).

Tiefeneinstellnormale werden immer vielseitiger bezüglich ihrer Anwendungsgebiete: Z.B. ermöglicht das von Brand et. al. 1999 eingeführte Tiefeneinstellnormal eine gleichzeitige Messung von Rillentiefen zwischen 1 und $900\text{ }\mu\text{m}$ ([Bra99], S. 502). Es wurden in den letzten Jahren weitere Normale entwickelt, die verschiedene Stufen aufweisen: Kim et. al. zeigten ein Konzept für Tastschnittgeräte unter Anwendung von sechs Stufenhöhen ([Kim07], S. 2750 ff.), De Chiffre stellte ein Normal vor, das verschiedene Stufenhöhen innerhalb eines typischen Topographie-Messfeldes kalibrieren kann [Chi11], die PTB veröffentlichte das Multistufenhöhennormal in zwei Varianten, die jeweils eine Vielzahl von Stufen kalibrieren können ([PTB12], S. 96 f.) ([Fel13], S. 6 ff.).

Ebenfalls erwähnt werden sollten Normale zur Kalibrierung der Ebenheit: Mit Planglasplatten erfolgt eine Quantifizierung des Messrauschens ([VDI08], S. 11)

([Dzi04], S. 119). Diese lassen sich heute mit Rauheiten von $R_z < 1\text{ nm}$ herstellen ([Dai04], S. 2042).

2.4.2.2 Kalibrierung von Rauheitskenngrößen

Raunormale in ihrer heutigen Form wurden bereits 1965 von Häsing (PTB) [Häs65] vorgestellt. Sie sind heute als Typ D nach DIN EN ISO 5436-1 genormt und bilden Oberflächenparameter, z.B. nach DIN EN ISO 4287, ab, mit deren Hilfe die Rauheit der Oberfläche charakterisiert werden kann ([5436-1], S. 5 ff.) [4287]. Ziel des Einsatzes dieser Normale ist die „Gesamtkalibrierung“ ([5436-1], S. 5) taktiler Rauheitsmessgeräte. Aufgrund des Vorliegens unterschiedlicher Wellenlängen können zuverlässige Kalibrierungen ausgeführt werden ([Bod92], S. 142). Raunormale können auch für die Kalibrierung verschiedener Messprinzipien genutzt werden. So ist ebenfalls ein Einsatz im Bereich optischer Messgeräte, z.B. für Interferenzmikroskope möglich ([Hil97], S. 78 f.).

Mit den Normalen werden in verschiedenen Stufen definierte Rauheitsparameter abgebildet ([Vol13b], S. 108). Der Kalibrierbereich der klassischen Raunormale deckt dabei Werte von $R_a = 0,15 - 2,5\ \mu\text{m}$ ab ([Hil97], S. 76). Da aufgrund von höher auflösenden Messgeräten ([Gar85], S. 137) feinere Normale benötigt wurden, wurden 1997 die superfeinen Raunormale vorgestellt, die einen Bereich der Rauheit von etwa $R_a = 20 - 100\ \text{nm}$ abbilden ([Hil97], S. 76). Das Profil von Raunormalen setzt sich periodisch fort, um die Kennwerte an beliebigen Antastorten zu erreichen ([Häs65], S. 380). In Anlehnung an die jeweils standardisierte Auswertelänge hat das Profil der Raunormale dabei eine Länge von $4\ \text{mm}$ ([Bod92], S. 140), das der superfeinen Raunormale eine Länge von $1,25\ \text{mm}$ ([Hil97], S. 77).

Von Song wurde in den 80er Jahren bereits erkannt, dass kleinere R_v -Werte zur Kalibrierung sowie Referenzflächen an den Rändern, z.B. zur Ausrichtung der Raunormale und für den Einsatz von Kufentastern, benötigt wurden ([Son88], S. 305). Die von ihm vorgestellten Raunormale weisen R_a -Werte von $100 - 12\ \text{nm}$ auf ([Son88], S. 305), ihre Herstellung ist mit $20 - 30\%$ des Nennwertes toleriert ([Son88], S. 306, S. 311) und sie streuen mit einer Standardabweichung von $3 - 8\%$ ([Son88], S. 306, S. 311). Gatzen et. al. fertigten 2001 Raunormale, die noch feinere R_a -Werte von $8,5$ und $4,2\ \text{nm}$ aufwiesen und zur AFM-Kalibrierung entwickelt wurden ([Gat01], S. 493 f.). Diese Normale wurden am selben Institut umfassend untersucht, so dass die R_a -Werte 20 und $5\ \text{nm}$ reproduzierbar erzeugt werden konnten ([Kou07], S. 95). In weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, dass prinzipiell mit dieser Methodik noch feinere Rauheiten erreicht werden können ([Krü04], S. 33). Dabei wurden auch 3D-Parameter ausgewertet ([Krü04], S. 37 f.).

Es wurde bereits aufgezeigt, dass in den letzten Jahren eine weitere Verbreitung der 3D-Messtechnik stattgefunden hat, was dazu führte, dass natürlich auch ent-

sprechende Normale und Kalibrieransätze entwickelt wurden, von denen einige mittlerweile in DIN EN ISO 25178-70 [25178-70] genormt sind. Dort sind verschiedene grundsätzliche Geometrielemente aufgeführt, an denen sowohl 2D- als auch 3D-Rauheitsparameter nach DIN EN ISO 25178-2 [25178-2] als Messgrößen kalibriert werden können [25178-70]. So gibt es mittlerweile z.B. Ansätze zur Kalibrierung von 3D-Rauheitsparametern im Nanometer-Bereich auf Basis von Rillen ([Bar12], S. 3 ff.). Ebenfalls für die Anwendung im 3D-Bereich standardisiert sind die „klassischen“ Raunormale, die sich als Typ PRO sowie PCR („unregelmäßiges Profil“) ([25178-70], S. 14 f.) in der Norm wiederfinden.

Tatsächliche Topographie-Strukturen, die mithilfe einer isotropen Oberfläche 3D-Rauheitsparameter kalibrieren, finden sich als „Typ AIR: unregelmäßig“ ([25178-70], S. 26 f.). Solche unregelmäßigen 3D-Normale waren in den letzten Jahren häufig Gegenstand der Forschung. So wurden verschiedene Ansätze zur Auslegung und Fertigung solcher Strukturen entwickelt, z.B. das autoregressive Modell bzw. Modelle mit Autokorrelation, vgl. ([25178-70], S. 35 ff.) [Nem09] [Uch11] [Che13] ([Lea13b], S. 410 f.) [Lea14] oder gänzlich zufällige Strukturen ([25178-70], S. 26) [Frü12]. Diese ersten beiden Ansätze in diesem Bereich sind interessant und es kann davon ausgegangen werden, dass in der Zukunft noch weitere hinzukommen werden.

2.4.2.3 Kalibrierung der lateralen Achse(n) (x , y -Achse)

Für die Erfassung von Profilen muss eine laterale Achse x und für die Erfassung von 3D-Topographien müssen zwei laterale Achsen x, y bereitgestellt werden, deren Kalibrierung eine wichtige Aufgabe darstellt. Für die taktile 2D-Messung ist das sogenannte Rillenabstandsnormale (DIN EN ISO 5436-1, Typ C) zur „Kalibrierung vertikaler Profilkomponenten“ ([5436-1], S. 4) vorgesehen, auf das Rillen in Sinus-, Dreiecks- oder Bogenform aufgebracht sind, bei denen u.a. die mittlere Rillenbreite nach DIN EN ISO 4287 ([4287], S. 16) ermittelt und mit dem kalibrierten Sollwert verglichen wird ([5436-1], S. 7 f.).

Ähnliche Rillennormale sind auch für die 3D-Anwendung genormt (DIN EN ISO 25178-70, Typen PPS, PPT, PPR, PPA, PAS), weiterhin werden in der entsprechenden Norm auch neue Ansätze zur Kalibrierung der lateralen Achse(n) genannt [25178-70]. Häufig für optische Messgeräte angewendet werden Gitter ([Dai05b], S. 1241), die als die beschriebenen 1D-Gitter verschiedener Form und 2D-Kreuzgitter genormt sind ([25178-70], S. 8 ff.). Gitter-Strukturen, die solche variablen geometrischen Grundformen abbilden, sowie die zugehörige Herstellung, wurden von Frühauf und Krönert beschrieben ([Frü04], S. 75). Kalibrierstrategien für Gitter und entsprechende Auswertemethoden wurden bei der PTB sowohl für 1D- [Dai05b] als auch 2D-Gitter [Dai07] entwickelt. Kalibriert mit Gittern werden z.B. Weißlichtinterferometer ([VDi08], S. 15) und Rastersondenmikroskope ([Dai05b], S. 1241).

Ferner funktioniert dieses Verfahren zur Kalibrierung heute mit verschiedenen Messverfahren und Unsicherheiten im Nanometer-Bereich ([Mel00], S. 12 ff.).

Aufgrund höher auflösender Messgeräte werden auch hier kleinere Gitterkonstanten benötigt, wobei selbst Gitterbreiten von 100 nm mittlerweile rückführbar und gleichmäßig herstellbar sind ([Tor02], S. 560 f.). Weiterhin verfügbar sind Strukturen, die eine laterale Kalibrierung über einen Materialkontrast mit einer Breite von bis zu $0,4\text{ nm}$ ermöglichen ([Sen05], S. 294).

Als alternativer Ansatz für 3D-Messgeräte ist die Messung eines kalibrierten Abstands zwischen Geometrieelementen möglich, z.B. zwischen Rillen (DIN EN ISO 25178-70 ([25178-70], S. 19 ff.) Typen PDG, AGP, AGC), die Messung eines bekannten Radius (DIN EN ISO 25178-70 ([25178-70], S. 22 f.), Typen ASP, APS) sowie die Erfassung eines photochromen Gitters ([25178-70], S. 28).

Angestrebt wird außerdem die Kalibrierung mehrerer Achsen mit nur einer Messung [25178-70]. So gibt es in DIN EN ISO 25178-70 einige Normale, bei denen gleichzeitig eine Lateral- und eine Horizontalgröße als Messgrößen definiert sind [25178-70].

Ein weiterer Ansatz ist die Kalibrierpyramide nach Ritter, die sogenannte „Nanomarker“ aufweist und sich für verschiedene Anwendungen eignet ([Rit04], S. 1). Die zugehörige Kalibrierstrategie sieht die gleichzeitige Kalibrierung aller drei Achsen zur 3D-Topographiemessung vor ([Rit07], S. 404).

2.4.2.4 Kalibrierung des Übertragungsverhaltens

Da jedes Messgerät von sich aus ein Filterverhalten aufweist, sollte z.B. „die kürzeste räumliche Wellenlänge“ ([VDI08], S. 13) bekannt sein, bei der, analog zur Grenzwellenlänge der Profilfilter, noch 50% einer Eingangsamplitude übertragen werden ([VDI08], S. 13 f.).

Ein Ansatz für die Auflösungsgrenze bei optischen Messgeräten wurde 1996 von Hillmann et. al. vorgestellt [Hil96]. Dabei wurden die taktilen Messergebnisse eines Rechteck-Gitters variabler Gitterbreite so lange gefiltert, bis sie gut mit den Ergebnissen der optischen Messung übereinstimmten ([Hil96], S. 95). Die hierzu erforderliche Filter-Wellenlänge diente dann zur Aussage über die „Grenzwellenlänge“ der optischen Geräte ([Hil96], S. 95).

Weiterhin wurde eine alternative Herangehensweise mit dem Auflösungsnormal entwickelt, das ebenfalls Gitter unterschiedlicher Strukturgrößen aufweist und so eine direkte Messung der Grenzwellenlänge erlaubt ([Krü05a], S. 21). Außerdem kann das bereits im Rahmen der Lateralkalibrierung vorgestellte Rillenabstandsnormal die Kalibrierung des Übertragungsverhaltens erfüllen ([5436-1], S. 4).

Ein ähnlich interessanter Ansatz ist das Chirp-Normal, das von der PTB entwickelt wurde und Sinuswellen mit variabler Wellenlänge aufweist ([Krü07b], S. 572). Mit den Ergebnissen einer Messung des Chirp-Normals kann z.B. die Instrumenten-Übertragungsfunktion (ITF) ermittelt werden ([Krü07b], S. 573). Diese ITF erlaubt nach de Groot z.B. die Beschreibung des Übertragungsverhaltens von Interferometern ([Gro06], S. 30) indem sie das frequenzabhängige Übertragungsverhältnis sinusförmiger Oberflächen charakterisiert ([Gro11b], S. 179). Der Einsatz von Chirp-Normalen ist in den letzten Jahren von verschiedenen Institutionen untersucht worden, z.B. in [Peh11] und [Fuj11]. Die PTB stellte 2012 außerdem ein neues Chirp-Normal vor, das zusätzlich noch kleinere Wellenlängen aufweist als sein Vorgänger ([PTB12], S. 98). Eine generische Auswertestrategie für beliebige Chirp-Normale wurde von Seewig et. al. eingeführt [See14a].

Zuletzt sei noch der sogenannte 3D Siemens-Stern genannt, der in der Norm DIN EN ISO 25178-70 als Typ ASG definiert ist ([25178-70], S. 26) ([Giu13], S. 2 f.). Dieser weist Rillen in Form einzelner Kreissegmente auf, die zum Mittelpunkt hin entsprechend enger werden ([25178-70], S. 26) ([Tan12], S. 74). Somit stehen auch hier verschiedene Wellenlängen zur Messung zur Verfügung ([Giu13], S. 2).

2.4.3 Verfahrensspezifische Vorschriften zur Kalibrierung

Nachdem einige grundlegende Messgeräte-Eigenschaften betrachtet wurden, die sich unabhängig vom Messprinzip untersuchen lassen, und die zugehörigen Normale zur Kalibrierung dieser Eigenschaften vorgestellt wurden, erfolgt eine spezifische Betrachtung der Kalibrierung bei verschiedenen Messprinzipien.

2.4.3.1 Kalibrierung von Tastschnittgeräten

DIN EN ISO 5436-1 [5436-1] gibt Normale für das 2D-Tastschnittverfahren vor. Es werden fünf verschiedene Arten von Normalen unterschieden, wobei drei dieser Typen in verfahrensunspezifischen Betrachtungen bereits behandelt wurden (Tiefeneinstellnormal, vgl. **Kapitel 2.4.2.1**, Rillenabstandsnormal, vgl. **Kapitel 2.4.2.3** und **2.4.2.4**, sowie das Raunormal, vgl. **Kapitel 2.4.2.2**) [5436-1].

Neben diesen allgemein einsetzbaren Normalen werden noch spezielle verfahrensabhängige Normale benötigt, die eine Erfassung „des Zustandes der Tastspitze“ ([5436-1], S. 4) ermöglichen, wozu z.B. eine Rasierklinge genutzt werden kann ([5436-1], S. 12 f.). Wird eine solche scharfe Kante mit einer Tastspitze vermessen, kann deren Form und Größe aus den Ergebnissen ermittelt werden ([Rub04], S. 135). Der fünfte Typ nach DIN EN ISO 5436-1 sind Normale, welche mit einer Kugel oder einem Prisma eine Überprüfung des „Profil-Koordinatensystems“ ([5436-1], S. 5) ausführen. Werden Messgeräte kalibriert, die neben einer Rauheitsmessung

auch eine Erfassung der Kontur durchführen können, kann dabei z.B. eine Kugel eingesetzt werden ([Vol13a], S. 2).

Auch grundsätzliche Ansprüche an die Beschaffenheit von Normalen werden in DIN EN ISO 5436-1 [5436-1] festgelegt. So muss das Material für Normale eine „angemessene Lebensdauer“ ([5436-1], S. 3) erzielen können [5436-1]. Weitere Voraussetzung ist das Vorhandensein einer glatten und ebenen Oberflächenbeschaffenheit ([5436-1], S. 3). Außerdem muss eine normgerechte Auswertung möglich sein, was bedeutet, dass das im Rahmen der Kalibrierung erfasste Messfenster mindestens so groß sein muss wie bei der später ausgeführten Messaufgabe ([5436-1], S. 3).

Praktische Kalibrierschriften für den Einsatz von „Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik“ [4-2-1] finden sich in Bezug auf das Tastschnittverfahren auch in den Richtlinien des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) [4-2-1] [4-2-3] sowie in der Norm DIN EN ISO 12179 [12179].

Die bis hierhin genannten Vorschriften zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten sind primär für den klassischen 2D-Einsatz vorgesehen. Im Zuge der zunehmenden Verbreitung der 3D-Messtechnik müssen auch entsprechende Normale und Kalibrierstrategien für 3D-Topographie-Messgeräte vorgegeben sein. Die meisten Betrachtungen für 3D-Topographie sind zwar speziell auf optische Messgeräte ausgelegt, da aber Tastschnittgeräte grundsätzlich auch zur flächenhaften Messung eingesetzt werden können, gibt es entsprechende Vorschriften zur Kalibrierung in DIN EN ISO 25178-701 [25178-701].

Hier werden Normale, die ebenso für die allgemeine 3D-Kalibrierung nach DIN EN ISO 25178-70 [25178-70] vorgesehen sind, entsprechend für den Einsatz bei Tastschnittgeräten vorgeschrieben. Die Normale nach DIN EN ISO 5436-1 werden außerdem um 3D-Normale erweitert, die ebenfalls Bestandteil der allgemeinen 3D-Norm für Normale DIN EN ISO 25178-70 [25178-70] sind: Es werden 3D-Rillen (DIN EN ISO 25178-701 Typen ER1, ER2, ER3, DIN EN ISO 25178-70 Typen PDG, AGP, AGC), das Kugelnormale (DIN EN ISO 25178-701 Typ ES, DIN EN ISO 25178-70 Typ ASP, APS), das Kreuzgitternormale (DIN EN ISO 25178-701 Typ CG, DIN EN ISO 25178-70 Typ ACG) sowie das Konturnormale (DIN EN ISO 25178-701 Typ CS, DIN EN ISO 25178-70 Typ PCS) vorgestellt [25178-701] [25178-70].

Das Konturnormale ist u.a. für die taktile Konturmesstechnik interessant und weist variable geometrische Grundformen auf, deren „Radien, Winkel, laterale und vertikale Abstände“ ([Fra04], S. 102) kalibriert werden können ([Fra04], S. 102) ([Neu11], S. 120 f.). Es kann zudem für optische Koordinatenmessgeräte eingesetzt werden ([Neu05], S. 18).

Da im Rahmen dieser 3D-Kalibriervorschriften auch auf entsprechende 2D-Normale verwiesen wird, können diese als Erweiterung dieser Vorgaben verstanden werden ([25178-701], S. 17 ff.).

2.4.3.2 Kalibrierung optischer Topographie-Messgeräte

Mit optischen Messgeräten wird häufig eine 3D-Topographie-Erfassung (z.B. mit Weißlichtinterferometern, **Kapitel 2.2.3.1**, und konfokalen Mikroskopen, **Kapitel 2.2.4**) durchgeführt, was komplexe Strategien für die Kalibrierung zur Folge hat ([Lea11b], S. 49). Bei 2D-Messgeräten werden die beiden Achsen häufig einzeln kalibriert (vgl. **Kapitel 2.4.3.1**), beim Einsatz von drei Achsen ist noch hohes Potential für eine Weiterentwicklung vorhanden, da sich die Normung zu dieser Thematik noch im Entwicklungsstadium befindet ([Lea11b], S. 51).

Nach Leach und Giusca müssen dabei die sechs „messtechnischen Merkmale“ aus DIN EN ISO 25178-603 ([25178-603], S. 12) untersucht werden, die einen Parametersatz darstellen, mit dem hinreichend viele Einflüsse auf die Messgeräteachsen beschrieben werden können ([Lea11b], S. 54 f.). Die Merkmale sind: „Verstärkungskoeffizient, Abweichung von der Linearität, Restebenheit, Messrauschen, Lateraler Periodengrenzwert, Rechtwinkligkeit“ ([25178-603], S. 12) ([Lea11b], S. 55).

Der VDI hat für einzelne 3D-Messverfahren jeweils eine entsprechende Richtlinie herausgegeben, die Vorschriften zur Kalibrierung im Rahmen der Rauheitsmessung vorgibt [VDI08] [VDI10]. VDI 2655 Blatt 1.1 beschreibt das „Kalibrieren von Interferenzmikroskopen“ [VDI08], VDI 2655 Blatt 1.2 gibt Vorschriften für das „Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen“ [VDI10] wieder. Die in VDI 2655 Blatt 1.1 erläuterten Kalibriervorschriften sowie auch die dafür einzusetzenden Normale orientieren sich dabei an den schon länger vorhandenen Vorgehensweisen für Tastschnittgeräte ([VDI08], S. 3).

Weiterhin wurde ein detaillierter ganzheitlicher Ansatz zur Topographie-Kalibrierung von Giusca, Leach et. al. vorgestellt, der die Erfassung sämtlicher messtechnischen Merkmale nach DIN EN ISO 25178-603 ([25178-603], S. 12) abdeckt [Giu12a] [Giu12b] [Giu13]. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass z.B. bei der Messung von speziellen Geometrienormalen eine unmittelbare Auswertung und Beschreibung der einzelnen Merkmalsgrößen und somit eine gute praktische Handhabung des Konzepts möglich ist ([Giu12a], S. 1). Viele Normale nach DIN EN ISO 25178-70 [25178-70] werden zur entsprechenden Kalibrierung genutzt und wurden im Wesentlichen bereits vorgestellt. Da sich die 2D-Normale aus der entsprechenden Profilnorm in DIN EN ISO 25178-70 wiederholen, ist längerfristig das Zurückziehen der DIN EN ISO 5436-1 geplant ([Lea11b], S. 52). Einige der zusätzlichen 3D-Normale wurden bereits 2003 vorgestellt (vgl. [Vil03], S. 130 ff.).

Tabelle 1 (nach [25178-70]) gibt einen Überblick über die in der Norm DIN EN ISO 25178-70 vorgestellten Normale sowie die dort gegebenen Typenbezeichnungen und ordnet die entsprechenden Geometrien den Kapiteln zu, in denen sie bereits im Rahmen der messgeräte-unspezifischen Betrachtung von Kalibrierprozessen vorgestellt wurden.

Tabelle 1: Überblick über profilhafte und flächenhafte Maßverkörperungen nach DIN EN ISO 25178-70 ([25178-70], S. 7 f.)

Bezeichnung - profilhaft	Kapitel	Bezeichnung - flächenhaft	Kapitel
Rillen, rechteckig und rund (PGR, PGC)	2.4.2.1	Senkrechte und kreisförmige Rillen (AGP, AGC), Ebenheitsnormal (AFL)	2.4.2.1
Rauheitsstruktur unregelmäßig 2D, gerade und kreisförmig (PRO, PCR)	2.4.2.2	Rauheitsstruktur unregelmäßig 3D (AIR), gekreuzte und radiale Sinuswelle (ACS, ARS)	2.4.2.2
Sinus-, Dreieck-, Rechteck-Bogen- und approximiertes Sinusgitter (PPS, PPT, PPR, PPA, PAS), Doppelrille (PDG)	2.4.2.3	Senkrechte und kreisförmige Rillen (AGP, AGC), Halbkugel und Ebene mit Kugel (ASP, APS), Kreuzgitter (ACG), photochromes Muster (APC)	2.4.2.3
	2.4.2.4	Rillen in sternförmiger Anordnung/3D-Siemens-Stern (ASG)	2.4.2.4
Tastspitzenprüfnormale/ Rasierklinge (PRB), Konturnormal (PCS), Prisma (PRI)	2.4.3.1	Halbkugel und Ebene mit Kugel (ASP, APS), Kreuzgitter (ACG)	2.4.3.1

Weiterhin gibt es eine Vielzahl an Normalen, die bisher nicht normativ definiert sind, allerdings trotzdem ihre Anwendung finden. Einige dieser Normale wurden ebenfalls im vorherigen Kapitel erläutert. Bekannte Ansätze zur Kalibrierung der einzelnen genannten messtechnischen Merkmale werden nachfolgend kurz eingeführt.

Beim „**Verstärkungskoeffizienten**“ der jeweiligen Achse handelt es sich um die Steigung der in die Übertragungsfunktion dieser Achse eingepassten Geraden ([25178-603], S. 8), die „**Abweichung von der Linearität**“ entspricht dann dem Wert der größten punktuellen Abweichung dieses Fits zum Original-Datensatz ([25178-603], S. 12) und die „**Rechtwinkligkeit**“ gibt die Differenz des Winkels z.B. der beiden lateralen Achsen zu ihrem Sollwert (90°) an ([25178-603], S. 12).

Giusca et. al. empfehlen die Ermittlung der Übertragungsfunktion der z -Achse unter Anwendung eines abgestuften Satzes von Tiefeneinstellnormalen, deren Messungen

dann zur Ableitung der Linearitätsabweichung sowie des Verstärkungskoeffizienten genutzt werden ([Giu12b], S. 3). Dabei wird zur Ermittlung der Stufenhöhe das gemittelte Profil der 3D-Topographie der Profilauswertung nach DIN EN ISO 5436-1 zugeführt, was zur Absicherung mehrfach über den Messbereich verteilt erfolgen sollte ([Giu12b], S. 3). Aus den n Messergebnissen wird dann mit den Soll-Höhenwerten $h_{cal,i}$ und den Messergebnissen $h_{ms,i}$ der Verstärkungskoeffizient α_z ermittelt ([Giu12b], S. 5):

$$\alpha_z = \frac{\sum_{i=1}^n h_{cal,i} \cdot h_{ms,i}}{\sum_{i=1}^n h_{cal,i}^2} . \quad (56)$$

VDI 2655 Blatt 1.1 schreibt den Einsatz von Tiefeneinstellnormalen vor, wobei zur Linearitätsüberprüfung unterschiedliche Rillen empfohlen werden ([VDI08], S. 15 f.) und auch Blatt 1.2 sieht Tiefeneinstellnormale für die z -Achse vor ([VDI10], S. 18 f.).

Beide Blätter sehen für die lateralen Achsen ein Gitter-Normal vor, wobei Blatt 1.2 auch andere Vorgehensweisen nennt ([VDI08], S. 15) ([VDI10], S. 18). Giusca et. al. empfehlen anstelle des Gitter-Normals die bereits vorgestellten Kreuzgitter-Normale (Typ ACG nach DIN EN ISO 25178-70 [25178-70], S. 23) sowie die Kalibrier-Pyramide nach Ritter [Rit04] [Rit07] ([Giu12b], S. 2). Konkret wird ein Einsatz des Kreuzgitters vorgeschlagen, bei dem die Schwerpunkte der vorhandenen Vertiefungen lokalisiert werden ([Giu12b], S. 5 f.). Verstärkungskoeffizient und Linearitätsabweichung werden dann ebenfalls analog nach Gleichung (56) berechnet ([Giu12b], S. 6). Die Rechtwinkligkeit wird weiterhin überprüft, indem „der Winkel zwischen zwei nominell orthogonalen Reihen“ ([Giu12b], S. 6) erfasst wird.

Die „**Restebenheit**“ wird in DIN EN ISO 25178-603 als „Ebenheit der Flächenreferenz“ ([25178-603], S. 12) definiert und wird nach VDI 2655 Blatt 1.1 durch in einem mäanderförmigen Muster ausgeführte Wiederholmessungen eines Ebenheitsnormals ermittelt ([VDI08], S. 12). Eine Mittelung von 8–16 Messstellen wird ausgeführt, um die Oberflächenstruktur des Ebenheitsnormals herauszumitteln ([VDI08], S. 12). Analoge Vorschriften finden sich auch in VDI 2655, Blatt 1.2 ([VDI10], S. 20 f.). Ebenfalls nach Giusca et. al. wird ein Ebenheitsnormal eingesetzt, bei dem zur Vereinfachung der Auswertung ein Schwellwert eingesetzt wird, um z.B. Ausreißer zu entfernen ([Giu12a], S. 5 f.).

Das „**Messrauschen**“ bezeichnet ein „während des üblichen Einsatzes des Messgerätes zum Ausgangssignal addiertes Rauschen“ ([25178-603], S. 9) und kann ermittelt werden, indem eine Differenzbildung zweier sofort hintereinander ausgeführter Aufnahmen eines Ebenheitsnormals erfolgt ([VDI08], S. 11) ([VDI10],

S. 21). Der S_q -Wert der Differenz-Topographie liefert dann eine Aussage über den Betrag des Rauschens S_{qR} ([Giu12a], S. 3):

$$S_{qR} = \frac{S_q}{\sqrt{2}}. \quad (57)$$

Ein zweiter Ansatz ist die Mittelwertbildung, wobei n Topographien des Ebenheitsnormals gemittelt werden, die hieraus resultierende Topographie anschließend auf den Kennwert S_{qn} führt und eine alternative Beschreibung des Rauschens zulässt ([Giu12a], S. 3):

$$S_{qR} = \sqrt{\frac{S_q^2 - S_{qn}^2}{1 - \frac{1}{n}}}. \quad (58)$$

Der „**laterale Periodengrenzwert**“ ist nach DIN EN ISO 25178-603 festgelegt als „räumliche Periode eines sinusförmigen Profils, für die das höhenbezogene Ansprechverhalten eines Messgeräts auf 50% abfällt“ ([25178-603], S. 11) und ist damit ähnlich zur Grenzwellenlänge z.B. des Gauß-Filters nach DIN EN ISO 16610-21 definiert ([16610-21], S. 5).

Nach Giusca und Leach wird demnach ein Normal benötigt, das eine Reihe von Sinus-Perioden zur Verfügung stellt, was z.B. auf das Chirp-Normal [Krü07b] ([PTB12], S. 98) [Peh11] [Fuj11] zutrifft ([Giu13], S. 2). Empfohlen wird in diesem Kalibrier-Konzept allerdings der Einsatz des Siemens-Sterns (DIN EN ISO 25178-70 Typ ASG [25178-70], S. 26), da dieser im Gegensatz zum Chirp-Normal jede beliebige Ortsfrequenz in x - und y -Richtung abbilden kann ([Giu13], S. 2).

Die von Giusca und Leach vorgeschlagene Auswertung subtrahiert zwei Profile, die durch zwei Erhöhungen bzw. Vertiefungen des Siemens-Sterns gelegt werden, die sich jeweils gegenüberliegen ([Giu13], S. 3). Nach einer entsprechenden Skalierung kann die laterale Auflösungsgrenze sofort abgelesen werden ([Giu13], S. 3 f.). VDI 2655 Blatt 1.1 und 1.2 legen das Auflösungsnormal mit lateralen Gitterstrukturen, die einem Satz von Wellenlängen entsprechen, zur Feststellung des Auflösungsvermögens fest ([VDI08], S. 13 ff.) ([VDI10], S. 22).

Obwohl der Begriff der „lateralen Auflösung“ normativ definiert ist, gibt es trotzdem noch keinen einheitlichen Konsens ([Lea11b], S. 64 f.). So ist z.B. kürzlich ein neuer Begriff der „kleinskaligen Profiltreue“ (englisch: „small scale fidelity“) vorgeschlagen worden, die für einen Messdatensatz dann erfüllt ist, wenn die betragsmäßige prozentuale Amplituden-Abweichung seines Fits zur Soll-Geometrie einen bestimmten Grenzwert erfüllt ([See14a], S. 4).

Es kann abschließend konstatiert werden, dass verschiedene Ansätze zur Kalibrierung von optischen Topographie-Messgeräten vorhanden sind. Entsprechende Normale, die auf die „messtechnischen Merkmale“ abgestimmt sind, können z.B. in der „Bento Box“, die von Leach et. al. vorgestellt wurde, mittlerweile in Serie bezogen werden ([Lea13b], S. 406 ff.).

2.4.3.3 Kalibrierung von Ellipsometern

Bei der Kalibrierung von Ellipsometern werden definierte Schichtdicken angestrebt ([Tho04], S. 108). Thomsen-Schmidt et. al. stellen dabei Normale mit einer Oxidschicht auf Silizium mit Dicken von 6–1000 nm vor ([Tho04], S. 108). Die kalibrierte Schichtdicke kann dabei mit anderen Messverfahren ermittelt werden ([Koe05], S. 255) ([Tho04], S. 108). Dies sind allerdings Ansätze für die Kalibrierung von Ellipsometern ohne zusätzliche Topographie-Messung.

Für die Kalibrierung der Messung von Δ und Ψ des EHT schlägt Leonhardt die Anwendung eines Faktors $V(x, y)$ vor ([Leo10], S. 627). Dieser ist bei der Messung eines vorher bekannten ellipsometrischen Verhältnisses $\rho_{el,cal}$ folgendermaßen definiert ([Leo10], S. 627):

$$V(x, y) = \frac{R_{ms}(x, y)}{\rho_{el,cal}}, \quad (59)$$

wobei $R_{ms}(x, y)$ ein gemessenes Übertragungsverhältnis zwischen s - und p -Polarisation beschreibt ([Leo10], S. 626).

2.4.3.4 Kalibrierung von Streulichtsensoren

Die Kalibrierung von Streulichtsensoren wird in der Empfehlung VDA 2009 [VDA09] behandelt. Demnach erfolgt die Erstkalibrierung des Sensors so, dass die Kenngrößen „unabhängig von der Lichtleistung“ ([VDA09], S. 8) sind und der bereits in **Kapitel 2.2.5** eingeführte Kalibrierfaktor k_F bei einer Gleichverteilung des Streulichts ermittelt wird, bei der k_F so angepasst wird, dass sich ein Kennwert von $A_q = 100$ ergibt ([VDA09], S. 8).

Im Betrieb kann eine Kalibrierung dann mit einer polierten Probe, die „den kleinstmöglichen Streulichtwert anzeigt“ ([VDA09], S. 8) sowie mit ähnlich zur jeweiligen Anwendung ausgeprägten Musterbauteilen erfolgen ([VDA09], S. 8). Die Rückführung der Sensoren wird mit einem „Winkelendmaß“ gewährleistet, dessen Winkeldifferenz aus zwei um 180° verdrehten Messpositionen ermittelt wird ([VDA09], S. 8).

2.4.3.5 Kalibrierung der industriellen Computertomographie

Problematisch bei der Anwendung der CT ist die Rückführung der Messungen, bei der es immer noch Schwierigkeiten gibt ([Car12], S. 491). Für den Einsatz in der

Koordinatenmesstechnik gibt es Normale, die CT-Geräte kalibrieren können, wobei z.B. Lochplatten oder Rubinkugeln eingesetzt werden ([Bar13], S. 3 ff.). So wurde für die CT u.a. eine „Kalottenplatte“ ([Bar07], S. 496 f.) entwickelt. Neugebauer et. al. verfolgten einen ähnlichen Ansatz, bei dem eine Reihe von „sphärischen Kalotten“ ([Neu07], S. 566) an mehreren Seiten eines Würfels angebracht und gemessen werden ([Neu07], S. 566).

Eine Übersicht über neue KMG-Normale findet sich bei Neuschaefer-Rube et. al. ([Neu11], S. 119 ff.), ein umfangreicher Überblick über Normale für die CT-Koordinatenmesstechnik wird von Kruth et. al. ([Kru11], S. 835 ff.) gegeben.

2.4.3.6 Kalibrierung pneumatischer Abstandsmesseinrichtungen

Bei pneumatischen Abstandssensoren wird in der Regel eine relative Kalibrierung durchgeführt ([Eif15a], S. 85). Dabei wird z.B. die pneumatische Kennlinie erfasst, was allerdings dazu führen kann, dass der bei der Messung entstehende Staudruck eine elastische Formänderung des Messaufbaus hervorruft und so das Messergebnis verändert wird ([Eif15a], S. 85) ([Eif14], S. 25).

Ein neuer Entwurf der Norm DIN 2271 beschreibt kurz mögliche Vorgehensweisen zur Kalibrierung ([2271], S. 11 ff.). Dabei wird die Linearität mit einer Messung von mindestens drei Punkten der pneumatischen Kennlinie, die möglichst den gesamten Messbereich abdecken sollten, verifiziert und die Eigenschaften des Rauschens, der Wiederholpräzision sowie der Dynamik des Sensors werden untersucht ([2271], S. 11 ff.).

2.4.4 Werkstoffe und Fertigung von Geometrienormalen

So vielseitig und umfangreich das Angebot an Geometrienormalen selbst ist sind auch die Möglichkeiten zur Fertigung sowie zur Werkstoffauswahl bei Normalen. Einige Möglichkeiten hierzu werden nachfolgend aufgezählt. Es wurde bereits festgestellt, dass die eingesetzten Fertigungsverfahren ein Ausgangspunkt für die Verbesserung von Normalen sind, was damit zusammenhängt, dass die Fertigung auch bei der Auslegung eine Rolle spielt ([Koe05], S. 245). In der Fertigungstechnik gibt es heute Möglichkeiten, definierte Geometrien für Kalibrierprozesse mit höchster Genauigkeit herzustellen ([Mee11], S. 180). Neben dieser benötigten Genauigkeit ergibt sich aus der Definition des Normals ([25178-70], S. 5) weiterhin die Notwendigkeit einer entsprechenden Reproduzierbarkeit bei der Herstellung ([Ehr11], S. 145).

Derzeit werden verschiedenste Fertigungsverfahren zur Herstellung von Normalen eingesetzt. Zunächst sei das **Schleifen** genannt. Die ersten Raunormale wurden durch Anwendung eines Schleifverfahrens hergestellt ([Häs65], S. 380).

Mit einem **Ultrapräzisions-Drehprozess** (UP-Drehprozess), der in der Regel eine Schneide aus monokristallinem Diamant einsetzt, können hochgenaue Oberflächen erzeugt werden ([Mee11], S. 182 f.). Z.B. die superfeinen Raunormale oder Tiefeneinstellnormale können mit dieser Technik gefertigt werden ([Mee11], S. 184) ([Hil97], S. 76) ([Bra99], S. 496). Das mit dem Verfahren erzeugte Drehprofil ist dabei „sehr viel gleichmäßiger [...] als es durch Schleifen herzustellen ist“ ([Hil97], S. 77).

Generell ist zur Fertigung von Raunormalen neben konventionellen Schleif- und UP-Drehprozessen auch das sogenannte **Nanoschleifen** geeignet ([Kou07], S. 1). Mit diesem Verfahren wird die Herstellung von extrem feinen Rauheitsstrukturen ($R_a < 1\text{nm}$) durchgeführt ([Krü04], S. 33) ([Krü05b], S. 272).

Das Nanoschleifen wird dabei den Schleifprozessen zugeordnet ([Kou07], S. 37), obwohl die Kinematik zwischen Werkstück und Werkzeug mehr der des Läppens ähnelt ([Gat97], S. 134). Dies bedeutet, dass im Eingriff ein „Rotieren der Arbeitsscheibe sowie der Werkstücke“ ([Kou07], S. 40) erfolgt. Für die flachen Werkstücke werden allerdings Schleifwerkzeuge und keine losen Körner eingesetzt ([Gat97], S. 134). Der spezielle Einsatz dieses Verfahrens im Bereich der Raunormale wurde von Gatzen und Kourouklis untersucht ([Gat01], S. 496).

Für Strukturen mit feinen rechteckigen Rillen, sowie für den Siemens-Stern, eignet sich z.B. das spezielle Herstellungsverfahren der **Elektronenstrahl-Lithographie** ([Gao08], S. 4) und u.a. auch für Gitter eignen sich allgemein die **lithographischen Verfahren** ([Koe11], S. 173) ([Kou07], S. 30).

Das **nasschemische Ätzen** sowie das **Trockenätzen** können ferner für verschiedene Normale wie z.B. das Dreiecksgitter ([Frü05], S. 1287) und andere Gitterformen ([Frü04], S. 75), Tiefeneinstellnormale ([Bra99], S. 496) ([Neu11], S. 122) sowie das Auflösungsnormal ([Krü05a], S. 23 f.) eingesetzt werden. Insbesondere der Ätzprozess von Silizium ist dabei sehr umfassend untersucht worden ([Sat99], S. 131) ([Frü04], S. 75).

Weitere eingesetzte Verfahren für die Herstellung von Normalen sind die Fertigung mit einem **fokussierten Ionenstrahl** (z.B. Kalibrierpyramide ([Rit04], S. 1), oder 3D-Siemens-Stern ([Tan12], S. 75)); **Läpp- sowie Polierprozesse** ([Kou07], S. 29), **Abscheideprozesse** ([Kou07], S. 30), sowie **Funkenerosion** (z.B. Konturnormal [Fra04], S. 102, Kugelkalottenwürfel [Neu07], S. 566).

Es gibt auch diverse Werkstoffe, die sich grundsätzlich für den Einsatz bei Kalibriernormalen eignen. Dabei gilt es, einige Kriterien zu beachten: DIN EN ISO 5436-1 verlangt eine ausreichende mechanische Stabilität ([5436-1], S. 3), weiterhin muss das Material mit dem eingesetzten Fertigungsverfahren in Einklang stehen und

zudem chemisch stabil sein, was sich aus der Definition des Normals ergibt ([25178-70], S. 5). Die mechanische Stabilität wird z.B. durch die Vorgabe bestimmter Härte-Werte überprüft ([Son88], S. 307).

Somit sind folgende Werkstoffe im Gebrauch. Für Raunormale eignen sich je nach Fertigungsverfahren **Werkzeugstähle** und spezielle, gehärtete **Chromstähle** ([Häs65], S. 381), oder „**Silizium** und **Saphir**“ ([Krü04], S. 33).

Für die superfeinen Raunormale wird laut Meeß et. al. eine harte Schicht aus **Nickel und Phosphor** zerspannt, wobei ein **Kupfer**-Rohling als Substrat dient ([Mee11], S. 184). Vorteil dieser Werkstoffkombination ist die gute Zerspanbarkeit beim UP-Drehen mit einem Diamantwerkzeug sowie die „ausreichend hohe Härte“ ([Kol10], S. 371). Dabei kann grundsätzlich festgestellt werden, dass bei der UP-Zerspannung „in aller Regel Nichteisenmetalle“ ([Kol10], S. 371) Verwendung finden.

Tiefeneinstellnormale können zum Beispiel aus **Glas** ([Bra99], S. 497), **Silizium** oder **Metallen** ([Neu11], S. 122) sowie **vernickeltem Kupfer** ([Bra99], S. 498) gefertigt werden. Für Konturnormale kommt **Edelstahl** ([Fra04], S. 102) oder **Chrom** ([Neu05], S. 1) zum Einsatz. Weiterhin wird allgemein für Normale der Einsatz von **Titan** ([Neu07], S. 566) und **Platin** ([Neu11], S. 124) in der Literatur vorgeschlagen.

3 Auswahl und Weiterentwicklung modellbasierter Techniken

Bekannte Normale sowie ihre Anwendung, die zu kalibrierenden Messverfahren sowie physikalische Grundlagen der Beschreibung von Messgeräten wurden erläutert. Ausgehend von diesem Stand der Technik erfolgt die Weiterentwicklung der Geometrienormale.

Im Verlauf dieser Überlegungen werden drei Säulen (vgl. **Kapitel 1**) betrachtet. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Auswahl und Weiterentwicklung von Techniken der virtuellen Beschreibung von Messgeräten (Säule 1 in **Abbildung 14**). Es werden Ansätze und Vereinfachungen beschrieben, die bei der späteren Auslegung der Normale als Modell zum Einsatz kommen.

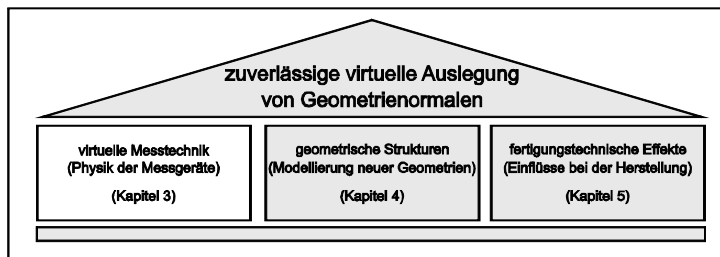


Abbildung 14: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Geometrienormalen

Im Rahmen von Industrie 4.0 soll ein breiterer industrieller Einsatz von Software erreicht werden ([Sen13], S. 1), und so gewinnt auch die virtuelle Modellierung von Prozessen immer mehr an Bedeutung. Ziel der Virtualisierung solcher Prozesse ist die Vermeidung von realen Messungen bzw. Experimenten, wodurch häufig auch Kostenersparnisse realisiert werden können ([Sch08c], S. 307).

Die Kapazität von Prozessoren unterliegt nach dem Moore'schen Gesetz einem exponentiellen Wachstum, wobei die Verdopplungszeit dieses Wachstums einen Wert von etwa 1,5 Jahren aufweist ([Ham99], S. 43). Die Verbesserung der Rechnerkapazität ermöglicht die physikalische Modellierung immer komplexerer Zusammenhänge. Heute stehen Hochleistungsrechner zur modellbasierten Analyse von komplexen physikalischen Zusammenhängen zur Verfügung ([Lau13], S. 14).

Die physikalischen Grundlagen der genutzten Messprinzipien wurden in **Kapitel 2** vorgestellt. Für den praktischen Einsatz der Beschreibung von Messgeräten sind oftmals Modelle ausreichend, welche in diesem Abschnitt eingeführt werden. Ziel ist die Darstellung der Messverfahren mit möglichst einfachen Modellen, da der Schwerpunkt dieser Arbeit im Bereich der Auslegung von Geometrienormalen liegt, wozu die virtuellen Messverfahren als Werkzeug eingesetzt werden sollen.

3.1 Modellierung taktiler Messverfahren

Die Interaktion zwischen Probe und Messgerät beschreibt wichtige Zusammenhänge. Die Wirkung der taktilen Abtastung auf die Oberfläche kann dabei berechnet werden. Das Phänomen der morphologischen Filterwirkung der Tastspitze ist hinreichend bekannt, vgl. ([Bod92], S. 17) ([Sch99], S. 70 f.).

Ein häufig genutztes Werkzeug zur Implementierung solcher Effekte in der Signalverarbeitung sind die morphologischen Filter nach DIN EN ISO 16610-40 und -41 [16610-40] [16610-41]. Unter Anwendung dieser Filter kann eine taktiler Abtastung simuliert werden ([Pue05], S. 667) ([Sch08c], S. 300) ([Lou11], S. 134). Die eingesetzten morphologischen Operationen stellen dabei die eigentliche Messung sowie die Rekonstruktion des Profils aus den Messdaten dar ([Kry04b], S. 43).

Dabei wird allgemein eine morphologische Schließung mit den Koordinaten der Tastspitzengeometrie \vec{d}_{ip} als strukturierendem Element ausgeführt, was bedeutet, das zunächst eine Dilatation und dann eine Erosion der Oberfläche \vec{z}_e ausgeführt werden muss ([Wec08], S. 293) ([Pue05], S. 666 f.):

$$\vec{z}_G = (\vec{z}_e \oplus \vec{d}_{ip}) \odot \vec{d}_{ip}, \quad (60)$$

wobei das Profil \vec{z}_G das rekonstruierte Profil bezeichnet. Zur Anwendung auf Profile muss die Filterung ortsdiskret ausgeführt werden; entsprechende Implementierungen finden sich z.B. in [Sri98] und [Lou11].

Wird also eine kugelförmige Tastspitze mit Radius r_{ip} und dem lateralen Punktabstand Δx vorausgesetzt, dann können die Koordinaten $d_{ip,i}$ der Tastspitze mit der Zählvariable i wie folgt dargestellt werden ([Sri98], S. 624):

$$d_{ip,i} = \sqrt{r_{ip}^2 - ((i-1) \cdot \Delta x)^2}, \text{ für } i = 1, 2, \dots, m, \quad m = (\text{fix}(r_{ip} / \Delta x) + 1), \quad (61)$$

wobei von einer symmetrischen Geometrie (der sogenannten ökonomische Form nach DIN EN ISO 16610-41 ([16610-41], S. 7)) ausgegangen wird ([Sri98], S. 624). Das Schema dieser Filterung wird in **Abbildung 15** dargestellt. Beispielhaft abgebildet werden das Profil, das strukturierende Element sowie die resultierende Filterlinie.

Es kann z.B. unter Voraussetzung von gleicher Diskretisierung von Oberfläche und strukturierendem Element ([Sri98], S. 624) und der Gerätefunktion $G_f(\cdot)$, welche allgemein den Messgeräte-Operator bezeichnet, folgende Implementierung in Anlehnung an [Sri98] und [Pue05] gewählt werden:

$$z_G(x) = G_f(z_e(x)) = (z_e(x) \oplus d_{ip}(x)) \odot d_{ip}(x) \triangleq \left[\begin{pmatrix} z_{e,1} \\ \dots \\ z_{e,n} \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} d_{ip,1} \\ \dots \\ d_{ip,m} \end{pmatrix} \right] \odot \begin{pmatrix} d_{ip,1} \\ \dots \\ d_{ip,m} \end{pmatrix},$$

$$z_{G,i} = \min \left\{ \left(\max \{ (z_{e,i} + d_{ip,1}), (z_{e,i+\xi+1} + d_{ip,\xi}), (z_{e,i-\xi+1} + d_{ip,\xi}) \} - d_{ip,1} \right), \dots \right. \\ \left. (z_{e,i+\xi+1} - d_{ip,\xi}), (z_{e,i-\xi+1} - d_{ip,\xi}) \right\} \quad (62)$$

für $\xi = 2, 3, \dots, m$,
und $i = m, m+1, \dots, (n-m+1)$,

wobei die Randzonen gesondert betrachtet werden müssen, die Kugel als Punktwolke \vec{d}_{ip} der Länge m vorliegt und die Oberfläche als Punktwolke \vec{z}_e der Länge n .

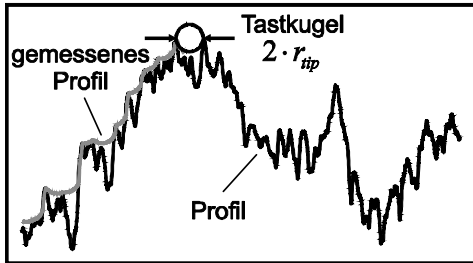


Abbildung 15: Prinzip der morphologischen Schließung bei taktilem Abtastung

Für die Auslegung der Normale in **Kapitel 4.1** wird diese ideale Abtastung vorausgesetzt. Dabei wird Linearität angenommen und nichtideale Faktoren bleiben unberücksichtigt. Sollen nichtideale Effekte berücksichtigt werden, so muss eine Erweiterung des Modells erfolgen.

Später werden in **Kapitel 6.1** auch Nichtidealitäten simuliert, damit die Möglichkeiten der generierten Normale unter den entsprechenden Voraussetzungen evaluiert werden können. Dazu werden die Modellierungsansätze entsprechend erweitert.

3.2 Modellierung optischer Messverfahren

Die physikalischen Grundlagen zur Beschreibung optischer Messverfahren wurden im vorherigen Kapitel erläutert. Nachfolgend wird die praktische Implementierung für verschiedene Messverfahren auf Basis vorhandener Modelle gezeigt. Für einige Messverfahren ist es dabei möglich, die Messgeräte als vereinfachtes Modell darzustellen.

3.2.1 Modellierung optischer Topographie-Messgeräte

Im Gegensatz zum Tastschnittverfahren ist der Abtastvorgang mit optischen Messgeräten i.d.R. nicht allgemein mathematisch lösbar, da die erfasste „elektromagnetische Oberfläche“ von verschiedenen Parametern wie der Wellenlänge des Lichts, Materialeigenschaften und der Topographie selbst abhängig ist ([14406], S. 6).

Daher wird zur generischen Betrachtung folgende Implementierung gewählt: In der später ausgeführten Iterationskette wird ein λ_s -Filter vorgesehen, das kurzwellige Profilanteile entfernt, die unterhalb der Strukturgröße liegen, die in lateraler Richtung erfasst werden könnte ([Eif15c], S.5).

Weiterhin wird eine Glättung des Profils mithilfe einer morphologischen Schließung mit einer Kreisscheibe ausgeführt ([Eif15c], S. 5). Dies führt zwar nicht zu einer Berücksichtigung der eigentlichen Abtastung ([Krü13], S. 201), sorgt aber gleichwohl durch eine Glättung des Profils für eine bessere Abtastbarkeit der resultierenden Oberfläche mit optischen Geräten. Dabei werden zu steile Kanten entfernt, die Artefakte wie „Batwings“ hervorrufen können ([Gao08], S. 2) sowie die zulässige Steigung zur Erfassung ([25178-603], S. 11) bzw. die Steigung, die mit der gegebenen numerischen Apertur ([25178-602], S. 10) maximal erfasst werden kann, überschreiten ([Eif15c], S. 5).

Zusammenfassend sei die Gerätefunktion $G_f(\cdot)$ optischer Topographie-Messgeräte unter Anwendung eines strukturierenden Elements $d_c(x)$ als Kreisscheibe sowie dem Operator $F_S[\cdot]$ zur λ_s -Filterung wie folgt definiert (vgl. [Eif15c], S. 5):

$$z_G(x) = G_f(z_e(x)) = F_S[(z_e(x) \oplus d_c(x)) \odot d_c(x)]. \quad (63)$$

Dabei ist $z_e(x)$ das Eingangsprofil und $z_G(x)$ das Ausgangsprofil dieser Transformation. Bei Anwendung einer 3D-Topographie kann eine zeilen- bzw. spaltenweise Implementierung in x - sowie y -Richtung ausgeführt werden ([Eif15c], S. 5). Letztendlich zielt dieses Vorgehen auf die Modellierung von Weißlichtinterferometern und konfokalen Mikroskopen ab. Würde eine spezifische Beschreibung eines einzelnen Messgerätes separat ausgeführt werden, ließe sich eine detailliertere Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge realisieren. Dabei kann z.B. mithilfe der Faltung mit einer Übertragungsfunktion eine Berücksichtigung der speziellen frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften erfolgen ([Eif15c], S. 5). Es gilt mit der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion $v_x = v(\omega_x)$ in x -Richtung ([Eif15c], S. 5):

$$z_G(x) = z_e(x) * \mathfrak{T}^{-1}\{v_x\} = \mathfrak{T}^{-1}\{\mathfrak{T}\{z_e(x)\} \cdot v_x\}. \quad (64)$$

Analog kann eine Berechnung in y -Richtung ausgeführt werden. Im Folgenden wird allerdings, um eine möglichst generische Beschreibung zu erhalten, davon ausgegangen, dass die zu erwartenden Glättungseffekte durch die beiden Prozessschritte der Gerätefunktion $G_f(\cdot)$ (Gleichung (63)) hinreichend gut beschrieben werden ([Eif15c], S. 5).

3.2.2 Modellierung der Ellipso-Höhen-Topometrie

Zentrales Element beim Einsatz des EHT ist die Erkennung unterschiedlicher Materialien. Es kann eine Betrachtung des Messgeräts im Rahmen der geometrischen Optik erfolgen. Dieses Werkzeug ist völlig ausreichend, um die Brechung und Reflexion an unterschiedlichen Materialien zu beschreiben. Grundsätzlich werden Modelle für drei Vorgänge vorgestellt: die Korrektur der Höhe, die Materialerkennung sowie die Messung der Dicke transparenter Schichten.

Zunächst sei die Korrektur der Höhendaten ΔH_k erläutert. Nach Leonhardt kann diese mit folgendem Term beschrieben werden, wobei λ die Wellenlänge des Lichts und AOI dessen Einfallswinkel beschreibt ([Leo10], S. 631):

$$\Delta H_k = \frac{\lambda}{4\pi \cdot \cos(AOI)} \cdot \text{phase}\{S(x, y)\}. \quad (65)$$

Die Variable $S(x, y)$ bezeichnet dabei den „komplexen Kontrast“, der durch Polarisationsinflüsse des Objektarms, des Referenzarms und der Beleuchtung bestimmt wird ([Leo99], S. 105). Mit den zugehörigen Jones-Matrizen M_{OA} und M_{RA} sowie dem normierten Jones-Vektor der Beleuchtung $J_{el,0}$ ergibt sich ([Leo99], S. 105):

$$S = \frac{2J_{el,0}^* M_{RA}^* M_{OA} J_{el,0}}{J_{el,0}^* (M_{OA}^* M_{OA} + M_{RA}^* M_{RA}) J_{el,0}}. \quad (66)$$

Komplex konjugierte, transponierte Tensoren sind mit * benannt ([Leo99], S. 103).

Die Beschreibung der Materialerkennung mit dem Messgerät kann über ein Schichtmodell erfolgen, wie in **Abbildung 16 a**) ([Azz87], S. 271) dargestellt. Dabei fällt das Licht durch ein Umgebungsmedium, meist Luft, mit dem Winkel AOI auf eine Oberfläche, wo ein Teil reflektiert und ein Teil transmittiert wird ([Azz87], S. 270 f.).

Das Material der Oberfläche kann dann erkannt werden, indem seine Brechzahl unter Anwendung von Gleichung (3) berechnet wird ([Azz87], S. 274).

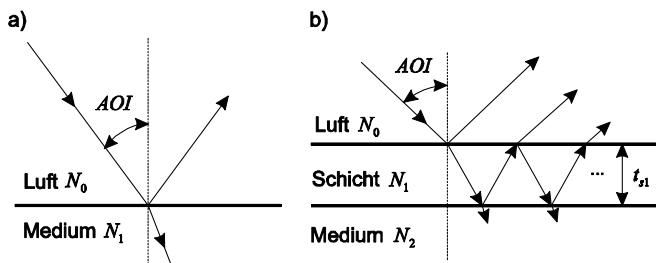


Abbildung 16: Schichtmodelle zur Beschreibung der Ellipsometrie;

a) Materialerkennung nach ([Azz87], S. 271),

b) Schichtdickenmessung nach ([Azz87], S. 283)

Eine weitere typische Aufgabe der Ellipsometrie ist die Schichtdickenmessung, wozu das entsprechende Modell in **Abbildung 16 b)** ([Azz87], S. 283) gezeigt wird. Dann kann die Dicke t_{s1} von transparenten Filmen als n -te periodische Lösung t_{s1}^n wie folgt berechnet werden ([Rai15a], S. 6) ([Azz87], S. 284):

$$t_{s1}^n = t_{s1}^0 + \frac{1}{2} \sqrt{(N_1^2 - N_0^2 \cdot \sin^2(AOI))} \cdot m \cdot \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (67)$$

vorausgesetzt, die benötigten Größen sind bekannt. Ein umfangreicher Überblick über Schichtmodelle findet sich in [Azz87] sowie [Rai15a].

3.2.3 Modellierung der Computertomographie

Für die Beschreibung der Computertomographie werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt. Zunächst erfolgt eine idealisierte Modellierung, die keine physikalischen Effekte der eigentlichen Abtastung berücksichtigt, sondern lediglich die durch die Einteilung in Voxel vorgenommene Diskretisierung berechnet. Dies erfolgt durch eine entsprechende morphologische Filterung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung:

$$z_G(x) = \left(\left[(z_e(x) \oplus d_v(x)) \odot d_v(x) \right] \oplus d_v(z_e(x)) \right) \odot d_v(z_e(x)), \quad (68)$$

wobei d_v ein strukturierendes Element als horizontale bzw. vertikale Strecke der Breite des Voxel-Elements bezeichnet.

Ein zweiter, später genutzter Ansatz ist der Einsatz kommerzieller Programme. Da es sich bei Röntgenstrahlung ebenfalls um elektromagnetische Wellen handelt ([Buz08], S. 15), kann prinzipiell auch eine Abbildung unter Anwendung von

Zusammenhängen der geometrischen Optik erfolgen, die im Rahmen von **Kapitel 2.3.3** eingeführt wurden.

Zur Erstellung entsprechender Modelle gibt es dabei bereits verschiedene Ansätze, die auch speziell auf die industrielle Anwendung hin ausgerichtet sind. Z.B. können Monte Carlo Simulationen durchgeführt werden ([Sou08], S. 587).

Weiterhin gibt es Programme auf der Basis von Ray-Tracing Ansätzen ([Bel12], S. 1) ([Rei08], S. 4). Nach Abwägung verschiedener Ansätze im Rahmen einer Bachelorarbeit (Ranker 2014) wurde auf Basis der gewonnenen Ergebnisse das Programm „aRTist - Analytical RT Inspection Simulation Tool“ [Bel07] [Bel12], das von der Bundesanstalt für Materialprüfung stammt, zur Beschreibung der virtuellen CT ausgewählt.

Für die später betrachteten Simulationen wurde diese Simulationsumgebung genutzt. Ein Beispiel für ein Modell ist in **Abbildung 17** dargestellt. Dabei kann nachvollzogen werden, dass die Simulation im Wesentlichen auf der Darstellung von Röntgenquelle, Werkstück und Röntgendetektor basiert.

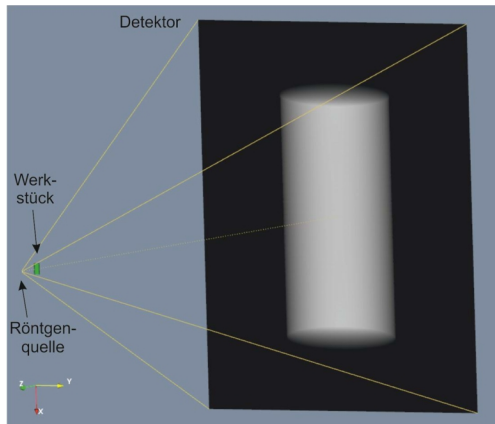


Abbildung 17: Simulation des CT-Prozesses in aRTist - Anwendungsbeispiel

3.2.4 Modellierung des Streulichtensors

Von Seewig et. al. wurde gezeigt, dass die Multiplikation der zu messenden Steigungsverteilung mit der eingesetzten Lichtintensität im Fourierraum zur Darstellung der virtuellen Streulichtmessung geeignet ist ([See09], S. 4). Dies entspricht dabei einer Faltung bei der Darstellung im Ortsraum ([See09], S. 4).

Eine Implementierung der von Seewig et. al. ([See09], S. 4) ([See16], S. 2 ff.) vorgestellten Modelle wird nachfolgend vorgestellt. Zunächst erfolgt die Differenzierung des Profils (x, z) , wobei in der kontinuierlichen Darstellung gilt:

$$z' = \frac{\partial z}{\partial x}. \quad (69)$$

In der Regel liegt das Profil als diskrete Punktwolke vor. Dann wird die Ableitung, je nachdem ob der Vorwärts- oder Rückwärts-Differenzen-Quotient berechnet wird, folgendermaßen angenähert:

$$z'_i \approx \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta x}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad z'_{i-1} \approx \frac{z_i - z_{i-1}}{\Delta x}, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (70)$$

Die zugehörigen Streuwinkel γ'_i werden mithilfe eines $f-\Theta$ -Objektivs ($\tan(\gamma'_i) \triangleq \gamma'_i$) des Sensors doppelt so groß auf der Sensorzeile abgebildet:

$$\gamma'_i = 2 \cdot z'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (71)$$

Die Diodenwerte, die beim Sensor für die k -te Diode unter Annahme eines Anfangswertes D_0 sowie einer Anzahl von m Dioden mit einer Winkelschrittweite von $\Delta\gamma$ wie folgt definiert sind:

$$\gamma(k) = D_0 + (k-1) \cdot \Delta\gamma, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (72)$$

führen auf das normierte Histogramm der Winkelverteilung der Oberfläche unter Berücksichtigung von n Abtastpunkten sowie $(n-1)$ Oberflächenwinkeln:

$$h(k) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \chi_i}{n-1}, \quad \chi_i = \begin{cases} 1 & \text{für } \left(\gamma(k) - \frac{\Delta\gamma}{2} \right) < \gamma'_i < \left(\gamma(k) + \frac{\Delta\gamma}{2} \right) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (73)$$

Dabei werden große Winkel, die von keiner Diode mehr erfasst werden können, nicht berücksichtigt. Beim später untersuchten Sensor werden $m = 32$ Dioden mit $\Delta\gamma = 1^\circ$ sowie $D_0 = -15,5^\circ$ eingesetzt.

Soll eine virtuelle Messung ausgeführt werden, müssen auch Übertragungseigenschaften des Sensors berücksichtigt werden. Ziel ist dabei die Umrechnung der Oberfläche (x, z) in eine Intensitätsverteilung auf der Sensorzeile. Dabei gelte für die Intensitätsverteilung I_l der Lichtquelle mit den Koordinaten (x_l, y_l) , dass diese als Funktion einer Verteilung $p_l(x_l, y_l)$ sowie einer Anfangsintensität $I_{l,0}$ dargestellt werden kann, vgl. ([See09], S. 2 f.) ([See16], S. 2):

$$I_l(x_l, y_l) = I_{l,0} \cdot p_l(x_l, y_l), \quad \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_l(x_l, y_l) \cdot dx_l \cdot dy_l = 1. \quad (74)$$

Das von der Quelle emittierte Licht fällt durch einen Kollimator der Brennweite f_c sowie das Messobjektiv der Brennweite f_{obj} auf die Oberfläche (x, y, z) des Messobjekts ([See09], S. 4 f.) ([See16], S. 2 f.):

$$I_{l,0} \cdot p_l'(x, y) = I_{l,0} \cdot p_l \left(-x \cdot \frac{f_c}{f_{obj}}, -y \cdot \frac{f_c}{f_{obj}} \right). \quad (75)$$

Da die Abtastung einer profilhaften Oberfläche mit einer Sensorzeile simuliert werden soll, können mit den Sensorkoordinaten (x_{sen}, y_{sen}) folgende Vereinfachungen getroffen werden ([See16], S. 3):

$$y_{sen} = 0, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 0. \quad (76)$$

Als weitere zu berücksichtigende Abbildung fällt das Licht auf die Sensorzeile, wobei für die Intensität gilt ([See16], S. 3):

$$I_l(x_{sen}, 0) = I_{l,0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_l'(x, y) \cdot s_{G,B}(-f_{obj} \cdot 2 \cdot z' + x_{sen}, 0) \cdot dx \cdot dy. \quad (77)$$

$s_{G,B}(x_l, y_l)$ sei dabei die Gewichsfunktion der kreisförmigen Blende des Kollimators, die in Abhängigkeit dessen Durchmessers D_c ermittelt wird ([See09], S. 5) ([See16], S. 3):

$$s_{G,B}(x, y) = \begin{cases} \frac{4}{\pi \cdot D_c^2} & \text{für } \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{D_c}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (78)$$

Von Interesse für die Auswertung sind dabei insbesondere das erste und zweite statistische Moment der Streulichtverteilung, wobei die entsprechenden Kennwerte nach VDA 2009 ([VDA09], S. 4 f.) aus der Intensität entlang der Sensorzeile ermittelt werden können ([See09], S. 3 f.) ([See16], S. 3):

$$\mu_s^k = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x_{sen}^k \cdot I_l(x_{sen}, 0) \cdot dx_{sen}}{\int_{-\infty}^{\infty} I_l(x_{sen}, 0) \cdot dx_{sen}}, \quad \mu_s^1 \hat{=} M, \quad \mu_s^2 \hat{=} A_q. \quad (79)$$

Die Variable μ_s^k bezeichnet das statistische Moment der Ordnung k der in Gleichung (77) beschriebenen Größe ([See16], S. 3). Durch eine Substitution auf die Koordinate \tilde{x}_{sen} (vgl. [See16], S. 3):

$$\tilde{x}_{sen} = -f_{obj} \cdot 2 \cdot z' + x_{sen} \Rightarrow x_{sen} = \tilde{x}_{sen} + f_{obj} \cdot 2 \cdot z' \quad (80)$$

kann Gleichung (79) nach Einsetzen von Gleichung (77) wie folgt umgeschrieben werden ([See16], S. 3):

$$\mu_s^k = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_{l,0} \cdot p_l'(x_s, y_s) \cdot (\tilde{x}_{sen} + f_{obj} \cdot 2 \cdot z', 0)^k \cdot s_{G,B}(\tilde{x}_{sen}, 0) \cdot d\tilde{x}_{sen} \cdot dx_l \cdot dy_l}{\int_{-\infty}^{\infty} I_l(x_{sen}, 0) \cdot dx_{sen}}. \quad (81)$$

Werden dabei ein runder Leuchtfleck des Durchmessers d_l auf dem Werkstück sowie eine konstante Gewichtsfunktion $s_{G,B}$ vorausgesetzt, so ergibt sich nach Lösen des Integrals in y_l -Richtung für ein profilhaftes Werkstück (vgl. [See16], S. 3 f.):

$$\mu_s^k = \frac{2 \cdot \int_{-d_l/2}^{d_l/2} \sqrt{(d_l/2)^2 - x_l^2} \int_{-D_c/2}^{D_c/2} (\tilde{x}_{sen} + f_{obj} \cdot 2 \cdot z')^k \cdot d\tilde{x}_{sen} \cdot dx_l}{D_c \cdot d_l^2 / 4 \cdot \pi}. \quad (82)$$

Eine Auswertung von Gleichung (82) für den M -Wert ($k=1$) führt auf (vgl. [See16], S. 4):

$$M = \frac{2 \cdot \int_{-d_l/2}^{d_l/2} \sqrt{(d_l/2)^2 - x_l^2} \cdot (f_{obj} \cdot 2 \cdot z') \cdot dx_l}{d_l^2 / 4 \cdot \pi}, \text{ für alle } |z'| \leq \frac{\gamma(m)}{2}. \quad (83)$$

Dabei wird als Sensor-spezifische Besonderheit berücksichtigt, dass die Sensorzeile nur Oberflächenwinkel bis $\gamma(m)/2$ erfassen kann.

Bei Auswertung des statistischen Momentes zweiter Ordnung (A_q) (vgl. [See16], S. 4) werden die um den M -Wert korrigierten Ableitungen der Werkstück-Oberfläche z'' eingesetzt sowie der Korrekturfaktor des Sensors (k_F nach [VDA09], S. 5) berücksichtigt:

$$A_q = k_F \cdot \frac{2 \cdot \int_{-d_l/2}^{d_l/2} \sqrt{(d_l/2)^2 - x_l^2} \cdot (f_{obj} \cdot 2 \cdot z'')^2 \cdot dx_l}{d_l^2 / 4 \cdot \pi} + \frac{(D_c/2)^2}{3}, \text{ für alle } |z'| \leq \frac{\gamma(m)}{2}. \quad (84)$$

Die praktische Anwendung der virtuellen Messung kann durch diskrete Implementierung der Gleichungen (83) und (84) erfolgen (vgl. [See16], S. 2 ff.), wobei die entsprechenden Integrale durch eine Summe approximiert werden.

Umfangreiche Untersuchungen zur Qualifizierung und Beschreibung des winkelauflösenden Streulichtensors wurden von Wendel [Wen15] durchgeführt.

3.3 Modellierung pneumatischer Messverfahren

Zur Abbildung der pneumatischen Sensoren gibt es verschiedene Möglichkeiten, die sich in ihrer Herangehensweise und dem Rechenaufwand stark unterscheiden. Angewendet wurden Computational Fluid Dynamics (CFD/numerische Strömungsmechanik) und somit eine Herangehensweise über die physikalischen Grundgleichungen der Strömung ([Fer08], S. 28) sowie alternativ eine rein geometrische Modellierung, die die laterale Filterwirkung des pneumatischen Messprinzips allein über den geometrischen Aufbau des Strömungskanals beschreiben kann (vgl. [Eif14], S. 27 f.).

3.3.1 CFD, numerische Strömungsmechanik

Die praktische Anwendung der in **Kapitel 2.3.4** vorgestellten Erhaltungsgleichungen ist CFD (Computational Fluid Dynamics). Die Gleichungen werden diskretisiert betrachtet und einem numerischen Gleichungslöser zugeführt, da eine analytische Beschreibung selten möglich ist ([Fer08], S. 27).

Es wurde ein 3D-Modell eines pneumatischen Abstandssensors auf Basis der Geometrie des Druckwändlers Hommel TPE 200 erstellt.¹ Zu diesem Zweck eingesetzt wurde die Software Ansys Fluent, sowie als Pre-Processor Ansys ICEM. Dieses Modell eignet sich grundsätzlich für die Ausführung virtueller Abtastungen. Dabei liegt „eine Schnittstelle zur Ankopplung von Oberflächen“ ([Eif14], S. 29) vor, so dass zur Ausführung einer neuen Abtastung nur eine erneute Diskretisierung (Vernetzung) der abzutastenden Oberfläche erforderlich ist ([Eif14], S. 29). Das eingesetzte Modell des Sensors mit einem Ausströmbereich sowie einer angekoppelten Oberfläche, die virtuell am Sensor vorbeigeführt und abgetastet wird, wird in **Abbildung 18** schematisch dargestellt.

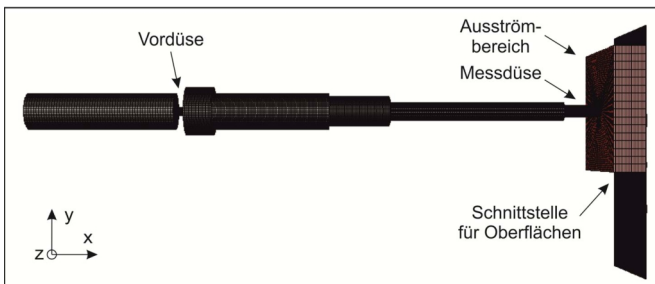


Abbildung 18: CFD-Modell zur Untersuchung pneumatischer Abstandssensoren

¹ Ein Teil dieses Modells stammte dabei aus Grundlagenuntersuchungen, die im Rahmen der Diplomarbeit des Autors [Eif13] durchgeführt wurden.

Nachteil des Verfahrens CFD ist allerdings der enorme Rechenaufwand (vgl. [Eif14], S. 28): Eine virtuelle Abtastung benötigt aufgrund der vielen notwendigen Modelle mehrere Tage bis hin zu einigen Wochen Rechenzeit auf einem Knoten eines Hochleistungsrechners. Aufgrund dieses hohen Aufwandes wurde alternativ ein vereinfachtes Modell auf Basis der lateralen Filterwirkung des Sensors eingesetzt, das nachfolgend beschrieben wird.

3.3.2 Beschreibung der lateralen Filterwirkung

Es stellt sich die Frage, wie mit einem einfachen Modell eine Näherung gefunden werden kann, die den Vorgang der pneumatischen Abtastung aber dennoch hinreichend genau beschreibt. Dabei kann ein Ansatz über eine Modellierung der lateralen Filterwirkung der Sensoren eingesetzt werden, der die virtuelle Abtastung auf Basis rein geometrischer Zusammenhänge charakterisiert vgl. ([Eif14], S. 27 f.) ([Eif15a], S. 87 f.) ([Sch15c], S. 49 ff.).

In **Kapitel 2.2.7** wurde bereits gezeigt, dass die engsten Querschnitte von Vor- und Messdüse entscheidend für die Ausprägung der pneumatischen Kennlinie sind. Da dieser Querschnitt im Bereich der Messdüse A_M innerhalb des Messbereichs direkt vom zu messenden Abstand s abhängt, kann dieser zur virtuellen Messung eingesetzt werden ([Eif15a], S. 87). Bei der theoretischen Ermittlung der Kennlinie wurde bisher eine ideale Zylinderfläche zwischen Messdüse und Werkstück angenommen ([Eif15a], S. 87). In der Realität treten allerdings Unebenheiten auf dem Werkstück auf, die unterschiedliche Wellenlängen haben können (vgl. **Abbildung 2** ([4760], S. 2)) und dazu führen, dass diese Annahme nicht zutrifft ([Eif14], S. 27).

Trotzdem kann eine Charakterisierung der realen geometrischen Filterwirkung durchgeführt werden, und zwar indem die tatsächliche Mantelfläche unter Einsatz der wirklichen Geometrie des Werkstücks ermittelt wird ([Eif15a], S. 87). Das entsprechende Modell hierzu wird in **Abbildung 19** ([Eif14], S. 28) skizziert.

Im ersten Schritt erfolgt eine Diskretisierung sowohl von Werkstück in kartesischen Koordinaten zu Abschnitten der Breite Δx als auch der Messdüse, die in Polarkoordinaten durch Abschnitte mit einem Winkel von jeweils $\Delta\varphi$ beschrieben wird und einen Radius r hat ([Eif14], S. 28), siehe **Abbildung 19 a**) ([Eif14], S. 28).

Damit eine Berechnung erfolgen kann, müssen die beiden Koordinatensysteme in Einklang gebracht werden, was geschieht, indem eine Interpolation von Profilmittelpunkten, die deckungsgleich mit den Punkten der Messdüse sind, erfolgt ([Eif14], S. 28) (**Abbildung 19 b**) ([Eif14], S. 28)).

Die Berechnung der entsprechenden Punkte des Messobjekts kann mithilfe einer Projektion der Messdüsenpunkte erfolgen, was auf die Wertepaare (x_{ip}, z_{ip}) führt ([Eif14], S. 28). Damit der tatsächliche Wert \bar{s} berechnet werden kann, muss lediglich das Integral in Polarkoordinaten entlang der Außenkante der Messdüse beschrieben werden ([Eif14], S. 28).

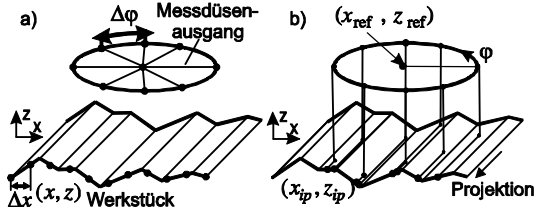


Abbildung 19: Modell zur geometrischen Beschreibung pneumatischer Abstandssensoren; a) Interpolation, b) Projektion, ([Eif14], S. 28)

Für eine Abtastung an der Stelle i ergibt sich mit den Koordinaten des Mittelpunktes der Messdüse $(x_{ref,i}, z_{ref})$ als Referenzpunkt der folgende Zusammenhang ([Eif14], S. 28):

$$\bar{s}_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (z_{ref} - z_{ip}(x_{ref,i} + r \cdot \cos(\varphi))) d\varphi. \quad (85)$$

Da die Geometriedaten von Messdüse und Werkstück diskret vorliegen, wird das Integral in eine Summe aus n äquidistanten Diskretisierungsabschnitten überführt ([Eif14], S. 28):

$$\bar{s}_i \approx \sum_{k=1}^n \frac{(z_{ref} - z_{ip}(x_{ref,i} + r \cdot \cos(k \cdot \Delta\varphi)))}{n}. \quad (86)$$

Es folgt die tatsächliche engste Querschnittsfläche aus Gleichung (6) ([Eif15a], S. 87) ([Eif14], S. 28):

$$\bar{A}_M(i) = \bar{s}(i) \cdot \pi \cdot d_M. \quad (87)$$

Da das Querschnittsverhältnis somit festgelegt ist, lassen sich mithilfe der pneumatischen Kennlinie das Verhältnis p_M / p_V und der Messdruck p_M eindeutig ermitteln ([Eif14], S. 28). Nach Ausführung von Gleichung (86) und (87) an jedem Abtastpunkt i ist das statische Filterverhalten durch die geometrische Ausprägung der Messdüse vollständig beschrieben ([Eif14], S. 28). Einer 3D-Ausprägung der Werkstückstruktur kann durch den Einsatz einer weiteren Integration Rechnung getragen werden ([Eif14], S. 28).

3.4 Modellierung der Auswertung von Messdaten

Die durchgeführten Auswertprozeduren sind normativ vorgeschrieben und somit im Wesentlichen standardisiert. Soweit sinnvoll wird im Einklang mit dem bestehenden Regelwerk agiert, lediglich die Implementierung der entsprechenden Werkzeuge wird kurz ausgeführt.

Wie in Gleichung (12) bereits dargestellt, ist eine Anwendung des Gauß-Filters mithilfe des Faltungintegrals möglich, wobei umfangreiche Möglichkeiten zur Implementierung u.a. von Krystek vorgestellt wurden ([Kry04a], S. 7 ff.). Das lineare Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-21 [16610-21] ist das später am häufigsten eingesetzte Filter. Die Gewichtsfunktion des Gauß-Filters wurde in Gleichung (13) gegeben.

Eine Implementierung kann nach Seewig et. al. ([See14b], S. 442) folgendermaßen durchgeführt werden: Im Frequenzraum wird eine Multiplikation von Gewichtsfunktion und Profil ausgeführt, wobei die Gewichtsfunktion periodisch mit ihrem Maximum am Rand des geschlossenen Profils abgebildet wird ([See14b], S. 442):

$$w(x) = \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathfrak{F}\{z(x)\} \cdot \mathfrak{F}\{s_G(x)\} \right]. \quad (88)$$

Dabei wird das Faltungstheorem ausgenutzt. Ein Beispiel für die Implementierung morphologischer Filter wurde bereits in Gleichung (62) gegeben, wobei diese ebenfalls in der Literatur nachvollzogen werden kann [Sri98] [Lou11].

3D-Filter sind ebenfalls standardisiert [See13c] [16610-61]. Die lineare Gauß-Filterung kann für den 3D-Fall dabei durch zeilen- bzw. spaltenweise Profilfilterung in x - und y -Richtung abgebildet werden ([16610-61], S. 9 f.):

$$w(x, y) = \int s_G(x - \xi_1) \left[\int s_G(y - \xi_2) \cdot z(\xi_1, \xi_2) d\xi_2 \right] d\xi_1, \quad (89)$$

wobei die Implementierung in Analogie zu Gleichung (88) ausgeführt werden kann und für die technische Anwendung diskret vorgenommen wird.

Da für diskrete Messdaten eine Parameter-Berechnung erfolgen muss, werden die entsprechenden Vorschriften ebenfalls angepasst: Dabei müssen die Integral-Berechnungen durch Summen approximiert werden. Somit ergeben sich die Kennwerte R_a, R_q, S_a, S_q ([4287], S. 17) ([25178-2], S. 12 f.) mit n Messpunkten in x -Richtung und optional m Messpunkten in y -Richtung zu:

$$R_a \approx \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i)}{n}, \quad R_q \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n z^2(x_i)}{n}}, \quad (90)$$

$$S_a \approx \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n z(x_i, y_k)}{n \cdot m}, \quad S_q \approx \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n z^2(x_i, y_k)}{n \cdot m}}. \quad (91)$$

3.5 Modellierung von Fertigungsverfahren

Es wurde bereits dargelegt, dass für die Fertigung von Geometrienormalen Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie das Ultrapräzisions-Drehen eingesetzt werden können ([Mee11], S. 184). Der ideale Drehprozess kann ebenfalls mit den bereits beschriebenen morphologischen Filtern modelliert werden ([Krü07b], S. 574). Weckenmann et. al. fassten diese morphologischen Effekte, die bei der Herstellung und Abtastung von Werkstücken auftreten, zusammen ([Wec08], S. 293).

Für die durchgeführten Betrachtungen wird folgende Darstellung gewählt: Gesucht sei ein Fertigungsoperator $M_f(\vec{z}_0(x))$, der bei einem gegebenen Profilvektor $\vec{z}_0(x)$ das gefertigte Profil $\vec{z}_e(x)$ berechnet:

$$\vec{z}_e(x) = M_f(\vec{z}_0(x)). \quad (92)$$

Es ist dabei offensichtlich, dass das gefertigte Profil in Abhängigkeit zur Geometrie des Drehwerkzeugs steht ([Krü07b], S. 574). Die Geometrie des Werkzeugs sei als Profil gegeben:

$$(\vec{x}_i, \vec{t}_M). \quad (93)$$

Dementsprechend können die Höhenwerte des Werkzeuges auch als Funktion der x -Koordinate des Werkstücks dargestellt werden:

$$\vec{t}_M = f(\vec{x}_i). \quad (94)$$

Nach Krüger-Sehm können Einflüsse der Fertigung mithilfe einer morphologischen Dilatation berechnet werden, wobei das strukturierende Element durch die Schneide $\vec{t}_M(x)$ charakterisiert wird ([Krü07b], S. 574) [16610-40]. Damit können die Koordinaten $\vec{z}_e(x)$ eines virtuell gefertigten Profils mithilfe des Eingangsprofils $\vec{z}_0(x)$ und der Geometrie des Werkzeugs $\vec{t}_M(x)$ wie folgt berechnet werden ([Wec08], S. 293):

$$\vec{z}_e(x) = (\vec{z}_0(x) \oplus \vec{t}_M(x)) \odot \vec{t}_M(x), \quad (95)$$

wobei die ausgeführte Schließung sich aus Dilatation und einer anschließenden Erosion zusammensetzt ([Pue05], S. 664) ([Wec08], S. 293).

Es kann eine analoge Implementierung, wie im Rahmen der taktilen Abtastung in Gleichung (62) [Sri98] [Pue05] gezeigt wurde, ausgeführt werden. Parametrisiert werden kann ein Drehwerkzeug dabei unter der Voraussetzung einer runden Spitzengeometrie mit seinem Radius r_{tool} sowie seinem Öffnungswinkel φ_{tool} ([Krü07b], S. 574). Andere Geometrien sind ebenfalls möglich, da entsprechend eine morphologische Schließung mit einem beliebigen strukturierenden Element ausgeführt werden kann.

Der Effekt der Werkzeuggeometrie auf eine beispielhafte Oberfläche sei in **Abbildung 20** schematisch veranschaulicht.

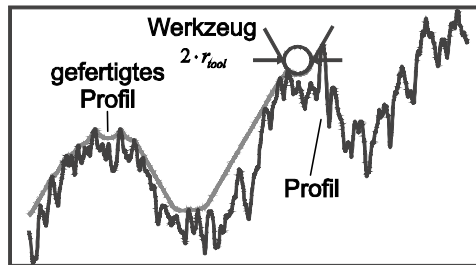


Abbildung 20: Prinzip der morphologischen Schließung bei der Drehfertigung

Diese Betrachtung ist vereinfacht und kann auch weiterentwickelt werden. So können Formabweichungen des Werkzeugs mithilfe einer Vermessung des Werkzeugs ermittelt und bei der morphologischen Filterung berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen wird in **Kapitel 5.2** noch untersucht.

Die später eingesetzten Modelle für Messgeräte sowie weitere Prozesse wurden in **Kapitel 3** vorgestellt. Damit ist die grundlegende Methodik für die nachfolgenden Betrachtungen dargelegt worden. In **Kapitel 4** wird ein Einsatz der Modelle zur Auslegung von Geometrienormalen angestrebt.

4 Modellbasierte Auslegung neuer Kalibriernormale

Nach Erarbeitung der Grundlagen der modellbasierten Betrachtungsweise wird nachfolgend die Entwicklung von Normalen erläutert.

Dabei handelt es sich um Säule 2 der im Rahmen von **Kapitel 1** beschriebenen Vorgehensweise: „geometrische Strukturen (Modellierung neuer Geometrien)“, vgl. **Abbildung 21**.

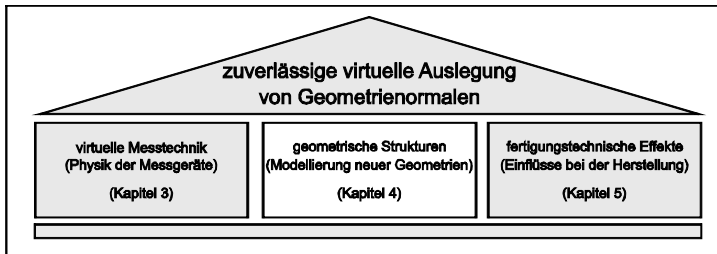


Abbildung 21: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Geometrienormalen

Es werden die verschiedenen Gesichtspunkte, die bei der Auslegung der Geometrien berücksichtigt wurden, sowie die entsprechenden Ergebnisse erläutert. Zur Auslegung der Normale werden die modellbasierten Beschreibungen der Messverfahren eingesetzt, um z.B. Effekte bei der Abtastung zu berücksichtigen ([See15], S. 44).

Die Herausforderung bei der Erzeugung von Normalen ist dabei, dass die vorgegebenen Eigenschaften reproduzierbar erreicht werden sollen, allerdings mögliche vorhandene Abweichungen oder Nichtlinearitäten im Messsystem auch zu einer Abweichung dieser Eigenschaften führen müssen, um festgestellt werden zu können.

Das bedeutet, dass ein Normal vorhandene Abweichungen zuverlässig detektieren können muss. Die derzeitige Herangehensweise zur Kalibrierung kann verbessert werden, da sich die Normale zu wenig an der Anwendung orientieren und aufgrund von steigenden Anforderungen an die Messtechnik eigentlich eine praxisnähere Kalibrierung erforderlich wäre ([See15], S. 44).

Die Oberfläche des Normals sollte demnach dieselbe Charakteristik wie die Oberfläche des späteren Messobjektes haben ([See15], S. 44). Durch dieses Vorgehen kann die Unsicherheit der Kalibrierung reduziert werden ([See15], S. 44). Es folgen Überlegungen zur Auslegung der Geometrien.

4.1 Normale für die taktile Messtechnik

In **Kapitel 3** wurden Modellierungstechniken beschrieben, welche jetzt zu einer Messkette zusammengesetzt werden, auf deren Basis die Auslegung der Geometrien erfolgt. Dabei soll die komplette Messkette aus Fertigung, Abtastung und Filterung simuliert werden ([See15], S. 44) ([Eif15c], S. 2 ff.). Die grundlegende Idee ist die Ausführung einer praxisnahen Kalibrierung ([See15], S. 44). Daher umfasst der Ansatz die Transformation einer realen Oberfläche, die dazu führt, dass

- 1) ... nach einer Abtastung mit einem Tastschnittgerät sowie der Filterung die vorgegebenen Rauheits-Eigenschaften abgebildet werden ([See15], S. 44 f.),
- 2) ... der Charakter der Oberfläche trotzdem erhalten bleibt, so dass die Kalibrierung mit einer Oberfläche ähnlich der zu vermessenden Oberfläche ausgeführt werden kann ([See15], S. 44),
- 3) ... ein normgerechter Abschnitt von z.B. 4 mm für das Normal entsteht, der beliebig periodisch fortgesetzt werden kann, so dass die Messergebnisse unabhängig vom Antastpunkt identisch sind (vgl. [Bod92], S. 140).

Gegeben sei als Ausgangsoberfläche die gemessene 2D-Punktewolke eines Tastschnittgerätes:

$$(\vec{x}, \vec{z}). \quad (96)$$

\vec{x}, \vec{z} sind jeweils Vektoren der Länge $n \in \mathbb{N}$. Das Profil soll so transformiert werden, dass mit der transformierten Punktewolke (\vec{x}_0, \vec{z}_0) nach Anwendung der Messkette bis zum Parameteroperator ([4-2-1], S. 9) vorgegebene Rauheitskennwerte abgebildet werden. Das Modell zur Ermittlung des Wertes K_p eines Oberflächenparameters P wird dabei in Anlehnung an die Messunsicherheitsbetrachtung der DKD Richtlinie 4-2 Blatt 1 wie folgt aufgestellt ([4-2-1], S. 9):

$$K_p = P \left\{ Fc \left[F_s \left(G_f \left(z_e(x) \right) \right) \right] \right\}. \quad (97)$$

Dabei beschreibt $G_f(z_e(x)) = z_g(x)$ das Profil nach Anwendung der virtuellen Messung (Gerätefunktion), $F_s(z_g(x)) = z_s(x)$ die Profildaten nach der ausgeführten λ_s -Filterung, analog $Fc(z_s(x)) = z_c(x)$ nach der λ_c -Filterung, sowie $P(z_c(x)) = K_p$ den jeweils ermittelten Rauheitsparameter ([4-2-1], S. 9). Der Ablauf wird als Signalkette in **Abbildung 22** ([4-2-1], S. 9) dargestellt.

Optional muss bei der Berechnung von Parametern aus der Materialanteilkurve (DIN EN ISO 13565-2) noch die Berechnung der Abbott-Kurve selbst ausgeführt

werden. Zu diesem Zweck wird ein separater Operator $C_a(\bar{z}_c(x)) = (\bar{M}r, \bar{C})$ vorgeschaltet.

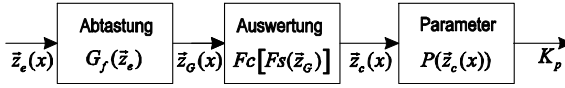


Abbildung 22: Darstellung der Signalkette nach DKD-Richtlinie 4-2-1, Blatt 1 ([4-2-1], S. 9)

Nachfolgend werden die einzelnen eingesetzten Funktionen beschrieben:

Die taktile **Abtastung**, die durch die Gerätefunktion $G_f(\bar{z}_e(x))$ beschrieben wird, wird als morphologische Filterung durch die Tastkugel, im 2D-Modell analog mit einer Kreisscheibe \bar{d}_{ip} ausgeführt (vgl. **Kapitel 3.1**, Gleichung (60)).

Die **Auswertung** erfolgt durch die Anwendung der nach Norm vorgegebenen Filter, Beispiele für die Implementierung wurden in **Kapitel 3.4** genannt. Der beschriebene normative Ablauf der 2D-Auswertung ist in **Abbildung 23** schematisch dargestellt, wobei zwischen Auswertungen auf Basis des Profils und auf Basis der Abbott-Kurve unterschieden werden muss. Hieraus ergeben sich auch Vorgaben für die Anwendung der entsprechenden Filter. Dabei erfolgt optional eine Vorschaltung des definierten Abbott-Kurven-Operators. Werden Kennwerte der Abbott-Kurve [13565-2] benötigt, so muss als zusätzlicher Prozessschritt die Berechnung der Materialanteilkurve erfolgen, bevor der Parameter-Operator eingesetzt werden kann. Die Abbott-Kurve sei für ein Profil mit n Messwerten durch eine Sortier-Operation des Profils $\bar{z}_c(x_i)$ der Signalkette in **Abbildung 22** ([4-2-1], S. 9) auf Basis seiner Höhenwerte definiert ([See13b], S. 294):

$$\bar{C} = \left(\max z(x_i), \dots, \min z(x_i) \right)^T, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (98)$$

Damit folgt die Darstellung der Abbott-Kurve in Abhängigkeit der Materialanteile $\bar{M}r$ sowie der gedachten Schnitthöhen \bar{C} (vgl. [Eif15c], S. 3):

$$(\bar{M}r, \bar{C}) = C_a(\bar{z}_c(x)) = (Mr_k, C_k) = \left(\frac{k-1}{n-1} \cdot 100\%, C_k \right), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (99)$$

Die Abbott-Kurve spielt dabei in der folgenden Auslegung von Normalen für das Tastschnittverfahren eine elementare Rolle. Da, wie gezeigt wurde, die Abbott-Kurve die sortierte Darstellung der Profil-Höhenwerte ist, können Manipulationen an der Abbott-Kurve ([4287], S. 19) genutzt werden, um das Profil selbst zu beeinflussen (vgl. [See15]). Es kann das in **Abbildung 24** gezeigte Vorgehen angewendet werden: Das zu transformierende Profil $z_1(x)$ wird in seine Abbott-Kurve $C_1(Mr)$ umgewandelt, welche dann wiederum zu einer anderen Abbott-Kurve $C_2(Mr)$

transformiert wird, bevor die Rekonstruktion in ein Höhenprofil $z_2(x)$ ausgeführt wird (vgl. auch [See15], S. 45).

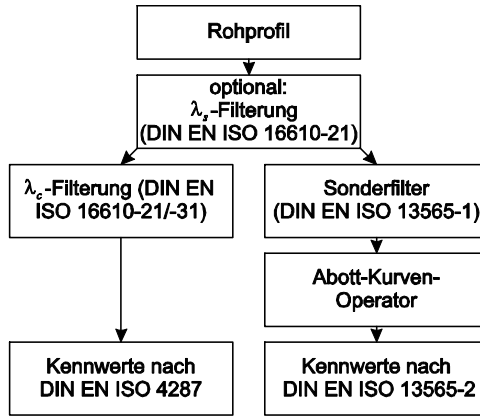


Abbildung 23: Eingesetztes Schema zur Auswertung von Profildaten

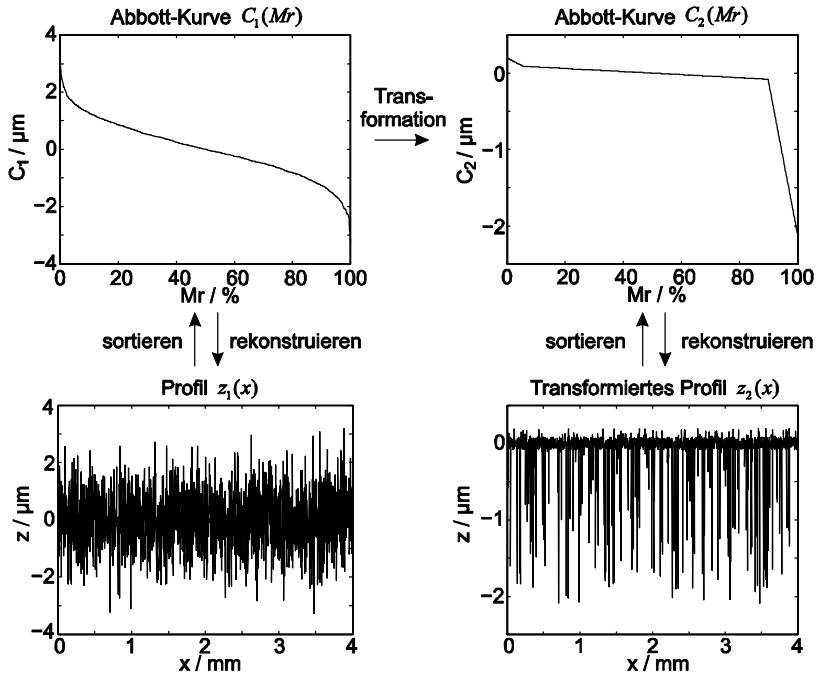


Abbildung 24: Vorgehen zur Transformation auf Basis der Abbott-Kurve

Weiterhin kann die Prozesskette (**Abbildung 22** ([4-2-1], S. 9)) um den Prozess der Fertigung $M_f(\bar{z}_0)$ erweitert werden. Die Fertigung wird durch eine morphologische Schließung [16610-40] [16610-41] mit der Werkzeugschneide ([Krü07b], S. 574) ([Wec08], S. 293) beschrieben (vgl. **Kapitel 3.5**).

Ermittelt werden kann auf diese Weise z.B. der Parameter R_a , was unter Anwendung der Signalkette mit ihren definierten Operatoren auf folgende Darstellung führt (vgl. [Eif15c], S. 2 ff.):

$$R_a = P \left\{ Fc \left[Fs \left(G_f \left(M_f \left(\bar{z}_0(x) \right) \right) \right) \right] \right\}. \quad (100)$$

Allgemeines Ziel der Auslegung ist es, durch diese Signalkette die Zusammenhänge bei der Messung mit dem Tastschnittverfahren möglichst realistisch abzubilden. Ein Überblick über die Abfolge der einzelnen Operationen wird in **Abbildung 25** gegeben. Der Signalkette wird dabei ein Transformationsschritt $\Psi_f(\bar{z})$ vorgeschaltet, welcher zur Erzeugung der gewünschten Oberflächeneigenschaften dient ([Eif15c], S. 3).

Aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Prozessschritten muss der Ansatz iterativ ausgeführt werden. Somit ergibt sich der grundlegende Ablauf in **Abbildung 25**. Nach Eingabe einer vorverarbeiteten realen Oberfläche erfolgt der Transformationsschritt, es wird die Signalkette nachgeschaltet und iteriert, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist ([Eif15c], S. 2 f.).

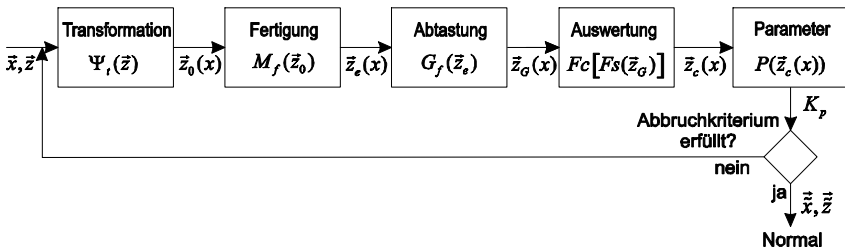


Abbildung 25: Iterativer Ablauf taktill - Signalkette

Als Vorverarbeitung für die gewählten Datensätze erfolgen eine Ausrichtung sowie eine periodische Fortsetzung des Profils mit der gewünschten Länge (vgl. [Eif15c], S. 3). Dazu wird an den Rändern eine Gewichtsfunktion angewendet. Weiterhin wird die Signalkette einmalig ohne die Anwendung der entsprechenden Transformation ausgeführt.

Die jeweiligen Funktionen zur Transformation $\Psi_f(\bar{z})$ werden in den folgenden Kapiteln für verschiedene Auslegungen erläutert. Dabei erfolgt der Einsatz des

vorgestellten Schemas zur Generation verschiedener Normale für das Tastschnittverfahren.

4.1.1 Ausgangspunkt R_k -Normal

Das R_k -Normal ist das erste Normal, das am Lehrstuhl systematisch ausgelegt wurde. Es ist grundsätzlich für ein taktiles Anwendungsgebiet vorgesehen und somit als Grundlage für die weiteren Betrachtungen zu verstehen. Der entsprechende Algorithmus wurde von Seewig entwickelt (vgl. [See15]) und dient als Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen zur taktilen Messtechnik.

Wie in **Kapitel 2.4.2.2** gezeigt wurde, gibt es verschiedene Raunormale, die unterschiedliche Rauheits-Kennwerte abbilden. Die Kennwerte der R_k -Gruppe werden dabei im Rahmen von Messaufgaben immer häufiger eingesetzt, denn die Messung von Oberflächen lehnt sich immer mehr an die Funktion des Bauteils an ([Har13], S. 285).

Es gibt bisher allerdings kein entsprechendes Rauheits-Normal, das eine Oberfläche abbildet, die für den Einsatz der R_k -Parameter üblich wäre. Da Kalibrierprozesse an der industriellen Praxis orientiert sein sollten ([See15], S. 44), wird dies angestrebt. Das R_k -Normal stellt eine reale, plateauartige Oberfläche dar, bei der die R_k -Kenngrößen sinnvollerweise ausgewertet werden können ([See15], S. 45).

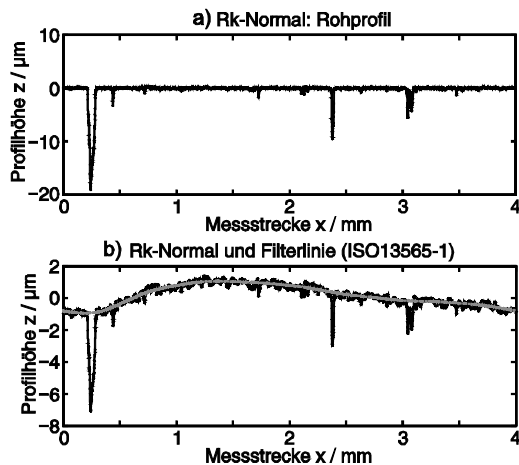


Abbildung 26: R_k -Normal, a) Rohprofil, b) Ergebnisse der Transformation nach ([See15], S. 45)

In **Abbildung 26 a)** wird das vorverarbeitete Original-Profil gezeigt. **Abbildung 26 b)** (nach [See15], S. 45) zeigt die Ergebnisse der Transformation für die Anwendung auf ein Hon-Profil. Dargestellt sind das transformierte Profil und die Filterlinie nach Anwendung des Sonderfilters (DIN EN ISO 13565-1). Bei der Transformation wurden für die Auslegung ein Werkzeug mit einem Spitzenradius von $r_{\text{tool}} = 5 \mu\text{m}$ und einem Öffnungswinkel von $\varphi_{\text{tool}} = 60^\circ$, sowie Filter-Grenzwellenlängen von $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ (DIN EN ISO 13565-1) und $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ (DIN EN ISO 16610-21) virtuell eingesetzt.

Die Betrachtung des R_k -Normals für den praktischen Einsatz erfolgt mit der Fertigung in **Kapitel 5.5** sowie mit Messergebnissen und einer Betrachtung der Messunsicherheit in **Kapitel 6**.

4.1.2 Stetiges Linearitätsnormal für die z-Achse

Ein Normal für die Linearität der z -Achse kann auch durch eine Transformation der Abbott-Kurve erzeugt werden (vgl. [See15], S. 46). Bei den Betrachtungen zum Stand der Technik wurde gezeigt, dass die Linearität der z -Achse derzeit oft mit der Messung eines Tiefeneinstellnormals kalibriert wird (vgl. **Kapitel 2.4.2.1** sowie DIN EN ISO 5436-1 [5436-1]). Ebenfalls wurden die möglichen Probleme bei dieser Art der Kalibrierung aufgezeigt: Es können bei weitem nicht alle Linearitätsabweichungen detektiert werden, wozu eine ausreichende Anzahl von Höhenwerten erforderlich ist ([Lea11b], S. 60 ff.) ([Giu12b], S. 3).

Diese Notwendigkeit mehrerer Stufen wurde im Rahmen einiger Normale bereits berücksichtigt, wie ebenfalls bei den Betrachtungen zum Stand der Technik dargelegt wurde ([PTB12], S. 96 f.) [Fel13] [Chi11]. Diese Ansätze führen allerdings auch nur zur Überprüfung einiger diskreter Punkte im Messbereich. Sinnvoll wäre eine möglichst stetige Kalibrierung der Höhenachse ([See15], S. 46). Auf dieser Idee basiert das entwickelte Linearitätsnormal: Ein Ansatz, der eine nahezu stufenlose Kalibrierung erlaubt, wurde erarbeitet ([See15], S. 46).

Zu dieser quasi stufenlosen Kalibrierung eignet sich ein Normal mit linearer Abbott-Kurve, das durch eine Transformation erzeugt werden soll ([See15], S. 46). Dies bedeutet, dass die Amplitudendichte-Kurve ([4287], S. 19) der Oberfläche gleichverteilt ist, da es sich um die Ableitung der Abbott-Kurve handelt. Der Vorteil gegenüber z.B. einer Gaußverteilung ist die Tatsache, dass auch an den Rändern der Verteilung ausreichend Werte für einen statistischen Repräsentationsschluss vorhanden sind.

Die Transformation wird in Anlehnung an das in **Kapitel 4.1** vorgestellte Konzept der Signalkette nach DKD-Richtlinie 4-2, Blatt 1 [4-2-1] ausgeführt. Dabei wird die

Prozesskette aus **Abbildung 25** simuliert. Die Transformation erfolgt auf Basis der Höhenwerte, wobei eine Gerade in die vorhandene Abbott-Kurve eingepasst wird (vgl. [Eif15c], S. 3 f.). Von hoher Priorität ist dabei, dass trotzdem der Charakter der gegebenen realen Oberfläche erhalten bleibt.

Entsprechend der simulierten Signalkette werden mit dem Fertigungsoperator die morphologischen Einflüsse der Werkzeuggeometrie berechnet. Dabei wird die später eingesetzte Geometrie des Werkzeugs genutzt: Das Werkzeug weist eine nominelle Breite von $10\ \mu\text{m}$ auf ([Sch15a], S. 33), woran sich abgerundete Ecken mit einem Radius von $r_e = 1\ \mu\text{m}$ anschließen. Weiterhin hat das Werkzeug einen nominellen Öffnungswinkel von $\varphi_{\text{tool},n} = 55^\circ$ ([Sch15a], S. 33) (die Ermittlung der tatsächlichen Parameter wird im Rahmen der fertigungstechnischen Betrachtungen, **Kapitel 5.2**, erläutert).

Die virtuelle Abtastung erfolgt mit einer Tastkugel mit dem Radius $r_{\text{tip}} = 5\ \mu\text{m}$, als Filteroperator dient das lineare Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-21 [16610-21]. Als Grenzwellenlängen wurden $\lambda_c = 0,8\ \text{mm}$ und $\lambda_s = 2,5\ \mu\text{m}$ eingesetzt. Von Relevanz für die Auswertung sind die Parameter nach DIN EN ISO 4287 [4287]. Somit ergeben sich folgende Operatoren:

$$Fc(\bar{z}_s) = Fs(\bar{z}_G) \hat{=} \text{ISO16610-21}, P(\bar{z}_c) \hat{=} \text{ISO4287}. \quad (101)$$

Der Transformationsschritt $\Psi_t(\bar{z})$ gemäß **Abbildung 25** wird ausgeführt, indem das Profil auf eine lineare Soll-Abbott-Kurve transformiert wird (vgl. [See15], S. 46). Dabei gilt zunächst für die vorhandene Abbott-Kurve $(\bar{M}r_{\text{act}}, \bar{C}_{\text{act}})$ auf Basis von n Profilmittelpunkten (vgl. [Eif15c], S. 3 ff.):

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{act}} &= (C_{1,\text{act}}, \dots, C_{n,\text{act}})^T, C_{1,\text{act}} = \max(\bar{z}_c(x)), C_{n,\text{act}} = \min(\bar{z}_c(x)), \\ \bar{M}r_{\text{act}} &= (0\%, \Delta Mr, 2 \cdot \Delta Mr, \dots, 100\%)^T, \Delta Mr = \frac{100\%}{n-1}. \end{aligned} \quad (102)$$

Die vorgegebene Soll-Abbott-Kurve $(\bar{M}r_{\text{tar}}, \bar{C}_{\text{tar}})$ wird berechnet, indem die beiden Randpunkte der tatsächlichen Abbott-Kurve $(0\%, C_{1,\text{act}})$ und $(100\%, C_{n,\text{act}})$ miteinander verbunden werden (vgl. [Eif15c], S. 3). Die Amplitude des Profils bleibt unverändert und es wird eine Gerade nach der Vorschrift (vgl. [Eif15c], S. 3)

$$C_{k,\text{tar}} = m_G \cdot \frac{k-1}{n-1} \cdot 100\% + b, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (103)$$

welche durch die Steigung m_G sowie das absolute Glied b definiert ist, in die vorliegende Materialanteilkurve, die in n Punkte diskretisiert ist, eingepasst. Die Parameter der Gerade werden mit den vorhandenen Höhenwerten des Profils nach folgender Vorschrift festgelegt (vgl. [Eif15c], S. 3):

$$m_G = \frac{C_{n,act} - C_{1,act}}{100\%}, \text{ für } k = n, b = C_{1,act}. \quad (104)$$

Die Transformation muss für alle Profilpunkte $k = 1, \dots, n$ separat ausgeführt werden und führt nach iterativer Anwendung der entsprechenden Signalkette auf das transformierte Profil (vgl. [Eif15c], S. 4 ff.). Dem jeweiligen Punkt kann dabei ein neuer Höhenwert zugeordnet werden, indem der Anteil der Punkte, die im Profil höher als der aktuell betrachtete Punkt liegen, berechnet wird. Dieser wird danach mit der vorhandenen Gesamtamplitude multipliziert. Die Transformationsvorschrift zur Abbildung der linearen Abbott-Kurve lautet somit (vgl. [Eif15c], S. 4):

$$\vec{z}_0(x) = \Psi_t(\vec{z}(x)) = \begin{pmatrix} z_{0,1} \\ \dots \\ z_{0,n} \end{pmatrix}, z_{0,k} = -\frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \cdot (C_{n,act} - C_{1,act}), \tau_i = \begin{cases} 1 & \text{für } z_i > z_k \\ 0 & \text{für } z_i < z_k \end{cases}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (105)$$

Diese Transformation führt auf die Abbott-Kurve, die die vorgegebene Gerade abbildet, aber dennoch den Charakter des transformierten Profils erhält, da ein möglichst kleiner Eingriff in das Profil erfolgt. Die vorhandene Höhenfolge des Profils wird ausgenutzt und bleibt erhalten (vgl. **Abbildung 27**).

Das Residuum dieser Transformation wird nach Anwendung der kompletten Signalkette gemäß **Abbildung 25** berechnet. Dabei wird als neue tatsächliche Abbott-Kurve \vec{C}_{act} die Abbott-Kurve des Profils $\vec{z}_c(x)$ unter Anwendung des Abbott-Kurven-Operators $C_a(\cdot)$ (Gleichung (99)) definiert:

$$\vec{C}_{act} = C_a(\vec{z}_c(x)). \quad (106)$$

Anschließend wird punktweise die Differenz zur vorgegebenen Soll-Abbott-Kurve ermittelt und mit einem definierten Maximalwert verglichen (vgl. [Eif15c], S. 6):

$$res = \sum_{k=1}^n |C_{k,act} - C_{k,tar}| < \varepsilon \cdot n. \quad (107)$$

Das Abbruchkriterium für den Algorithmus wird auf Basis eines Schwellwertes definiert (vgl. auch [Eif15c], S. 6). Dabei wird ein maximal zulässiges ε vorgegeben, was der durchschnittlichen Höhenabweichung pro Punkt der Abbott-Kurve entspricht. Wird Gleichung (107) erfüllt, so ist der Algorithmus als konvergiert gemäß des definierten Kriteriums zu betrachten (vgl. analog [Eif15c], S. 6).

Die Anwendung dieses Algorithmus auf eine Oberfläche ist in **Abbildung 27** gezeigt, wobei als Ausgangsoberfläche ein Raunormal der Firma Halle (Stufe 1) dient. Das Rohprofil ist in **Abbildung 27 a)** dargestellt. Das Profil nach Anwendung der

beschriebenen Transformation ist in **Abbildung 27 b)** (nach [See15], S. 45) gezeigt. Es kann festgestellt werden, dass charakteristische Strukturen des Profils wie Riefen oder Spitzen erhalten bleiben.

Die praktische Umsetzung im Rahmen der Fertigung und Messung, die Kalibrier- und Auswertestrategie, ein virtueller Test sowie eine Unsicherheitsbilanz des Normals folgen ebenfalls in den **Kapiteln 5** und **6**. Das vorgestellte Normal ist insbesondere zur Feststellung von Linearitätsabweichungen der Höhenachse (Kalibrierung) vorgesehen ([See15], S. 46).

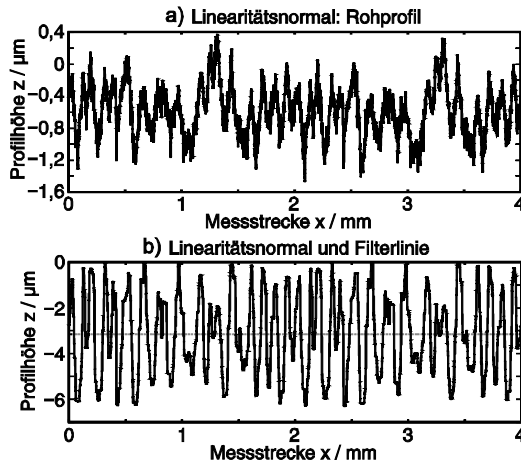


Abbildung 27: Linearitätsnormal, a) Rohprofil und b) transformierte Oberfläche nach ([See15], S. 45)

4.1.3 Stetiges Normal für Ortsspektren

Es wurde gezeigt, dass es Ansätze gibt, das Übertragungsverhalten verschiedener Frequenzen zu kalibrieren (**Kapitel 2.4.2.4**). In der Regel wird das Übertragungsverhalten der Messgeräte dabei ebenfalls nur mit einigen Punkten kalibriert, wie z.B. beim Chirp-Normal, auf dem 24 diskrete Wellenlängen abgebildet werden ([Krü07b], S. 573). Allerdings wäre auch für Ortsfrequenzen eine kontinuierliche Kalibrierung sinnvoll.

Heutige Tastschnittgeräte können einen breiten Bereich von Ortsfrequenzen erfassen und Wellenlängen im Bereich von Rauheit bis Kontur messen ([Vol13a], S. 2). Konturmessgeräte werden ganzheitlich mit einer Kugel als Normal kalibriert ([Vol13a], S. 2), die ebenfalls definierte Ortsfrequenzen abbildet. Weiterhin

existieren bereits Gitter und superfine Raunormale, die ein definiertes Ortsspektrum aufweisen ([Ehr11], S. 144). Demnach kann ein kontinuierliches Spektrum bereits kalibriert werden, bisher allerdings nicht basierend auf einer realen Oberfläche.

Ein Ansatz zu einer entsprechenden Kalibrierung wird nachfolgend vorgestellt. Nach den vorherigen Betrachtungen ist eine stufenlose Kalibrierung des Übertragungsverhaltens von Ortsfrequenzen auf Basis einer realen Oberfläche sinnvoll. Die Herangehensweise der Auslegung ist dabei eine Überführung des Profils in den Frequenzbereich, eine anschließende Änderung der Daten im Frequenzbereich sowie die Rückführung in den Ortsbereich.

Hierzu wird zunächst die Fourier-Transformation berechnet und mithilfe einer Filteroperation geglättet (siehe Gleichungen (108)-(111)), wobei sichergestellt wird, dass alle gewünschten Frequenzen hinreichend vorhanden sind. Über den Vergleich zwischen Soll- und dem Ist-Spektrum der Messdaten kann das Übertragungsverhalten des Messgerätes nahezu stufenlos beurteilt werden. Dieser Vorgang wird folgend mathematisch beschrieben.

Zur Anpassung der Oberflächendaten wird ein vorhandenes Profil $\bar{z}(x)$ Fourier-transformiert:

$$\bar{Z}(\omega) = \mathfrak{F}\{\bar{z}(x)\}. \quad (108)$$

Diskret ergibt sich:

$$Z(\omega_k) = \mathfrak{F}\{z_k(x_k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (109)$$

Weiterhin wird der Betrag $Z_0(\omega_k)$ dieser Fourier-Transformierten berechnet:

$$Z_0(\omega_k) = |Z(\omega_k)|, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad \bar{Z}_0(\omega_k) = (Z_0(\omega_k)), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (110)$$

Anschließend erfolgt eine Glättung des Betrags der Fourier-Transformierten mit dem robusten Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-31 [16610-31] unter Anwendung der Grenzwellenlänge λ_{DFT} , wobei $\bar{Z}'(\omega)$ die geglätteten Werte bezeichnet:

$$\bar{Z}'(\omega) = Fc[\bar{Z}_0(\omega_k), \lambda_{DFT}]. \quad (111)$$

Vor der Rücktransformation wird die Betragsoperation wieder rückgängig gemacht, wobei die ursprünglichen Verhältnisse aus Real- und Imaginärteil zugrunde gelegt werden:

$$Z''(\omega_k) = \left(\frac{\operatorname{Re}(Z(\omega_k))}{|Z(\omega_k)|} \cdot Z'(\omega_k) \right) + \left(\frac{\operatorname{Im}(Z(\omega_k))}{|Z(\omega_k)|} \cdot Z'(\omega_k) \right) \cdot j, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (112)$$

Die transformierten Daten $Z''(\omega_k)$ im Frequenzbereich werden zu einem Vektor zusammengesetzt:

$$\bar{Z}''(\omega) = \begin{pmatrix} Z''(\omega_1) \\ \dots \\ Z''(\omega_n) \end{pmatrix} = (Z''(\omega_k)), k=1, 2, \dots, n. \quad (113)$$

Das transformierte Profil ergibt sich aus der Rücktransformation in den Ortsbereich:

$$\bar{z}_0(x) = \mathfrak{F}^{-1} \{ \bar{Z}''(\omega) \}. \quad (114)$$

Anschließend wird die bereits erläuterte Signalkette angewendet. Die Bandbreite der im Profil vorhandenen Frequenzen wird letztendlich durch die Filter bei der Auswertung festgelegt und kann beliebig variiert werden.

Da die Transformation für plateauartige Oberflächen angewendet werden soll, wird zur Auswertung das robuste Gauß-Filter [16610-31] mit $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ eingesetzt, ein λ_s -Filter wird nicht angewendet und Rauheitsparameter werden nach DIN EN ISO 4287 [4287] ausgewertet:

$$Fc(\bar{z}_s) \triangleq \text{ISO16610-31}, P(\bar{z}_c) \triangleq \text{ISO4287}. \quad (115)$$

Da mit dem Normal später die Übertragungseigenschaften von Tastschnittgeräten überprüft werden sollen, wird zur Beurteilung des Abbruchkriteriums der virtuell gefertigte Datensatz $\bar{z}_e(x)$ genutzt. Dieser wird zu $\bar{Z}_e(\omega)$ Fourier-transformiert und in ein Histogramm H_{DFT} mit der Spaltenbreite von b_{hist} Elementen aufgetragen:

$$\bar{Z}_e(\omega) = \mathfrak{F} \{ \bar{z}_e(x) \}. \quad (116)$$

Es ergibt sich für den Betrag $Z_{0,e}(\omega_k)$ der diskreten Werte:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_e(\omega) &= (Z_e(\omega_k)), \\ Z_{0,e}(\omega_k) &= |Z_e(\omega_k)|, k=1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (117)$$

sowie das zugehörige Histogramm H_{DFT} :

$$H_{DFT}(m) = \frac{1}{b_{hist}} \cdot \sum_{k=(m-1)b_{hist}}^{m \cdot b_{hist}} Z_{0,e}(\omega_k), \quad m=1, 2, \dots, \frac{n}{b_{hist}}. \quad (118)$$

Dieses Histogramm wird geglättet und anschließend mit dem ungeglätteten Histogramm verglichen. Der Effekt, der durch diese Glättung auftritt, stellt ein Maß für die Konvergenz dar: Je kleiner der Wert ist, desto eher hat sich das Profil seiner

eigenen Glättung angenähert. Die Glättung zu \tilde{H}_{DFT} wird dabei mit der bereits definierten Wellenlänge λ_{DFT} durchgeführt:

$$\tilde{H}_{DFT} = Fc \left[\tilde{H}_{DFT}, \lambda_{DFT} \right]. \quad (119)$$

Das Abbruchkriterium wird definiert, wobei ε das maximale Residuum an jedem Punkt sei:

$$res = \sum_{k=1}^{n/b_{hist}} \left| (H'_{DFT}(k) - H_{DFT}(k)) \right| < \varepsilon \cdot \frac{n}{b_{hist}}. \quad (120)$$

Dies bedeutet, dass die durchschnittliche Abweichung zwischen dem gefilterten und unfilterten Histogramm einen definierten Schwellwert nicht erreichen darf.

Wird dieses Abbruchkriterium erfüllt, so wird Konvergenz angenommen, anderweitig wird die Wellenlänge λ_{DFT} für den nächsten Iterationsschritt verkleinert und die Berechnung wiederholt, bis eine Wellenlänge gefunden ist, bei der eine hinreichende Glättung zur Erfüllung der gegebenen Kriterien durchgeführt werden kann.

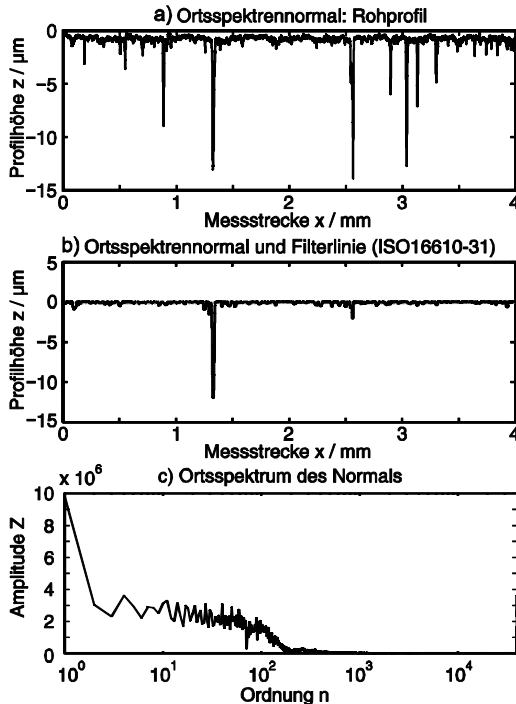


Abbildung 28: Ortspektren-Normal, a) Rohprofil, b) Oberfläche und c) Ortspektrum

Nach dem i -ten Iterationsschritt ohne Konvergenz gilt somit für die Filterwellenlänge $\lambda_{DFT}(i+1)$ der nächsten Iteration:

$$\lambda_{DFT}(i+1) = \lambda_{DFT}(i) / c_a, \quad (121)$$

wobei c_a eine Konstante zur Korrektur der Wellenlänge darstellt. Die praktische Implementierung des Algorithmus wird am Profil in **Abbildung 28 a)** demonstriert, welches als Ausgangsprofil für die Transformation dient.

Nach dem Erfüllen des entsprechenden Abbruchkriteriums ergibt sich das Profil in **Abbildung 28 b)**. Dabei kann festgestellt werden, dass durch die Glättung der DFT auch einige Frequenzanteile stark gedämpft werden, charakteristische Strukturen des Profils jedoch erhalten bleiben. **Abbildung 28 c)** stellt das Ortsspektrum des ausgelegten Normals dar.

4.1.4 Kombiniertes Normal für Welligkeit und Rauheit

Für den Einsatz in der Praxis sind Normale sinnvoll, die möglichst viele Eigenschaften innerhalb einer Messung kalibrieren können. Auch eine kombinierte Kalibrierung von Rauheits- und Welligkeitseigenschaften erscheint daher erstrebenswert.

Normale mit bogenförmigen Rillen (Typ C4, DIN EN ISO 5436-1 [5436-1], S. 8) können dabei - je nach Wellenlänge der Elemente - Rauheits- oder Welligkeitseigenschaften kalibrieren ([12179], S. 11). Eine Verringerung des Kalibrieraufwands wäre durch ein Normal, das sowohl Rauheits- als auch Welligkeitskennwerte auf Basis einer realen Oberfläche und in nur einer Messung kalibriert, möglich.

Da sich das Welligkeits- und Rauheitsprofil durch lineare Profilfilter vollständig voneinander trennen lassen, kann auch eine separate Transformation dieser beiden Signalanteile erfolgen. Vor der Anwendung der entsprechenden Signalkette werden die einzelnen Profile dann wieder zusammengefügt.

Das Vorgehen wird in **Abbildung 29** veranschaulicht: Gegeben sei dabei ein entsprechendes Profil, das sowohl Form und Welligkeit, als auch Rauheitsanteile aufweist. Dieses wird mithilfe einer linearen Filterung in die einzelnen Gestaltabweichungen zerlegt. Danach kann eine unabhängige Transformation der einzelnen Signalanteile erfolgen, bevor das Gesamtprofil wieder rekonstruiert wird. Da das Rauheitsprofil eine kürzere Auswertelänge als das Welligkeitsprofil aufweist, wird es in ein periodisch fortsetzbares Rauheitsprofil $\bar{z}_{r,0,p}(x)$ transformiert, das die normierte Länge der jeweiligen Rauheitsauswertung aufweist.

Dieses Vorgehen soll am Beispiel der Kennwerte W_{sa} (arithmetische Mittenwelligkeit nach SEP 1941 ([1941], S. 4)), R_a und R_z ([4287], S. 12 ff.) demonstriert werden. Im untersuchten Fall wird der Formanteil der Oberfläche entfernt und die in **Abbildung 25** beschriebene Signalkette einmalig angewendet, bevor die Zerlegung des Profils und die anschließende Transformation stattfinden.

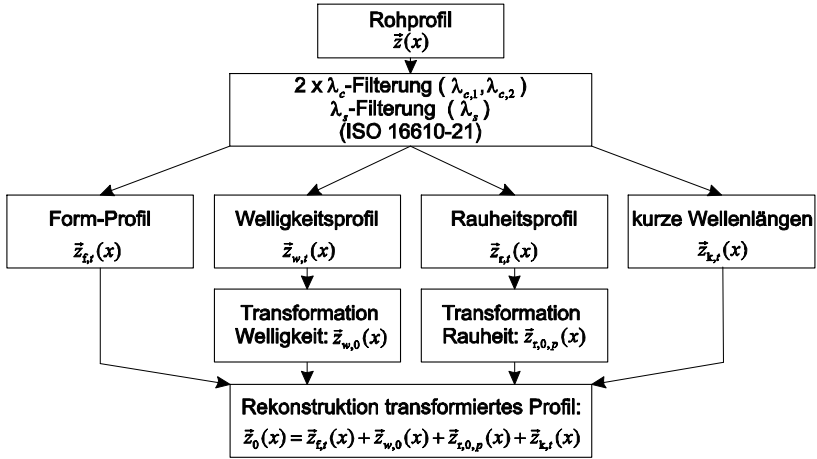


Abbildung 29: Schematisches Vorgehen Welligkeits- und Rauheitsnormal

Es erfolgt die Filterung in das Welligkeitsprofil zur Transformation $\bar{z}_{w,f}(x)$ mit den Wellenlängen $\lambda_{c,1} < \lambda < \lambda_{c,2}$, wofür die zugehörige Berechnungs-Operation wie folgt definiert wird:

$$\bar{z}_{w,f}(x) = FS \left\{ \bar{z}(x) - FC \left[\bar{z}(x), \lambda_{c,1} \right], \lambda_{c,2} \right\}, \quad (122)$$

wobei gilt, dass lineare Filter eingesetzt werden müssen, z.B.:

$$FC(\cdot) \hat{=} \text{ISO 16610-21}, \quad FS(\cdot) \hat{=} \text{ISO 16610-21}. \quad (123)$$

Typische Werte für die Grenzwellenlängen sind:

$$\lambda_{c,1} = 5 \text{ mm}, \quad \lambda_{c,2} = 0,8 \text{ mm}. \quad (124)$$

Weiterhin kann die Filterung des Rauheitsprofils $\bar{z}_{r,f}(x)$ der Wellenlängen $\lambda_{c,2} < \lambda < \lambda_s$ analog definiert werden:

$$\bar{z}_{r,f}(x) = FS \left\{ \bar{z}(x) - FC \left[\bar{z}(x), \lambda_{c,1} \right] - FC \left[\bar{z}(x), \lambda_{c,2} \right], \lambda_s \right\}, \quad (125)$$

mit z.B. $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$. Aus beiden angegebenen Profilen herausgefiltert ist dabei der Formanteil $\bar{z}_{f,t}(x)$ der Oberfläche:

$$\bar{z}_{f,t}(x) = Fc[\bar{z}(x), \lambda_{c,1}], \quad (126)$$

sowie der kurzwellige Anteil $\bar{z}_{k,t}(x)$:

$$\bar{z}_{k,t}(x) = \bar{z}(x) - Fc[\bar{z}(x), \lambda_s]. \quad (127)$$

Das Gesamtprofil kann bei Anwendung der linearen Profilfilterung aus diesen gefilterten Einzelprofilen wieder eindeutig rekonstruiert werden:

$$\bar{z}(x) = \bar{z}_{f,t}(x) + \bar{z}_{w,t}(x) + \bar{z}_{r,t}(x) + \bar{z}_{k,t}(x). \quad (128)$$

Zur Transformation werden die entsprechenden Ist-Parameter des Welligkeits- und Rauheitsprofils ermittelt. Dazu dienen der Parameter W_{sa} nach SEP 1941 ([1941], S. 4):

$$W_{sa} = \frac{1}{l_w} \int_0^{l_w} |\bar{z}_{w,t}(x) - z_m| dx, \quad (129)$$

mit der Mittellinie z_m und der Auswertelänge l_w , sowie die Rauheitsparameter R_a und R_z nach DIN EN ISO 4287 [4287] als Ausgangspunkt:

$$P(\bar{z}_{f,t}(x)) \hat{=} ISO 4287, \quad P(\bar{z}_{w,t}(x)) \hat{=} SEP 1941. \quad (130)$$

Als diskrete Implementierung zur Ermittlung des Parameters W_{sa} ergibt sich analog zu Gleichung (90) die folgende Vorschrift:

$$W_{sa} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{w,t}(x_i) - z_m|. \quad (131)$$

Wird diese Berechnung für die Profile $\bar{z}_{f,t}(x)$ und $\bar{z}_{w,t}(x)$ ausgeführt, ergeben sich die Ist-Parameter $W_{sa,cur}$, $R_{a,cur}$, $R_{z,cur}$. Weiterhin werden die entsprechenden Soll-Parameter $W_{sa,tar}$, $R_{a,tar}$, $R_{z,tar}$ definiert, die als Eingangsgrößen für die Transformation benötigt werden. Als Transformationsschritt für das Welligkeits-Profil wird die folgende Berechnung ausgeführt, woraus sich das transformierte Welligkeitsprofils $\bar{z}_{w,0}(x)$ ergibt:

$$\bar{z}_{w,0}(x) = \bar{z}_{w,t}(x) \cdot \frac{W_{sa,tar}}{W_{sa,cur}}. \quad (132)$$

Die Transformation des Rauheitsprofils erfolgt in zwei separaten Schritten, wobei zur Transformation zunächst ein Teilbereich aus dem Profil extrahiert wird, der einer

Auswertelänge für Rauheit entspricht. Für diesen Ausschnitt wird dann eine entsprechende Periodizität durch die Anwendung einer Gewichtsfunktion gewährleistet.

Eine Annäherung des R_z -Wertes an den Sollwert $R_{z,tar}$ kann dann analog zur Transformation zu $W_{sa,tar}$ ausgeführt werden:

$$\bar{z}_{r,z0}(x) = \bar{z}_{r,t}(x) \cdot \frac{R_{z,tar}}{R_{z,cur}}. \quad (133)$$

Im zweiten Schritt soll eine Transformation von R_a erfolgen, wozu zunächst der neue Istwert $R_{a,cur}$ ermittelt werden muss. Dabei soll allerdings der Bereich, der für die Definition von R_z der Oberfläche verantwortlich ist, nicht mehr verändert werden. Dementsprechend wird ein Schwellwert χ_G definiert, der den Anteil am maximalen Betrag der Profilwerte angibt, bis zu dem eine Transformation der Profilwerte erfolgen soll. Entsprechend gilt für den maximalen Profilwert s_w , bis zu dem die Transformation durchgeführt wird:

$$s_w = \chi_G \cdot \max\left(|\bar{z}_{r,z0}(x)|\right). \quad (134)$$

Auf Basis dieses Grenzwertes wird eine höhenabhängige Gewichtsfunktion $s_r(\bar{z}_{r,z0}(x))$ definiert:

$$s_r(\bar{z}_{r,z0}(x)) = \begin{cases} 1 & \text{für } |\bar{z}_{r,z0}(x)| > s_w \\ -\frac{|\bar{z}_{r,z0}(x)|}{s_w} \cdot \left(\frac{R_{a,tar}}{R_{a,cur}} - 1\right) + \frac{R_{a,tar}}{R_{a,cur}} & \text{für } |\bar{z}_{r,z0}(x)| < s_w. \end{cases} \quad (135)$$

Diese Gewichtsfunktion ist dabei so ausgelegt, dass die achsennahen Höhenwerte mit einem zur Mittelachse hin linear ansteigenden Koeffizienten multipliziert werden. Die Transformation erfolgt durch Multiplikation mit dieser Gewichtsfunktion:

$$\bar{z}_{r,0}(x) = \bar{z}_{r,z0}(x) \cdot |s_r(\bar{z}_{r,z0}(x))|. \quad (136)$$

Nach der Transformation des Rauheitsprofils muss dieses periodisch fortgesetzt werden. Hat das normgerechte Rauheitsprofil eine Länge von l_r , dann gilt dabei:

$$\bar{z}_{r,0}(x) = \bar{z}_{r,0}(x + l_r). \quad (137)$$

Dieses Profil wird dabei auf die maximale vielfache Länge des Rauheitsprofils, die sich auf dem Welligkeitsprofil l_w abbilden lässt, periodisch fortgesetzt. Bei Längen von $l_w = 25 \text{ mm}$ und $l_r = 4 \text{ mm}$ entspricht dies z.B. einer Länge von 24 mm . Dies führt dazu, dass bei einem periodischen Fortsatz des Gesamtprofils mit der Länge l_w

sofort ersichtlich ist, in welchem Bereich eine Rauheitsauswertung durchgeführt werden kann. Demnach ergibt sich das Rauheitsprofil $\bar{z}_{r,0\rho}(x)$. Anschließend kann das transformierte Gesamtprofil rekonstruiert werden:

$$\bar{z}_0(x) = \bar{z}_{f,t}(x) + \bar{z}_{w,0}(x) + \bar{z}_{r,0,\rho}(x) + \bar{z}_{k,t}(x). \quad (138)$$

Auf dieses Profil wird dann die Signalkette (vgl. **Abbildung 25**) angewendet, bevor die neuen Kennwerte ermittelt werden. Falls das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, beginnt die Iteration von vorne. Das zu prüfende Residuum ist z.B. als Summe einzelner Kennwert-Abweichungen definiert:

$$res = |R_{a,cur} - R_{a,tar}| + |W_{sa,cur} - W_{sa,tar}| < \varepsilon, \quad (139)$$

wobei als Schwellwert ein Wert ε definiert wird. Die Rauheitskennwerte werden dabei außerdem an verschiedenen Stellen ausgewertet und der mittlere Betrag der Abweichung eingesetzt.

Abbildung 30 a) zeigt das zur Transformation eingesetzte Rohprofil, das auf Daten einer entsprechenden realen Messaufgabe basiert. **Abbildung 30 b)** zeigt das Profil nach Anwendung der beschriebenen Transformation. Das Rauheitsprofil wurde dabei aus Ausschnitten verschiedenartiger realer Oberflächen zusammengesetzt und anschließend die beschriebene Transformation angewendet. Dies dient dazu, die Charakteristiken verschiedener typischer Oberflächen abzubilden.

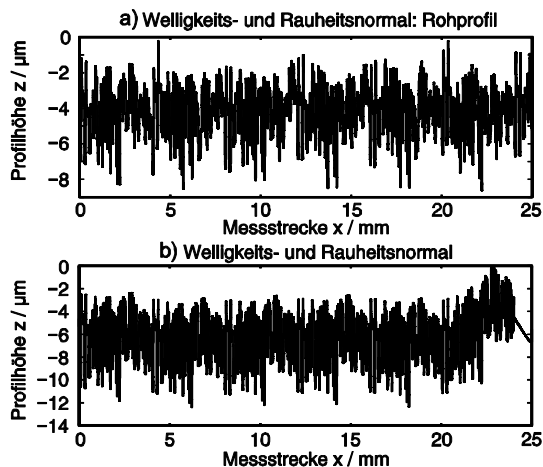


Abbildung 30: Welligkeits- und Rauheitsnormal, a) Rohprofil, b) Normal

Neben der Kalibrierung der genannten Kenngrößen kann zu Beginn des Profils z.B. noch ein Tastspitzenprüfnormal angebracht werden (vgl. DIN EN ISO 5436-1,

Typ B3, [5436-1], S. 4). Somit kann im Rahmen einer einzigen Tastschnittmessung die Kalibrierung der Tastspitze, von Welligkeitskennwerten, von Rauheitskennwerten sowie der Frequenz der dominanten Welligkeit erfolgen.

Zur Veranschaulichung dieses Konzepts werden die einzelnen Auswerteanteile in **Abbildung 31** zusammengefasst. Diagramm **a)** zeigt das periodisch fortsetzbare Rauheitsprofil, das auf das Welligkeitsprofil in **b)** addiert wird, welches wiederum ebenfalls mit seiner eigenen Auswertelänge periodisch fortgesetzt werden kann.

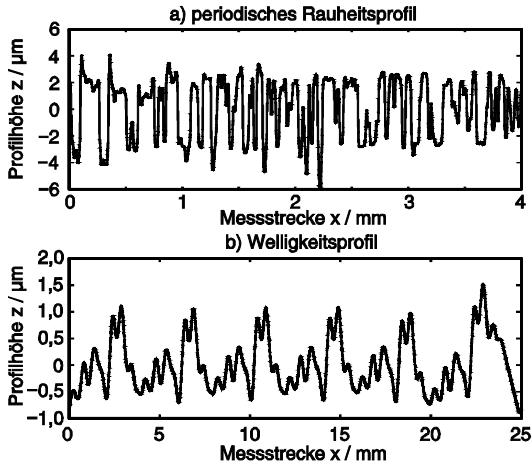


Abbildung 31: Auswertemöglichkeiten des Profils nach Abbildung 30 b),
a) Rauheit, b) Welligkeit

Zur Anwendung im Rahmen der taktilen Messtechnik wurden unterschiedliche Normale vorgestellt. Dabei wurde gezeigt, dass es unterschiedlichste Herangehensweisen für die Berechnung der entsprechenden Oberflächen gibt. Die Transformation kann z.B. auf Basis der Abbott-Kurve oder der Fourier-Transformierten erfolgen. Die vorgestellten Normale können für die Kalibrierung beider Achsen eingesetzt werden, da hier eine Orientierung an einer realen Oberfläche erfolgte und eine kontinuierliche Verteilung der Messwerte vorausgesetzt wurde. Eine separate Kalibrierung der lateralen Achse kann somit möglicherweise vermieden werden.

Die Fähigkeiten der generierten Normale sowie zugehörige Auswerte- und Kalibrierstrategien für den Einsatz in der Praxis werden in **Kapitel 6** noch eingehender, virtuell wie experimentell, untersucht. Ziel ist eine umfangreiche und praxisnahe Kalibrierung des Messgerätes mit wenigen Normalen in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzgebietes.

Im nächsten Abschnitt soll gezeigt werden, dass sich die entwickelte Vorgehensweise ebenso zur Kalibrierung optischer Messeinrichtungen eignet. Dabei werden unterschiedliche Messprinzipien betrachtet und auf Basis der gezeigten Grundlagen zur virtuellen Modellierung aus **Kapitel 3** die Effekte bei der Abtastung berücksichtigt.

4.2 Normale für die optische Messtechnik

4.2.1 Normal zur Charakterisierung der Linearität der z-Achse

Das bereits in **Kapitel 4.1.2** vorgestellte Linearitätsnormal kann ebenfalls als 3D-Topographie-Version ausgelegt werden. Ziel ist die Anwendung der 3D-Version für optische Messgeräte wie Weißlichtinterferometer sowie konfokale Mikroskope, mit denen eine Erfassung der 3D-Topographie durchgeführt werden kann ([Eif15c], S. 2). Entsprechend wird eine Geometrie mit gleichverteilten Höhenwerten und somit einer linearen Flächenmaterialanteilkurve angestrebt ([Eif15c], S. 2 ff.).

Dabei wird jedoch keine integrale Transformation auf 3D-Topographie-Basis eingesetzt, sondern die bereits vorgestellte Transformation für einen Profilschnitt Ψ_{Lin} (Gleichung (105)) wird separat auf jeden Schnitt der Topographie sowohl in x - als auch in y -Richtung angewendet, um den Messbereich jeder Zeile bzw. Spalte der Topographie-Matrix separat untersuchen zu können ([Eif15c], S. 2 ff.).

Gegeben sei die Topographie \mathbf{Z}_p einer Oberfläche als Matrix mit $m \cdot n$ Messpunkten, die den Zählvariablen i und g unterliegen ([Eif15c], S. 3). Die Topographie wurde einer Vorverarbeitung aus Interpolation, Ausrichtung, λ_s -Filterung und Amplitudenkorrektur unterzogen ([Eif15c], S. 3):

$$\mathbf{Z}_p = \begin{pmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m,1} & \cdots & z_{m,n} \end{pmatrix} = (z_{ig}), \quad z_{ig} \in \mathbb{R}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad g = 1, 2, \dots, n. \quad (140)$$

Nach dieser Vorverarbeitung der Messdaten dienen die Randpunkte der aktuell vorhandenen 3D-Abbott-Kurve (0% , $C_{1,act}$) und (100% , $C_{n-m,act}$) als Ausgangspunkt für die Transformation ([Eif15c], S. 3). Für diese Punkte gilt entsprechend der absteigenden Sortierung der Höhenwerte im Rahmen der Berechnung der Abbott-Kurve ([Eif15c], S. 3):

$$C_{0,act} = \max_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ g=1,2,\dots,n}} (z_{ig}), \quad C_{n-m,act} = \min_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ g=1,2,\dots,n}} (z_{ig}). \quad (141)$$

Die Parameter für die Soll-Abbott-Kurve werden demnach in jedem Iterationsschritt neu auf Basis der gesamten 3D-Topographie festgelegt (vgl. [Eif15c], S. 2). Die eigentliche Transformation erfolgt allerdings zeilen- bzw. spaltenweise, damit die gewünschten Linearitäts-Eigenschaften ebenfalls von jedem Einzelprofil der 3D-Topographie abgebildet werden ([Eif15c], S. 2 ff.).

Sind beide Randpunkte nach Gleichung (141) bekannt, liegt die Soll-Abbott-Kurve vollständig fest ([Eif15c], S. 3):

$$\vec{M}_{tar} = \begin{pmatrix} M_{tar,1} \\ \vdots \\ M_{tar,m \cdot n} \end{pmatrix}, \vec{C}_{tar} = \begin{pmatrix} C_{tar,1} \\ \vdots \\ C_{tar,m \cdot n} \end{pmatrix}, \quad (142)$$

wobei für die ideale Soll-Abbott-Kurve in Form einer Geraden der folgende Zusammenhang gelten muss, damit sie dem Messbereich der ursprünglichen 3D-Topographie entspricht ([Eif15c], S. 3):

$$M_{tar,k} = (k-1) \cdot \frac{100\%}{m \cdot n - 1}, C_{tar,k} = \left(C_{act,1} - \frac{(k-1)}{m \cdot n - 1} \cdot (C_{act,n \cdot m} - C_{act,1}) \right), k = 1, 2, \dots, m \cdot n. \quad (143)$$

Zur Transformation erfolgt im ersten Schritt die Extraktion aller Einzelprofile in x -Richtung ([Eif15c], S. 5). Dabei gilt für das g -te Profil, dargestellt durch die Spalte g der Matrix \mathbf{Z}_p :

$$\vec{z}(x) \triangleq \vec{z}_g(x) = \begin{pmatrix} z_{1,g} \\ \dots \\ z_{m,g} \end{pmatrix}, \text{ für } g = 1, 2, \dots, n, \quad (144)$$

gefolgt von einer jeweiligen Anwendung des Algorithmus aus **Kapitel 4.1.2** für jeden möglichen Profilschnitt der vorgegebenen Topographie in x -Richtung (vgl. [Eif15c], S. 2 ff.):

$$\vec{z}_0(x) = \Psi_{Lim}(\vec{z}(x)) = \begin{pmatrix} z_{0,1} \\ \dots \\ z_{0,m} \end{pmatrix}. \quad (145)$$

Demnach werden die Profilpunkte $z_{0,o}$ des transformierten Vektors $\vec{z}_0(x)$ folgendermaßen berechnet ([Eif15c], S. 4):

$$\vec{z}_0 = (z_{0,o}), z_{0,o} = -\frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m} \cdot (C_{m \cdot n, act} - C_{1, act}), \quad \tau_i = \begin{cases} 1 & \text{für } z_i > z_o \\ 0 & \text{für } z_i < z_o \end{cases}, o = 1, 2, \dots, m. \quad (146)$$

Im Rahmen dieser Transformation wird letztendlich der Höhenindex des Profilpunkts ermittelt, indem für jeden Profilpunkt des ursprünglichen Profils überprüft wird, ob er einen kleineren oder größeren Höhenwert aufweist. Bei Betrachtung aller τ_i ergibt sich damit jeweils der relative Höhenwert im Verhältnis zu allen Punkten. Die dabei resultierende Anzahl wird auf die Gesamtzahl der Punkte m bezogen und mit der Gesamtamplitude des Oberflächenvektors ($C_{m-n,act} - C_{1,act}$) multipliziert, um den zugehörigen Höhenwert zu ermitteln, der auf der linearen Soll-Abbott-Kurve liegt (vgl. [Eif15c], S. 3 f.).

Somit ergibt sich der erste Transformationsschritt sowie die zugehörige Signalkette wie folgt, wobei für das g -te Profil in x -Richtung die Transformation aus Gleichung (146) angewendet wird und anschließend eine modifizierte Signalkette berechnet wird (vgl. [Eif15c], S. 5):

$$\bar{z}_{sp,g}(x) = Fc \left[Fs \left(G_f \left(M_f \left(\Psi_{Lin}(\bar{z}_g(x), C_{1,act}, C_{m-n,act}) \right) \right) \right) \right], g = 1, 2, \dots, n. \quad (147)$$

$\bar{z}_{sp,g}(x)$ bezeichnet dabei die transformierten Spalten und der Fertigungsoperator M_f kann vernachlässigt werden, wenn die laterale Auflösung des eingesetzten Fertigungsverfahrens (z.B. 3D-Laser-Lithographie) so hoch ist, dass die entsprechenden Effekte nicht mehr auf dem diskreten Datensatz dargestellt werden können ([Eif15c], S. 4).

Wie in **Kapitel 3.2.1** beschrieben, ist die Abschätzung der lateralen Filterwirkung der Messung (G_f) in Analogie zur morphologischen Filterwirkung der Tastspitze möglich, wenn auch nicht allgemein darstellbar. Die beschriebene Gerätefunktion wird im Rahmen einer morphologischen Filterwirkung implementiert ([Eif15c], S. 5). Als Filterung erfolgt die zeilenhafte Implementierung des linearen 3D-Gauß-Filters (DIN EN ISO 16610-61) [16610-61] unter Anwendung des profilhaften Filters (DIN EN ISO 16610-21) [16610-21]; die entsprechenden 3D-Parameter definiert DIN EN ISO 25178-2 [25178-2] ([Eif15c], S. 5 ff.):

$$Fc(\bar{z}_g) = Fs(\bar{z}_g) \hat{=} \text{ISO16610-21}, P(\bar{z}_g) \hat{=} \text{ISO25178-2}. \quad (148)$$

In einem zweiten Transformationsschritt wird eine analoge Berechnung für die y -Richtung durchgeführt ([Eif15c], S. 5). Die Ausgangsmatrix \mathbf{Z}_{sp} wird dabei durch die transformierten Werte des ersten Transformationsschrittes gebildet ([Eif15c], S. 5):

$$\mathbf{Z}_{sp} = \begin{pmatrix} \bar{z}_{sp,1} & \dots & \bar{z}_{sp,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{sp,1,1} & \dots & z_{sp,1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{sp,m,1} & \dots & z_{sp,m,n} \end{pmatrix}. \quad (149)$$

Aus dieser Topographie werden die Profile $\bar{z}_i(y)$ in y -Richtung extrahiert, wobei für das i -te Profil gilt ([Eif15c], S. 5):

$$\bar{z}(y) \hat{=} \bar{z}_i(y) = (z_{sp,i,1} \quad \dots \quad z_{sp,i,n}), \text{ für } i = 1, 2, \dots, m. \quad (150)$$

Die Profile werden anschließend analog zum ersten Transformationsschritt transformiert (vgl. [Eif15c], S. 5):

$$\bar{z}_{ze,i}(y) = Fc \left[F_s \left(G_f \left(M_f \left(\Psi_{Lin}(\bar{z}_i(y), C_{1,act}, C_{n-m,act}) \right) \right) \right) \right], \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (151)$$

Das Ergebnis dieser Operation ist jeweils der i -te transformierte Vektor $\bar{z}_{ze,i}(y)$. Die Ergebnis-Matrix der zeilenweisen Transformation \mathbf{Z}_{ze} wird wie folgt dargestellt ([Eif15c], S. 5):

$$\mathbf{Z}_{ze} = \begin{pmatrix} \bar{z}_{ze,1} \\ \vdots \\ \bar{z}_{ze,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{ze,1,1} & \dots & z_{ze,1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{ze,m,1} & \dots & z_{ze,m,n} \end{pmatrix} = (z_{ze,ig}). \quad (152)$$

Mit dem Parameter-Operator werden die Ist-Kenngrößen dieser transformierten 3D-Topographie ermittelt:

$$K_p = P \{ \mathbf{Z}_{ze} \}. \quad (153)$$

Das Abbruchkriterium der Transformation wird mithilfe eines Abgleichs zwischen idealer Soll-Abbott-Kurve und tatsächlicher Abbott-Kurve überprüft ([Eif15c], S. 6).

Analog zur profilhaften Betrachtung ergeben sich für die Geradenparameter m_G, b der in Gleichung (143) definierten Soll-Abbott-Kurve die folgenden Werte ([Eif15c], S. 3):

$$m_G = \frac{C_{n-m,act} - C_{1,act}}{100\%}, \text{ für } k = n \cdot m, \quad b = C_{1,act}. \quad (154)$$

Die tatsächliche Abbott-Kurve nach der Transformation wird dabei folgendermaßen berechnet ([Eif15c], S. 6):

$$\vec{C}_{act} = (C_{act,1}, \dots, C_{act,m \cdot n})^T = \left(\max_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ g=1,2,\dots,n}} \{ z_{ze,ig} \}, \dots, \min_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ g=1,2,\dots,n}} \{ z_{ze,ig} \} \right)^T. \quad (155)$$

Das zulässige Residuum ergibt sich, wenn ε die maximale Abweichung pro Messpunkt beschreibt, zu ([Eif15c], S. 6):

$$res = \sum_{k=1}^{m \cdot n} |C_{k,act} - C_{k,tar}| < \varepsilon \cdot m \cdot n. \quad (156)$$

Die Transformation wird beispielhaft in **Abbildung 32** ([Eif15c], S. 7) dargestellt. In **Abbildung 32 a)** ([Eif15c], S. 7) wird die vorverarbeitete Rohtopographie einer Zylinderlaufbahn dargestellt, **Abbildung 32 b)** ([Eif15c], S. 7) zeigt das transformierte Profil nach Durchführung der virtuellen Auswertevorschrift unter Anwendung der Grenzwellenlängen $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ und $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ sowie einem lateralen Punktabstand von $\Delta x = \Delta y = 400 \text{ nm}$ ([Eif15c], S. 7).

Bei Betrachtung dieser Transformation kann festgestellt werden, dass, wie bei den vorherigen Transformationen, wesentliche Strukturelemente der Topographie, wie charakteristische Riefen, erhalten bleiben.

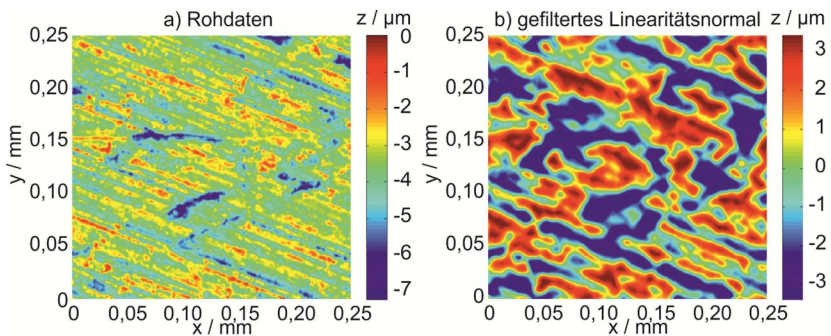


Abbildung 32: Linearitätsnormal 3D, a) Rohdaten und b) transformierte, gefilterte Oberfläche ([Eif15c], S. 7)

4.2.2 Ellipso-Höhen-Topometer-Normale

Die Besonderheiten des EHT, welches z.B. die materialbedingten Topographieabweichungen der Weißlichtinterferometrie charakterisiert und berücksichtigt, wurden bereits vorgestellt ([Leo10], S. 623). Diese speziellen Eigenschaften des Messgerätes müssen auch kalibriert werden, wozu entsprechende Normale benötigt werden (vgl. [Rai15b], S. 4591 f.).

Die reine Topographie-Erfassung des Aufbaus kann mit konventionellen Normalen überprüft werden, wie sie auch im Rahmen der Weißlichtinterferometrie ohne Erfassung von Materialeigenschaften eingesetzt werden ([Rai15a], S. 7). So kann auch beim EHT ein Einsatz von Raunormalen, Auflösungsnormalen und Tiefeneinstellnormalen erfolgen, die keinen Materialkontrast aufweisen ([Rai15a], S. 7).

Interessant sind Kalibrierprozesse in Bezug auf die Messung von Materialeigenschaften zur Ausführung einer Höhenkorrektur, der Materialerkennung sowie der Schichtdickenermittlung ([Rai15a], S. 7). Dies sind drei typische Einsatzfälle für das EHT, wie sie in **Kapitel 3.2.2** benannt wurden.

Es ist sinnvoll, zur kombinierten Abbildung der zu messenden Eigenschaften einen Materialkontrast mit Höhenstufen zu koppeln ([Rai15a], S. 8). Stufen als einfache Geometrie sind dabei zur Kalibrierung ausreichend, da die Gesamtübertragung von Topographie-Eigenschaften z.B. mit Raunormalen hinreichend überprüft werden kann (vgl. DIN EN ISO 25178-70 [25178-70], S. 14).

Ein Konzept zu Normalen und zur Kalibrierung wurde für zwei Materialkombinationen (Aluminium *Al* und Silicium *Si*, sowie Platin *Pt* und Siliciumdioxid *SiO₂*) erarbeitet, wobei ein Überblick über die benötigten Proben in **Abbildung 33** ([Rai15a], S. 8) gegeben wird ([Rai15a], S. 7 f.). Die Proben i), ii), iv) und v) können dabei genutzt werden, um die ordnungsgemäße Erfassung von optischen Materialeigenschaften zu überprüfen, wohingegen die Proben iii), vi) und vii) zur gleichzeitigen Topographie- und Materialkalibrierung vorgesehen sind ([Rai15a], S. 7 f.).

Erste Messungen an solchen Gittern mit Materialkontrast wurden von Leonhardt ([Leo10], S. 627 ff.) durchgeführt. In den durchgeführten Untersuchungen soll die Anwendung solcher Gitterstrukturen zur Kalibrierung betrachtet werden ([Rai15a], S. 7 f.).

Die Gitter-Proben iii) und vi) können zur lokalen Materialerkennung genutzt werden, v) und vi) eignen sich weiterhin zur Kalibrierung von Messungen, bei denen insbesondere die korrekte Erfassung der Schichtdicke transparenter Materialien von Interesse ist ([Rai15a], S. 7). Die Probe vii), die ähnlich dem Chirp-Normal [Krü07b] verschieden große laterale Gitterstrukturen mit Größenordnungen von 250–2000 nm aufweist, dient zur Überprüfung des lateralen Auflösungsvermögens im Rahmen der Erfassung von Materialeigenschaften ([Rai15a], S. 7 f.). Ein spezielles Kalibrierkonzept unter Anwendung der genannten Normale wurde entworfen und ist später in **Kapitel 6** beschrieben (vgl. [Rai15b] [Rai15a]).

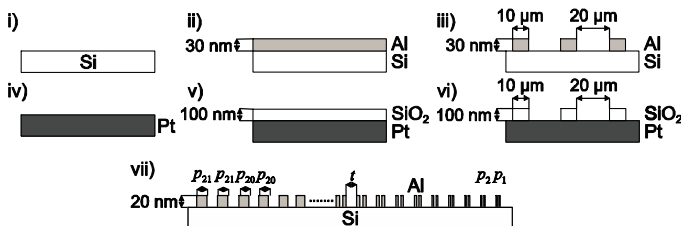


Abbildung 33: Spezielle Normale für das EHT ([Rai15a], S. 8)

4.2.3 Normal für die industrielle Computertomographie (CT)

Im Stand der Technik wurde konstatiert: Bisher ist die industrielle CT im Wesentlichen für die Koordinatenmesstechnik geeignet ([Bar13], S. 1). Aufgrund der steigenden Auflösung - auch dieses Verfahrens - stellt sich die Frage, inwieweit auch eine Rauheitsmessung möglich ist ([Eif16], S. 52).

Zur Klärung dieses Potentials ist eine entsprechende Machbarkeitsstudie sinnvoll. Daher wurde auch für die CT ein spezielles Raunormal entworfen, um eine Grundlagenuntersuchung zur Rauheitsmessung durchführen zu können ([Eif16], S. 52).

Wie in **Kapitel 3.2.3** beschrieben wird die Diskretisierung in Voxel über eine morphologische Filterung mit einer horizontalen Strecke sowie einer Rundungsoperation in vertikaler Richtung berücksichtigt. Das Vorgehen aus **Kapitel 4.1** wird dabei für das weitere Vorgehen unter Berücksichtigung der vorgestellten CT-Gerätekfunktion analog eingesetzt ([Eif16], S. 52). Für die Messung mit der CT soll demnach eine bestimmte Rauheit abgebildet werden ([Eif16], S. 52). Diese kann z.B. durch eine Transformation des Kennwerts R_a klassifiziert werden:

Dabei erfolgt zunächst eine Ermittlung des tatsächlichen R_a -Wertes $R_{a,cur}$ des Rohprofils $\bar{z}(x)$, wobei Herstellung und Abtastung zur Berechnung dieses Anfangswertes zunächst nicht berücksichtigt werden müssen, da die Fertigung und Messung des Profils bereits real stattgefunden hat. Lediglich die Auswerteprozeduren werden als Vorverarbeitung vor der Berechnung der Kennwerte ausgeführt:

$$R_{a,cur} = P\{Fc[Fs[\bar{z}(x)]]\}. \quad (157)$$

Dabei werden für die Filterung und Parameterberechnung die folgenden Auswertoroutinen eingesetzt:

$$Fc(\bar{z}_S) = Fs(\bar{z}_G) \hat{=} \text{ISO16610-21}, \quad P(\bar{z}_c) \hat{=} \text{ISO4287}. \quad (158)$$

Die Transformation wird dann auf Basis des Verhältnisses zwischen diesem tatsächlich vorliegenden Wert sowie dem Ziel-Parameter $R_{a,tar}$ ausgeführt:

$$\bar{z}_0(x) = \Psi_i(\bar{z}(x)), \quad \bar{z}_0(x) = (z_{0,i}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (159)$$

$$z_{0,i}(x_i) = \text{round}\left(z_i(x_i) \cdot \frac{R_{a,tar}}{R_{a,cur}} \cdot 10^\delta\right) / 10^\delta, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (160)$$

wobei δ der Exponent ist, der zur Rundung mit einer Diskretisierung von z.B. 10 nm benötigt wird und $\text{round}(\cdot)$ einen Rundungsoperator beschreibt. Ziel ist eine erste Berücksichtigung von Auflösungseffekten im Rahmen der Transformation. Der

Fertigungsoperator wird dabei analog zu den Normalen für den Einsatz bei taktilen Messgeräten angewendet (morphologische Schließung mit der Werkzeuggeometrie, vgl. **Kapitel 3.5**), da die Fertigung des Normals ebenfalls unter Anwendung eines UP-Drehprozesses angestrebt wird:

$$\bar{z}_e(x) = M_f(\bar{z}_0). \quad (161)$$

Die Einflüsse des Messverfahrens werden im Wesentlichen mit einer Beschreibung der Einflüsse, die durch die Diskretisierung auf Voxel auftreten, berücksichtigt (vgl. **Kapitel 3.2.3**). Die Prozess-Simulation der virtuellen CT wird lediglich später zur Verifikation eingesetzt. Somit ergibt sich, wie in Gleichung (68) beschrieben, folgender Ablauf:

$$\bar{z}_G(x) = \left(\left[(\bar{z}_e(x) \oplus \bar{d}_v(x)) \odot \bar{d}_v(x) \right] \oplus \bar{d}_v(z) \right) \odot \bar{d}_v(z). \quad (162)$$

Im Detail führt dies auf folgende Implementierung: Es sei v_x die Kantenlänge eines Voxels, dann kann die Auflösungsbegrenzung in lateraler Richtung durch eine morphologische Schließung mit einer horizontalen Strecke derselben Länge ausgedrückt werden:

$$\bar{z}_{G,a}(x) = (\bar{z}_e(x) \oplus \bar{d}_v(x)) \odot \bar{d}_v(x), \quad \bar{d}_v(x) = 0 \cdot \begin{pmatrix} d_{v,1} \\ \vdots \\ d_{v,l_{se}} \end{pmatrix}, \quad l_{se} = \frac{v_x}{\Delta x}. \quad (163)$$

Die Auflösungsbegrenzung in vertikaler Richtung wird hingegen anstelle einer morphologischen Filterung durch einen entsprechenden Rundungsprozess berücksichtigt, um den Rechenaufwand aufgrund der nichtäquidistanten Punktabstände in dieser Achse zu reduzieren:

$$\bar{z}_G = \text{round}(\bar{z}_{G,a} \cdot 10^\delta) / 10^\delta, \quad (164)$$

wobei der Parameter δ so gewählt wird, dass eine möglichst gute Übereinstimmung mit der Größenordnung der Voxel erzielt wird. Anschließend erfolgt die reguläre λ_c - und λ_s -Filterung des Datensatzes sowie die Anwendung des Parameter-Operators zur Berechnung der neuen Rauheitskennwerte:

$$R_{a,cur} = P \left\{ Fc \left[Fs \left(\bar{z}_G(x) \right) \right] \right\}. \quad (165)$$

Diese Parameter werden wiederum zur Überprüfung des Abbruchkriteriums genutzt, das erfüllt ist, sobald das Residuum res den Maximalwert ε unterschreitet:

$$res = \left| R_{a,lar} - R_{a,cur} \right| < \varepsilon. \quad (166)$$

Weiterhin kann auch der Parameter $R_{z,cur}$ mit einem virtuell gemessenen Sollwert verglichen werden. Die Anwendung des beschriebenen Algorithmus auf das Profil in **Abbildung 34 a)** führt auf die transformierte Oberfläche in **Abbildung 34 b)**. Eingesetzt wurden dabei die Parameter $\lambda_c = 0,8\text{mm}$ und $\lambda_s = 2,5\mu\text{m}$ sowie eine Voxelgröße von $v_x = 1\mu\text{m}$. Auch dieses Profil kann dabei periodisch fortgesetzt werden.

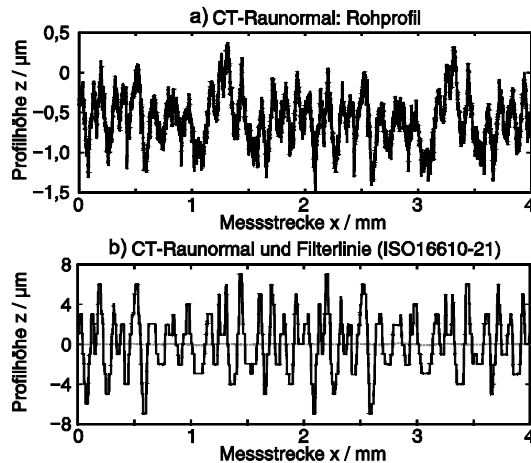


Abbildung 34: CT-Raunormal, a) Rohprofil und b) transformierte Oberfläche

4.2.4 Streulicht-Normale

Bisherige Strategien zur Kalibrierung von winkelauflösenden Streulichtsensoren wurden im Rahmen von **Kapitel 2.4.3.4** vorgestellt. Dabei basiert die bisherige Kalibrierung und Justierung auf der Betrachtung von speziellen Einsatzfällen, wie z.B. der Anpassung an ein gleichverteiltes Streulicht ([VDA09], S. 8) ([See16], S. 4).

Bis jetzt wird allerdings kein rückgeführtes Kalibriernormal genutzt, das an eine reale Messaufgabe angelehnt ist ([See16], S. 4). Dazu soll eine entsprechende Strategie erarbeitet werden. Es wird dabei ein definierter A_y -Wert abgebildet und kalibriert, wie er bei einer realen, zu messenden Oberfläche auftreten könnte ([See16], S. 4). Die Periodizität des Normals sollte dabei an den Leuchtfleckdurchmesser angepasst werden ([See16], S. 5).

Es werden zwei verschiedene Geometrien vorgeschlagen, mit denen der A_y -Wert kalibriert werden soll: eine Geometrie auf Basis einer realen Oberfläche, deren Winkelverteilung transformiert wird sowie ein Normal, dessen Oberfläche auf Basis der gaußschen Fehlerfunktion ausgelegt wird ([See16], S. 5 ff.).

Zur Auslegung des Normals auf Basis einer realen Oberfläche wird eine Überführung der Oberfläche auf die Winkeldarstellung, eine anschließende Transformation der Winkelverteilung sowie die abschließende Rücktransformation auf die Profildarstellung ausgeführt ([See16], S. 5 f.).

Der in **Kapitel 3.2.4** definierte Ablauf (Gleichungen (83)-(84)) zur virtuellen Messung mit dem winkelauflösenden Streulichtsensor sei weiterhin als Messgeräte-Operator $G_{f,sl}$ zur Modellierung des Messgeräts definiert:

$$\bar{z}_G(x) = G_{f,sl}(\bar{z}_e(x)). \quad (167)$$

Für die eigentliche Transformation $\Psi(\bar{z}(x))$ kann die Eigenschaft ausgenutzt werden, dass der A_q -Wert einer Oberfläche direkt mit der Standardabweichung der Streulichtverteilung im Zusammenhang steht ([VDA09], S. 5).

Nach der erstmaligen Ausführung der Signalkette ohne Transformationsschritt sei der virtuell ermittelte A_q -Wert $A_{q,act}$ ([See16], S. 5 f.). Weiterhin wird ein Zielwert für den Parameter als $A_{q,tar}$ definiert ([See16], S. 5). Danach erfolgt in einer Iteration die Korrektur des Profils (vgl. [See16], S. 5). Für die Transformation des Profils wird keine ideal gaußförmige Verteilung angestrebt. Lediglich die Erzielung des definierten Wertes $A_{q,tar}$ wird vorausgesetzt ([See16], S. 5). Demnach wird folgender Korrekturfaktor k_{tar} definiert ([See16], S. 5):

$$k_{tar} = \frac{A_{q,act}}{A_{q,tar}}. \quad (168)$$

Da aufgrund des eingesetzten $f-\theta$ -Objektivs näherungsweise ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Ableitung und dem Profildwinkel angenommen werden kann, erfolgt für das gegebene diskrete Eingangsprofil $\bar{z}(x) = (z(k))$, $k = 1, 2, \dots, n$ mit n Messpunkten die Berechnung der entsprechenden diskreten Ableitung $\Delta z(k)$ ([See16], S. 5):

$$\Delta z(k) = z(k+1) - z(k), \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (169)$$

Mit dem auf Basis von Gleichung (168) berechneten Korrekturfaktor erfolgt die Transformation ([See16], S. 5):

$$\Delta z_t(k) = \frac{\Delta z(k)}{k_{tar}}, \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (170)$$

Die tatsächliche Steigung für den Streulichtsensor γ'_{act} in Grad wird berechnet, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Sensor bedingt durch seinen geometrischen Aufbau den doppelten Oberflächenwinkel erfasst:

$$\gamma'_{act}(k) = \frac{2 \cdot 180}{\pi} \frac{\Delta z_t(k)}{\Delta x}, \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (171)$$

Um zu große Winkel, die der Sensor nicht mehr erfassen könnte, zu entfernen, wird eine Filterung vorgesehen ([See16], S. 5 f.). Dabei werden die zu großen Winkel so lange mit einem Transformationsfaktor t_f multipliziert, bis sie einen festgelegten Grenzwert unterschreiten, der so gewählt wird, dass jeweils die äußere Diode der Diodenzeile mit einer Intensität von 0 beleuchtet wird (vgl. [See16], S. 5 f.):

$$\gamma'_{t,act}(k) = \begin{cases} \gamma'_{act}(k), & \text{für } |\gamma'_{act}(k)| < |\gamma(m-1)| \\ \gamma'_{act}(k) \cdot t_f, & \text{für } |\gamma'_{act}(k)| > |\gamma(m-1)| \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (172)$$

Diese Berechnungsvorschrift wird solange ausgeführt, bis die gegebene Bedingung erfüllt ist:

$$|\gamma'_{t,act}(k)| < |\gamma(m-1)|, \quad k \in \mathbb{N}, \quad k \leq n-1. \quad (173)$$

Im nächsten Schritt werden die Winkel gemäß ihrem Wert geordnet, wobei diese Darstellung anschließend geglättet wird, um eine kontinuierlichere Winkelverteilung zu erreichen (vgl. [See16], S. 6). Die sortierten Winkel $\vec{\gamma}'_{sort,act}$ seien definiert:

$$\vec{\gamma}'_{sort,act} = \left(\max(\gamma'_{t,act}(k)), \dots, \min(\gamma'_{t,act}(k)) \right)^T, \quad k = 1, 2, \dots, n-1, \quad (174)$$

mit den Indices \vec{Ind} , die auf die ursprüngliche Winkeldarstellung bezogen werden. Diese geben demnach die Position des Winkels im Profil an:

$$\vec{Ind} = \left(\text{ind}(\max(\gamma'_{t,act}(k))), \dots, \text{ind}(\min(\gamma'_{t,act}(k))) \right)^T = (\text{Ind}(k)), \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (175)$$

Die auf dieser Basis sortierte Winkelverteilung wird im Anschluss an die Sortieroperation mit der Wellenlänge λ_s^γ unter Anwendung des robusten Gauß-Filters gefiltert, was auf die geglätteten Winkel $\vec{\gamma}'_{sort,act,g}$ führt (vgl. [See16], S. 6):

$$\vec{\gamma}'_{sort,act,g} = Fs(\vec{\gamma}'_{sort,act}), \quad Fs(\cdot) \triangleq ISO16610-31. \quad (176)$$

Nach der abgeschlossenen Transformation erfolgt eine Rücktransformation auf die lokalen Oberflächenwinkel unter Ausnutzung der Information der Indices \vec{Ind} (vgl. [See16], S. 6). Dabei gilt für die rekonstruierten Werte $\vec{\gamma}'_{rec} = \gamma'_{rec}(k)$, $k = 1, 2, \dots, n-1$:

$$\gamma'_{rec}(k) = \gamma'_{sort,act,g}(\text{Ind}(k)), \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (177)$$

Ausgehend von diesen Winkeln erfolgt die Rücktransformation auf die Ableitung des Profils sowie des Profils selbst, wobei ein entsprechender Anfangswert $z_0(1)$ festgelegt werden kann (vgl. [See16], S. 6):

$$\Delta z_{rec}(k) = \frac{\pi}{2 \cdot 180} \cdot \gamma'_{rec}(k) \cdot \Delta x, \quad k = 1, 2, \dots, n-1, \quad (178)$$

$$z_0(1) = z(1) \cdot k_{tar}; \quad z_0(k+1) = z_0(k) + \Delta z_{rec}(k), \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (179)$$

Anschließend wird die virtuelle Fertigung ausgeführt, um ebenfalls eine Glättung zu großer Winkel herbeizuführen und die fertigungstechnische Umsetzbarkeit der Geometrie sicherzustellen ([See16], S. 6). Beim Streulichtmessverfahren ist im Rahmen der Auswertung keine Filterung vorgesehen.

Es erfolgt nach der virtuellen Fertigung die in **Kapitel 3.2.4** beschriebene, ebenfalls virtuelle, Ermittlung des A_q -Werts der Oberfläche, was auf den neuen $A_{q,act}$ -Wert führt ([See16], S. 6). Somit ist dieser Wert ins Abbruchkriterium bei der Iteration einzusetzen ([See16], S. 6):

$$res = |A_{q,tar} - A_{q,act}| < \varepsilon. \quad (180)$$

Wird dieser Algorithmus für einen Wert von $A_{q,tar} = 30$ sowie eine Periodizität der Oberfläche von $p_{min} = 30 \mu m$, die dem minimal möglichen Leuchtfleckdurchmesser entspricht, ausgeführt und eine virtuelle Messung mit $d_i = 900 \mu m$ berücksichtigt, können Leuchtfleckdurchmesser von $d_i = 30, 300, 900 \mu m$ kalibriert werden (vgl. [See16], S. 6). Der Einfluss eventueller abweichender Werte für die Größe des Leuchtfleckdurchmessers auf das Messergebnis wird später im Rahmen von **Kapitel 6.1.2.4** untersucht.

Das auf den genannten Parametern generierte Profil ist in **Abbildung 35** ([See16], S. 6) dargestellt, wobei **Abbildung 35 a**) ([See16], S. 6) das vorverarbeitete Rohprofil und **Abbildung 35 b**) ([See16], S. 6) das Profil nach Erfüllung des in Gleichung (180) definierten Konvergenzkriteriums darstellt.

Die zweite Möglichkeit stellt die Generation eines Profils über das gaußsche Fehlerintegral dar ([See16], S. 6). Dabei werden zunächst die x -Werte in Abhängigkeit der eingesetzten Periodenlänge p_{min} sowie der Diskretisierung Δx_{err} berechnet (vgl. [See16], S. 6):

$$\vec{x}_{err} = (x_{err,i}), \quad x_{err,i} = (i-1) \cdot \Delta x_{err}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{p_{min}}{\Delta x_{err}} / 2. \quad (181)$$

Diese Werte werden so umgerechnet, dass ein Einsetzen in die Fehlerfunktion zwischen den Grenzwerten $-g_r$ und g_r möglich ist ([See16], S. 6):

$$\bar{x} = (-g_r + (i-1) \cdot \Delta x), i = 1, 2, \dots, \frac{p_{\min}/2}{\Delta x_{err}}, \Delta x = \frac{2 \cdot g_r}{\frac{p_{\min}/2}{\Delta x_{err}} - 1} \quad (182)$$

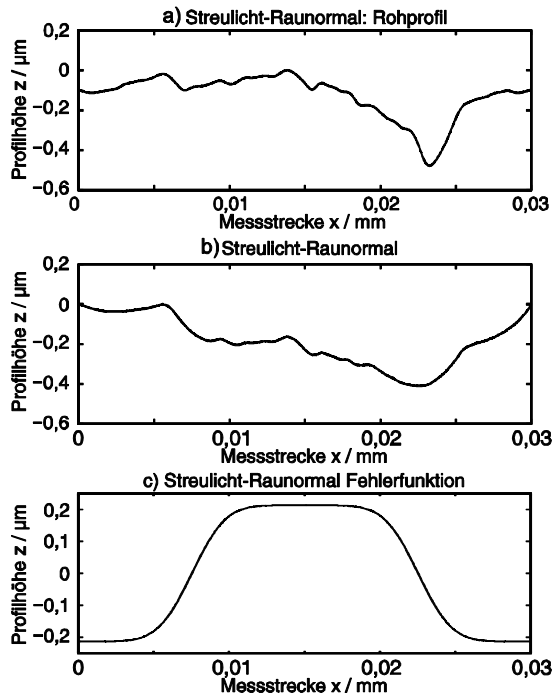


Abbildung 35: Streulicht-Raunormal, a) Rohprofil und b) transformierte Oberfläche, c) Normal auf Basis der gaußschen Fehlerfunktion; ([See16], S. 6)

Die zugehörigen z -Werte \bar{z}_{err} ergeben sich mit der Amplitude A_0 zu ([See16], S. 7):

$$\bar{z}_{err} = (z_{err,i}), z_{err,i} = A_0 \cdot erf(x_i), i = 1, 2, \dots, \frac{p_{\min}/2}{\Delta x_{err}} \quad (183)$$

Zur Darstellung des Gesamtprofils wird die Funktion gespiegelt ([See16], S. 7):

$$\bar{z}_{err,u} = (z_{err,u,i}), z_{err,u,i} = z_{err,k}, k = \frac{p_{\min}/2}{\Delta x_{err}} - (i-1) \quad (184)$$

Diese Profile werden zu einem Gesamtprofil $\bar{z}_{err,ges}$ zusammengesetzt, welches einen stetigen Verlauf aufweist und somit beliebig periodisch fortgesetzt werden kann ([See16], S. 7):

$$\bar{z}_{err,ges} = \left(\bar{z}_{err}, \bar{z}_{err,\mu} \right). \quad (185)$$

Das Profil \bar{z}_0 , das durch einen periodischen Fortsatz von $\bar{z}_{err,ges}$ auf die Länge des zur virtuellen Messung eingesetzten Leuchtfleckdurchmessers gebildet wird, führt nach seiner virtuellen Fertigung und Messung auf den gemessenen Wert von $A_{q,act}$ ([See16], S. 7). Weiterhin wird auch hier ein Sollwert $A_{q,tar}$ definiert (vgl. [See16], S. 6 f.).

Auf Basis dieser beiden Werte wird der Korrekturfaktor für die Amplitude und somit die neue Amplitude A_0 für die $(i+1)$ -te Iteration berechnet ([See16], S. 7):

$$k_{tar}(i) = \frac{A_{q,act}(i)}{A_{q,tar}}, \quad A_0(i+1) = \frac{A_0(i)}{k_{tar}(i)}. \quad (186)$$

Mit dieser neuen Amplitude erfolgt eine neue Berechnung des Profils (Gleichungen (183)-(185)) sowie dessen virtuelle Messung zu $A_{q,act}$ ([See16], S. 7). Dieser Ablauf wird solange wiederholt, bis der gemessene Wert $A_{q,act}$ folgendem Abbruchkriterium des zulässigen Residuums ε genügt ([See16], S. 7):

$$res = \left| A_{q,tar} - A_{q,act} \right| < \varepsilon. \quad (187)$$

Der auf Basis der Parameter $l_d = 900 \mu m$, $p_{min} = 30 \mu m$ sowie $A_{q,tar} = 30$ generierte Datensatz ist in **Abbildung 35 c**) ([See16], S. 6) dargestellt ([See16], S. 7). Dieser eignet sich dabei ebenfalls für alle Leuchtfleckdurchmesser, die einem Vielfachen von p_{min} entsprechen.

Nach der Betrachtung unterschiedlicher optischer Messverfahren soll auch das dritte Messprinzip der Fertigungsmesstechnik, die pneumatische Messtechnik, im folgenden Abschnitt noch Beachtung finden.

4.3 Normale für die pneumatische Messtechnik

Grundlagen des Messverfahrens sowie seine physikalischen Grundlagen wurden in den **Kapiteln 2.2.7** bzw. **2.3.4** beschrieben. Darauf aufbauend wurde die virtuelle Modellierung mit CFD sowie der lateralen Filterwirkung in **Kapitel 3.3** erläutert. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich die statische Filterwirkung des Sensors in Abhängigkeit des Messdüsendurchmessers durch einen letztendlich rein geometrischen Zusammenhang gut beschreiben lässt ([Eif15a], S. 87).

Weiterhin ist bekannt, dass das Übertragungsverhalten pneumatischer Sensoren mit runden Messdüsen durch eine Bessel-Funktion erster Gattung (vgl. [Bro08], S. 566 ff.) charakterisiert werden kann ([Sch15c], S. 53) ([Eif15a], S. 88):

$$\nu = \frac{A_a}{A_e} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (\cos(\omega_D \cdot \sin(\varphi))) d\varphi, \quad (188)$$

mit dem Übertragungsverhältnis ν , der gemessenen Ausgangsamplitude A_a des Sensors, der tatsächlichen Eingangsamplitude A_e sowie der dimensionslosen Ortsfrequenz ω_D in Abhängigkeit des Messdüsendurchmessers d_M und der Ortsfrequenz f ([Eif15a], S. 88):

$$\omega_D = 2\pi f \frac{d_M}{2}. \quad (189)$$

Es wurde außerdem ein erstes Formnormal von Schäfer ([Sch15c], S. 56 ff.) vorgestellt. Ausgangspunkt für dieses erste Normal war der Ansatz, dass die durchgeführten pneumatischen Formmessungen sich teilweise nicht wesentlich von Konturmessaufgaben für Tastschnittgeräte unterscheiden und somit auch eine Kalibrierung in Anlehnung an z.B. das Konturnormal der PTB ([Neu11], S. 120 f.) (vgl. auch **Kapitel 2.4.3.1**) erfolgen kann ([Eif15a], S. 89).

Das Normal bildet dabei möglichst viele Eigenschaften ab, wozu neben einem Absatz, der zur Betrachtung unterschiedlicher Ortsfrequenzen vorgesehen wird, auch spezielle Frequenzen zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens, die als Kreisbogensegmente mit unterschiedlichem Radius aufgebracht werden, und eine Rampe zur Kalibrierung des Messbereichs der in **Kapitel 2.2.7** eingeführten pneumatischen Kennlinie, zählen ([Eif14], S. 29) ([Eif15a], S. 89).

Dieses vorhandene Normal soll auf Basis numerischer Verfahren untersucht und weiterentwickelt werden. In Vorarbeiten wurden die grundsätzlichen Einsatzgebiete der pneumatischen Messtechnik [Sch13a] sowie die dynamischen Eigenschaften der Sensoren [Sch13b] untersucht. Dabei wurde unter anderem mit CFD das laterale Auflösungsvermögen, die Sprungantwort des Sensors [Eif13] und die zugehörige Ansprechzeit ([Sch13a], S. 58 ff.) ([Sch13b], S. 908 ff.) charakterisiert. Generell konnte im Rahmen einer Grundlagenuntersuchung [Eif13] festgestellt werden, dass sich das Werkzeug CFD gut zur Abbildung der pneumatischen Messtechnik eignet.

Ziel für das auszulegende Normal ist eine Kalibrierung des räumlichen Filterverhaltens ([Eif15a], S. 89) ([Eif14], S. 29). Entsprechend soll die Abtastung langsam, unter Vernachlässigung dynamischer Effekte, erfolgen ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 90). Zur Untersuchung, inwieweit Glättungseffekte über Zusammenhänge der Strömungsmechanik modelliert werden können, werden mit dem Modell aus **Kapitel 3.3.1** CFD-Simulationen ausgeführt. Es wird eine Abtastung von Testgeometrien simuliert. Genutzt werden eine Rechteck-Funktion, eine Dreiecks-Funktion sowie ein Kreissegment. Die abzutastende Geometrie ist in

Abbildung 36 a) dargestellt. Auf Basis des Filter-Verhaltens erfolgt anschließend die Auslegung eines verbesserten Normals.

Die Abtastung mit CFD wurde mit einer virtuellen Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks von $0,2\text{ mm/s}$ ausgeführt, was ausreichend langsam ist. In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Ansprechzeit des Sensors bei den hier betrachteten kleinen Messkammervolumen in der Größenordnung von etwa 20 ms liegt ([Sch13b], S. 909) ([Sch15c], S. 77). Angewendet wurden Düsendurchmesser von $d_V = 1,4\text{ mm}$ und $d_M = 2,0\text{ mm}$ ([Eif15a], S. 88), ein Vordruck von $p_V = 4\text{ bar}$ sowie ein Umgebungsdruck von $p_U = 1\text{ bar}$. Die erzielten Ergebnisse sind in **Abbildung 36 b)** gezeigt. Dabei kann festgestellt werden, dass eine Glättung der Geometrielemente erfolgt. Diese Glättung zeigt sich bei gleicher Amplitude der Elemente sehr unterschiedlich, was das integrale Filterverhalten aus **Kapitel 3.3.2** bestätigt.

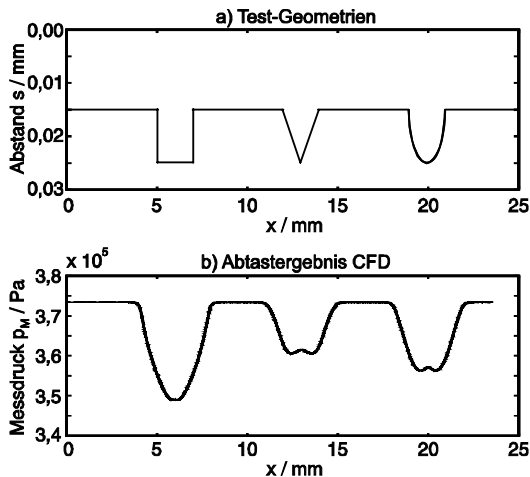


Abbildung 36: a) Testfunktionen Pneumatik, b) Abtastergebnisse mit CFD

Das geometrische Filterverhalten pneumatischer Abstandssensoren kann demnach mit CFD-Simulationen abgebildet werden. Da die Form des Geometrieelements einen Einfluss auf das Filterverhalten hat, sollten bei der optimierten Version des Normals unterschiedliche Geometrielemente sowie Amplituden eingesetzt werden.

Zur Quantifizierung dieser Effekte und zum Vergleich der unterschiedlichen Modelle wird der Ideal-Datensatz des Normalen-Prototyps ([Sch15c], S. 57) virtuell mit dem pneumatischem CFD-Sensor abgetastet, vgl. ([Eif14], S. 30 f.) ([Eif15a], S. 90). Die Ergebnisse der Abtastung sind aus zwei separaten CFD-Simulationen fusioniert und in **Abbildung 37** ([Eif14], S. 31) wiedergegeben. Dabei in grau markiert ist die

vorgegebene Ideal-Geometrie und in schwarz wird die virtuell gemessene Geometrie wiedergegeben, wobei Glättungseffekte erkennbar sind ([Eif15a], S. 90) ([Eif14], S. 30).

Dabei wird in der CFD-Simulation zunächst der Druck am Messpunkt virtuell erfasst ([Eif15a], S. 91). Zur Umwandlung in den zugehörigen Werkstückabstand wird zunächst eine geometrische Filterung (vgl. **Kapitel 3.3.2**) der Ideal-Geometrie durchgeführt, um den gemittelten Werkstück-Abstand \bar{s} an jedem Abtastpunkt in x -Richtung zu ermitteln ([Eif15a], S. 91):

$$\bar{s}_i = f\bar{c}(x), \quad i=1,2,\dots,n. \quad (190)$$

Aus der CFD-Simulation resultiert der Zusammenhang des ortsabhängigen Messdrucks sowie des entsprechenden Druckverhältnisses ([Eif15a], S. 91):

$$p_{M,i} = f\bar{c}(x); \quad \omega_{M,i} = f\bar{c}(x), \quad i=1,2,\dots,n. \quad (191)$$

Die Umrechnung dieses Messdrucks auf den virtuell gemessenen Werkstückabstand erfolgt anschließend mithilfe der virtuell gemessenen pneumatischen Kennlinie (vgl. [Eif15a], S. 91). Diese Kennlinie wurde an der hierzu vorgesehenen Rampe am Normal erfasst ([Eif15a], S. 91). Eine Korrelation zwischen Gleichung (190) und Gleichung (191) liefert die folgenden Darstellungen der Sensor-Kennlinie ([Eif15a], S. 91):

$$\bar{s}_i = f\bar{c}(p_{M,i}), \quad \bar{s}_i = f\bar{c}(\omega_{M,i}), \quad i=1,2,\dots,n. \quad (192)$$

Das Ergebnis der CFD-Abtastung des Formnormals nach der beschriebenen Umwandlung des vollständigen Datensatzes anhand der Vorschrift in Gleichung (192) ist der in **Abbildung 37** ([Eif14], S. 31) dargestellte Datensatz, wobei der gemittelte Werkstück-Abstand aus der CFD-Simulation als s_{CFD} bezeichnet wird.

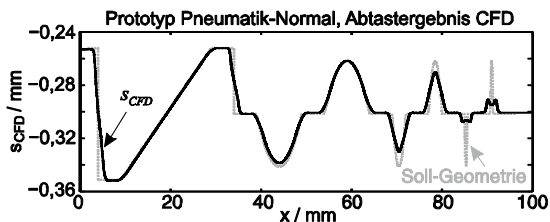


Abbildung 37: Pneumatik Formnormal, Prototyp, Abtastergebnisse CFD ([Eif14], S. 31)

Durch eine Gegenüberstellung zwischen der Abtastung mit der geometrischen Filterung (vgl. **Kapitel 3.3.1**) und der CFD-Simulation sollen eine Beurteilung der

Güte des Modells sowie auf dieser Basis eine Auslegung eines weiterentwickelten Normals ermöglicht werden ([Eif14], S. 31 f.). Die Soll-Geometrie wird mithilfe der geometrischen Modellierung abgetastet. Das zugehörige Ergebnis ist in **Abbildung 38 a)** ([Eif14], S. 31) wiedergegeben, wobei zusätzlich in grau ebenfalls die Rohdaten vor der Abtastung angegeben sind ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 90). Die Ergebnisse der geometrischen Filterung der Soll-Geometrie werden als $s_{\text{filt soll}}$ bezeichnet.

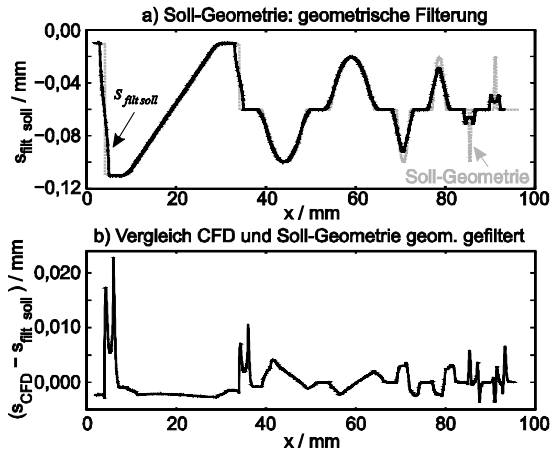


Abbildung 38: Pneumatik Normal, Prototyp, a) Ergebnisse der geometrischen Filterung und b) Differenz zu CFD ([Eif14], S. 31 f.)

Ein Vergleich der beiden virtuellen Modelle erfolgt durch Bildung der Differenz zwischen den beiden Ergebnissen, welche in **Abbildung 38 b)** ([Eif14], S. 32) gezeigt wird. Aus dieser Darstellung kann gefolgert werden, dass bei beiden virtuellen Messverfahren ein Glättungseffekt aufgrund der geometrischen Ausprägung der Messdüse berücksichtigt wird, welcher bei der CFD-Simulation allerdings etwas deutlicher zu beobachten ist ([Eif14], S. 31 f.) ([Eif15a], S. 92). Dies hängt damit zusammen, dass in diesem Modell im Gegensatz zur rein geometrischen Betrachtung eine Berechnung von Reibungseffekten erfolgt ([Eif15a], S. 92).

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Geometrie sollen die fertigungstechnische sowie messtechnische Umsetzbarkeit unter Ausführung einer neuen Kalibrierstrategie optimiert werden ([Eif15a], S. 89). Diese Kalibrierstrategie wird im Rahmen von **Kapitel 6.1.3** noch ausführlich betrachtet.

Ein Ziel ist die Abkehr von der in **Kapitel 2.4.3.6** beschriebenen relativen Kalibrierung hin zu einer Absolutmessung ([Eif15a], S. 89). Dazu wird eine Positionierkante vorgesehen, an der die Messdüse ausgerichtet werden kann und die somit den Einfluss der unerwünschten Verschiebung, die durch die Messkraft

hervorgerufen wird, deutlich verkleinert ([Eif15a], S. 89). Weiterhin sollten neben der bereits dargelegten Anforderung zu unterschiedlichen Geometrieelementen und Amplituden auch eine vereinfachte Ausrichtung mittels einer Referenzebene sowie eine breitere Abdeckung des späteren Messbereichs im Rahmen der Kalibrierung umgesetzt werden ([Eif14], S. 29) ([Eif15a], S. 89).

Auf Basis der beschriebenen Optimierung ergibt sich als Verbesserung des Normals die in **Abbildung 39** ([Eif14], S. 30) gezeigte Geometrie, bei der die genannten Verbesserungen berücksichtigt wurden ([Eif14], S. 29) ([Eif15a], S. 89). Der praktische Einsatz dieser Geometrie wird im Rahmen von **Kapitel 6.1.3** untersucht.

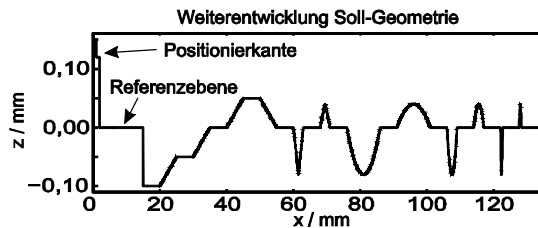


Abbildung 39: Pneumatik Formnormal, Weiterentwicklung, Soll-Geometrie ([Eif14], S. 30)

Fazit: In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass sich die Idee der modellbasierten Auslegung von Geometrienormalen grundsätzlich für jegliches im Rahmen der geometrischen Produktspezifikation häufig eingesetzte Messprinzip eignet. Dies wurde für das taktile Anwendungsgebiet, verschiedene optische Messverfahren sowie die pneumatische Messtechnik theoretisch demonstriert. Allerdings müssen die ausgelegten Geometrien auch in reale Bauteile überführt werden, um den praktischen Nutzen dieser Theorien zu überprüfen. Dabei spielt die Fertigungstechnik eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund werden entsprechende Aspekte im nachfolgenden **Kapitel 5** betrachtet.

5 Untersuchung fertigungstechnischer Einflüsse

Im folgenden Kapitel wird die dritte Säule des Modells aus **Abbildung 1** betrachtet, die fertigungstechnische Effekte umfasst (vgl. **Abbildung 40**). Die Fertigung ist ein erfolgskritischer Faktor für die Erstellung neuer Geometriennormale, da es aufwendig ist, diese in entsprechende reale Bauteile zu überführen. Es wurden Untersuchungen ausgeführt, welche Faktoren bei der Fertigung relevant sind und mit welchen Effekten gerechnet werden muss. Weiterhin wird die praktische Umsetzung der ausgelegten Geometrien aus **Kapitel 4** beschrieben.

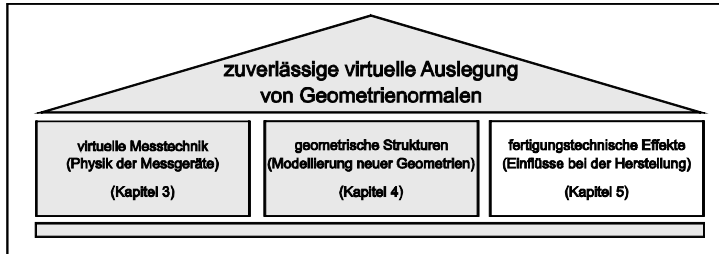


Abbildung 40: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Geometriennormalen

Bisher wurde mit einer rein theoretischen Betrachtung die Auslegung neuer Normale ausgeführt, allerdings ist auch die praktische Umsetzung von hoher Wichtigkeit und sollte separat untersucht werden. Es werden die Auswahl von Fertigungsverfahren, die Untersuchung grundlegender Phänomene im Zusammenhang mit der Fertigung und Handhabung von Geometriennormalen sowie deren praktische Umsetzung erläutert. Die Fertigungstechnik liefert dabei heute diverse Möglichkeiten, um Geometrien sehr exakt in ein Normal zu fertigen. Dies kann z.B. durch Vorgabe von Strukturen für die Ultrapräzisionszerspanung erfolgen (vgl. [Mee11], S. 184). Der Einsatz von Messgeräten an den entwickelten Geometrien sowie die zugehörigen Phänomene werden anschließend in **Kapitel 6** beschrieben.

5.1 Auswahl von Fertigungsverfahren und Werkstoffen

Nachdem eine Auslegung der entsprechenden Geometrien durchgeführt wurde, müssen diese gefertigt werden, um für Kalibrieraufgaben genutzt werden zu können. Zu diesem Zweck werden, je nach Normal, unterschiedliche Fertigungsverfahren ausgewählt. Die detailliertere Umsetzung der einzelnen Geometrien wird dabei in **Kapitel 5.5** erläutert.

Für die Normale, die für ein taktiles Anwendungsgebiet vorgesehen sind, wurde das Ultrapräzisions-Drehen bei der Auslegung berücksichtigt und für die Fertigung

ausgewählt (vgl. [See15], S. 45). Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich geometrische Effekte bei der Fertigung relativ leicht berücksichtigen lassen (vgl. **Kapitel 3.5** und **5.2**). Auch für die CT- und Streulicht-Normale eignet sich dieser Prozess ([Eif16], S. 52 f.) ([See16], S. 7). Als Werkstoffe wurden -je nach Normal und Verfügbarkeit- Nickel-Phosphor beschichtetes Kupfer, Messing, reines Kupfer sowie Titan für die Herstellung ausgewählt.

Das 3D-Linearitätsnormal wurde mithilfe der 3D-Laser-Lithographie erzeugt, wobei ein Polymer zum Einsatz kommt ([Eif15c], S. 7). Für die Ellipsometer-Normale eignen sich als lithographische Verfahren sowohl die Photolithographie sowie die Elektronenstrahl-Lithographie sehr gut ([Rai15a], S. 7). Die entsprechenden Materialien, die hier beispielhaft kalibriert werden sollen, sind, wie im Rahmen der Auslegung bereits erläutert wurde, Silicium, Aluminium, Platin und Siliciumdioxid (vgl. [Rai15a], S. 7 f.).

Das Pneumatik-Normal kann mit einem konventionellen Drehprozess hergestellt werden, da keine Abbildung definierter Rauheitsstrukturen vorgesehen ist ([Eif15a], S. 89). Aufgrund der Tatsache, dass keine große mechanische Belastung zu erwarten ist, wird eine Aluminium-Legierung eingesetzt ([Eif14], S. 29).

5.2 Berechnung geometrischer Effekte bei der spanenden Fertigung

In **Kapitel 3.5** wurde erläutert, dass im Rahmen der Ultrapräzisionszerspanung mit definierter Schneide eine Berücksichtigung von geometrischen Effekten im Rahmen einer morphologischen Filterung [16610-41] erfolgen kann. Dabei wurde bisher eine idealisierte Betrachtung durchgeführt. Dieser Prozess soll nachfolgend verbessert werden, indem mögliche Formabweichungen des bei der Fertigung eingesetzten Werkzeugs mitberücksichtigt werden.

Wie bei jedem Fertigungsprozess treten auch bei der Fertigung von Werkzeugen Abweichungen auf. Dabei ist offensichtlich: Je kleiner die Geometrie des entsprechenden Werkzeugs ist, desto schwieriger ist auch der Prozess zu dessen definierter Erzeugung. Daher ergibt es Sinn, ein entsprechendes Werkzeug zunächst zu messen, um anschließend den Einfluss der tatsächlichen Geometrie über eine morphologische Filteroperation der Solldaten des Normals zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen wird in **Abbildung 41** für den relevanten Ausschnitt aus der Signalkette illustriert.

Das Vorgehen wurde mit einem Diamantwerkzeug zur Ultrapräzisionszerspanung, welches am FBK zur späteren Fertigung einiger Normale eingesetzt wurde, durchgeführt. Die Geometrie dieses Werkzeugs ist in den folgenden Raster-elektronenmikroskop-Aufnahmen mit unterschiedlicher Vergrößerung in **Abbildung**

42 (a) nach [Sch15a], S. 33) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass das Werkzeug eine gerade Schneidkante aufweist, die mit einer nominellen Breite von $b_{tool,n} = 10 \mu\text{m}$ angegeben ist ([Sch15b], S. 24). Der nominelle Öffnungswinkel des Werkzeugs beträgt $\varphi_{tool,n} = 55^\circ$ ([Sch15b], S. 24). Die Ecken der Schneide sind leicht abgerundet.

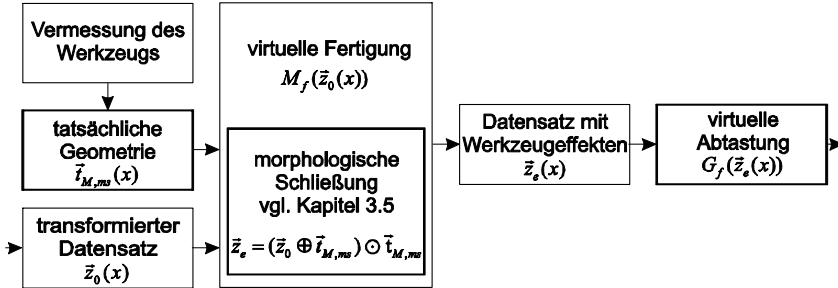


Abbildung 41: Schema zur Berücksichtigung der tatsächlichen Werkzeuggeometrie

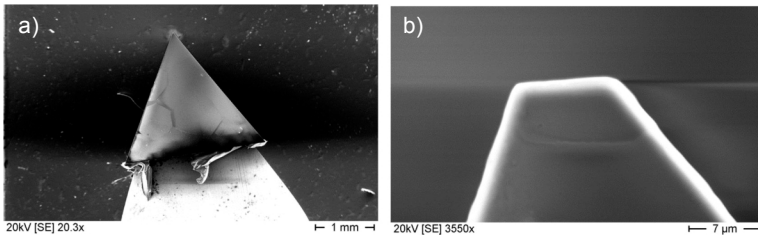


Abbildung 42: REM-Aufnahmen eines Diamant-Werkzeugs des Lehrstuhl FBK, (a) nach [Sch15a], S. 33)

Eine geometrische Messung zur beschriebenen Ermittlung der tatsächlichen Geometrie der Schneide wurde mit dem Konfokalmikroskop NanoFocus μSurf mit einem $50\times$ Objektiv ($NA=0,8$) ausgeführt. Dabei sind die Ergebnisse aus **Abbildung 43** erzielt worden.

Das eingesetzte Werkzeug wird durch die zwei gemessenen Parameter seiner Breite $b_{tool,ms}$ sowie seines Öffnungswinkels $\varphi_{tool,ms}$ charakterisiert. Weiterhin ist die leichte Abrundung der Kanten zur Darstellung der gesamten Geometrie zu berücksichtigen. In **Abbildung 43** werden die Ermittlung der Größen b_{tool} und φ_{tool} jeweils nach einer Ausrichtung des gemessenen Datensatzes dargestellt.

Die Unsicherheit der Messung von $b_{tool,ms}$ wird insbesondere durch die Größe der Pixel charakterisiert. Auf jeder Seite des Werkzeugs beträgt die Unsicherheit

aufgrund dieser Diskretisierung jeweils die halbe Pixelbreite. Somit ergibt sich bei einer Pixelbreite von $p_x = 0,625 \mu\text{m}$ ein Messergebnis von:

$$b_{\text{tool,ms}} = (10,0 \pm 0,625) \mu\text{m}. \quad (193)$$

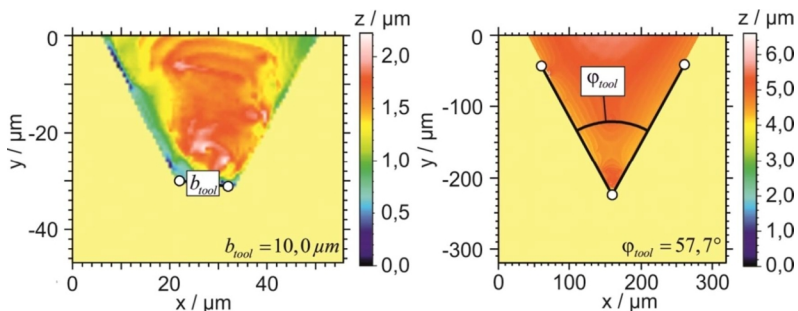


Abbildung 43: Topographie-Messdaten des Diamant-Werkzeugs (NanoFocus μSurf)

Da der Winkel anhand von drei Punkten berechnet wird, sind entsprechende Punktunsicherheiten bei der Winkelermittlung zu berücksichtigen. Weiterhin ist nur der Winkel an der Spitze des Werkzeugs relevant und nur diese Spitze wird auch zur Ermittlung des Winkels genutzt, da sich der gemessene Wert entlang des Werkzeugs aufgrund von Formabweichungen ändert. Dies ist damit zu begründen, dass bei den zu betrachtenden Fertigungsprozessen lediglich ein geringer Anteil der Spitze tatsächlich im Eingriff ist und morphologische Einflüsse auf das Profil hat.

Zur Berechnung der Abweichungfortpflanzung wird dabei eine Modellfunktion mit dem folgenden Aufbau benötigt ([Kie05], S. 184) ([13005], S. 15):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (194)$$

bei der die Messgröße Y unter Zuhilfenahme verschiedener Eingangsgrößen X_1, X_2, \dots, X_n dargestellt wird ([13005], S. 15). Dann kann mithilfe der folgenden Abweichungfortpflanzung unter Kenntnis der jeweiligen Einzelabweichungen der Eingangsgrößen ΔX_i die Gesamtabweichung ΔY formuliert werden ([Kie05], S. 185):

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot \Delta X_i. \quad (195)$$

Für den konkret betrachteten Anwendungsfall bedeutet das: Wird der Winkel in einem Abstand von d_s zur gedachten Spitze gemessen, an der das Werkzeug einen Abstand x zwischen Symmetrielinie und Außenkante aufweist, so ergibt sich die Modellfunktion:

$$\varphi_{\text{tool}} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{x}{d_s}\right), \quad (196)$$

und mit der Punktabweichung Δpx die folgende Darstellung für die Unsicherheit:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\text{tool,ms}} &= \frac{\partial}{\partial(x)}\left(2 \cdot \arctan\left(\frac{x}{d_s}\right)\right) \cdot \Delta px + \frac{\partial}{\partial(d_s)}\left(2 \cdot \arctan\left(\frac{x}{d_s}\right)\right) \cdot \Delta px \\ &= \frac{2d_s}{d_s^2 + x^2} \cdot \Delta px + \frac{2x}{d_s^2 + x^2} \cdot \Delta px = \frac{2\Delta px \cdot (d_s + x)}{d_s^2 + x^2}. \end{aligned} \quad (197)$$

Wird der Winkel z.B. für die Spitze in einem Bereich von $d_s = 50 \mu\text{m}$ ermittelt, ergibt sich ein Wert von

$$x = d_s \cdot \tan\left(\frac{\varphi_{\text{tool,ms}}}{2}\right) = 27,545 \mu\text{m}. \quad (198)$$

Auf Basis dieser Betrachtungen werden das Messergebnis sowie seine Unsicherheit abgeschätzt:

$$\Delta\varphi_{\text{tool,ms}} = 0,02975 \text{ rad} \hat{=} 1,70^\circ, \quad (199)$$

$$\varphi_{\text{tool,ms}} = (57,7 \pm 1,7)^\circ. \quad (200)$$

Mit diesem Messergebnis kann gemäß **Abbildung 41** eine Berücksichtigung der Abweichung zwischen Werkzeug-Soll- und -Ist-Geometrie erfolgen, indem die tatsächliche Geometrie des Werkzeuges in der iterativen Auslegung zugrunde gelegt wird. Dies führt zu einer verbesserten Berücksichtigung der geometrischen Einflüsse des Fertigungsprozesses.

5.3 Parameterstudie der spanenden Fertigung

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl FBK wurde eine Parameterstudie zu Zerspanungsparametern im Rahmen der Ultrapräzisionszerspanung von Normalen durchgeführt. Zu dieser Untersuchung wurde das 2D-Linearitätsnormal (vgl. **Kapitel 4.1.2**) ausgewählt.

Zusätzlich zum später untersuchten Prototypen wurden vier Werkstücke mit jeweils unterschiedlichen Fertigungsparametern hergestellt. Dabei handelt es sich 1) um ein Referenzwerkstück, 2) ein Werkstück, das mit einem Datensatz, der einen geringeren Diskretisierungsabstand aufweist (20 nm anstelle von 100 nm), hergestellt wurde, 3) ein Werkstück mit einer größeren Schnitttiefe (komplette Zerspanung in einem Schnitt, anstelle von Schnitten zu je z.B. $1 \mu\text{m}$ Schnitttiefe) sowie 4) ein

Werkstück, das aus einem anderen Material (Messing anstelle von Kupfer) hergestellt wurde.

Zur Ermittlung der Rauheitskennwerte wurde das komplette Profil (16 mm) dabei an 36 Messstellen alle 10° aufgenommen, um das gesamte Normal abzudecken ([Sch15a], S. 33). Ausgewertet wurde an jeder Messstelle an jeweils 53 Auswertestellen, die in lateraler Richtung um je $200\ \mu\text{m}$ zueinander versetzt sind, wobei ein Filtervorlauf bzw. -nachlauf von $\lambda_c = 0,8\ \text{mm}$ nicht ausgewertet wurde ([Sch15a], S. 33). Diese Betrachtung ergibt 1908 Auswertungen je Normal (vgl. [Sch15a], S. 34). Weiterhin wurden die bei der Auslegung berücksichtigten Filter (vgl. **Kapitel 4.1.2**) eingesetzt ([Sch15a], S. 33). Die Messergebnisse sind in **Tabelle 2** ([Sch15a], S. 34) als Mittelwert und Standardabweichung aller Einzelauswertungen gegeben und in **Abbildung 44** veranschaulicht.

Tabelle 2: Messergebnisse der Parameterstudie (vgl. [Sch15a], S. 34)

	Sollwerte	1) Referenz	2) Punktabs. 20 nm	3) Höhere Schnitttiefe	4) Anderes Material
$R_a / \mu\text{m}$	1,5765	1,532 $\pm 0,0021$	1,536 $\pm 0,0018$	1,524 $\pm 0,0016$	1,536 $\pm 0,0014$
$R_q / \mu\text{m}$	1,8203	1,774 $\pm 0,0021$	1,778 $\pm 0,0019$	1,765 $\pm 0,0017$	1,779 $\pm 0,0015$
$R_z / \mu\text{m}$	6,1041	6,170 $\pm 0,0284$	6,227 $\pm 0,0260$	6,101 $\pm 0,0268$	6,200 $\pm 0,0277$

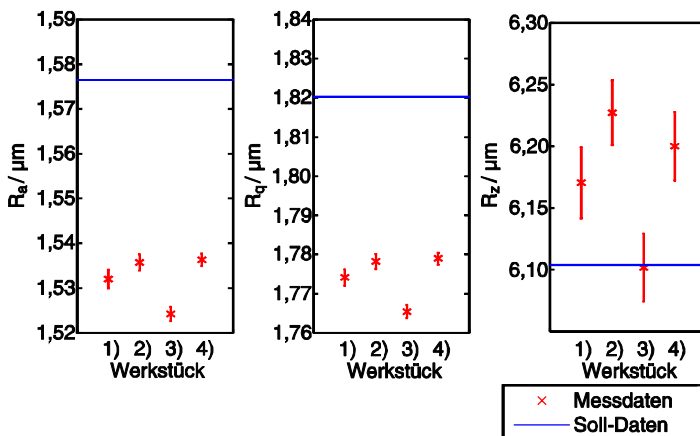


Abbildung 44: Ergebnisse der Parameterstudie

Bei Betrachtung der Rauheitskennwerte kann grundsätzlich festgestellt werden, dass eine reproduzierbare Fertigung der Raunormale unter Anwendung unterschiedlicher

Fertigungsparameter möglich ist. Der Fertigungsprozess funktioniert zuverlässig und liefert unabhängig von den betrachteten Parametern gute Ergebnisse.

Die Unterschiede im Ergebnis beim Vergleich der beiden Diskretisierungsabstände sind gering. Da die Messung ohnehin einen höheren lateralen Punktabstand (z.B. 100 oder 500 *nm*) aufweist, ist dies plausibel. Bei Fertigung mit nur einem Schnitt wird der Wert R_z sehr gut abgebildet. Dies kann mit einer saubereren Trennung des Materials aufgrund der größeren Spannungsdicke erklärt werden. Der Einsatz von Messing führt ebenfalls zu etwas geringeren Standardabweichungen. Es kann auch hier -aufgrund der Härte des Materials- von einer saubereren Bearbeitung ausgegangen werden.

5.4 Untersuchung von Umwelteinflüssen auf Normale

Zur Erzielung einer langen Lebensdauer von Normalen ist eine entsprechende Handhabung erforderlich. Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Rother 2014) wurden theoretische Grundlagen zu Mechanismen verschiedener Verschmutzungs- und Reinigungsarten zusammengestellt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine Untersuchung durchgeführt, welchen Einfluss eine Verschmutzung hat und inwiefern eine zuverlässige Reinigung der Oberflächen möglich ist ([Eif15b], S. 119 f.).

Als Stand der Technik bei der Reinigung von Normalen wird dabei das Abwischen der Verschmutzungen, teilweise unter Anwendung von Isopropanol, in der Literatur genannt ([Bra95], S. 30) ([4-2-1], S. 6) ([4-2-3], S. 6).

Im Rahmen dieser Grundlagenuntersuchung wurden typische Reinigungsverfahren für konventionelle Werkstücke betrachtet und untersucht, inwieweit sich diese auch für den Einsatz bei Normalen eignen: Dazu zählen neben der **Ultraschall**-Reinigung auch die **Druckluft**-Reinigung sowie die Reinigung mit einem **CO₂-Strahl** ([Eif15b], S. 119 f.). Weiterhin wurden entsprechend der Vorgabe, eine praxisnahe Kalibrierung anzustreben, Verschmutzungsarten ausgewählt, die häufig in der Fertigungsumgebung auftreten ([Eif15b], S. 119 f.). Dazu zählen Kriechöl, Schneidöl sowie Metallspäne ([Eif15b], S. 119 f.).

Die entsprechende Untersuchung wurde mit einem Normal ähnlich dem Linearitätsnormal aus **Kapitel 4.1.2** experimentell durchgeführt, das für diese Grundlagenuntersuchung gefertigt wurde ([Eif15b], S. 119 f.). Dabei ist insbesondere die Frage von Interesse, welchen Einfluss die Verschmutzung auf die gemessenen Kennwerte hat und inwieweit dieser durch eine Reinigung wieder behoben werden kann ([Eif15b], S. 119 f.).

Im Rahmen der Untersuchung wurde im ersten Schritt die Charakterisierung des Referenzzustands ausgeführt ([Eif15b], S. 119 f.). Dann wurden jeweils eine Stelle mit Kriechöl, Schneidöl und Spänen verunreinigt und eine Messung des verschmutzten Zustands durchgeführt ([Eif15b], S. 119 f.).

Die Reinigung wurde im Anschluss an jede Verschmutzung durchgeführt, wobei jedes Mal ein unterschiedliches Verfahren eingesetzt worden ist ([Eif15b], S. 119 f.). Der Reinigungserfolg kann dann durch eine Charakterisierung der gereinigten Oberfläche beurteilt werden ([Eif15b], S. 119 f.). Diese Charakterisierung wurde auf Basis einer 3D-Topographie-Erfassung durchgeführt, die ebenfalls mit dem Messgerät NanoFocus μ Surf, diesmal unter Anwendung eines Objektivs mit 20x Vergrößerung ($NA=0,6$), erfolgte ([Eif15b], S. 119). Die Erfassung desselben Topographie-Bereichs wurde am Anfang des strukturierten Profils durchgeführt, um eine reproduzierbare Messposition zu erhalten ([Eif15b], S. 119 f.). Ausgewertet wurde dabei profilhaft, da das gedrehte Normal letztendlich eine 2D-Geometrie abbildet ([Eif15b], S. 119 f.). Es wurden jeweils alle 512 Einzelprofile des $800 \times 800 \mu\text{m}$ großen Messfelds zur Berechnung der Rauheitsparameter genutzt ([Eif15b], S. 119).

Ein Auswertalgorithmus wurde zur Detektion des Anfangspunktes des strukturierten Profils eingesetzt ([Eif15b], S. 120). Für die Extraktion des Rauheitsprofils wurde das lineare Gauß-Filter nach DIN EN ISO 16610-21 mit $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ und $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ eingesetzt, bevor integrale Rauheitsparameter nach DIN EN ISO 4287 [4287] zur Qualifizierung der Oberfläche bei einer Auswertestrecke von $l_r = 640 \mu\text{m}$ berechnet wurden ([Eif15b], S. 119 f.). Diese verkürzte Auswertestrecke begründet sich durch kleine Positioniergenauigkeiten bei der Messung und die radiale Krümmung der Drehstruktur ([Eif15b], S. 120). Es ist somit möglich, eine sehr reproduzierbare Auswertung des identischen Profilausschnitts durchzuführen ([Eif15b], S. 119 f.).

Der Effekt der Verschmutzung soll exemplarisch unter Anwendung von Schneidöl demonstriert werden ([Eif15b], S. 120). Wird ein Ausschnitt aus der gemessenen Topographie im Referenzzustand, mit der Verschmutzung durch Schneidöl und nach der Reinigung mit Druckluft betrachtet, so kann beobachtet werden, dass aufgrund der Verschmutzung optische Artefakte auftreten ([Eif15b], S. 120). Nach der mit Druckluft durchgeführten Reinigung verbleibt immer noch eine geringfügige Ausprägung dieser Artefakte ([Eif15b], S. 120). Die zugehörigen Topographie-Ausschnitte sind in **Abbildung 45** ([Eif15b], S. 120) gezeigt ([Eif15b], S. 120).

Werden, wie bereits beschrieben, Rauheitsparameter auf Basis von 512 Einzelwerten der Profile ausgewertet, ergeben sich in Abhängigkeit von Verschmutzung und Reinigungsverfahren die in **Tabelle 3** ([Eif15b], S. 120) zusammengefassten

Ergebnisse ([Eif15b], S. 120). Dabei werden Mittelwert und Standardabweichung aller Einzelauswertungen angegeben ([Eif15b], S. 120).

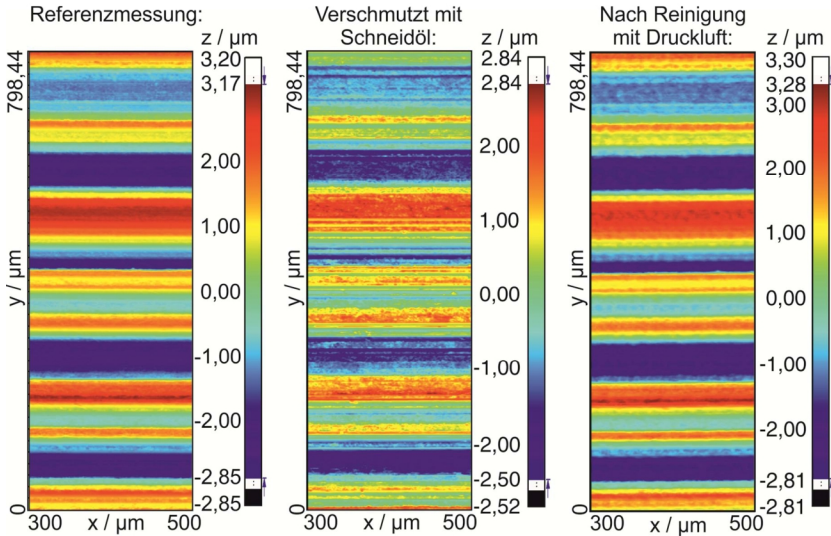


Abbildung 45: Topographie-Ausschnitte, Einfluss von Verschmutzung mit Schneidöl und anschließender Reinigung mit Druckluft ([Eif15b], S. 120)

Tabelle 3: Überblick über die Rauheitskennwerte zur Beurteilung des Reinigungserfolgs ([Eif15b], S. 120)

	Messstelle Kriechöl		Messstelle Schneidöl		Messstelle Späne	
	$R_a / \mu m$	$R_q / \mu m$	$R_a / \mu m$	$R_q / \mu m$	$R_a / \mu m$	$R_q / \mu m$
Referenzmessung ohne Verschmutzung	1,406 $\pm 0,012$	1,618 $\pm 0,013$	1,395 $\pm 0,011$	1,611 $\pm 0,011$	1,416 $\pm 0,015$	1,632 $\pm 0,014$
Nach Reinigung mit Druckluft	1,282 $\pm 0,039$	1,502 $\pm 0,044$	1,405 $\pm 0,011$	1,620 $\pm 0,012$	1,413 $\pm 0,016$	1,630 $\pm 0,016$
Nach Reinigung mit Ultraschall	1,329 $\pm 0,011$	1,526 $\pm 0,022$	1,390 $\pm 0,012$	1,606 $\pm 0,016$	1,410 $\pm 0,013$	1,624 $\pm 0,014$
Nach Reinigung mit CO ₂ -Strahl	1,414 $\pm 0,062$	1,660 $\pm 0,169$	1,389 $\pm 0,013$	1,605 $\pm 0,017$	1,412 $\pm 0,013$	1,625 $\pm 0,013$

Anhand der vorliegenden Messergebnisse kann zusammengefasst werden, dass Schneidöl und Späne zuverlässig entfernt werden können, was daran festgestellt

werden kann, dass die untersuchten Rauheitskennwerte nach Entfernung der Verschmutzung nur noch geringfügig -im Bereich der vorherigen Standardabweichung- von ihren Referenzwerten abweichen ([Eif15b], S. 120). Bei der Anwendung von Kriechöl, welches eine typische anhaftende Verschmutzung darstellt, sind die für seinen üblichen Einsatz gewünschten Benetzungseffekte hingegen schwer aufzuheben ([Eif15b], S. 120).

Dieses Ergebnis trifft insbesondere für die angewandten Reinigungsmethode Druckluft zu ([Eif15b], S. 120). Dagegen liefert die CO₂-Reinigung die besten Ergebnisse ([Eif15b], S. 120). Durch unterstützende Kombination unterschiedlicher Reinigungsmethoden könnten die erzielten Ergebnisse weiter verbessert werden ([Eif15b], S. 120). Zusätzlich kann die abschließende Empfehlung gegeben werden, dass durch entsprechende Handhabung und Lagerung eine Verschmutzung von Geometrienormalen idealerweise gänzlich vermieden werden sollte ([Eif15b], S. 120).

5.5 Praktische Umsetzung der ausgelegten Geometrien

Nachdem eine Auswahl möglicher Fertigungsverfahren sowie zugehörige Voruntersuchungen durchgeführt worden sind, soll die tatsächliche Fertigung der in **Kapitel 4** ausgelegten Geometrien beschrieben werden.

Wie in **Kapitel 5.1** dargelegt, wurde für die Normale, die für die Kalibrierung taktlicher Messgeräte vorgesehen sind, ein Ultrapräzisions-Plandrehprozess als Fertigungsverfahren ausgewählt. Das R_k -Normal hat eine Profillänge von $l_r = 4\text{ mm}$ ([See15], S. 45). Diese wurde periodisch fortgesetzt, um eine Auswerteänge von insgesamt $l = 12\text{ mm}$ zu erreichen ([See15], S. 45). Die Fertigung des Prototyps wurde bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführt ([See15], S. 45), wobei das Profil von außen beginnend von einem Radius von 30 mm nach innen auf ein Nickel-Phosphor beschichtetes Kupfer-Werkstück gedreht wurde.

Es wurde ein Diamant-Werkzeug mit einem Spitzenradius von $r_{\text{tool},n} = 5\text{ }\mu\text{m}$ sowie einem Öffnungs-Winkel von $\varphi_{\text{tool},n} = 60^\circ$ eingesetzt ([See15], S. 45). **Abbildung 46 a** ([See15], S. 44) zeigt den gefertigten Prototyp. Ein zweites Exemplar des R_k -Normals, das für das Werkzeug aus **Kapitel 5.2** ausgelegt wurde, ist zusätzlich am Lehrstuhl für Fertigungstechnik & Betriebsorganisation (FBK) der TU Kaiserslautern ebenfalls in einem Plandrehprozess gefertigt worden ([See15], S. 45). Die Ermittlung der Geometrie des entsprechenden Werkzeugs wurde in **Kapitel 5.2** betrachtet.

Das Normal zur stufenlosen Überprüfung der Linearität wurde am Lehrstuhl FBK mit derselben Werkzeugmaschine und demselben Werkzeug gefertigt (vgl. [Sch15a],

S. 33). Die entsprechenden Fertigungsparameter wurden in **Kapitel 5.3** diskutiert. Das Fertigungsergebnis ist in **Abbildung 46 b)** dargestellt. Dabei wurde das Profil vier Mal periodisch abgebildet, um eine Gesamtlänge des Profils von $l=16\text{mm}$ zu erreichen ([Sch15a], S. 33).

Dieselbe Vorgehensweise wurde für das Normal für kontinuierliche Ortsspektren gewählt, wobei die gefertigte Geometrie in **Abbildung 46 c)** zu sehen ist.

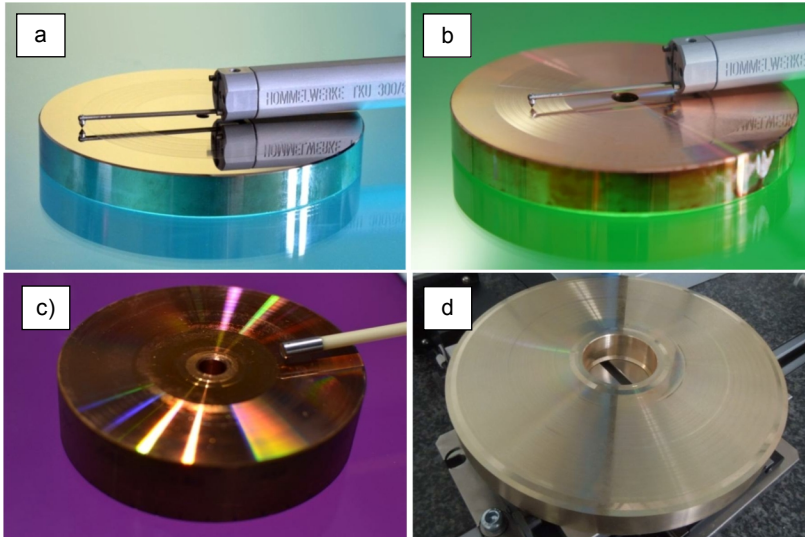


Abbildung 46: Gefertigte Normale zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten
 a) gefertigtes Rk-Normal, Prototyp der PTB ([See15], S. 44);
 b) gefertigtes Linearitätsnormal, FBK; c) Normal für Ortsfrequenzen, FBK;
 d) Normal für Welligkeit und Rauheit, FBK

Das kombinierte Normal für Rauheit und Welligkeit wurde ebenfalls mit dem erläuterten UP-Drehprozess gefertigt. Das mit der Rauheitsstruktur überlagerte Welligkeitsprofil der Länge 25mm wurde dabei zwei mal hintereinander fortgesetzt, so dass sich eine Gesamtlänge von 50mm der Struktur ergibt. Zusätzlich zu der in **Kapitel 4.1.4** beschriebenen Geometrie wurden dabei jeweils vor und hinter der Welligkeitsstruktur noch eine $0,6\text{mm}$ hohe und 3mm lange Rampe, vor der Struktur ein Tastspitzenprüfnormal sowie hinter der Struktur eine Sinus-Funktion mit einer konstanten Wellenlänge aber verschiedenen Amplituden aufgebracht. Die Geometrie wurde zunächst mit einem größeren Werkzeug vorgespannt, die feine Sinusstruktur und der bereits charakterisierte Rest des Profils wurden mit dem UP-Diamanten gefertigt. Das gefertigte Normal ist in **Abbildung 46 d)** zu sehen. Zwischen Tastspitzenprüfnormal und dem Welligkeits- und Rauheitsprofil ist weiterhin ein

sinusförmiger Marker zur Positionierung angebracht. Mit bloßem Auge erkennbar ist der Abschnitt der strukturierten Oberfläche, der kein Rauheitsprofil aufweist.

Das nachfolgende Linearitätsnormal für 3D-Topographie-Anwendungen wurde mit 3D Laser-Lithographie aus einem Polymer hergestellt ([Eif15c], S. 7). Dies wurde von der AG Optische Technologien und Photonik der TU Kaiserslautern durchgeführt. Eine Mikroskop-Aufnahme der gefertigten Geometrie ist in **Abbildung 47** gezeigt.

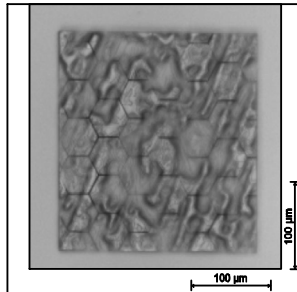


Abbildung 47: Mikroskop-Aufnahme 3D-Linearitätsnormal

Als Ellipsometer-Normale wurden am Nanostructuring Center der TU Kaiserslautern die in **Abbildung 33** ([Rai15a], S. 8) angegebenen Strukturen mithilfe von Photolithographie sowie im Fall von Normal vii) durch Elektronenstrahl-Lithographie erzeugt ([Rai15a], S. 7). Beispielhaft wird ein Ausschnitt des Normals vii) in **Abbildung 48** gezeigt. Dabei sind die Gitter variabler Gitterbreite und der vorhandene Materialkontrast zu erkennen. Diese vorhandenen Strukturen werden bereits bei der Betrachtung unter einem Mikroskop sichtbar.

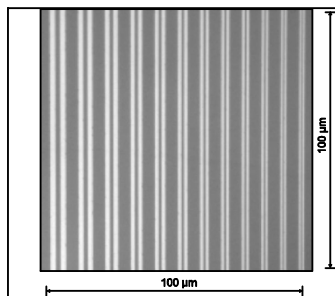


Abbildung 48: EHT-Normal vii), Ausschnitt

Das CT-Normal ist unter Anwendung eines Außendrehprozesses hergestellt worden ([Eif16], S. 52 f.). Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass, aufgrund des begrenzten Messraums, ein maximaler Durchmesser des Normals in Höhe von ca. 4 mm

eingehalten werden sollte, was dazu führt, dass nur entlang des Außenmantels des Werkstücks eine normgerechte Rauheitsauswertung durchgeführt werden kann ([Eif16], S. 53). **Abbildung 49** stellt das gefertigte Normal dar. Das Profil wurde entlang des Außenmantels aufgebracht und wird zwei mal wiederholt, so dass insgesamt eine Strecke von 8 mm das strukturierte Profil abbildet ([Eif16], S. 53).

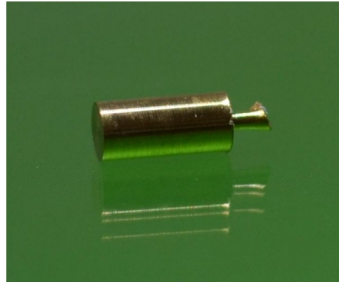


Abbildung 49: Normal zur Kalibrierung der industriellen CT

Die Streulichtnormale wurden ebenfalls mithilfe eines Plandrehprozesses im Rahmen der Ultrapräzisionszerspanung hergestellt ([See16], S. 7). Es wurde ein Werkzeug eingesetzt, dessen geometrische Eigenschaften analog zur Vorgehensweise in **Kapitel 5.2** verifiziert wurden, wobei als nominelle Abmaße $r_{\text{tool},n} = 6\mu\text{m}$ und $\varphi_{\text{tool},n} = 55^\circ$ festgelegt sind ([See16], S. 7). Aufgrund der nach dem Leuchtfleckdurchmesser ausgelegten Periodizität der Normale von $l_r = 30\mu\text{m}$ wiederholen sich die Profile immer wieder nach dieser Länge ([See16], S. 6 f.).

Insgesamt steht eine Länge von $4,5\text{ mm}$ für die Messung zur Verfügung, was bedeutet, dass jedes Profil 150 mal abgebildet wird ([See16], S. 7). Weiterhin wird im Rahmen der später erläuterten Kalibrierstrategie ein Marker am Beginn des Normals zur Ausführung einer Positionierung angebracht ([See16], S. 7). Die gefertigte Geometrie auf Basis der gaußschen Fehlerfunktion ist in **Abbildung 50** abgebildet. Das Profil auf Basis der realen Oberfläche wurde analog gefertigt (vgl. [See16], S. 7).

Das Normal für die pneumatische Messtechnik wurde unter Anwendung eines Plandrehprozesses aus einem Aluminium-Rohling erzeugt ([Eif14], S. 29). Dabei wurde ein Drehprozess mit einem Werkzeug, das einen Spitzenradius von ca. $100\mu\text{m}$ aufweist, in der Metallwerkstatt der TU Kaiserslautern ausgeführt. Die durch den Plandrehprozess hergestellte Geometrie erlaubt für die spätere Messung einen stark vereinfachten Ausrichtvorgang, da nicht, wie bei mit einem Außendrehprozess gefertigten Geometrien, eine Messung genau entlang der Mantellinie erfolgen muss ([Eif15a], S. 89). Die komplette Struktur liegt dabei in einer Ebene, so dass keine

Krümmung vorliegt ([Eif15a], S. 89). Die gefertigte Geometrie ist in **Abbildung 51** dargestellt.

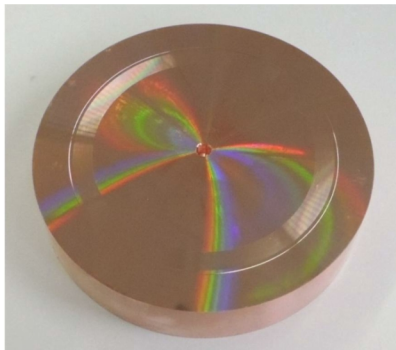


Abbildung 50: Normal zur Kalibrierung von Streulichtsensoren (Fehlerfunktion)

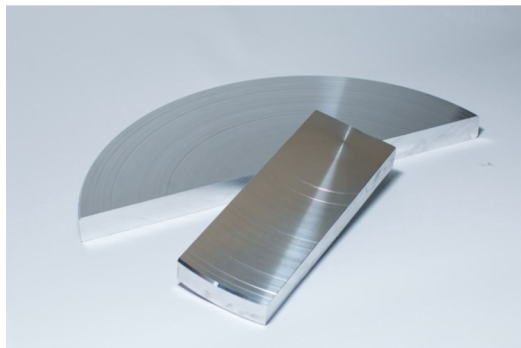


Abbildung 51: Normal zur Kalibrierung von pneumatischen Abstandssensoren

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass alle in **Kapitel 4** entworfenen Geometrien letztendlich mithilfe von vorhandenen Fertigungsverfahren in reale Bauteile überführt werden können.

Letzter zu betrachtender Punkt ist die Analyse des realen messtechnischen Einsatzes der Geometrien. Dieser praktische Einsatz wird in **Kapitel 6** untersucht.

6 Normale in der Praxis - Kalibrierung sowie Unsicherheitsbetrachtung

Bisher wurden im Wesentlichen neue Geometrien vorgestellt, die sich für vielfältige Anwendungsgebiete eignen. Weiterhin wurde gezeigt, dass es entsprechende Fertigungsverfahren gibt, die diese neuen Geometrien reproduzierbar erzeugen können. Nachdem die Fertigung der ausgelegten Normale durchgeführt worden ist, soll abschließend eine Beurteilung zum praktischen Nutzen der Geometrien beim Einsatz an verschiedenen Messgeräten durchgeführt werden.

Neben der Verifikation unter Anwendung von virtuellen wie realen Abtastungen gehören hierzu auch die Abschätzung der Messunsicherheit sowie Strategien zur Kalibrierung mit den Normalen für die messtechnische Praxis. Dabei ist auf eine möglichst einfache Anwendung der Normale zu achten.

Die Verifikation erfolgt zunächst für die einzelnen Normale mithilfe von virtuellen Abtastungen, die sowohl ideal als auch nichtideal ausgeführt werden, sowie realen Messungen unter Anwendung neu entwickelter Kalibrierstrategien, die für den praktischen Einsatz der neuen Normale unverzichtbar sind. Es ist eine möglichst starke Automatisierung des Kalibrierablaufs sowie eine einfache praktische Handhabung anzustreben, damit auch ein tatsächlicher Transfer in die Praxis erzielt werden kann.

Anschließend erfolgt im zweiten Teil dieses Kapitels eine allgemeine Betrachtung zur Unsicherheit des hier beschriebenen Vorgehens zur Entwicklung von Normalen.

6.1 Kalibrierstrategien und Verifikation

In diesem Abschnitt werden Strategien für den praktischen Einsatz der generierten Normale vorgestellt. Dazu zählen die Beschreibung der Kalibrierstrategie sowie deren Verifikation auf Basis virtueller und realer Messergebnisse.

6.1.1 Normale für taktile Messgeräte

Die ideale virtuelle taktile Abtastung wurde in **Kapitel 3.1** betrachtet. Jetzt erfolgt weitergehend ebenfalls die Berücksichtigung von Nichtidealitäten. Bisher wurde die virtuelle Abtastung als ideal angenommen. Tatsächlich treten in der Realität Abweichungen von dieser Betrachtungsweise auf, welche z.B. als Nichtidealitäten erkennbar werden. Ein Teil dieser Nichtidealitäten kann charakterisiert werden. Zu

diesem Zweck wurden Überlegungen angestellt, von denen einige nachfolgend aufgeführt werden.

Im Rahmen einer Studienarbeit (Follmann 2015) wurde ein virtuelles Tastschnittgerät unter detaillierter Berücksichtigung unterschiedlicher Nichtidealitäten aufgebaut und untersucht. Die nachfolgenden Betrachtungen sollen allerdings auf einige grundlegende und generische Nichtidealitäten eingegrenzt werden.

Ein allgemeiner Ansatz zur Berechnung von Nichtidealitäten mithilfe von Kennlinien wurde z.B. von Schwenke vorgestellt ([Sch99], S. 50). Im Folgenden soll sich auf Fälle beschränkt werden, die orts aufgelöst appliziert werden können.

So kann z.B. aufgrund von Temperaturänderungen oder aufgrund einer Linearitätsabweichung bei der Messwertaufnahme eine Abweichung in der lateralen Achse vorliegen. Diese kann durch die Multiplikation mit einer Transformations-Funktion berücksichtigt werden:

$$\vec{\tilde{x}}_{NL} = (\vec{x} - x_1) \cdot f_{lat}(p_{NL,i}), \quad \vec{x} = (x(k)), \quad \vec{\tilde{x}}_{NL} = (\tilde{x}_{NL}(k)), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (201)$$

wobei $p_{NL,i}$ den oder die Parameter bezeichnet, die die Funktion definieren. So lautet diese Transformations-Funktion $f_{lat}(p_{NL,i})$ z.B. bei einer Änderung der Temperatur des gemessenen Werkstücks um ΔT (vgl. [Sch99], S. 67):

$$f_{lat}(\Delta T, \alpha_a) = \alpha_a \Delta T, \quad (202)$$

wobei α_a den entsprechenden Ausdehnungskoeffizienten des Werkstückmaterials bezeichnet. Für die zugehörige Temperaturabweichung interessant ist dabei der Temperaturunterschied zwischen Fertigungs- und Messprozess. Die temperaturbedingte Ausdehnung tritt dabei ebenfalls in Höhenrichtung auf. Da allerdings die Amplitude i.d.R. in der Größenordnung Mikrometer liegt und die Messung relativ, ausgehend von einem Antastpunkt, erfolgt, kann der Effekt in der z -Richtung vernachlässigt werden. Die laterale Ausdehnung der Werkstücke ist i.d.R. etwa 1000x größer.

Mit demselben Schema kann u.a. auch eine Linearitätsabweichung der lateralen Achse berechnet werden, die auftritt, wenn eine Justierung mit der falschen Steigung durchgeführt wurde.

In der Höhenachse können ebenfalls Linearitätsabweichungen auftreten. Die entsprechende Transformation wird nach der idealen Abtastung zusätzlich angewendet und ist wie folgt definiert:

$$\vec{\tilde{z}}_{G,nl} = (\vec{z}_G - \max(\vec{z}_G)) \cdot f_{ver}(p_{NL}), \quad \vec{z}_G = (z_{G,k}), \quad \vec{\tilde{z}}_{G,nl} = (z_{G,nl,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (203)$$

Dabei kann z.B. bei einer Höhenkalibrierung, die mit nur zwei Höhenpunkten (z.B. einem Tiefeneinstellnormal) durchgeführt wurde, eine Justierung mit der falschen Steigung durchgeführt worden sein. Diese Problematik wurde im Rahmen der durchgeführten Betrachtungen zum Linearitätsnormal erläutert. Für dieses Beispiel ergibt sich die folgende Transformationsfunktion $f_{\text{ver}}(p_{NL})$:

$$f_{\text{ver}}(m_{\text{err}}, m_{\text{act}}) = \frac{m_{\text{err}}}{m_{\text{act}}}, \quad (204)$$

wobei m_{err} die zur Justage eingesetzte Steigung und m_{act} die tatsächliche Steigung der Linearität der Höhenachse beschreibt. Weiterhin kann auch nur ein Teil der z -Achse betroffen sein, wenn eine lokale Linearitätsabweichungen vorliegt. Tritt ab dem Grenzwert z_b der abweichende Steigungswert m_{err} auf, so ergibt sich folgende Transformationsfunktion:

$$f_{\text{ver}}(m_{\text{err}}) = \begin{cases} \frac{m_{\text{err}}}{m_{\text{act}}}, & \text{für } z_G < z_b \\ m_{\text{act}}, & \text{für } z_G > z_b \end{cases}. \quad (205)$$

Aus Gründen der Stetigkeit der Transformation ist es sinnvoll, das Profil so anzuordnen, dass sich der Übergangswert bei $z_b = 0$ befindet.

Eine andere Tastkugelgeometrie kann weiterhin das Übertragungsverhalten des Tastschnittgerätes beeinflussen (vgl. [Sch99], S. 71). Dies kann durch eine Anpassung der Geometrie des strukturierenden Elementes bei der morphologischen Filterung berücksichtigt werden (vgl. **Kapitel 3.1**):

$$\vec{z}_{G,m}(x) = (\vec{z}_e(x) \oplus \vec{d}_b(x)) \odot \vec{d}_b(x), \quad (206)$$

wobei \vec{d}_b die Geometrie der Tastspitze charakterisiert. Mit diesen einfach zu berechnenden Nichtidealitäten kann später eine virtuelle Beurteilung von Normalen erfolgen.

6.1.1.1 R_k -Normal

Das R_k -Normal wurde auf Basis des vorhandenen Algorithmus in ein Serienprodukt überführt. Dazu musste neben der fertigungstechnischen Umsetzung auch eine experimentelle Verifikation durchgeführt werden.

Beim R_k -Normal werden die Parameter R_k , R_{pk} , R_{vk} , $Mr1$ und $Mr2$ kalibriert. Entsprechend erfolgt im Rahmen der Kalibrierstrategie nach der Messung des Normals ein Abgleich der Parameter mit den Sollwerten. Dabei geben die prozentualen Abweichungen zwischen den Sollgrößen (indiziert mit $_{tar}$) und den Istgrößen (indiziert mit $_{act}$) Auskunft über den Zustand des Messgeräts:

$$\Delta R_k = \left(\frac{R_{k,act}}{R_{k,tar}} - 1 \right) 100, \Delta R_{pk} = \left(\frac{R_{pk,act}}{R_{pk,tar}} - 1 \right) 100, \Delta R_{vk} = \left(\frac{R_{vk,act}}{R_{vk,tar}} - 1 \right) 100, \quad (207)$$

$$\Delta Mr1 = \left(\frac{Mr1_{act}}{Mr1_{tar}} - 1 \right) 100, \Delta Mr2 = \left(\frac{Mr2_{act}}{Mr2_{tar}} - 1 \right) 100.$$

Treten dabei Abweichungen auf, muss eine Analyse erfolgen, aus welchem Grund diese hervorgerufen werden. Dies können z.B. Linearitätsabweichungen in den Achsen sein. Danach kann auf Basis der Ergebnisse aus Gleichung (207) eine entsprechende Justierung zu deren Abstimmung durchgeführt werden.

Es erfolgt eine virtuelle Verifikation der Geometrie. Wird die virtuelle Signalkette (Fertigung, Abtastung, Filterung, Parameterberechnung) ideal angewendet, so ergeben sich die gewünschten Kennwerte $R_{pk,tar} = 0,150 \mu\text{m}$, $R_{k,tar} = 0,400 \mu\text{m}$ und $R_{vk,tar} = 1,200 \mu\text{m}$ ([See15], S. 45), wie in **Abbildung 52** dargestellt. Dies hängt damit zusammen, dass die ideale virtuelle Abtastung bei der Auslegung mitberücksichtigt wird und sich somit bei Anwendung des entwickelten Schemas aus **Abbildung 25** – innerhalb des vorgegebenen Residuums – die gewünschten Kennwerte per Definition ergeben müssen.

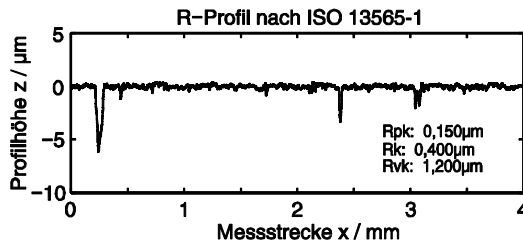


Abbildung 52: R_k -Normal, Ergebnisse der idealen, virtuellen Auswertung

Wird eine nichtideale Abtastung, wie in **Kapitel 6.1.1** vorgestellt, durchgeführt, so ergeben sich die Kennwerte in **Tabelle 25** in **Anhang B**. Dabei kann festgestellt werden, dass die Temperatureinflüsse vernachlässigbar klein im Nanometer-Bereich liegen, was der Größenordnung der Messunsicherheit entspricht. Ist die komplette z -Achse nichtideal justiert, macht sich dies auch an den Kennwerten bemerkbar. Da die hier angegebenen Kennwerte z -Abstände charakterisieren, entspricht der Faktor der Linearitätsabweichungen näherungsweise dem Verhältnis zwischen nicht-idealem und idealem Kennwert. Deutlich weniger stark macht sich die lokal eingerechnete Linearitätsabweichung der z -Achse bemerkbar. Der Einfluss der abgebrochenen Tastspitze hingegen ist deutlich zu erkennen.

Wichtig ist ebenfalls eine experimentelle Absicherung der Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden Messungen der von der PTB und dem Lehrstuhl FBK gefertigten

Normale durchgeführt. Insbesondere für das R_k -Normal, welches das erste systematisch nach dieser Art ausgelegte Normal ist, erfolgte eine ausführliche experimentelle Verifikation.

Erste Messungen wurden am Lehrstuhl MTS jeweils an den durch UP-Drehen hergestellten Normalen durchgeführt. Es erfolgte die Berücksichtigung vier verschiedener Messstellen, an denen jeweils die gesamte Struktur, die aufgrund der Profilwiederholung eine Länge von $12,8\text{ mm}$ aufweist, aufgenommen wurde, wobei das Normal nach jeder Messung jeweils um 90° gedreht wurde ([See15], S. 45). Eine solche Erfassung von vier Tastschnitten wird analog z.B. bei der Auswertung der superfeinen Raunormale durchgeführt (vgl. [Hi197], S. 78).

An jeder Messstelle wurden zur Auswertung der Rauheitskennwerte 4 mm des Profils an jeweils 36 Auswertestellen genutzt, die zueinander um $200\text{ }\mu\text{m}$ lateral versetzt angeordnet worden sind (vgl. [See15], S. 45). Ein Filtervor- und -nachlauf von $\lambda_c = 0,8\text{ mm}$ wurde berücksichtigt. Die Messungen wurden mit dem Tastschnittgerät Hommel T 8000 durchgeführt. Dabei ergaben sich die Kennwerte in **Tabelle 4** ([See15], S. 45). Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardabweichungen über alle 144 Auswertungen.

Tabelle 4: R_k -Normal, experimentelle Ergebnisse MTS ([See15], S. 45)

Rauheitskennwerte	Sollwert	Messung Probe 1 (PTB)	Messung Probe 2 (FBK)
$R_k / \mu\text{m}$	0,400	$0,387 \pm 0,001$	$0,391 \pm 0,010$
$R_{pk} / \mu\text{m}$	0,150	$0,156 \pm 0,001$	$0,146 \pm 0,007$
$R_{vk} / \mu\text{m}$	1,200	$1,194 \pm 0,006$	$1,295 \pm 0,032$

Es kann festgestellt werden, dass die Kennwerte sehr gut mit den Vorgaben übereinstimmen und unabhängig von Werkzeugmaschine und Werkzeuggeometrie eine Streuung in der Größenordnung Nanometer aufweisen ([See15], S. 45). Werden, wie in **Abbildung 53** gezeigt, die Soll-Abbott-Kurve und die gemessene Abbott-Kurve beispielhaft für eine Messung verglichen, lässt sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung feststellen. Aufgrund der geringen Abweichungen der zugehörigen Kennwerte ist dieses Ergebnis zu erwarten.

Anschließend wurde im Hinblick auf den späteren praktischen Einsatz des Normals ein Fragment durch die PTB aus dem Prototypen des Normals herausgetrennt. Der dazu von der PTB entwickelte Messstellenplan sieht das Erfassen von vier Tastschnitten entlang des kompletten Profils in Abständen von $d_s = -2,25\text{ mm}$, $-0,75\text{ mm}$, $0,75\text{ mm}$ und $2,25\text{ mm}$ zur Symmetrielinie des Fragments vor. Die Berechnung der Rauheitskennwerte nach diesem Messstellenplan wird an je drei

Stellen der Profile, jeweils an unterschiedlichen lateralen Positionen der vier Tastschnitte, und somit an insgesamt zwölf Positionen, vorgeschrieben.

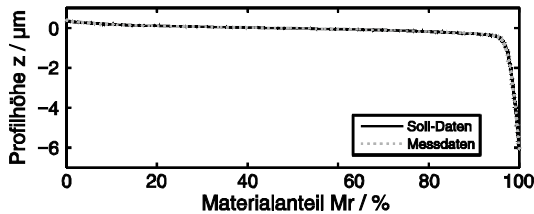


Abbildung 53: R_k -Normal, Vergleich zwischen gemessener und idealer Abbott-Kurve

Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft wurde der Messstellenplan der PTB um drei weitere Messstellen in Abständen von $d_s = -0,25\text{ mm}$, $0,0\text{ mm}$ und $0,25\text{ mm}$ erweitert, was auf insgesamt sieben Tastschnitte führt. Weiterhin wurde die Auswertung der einzelnen Messstellen an je 36 Auswertestellen in einem lateralen Abstand von je $200\text{ }\mu\text{m}$ zueinander durchgeführt. Dabei wurde an den Rändern jeweils der Filtevor- und -nachlauf berücksichtigt, so dass die erste Auswertung in einem Abstand von $0,8\text{ mm}$ zum Beginn des Profils ausgeführt wird. Dies führt auf 252 Auswertestellen pro Messung. Die Messungen nach diesem Messstellenplan wurden zunächst an zwei verschiedenen Tastschnittgeräten (das industrielle Tastschnittgerät Hommel T 8000 und das für den Einsatz in Reinräumen geeignete Gerät Hommel Nanoscan) des Lehrstuhls MTS durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5** gezeigt. Dabei sind ebenfalls jeweils der Mittelwert aller Auswertungen sowie die zugehörige Standardabweichung angegeben.

Tabelle 5: R_k -Normal, Messwerte bei Untersuchung des Fragments

	Sollwert	Hommel Nanoscan	Hommel T 8000
$R_k / \mu\text{m}$	0,400	$0,386 \pm 0,002$	$0,383 \pm 0,003$
$R_{pk} / \mu\text{m}$	0,150	$0,163 \pm 0,002$	$0,162 \pm 0,005$
$R_{vk} / \mu\text{m}$	1,200	$1,185 \pm 0,012$	$1,188 \pm 0,014$
$Mr1 / \%$	9,436	$9,252 \pm 0,146$	$9,364 \pm 0,187$
$Mr2 / \%$	83,553	$82,918 \pm 0,147$	$83,105 \pm 0,194$

Da eine umfangreiche statistische Absicherung der Ergebnisse sinnvoll ist, wurde für das R_k -Normal weiterhin ein Ringvergleich ausgeführt (vgl. [See15], S. 45). Dieser wurde ebenfalls mit dem von der PTB erodierten Fragment des Normals sowie dem bereits beschriebenen erweiterten Messstellenplan unter Nutzung von 252 Auswertestellen durchgeführt.

Der durchgeführte Ringvergleich umfasste Messungen mit neun verschiedenen Tastschnittgeräten (TSG) und zwei Weißlichtinterferometern (WLI) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6** gegeben und in **Abbildung 54 a)** (R_k), **b)** (R_{pk}) und **c)** (R_{vk}) graphisch dargestellt. Dabei sind analog Mittelwert und Standardabweichung aus den 252 Auswertestellen angegeben.

Tabelle 6: R_k -Normal, Ringvergleich, Ergebnisse

	$R_k / \mu m$	$R_{pk} / \mu m$	$R_{vk} / \mu m$
TSG1	$0,385 \pm 0,011$	$0,152 \pm 0,007$	$1,168 \pm 0,125$
TSG2	$0,395 \pm 0,007$	$0,170 \pm 0,004$	$1,264 \pm 0,031$
TSG3	$0,388 \pm 0,003$	$0,161 \pm 0,002$	$1,193 \pm 0,015$
TSG4	$0,378 \pm 0,003$	$0,161 \pm 0,004$	$1,207 \pm 0,012$
TSG5	$0,387 \pm 0,004$	$0,161 \pm 0,003$	$1,178 \pm 0,016$
TSG6	$0,370 \pm 0,004$	$0,155 \pm 0,005$	$1,151 \pm 0,016$
TSG7	$0,357 \pm 0,010$	$0,157 \pm 0,007$	$1,133 \pm 0,032$
TSG8	$0,378 \pm 0,003$	$0,160 \pm 0,002$	$1,164 \pm 0,012$
TSG9	$0,374 \pm 0,010$	$0,155 \pm 0,006$	$1,178 \pm 0,024$

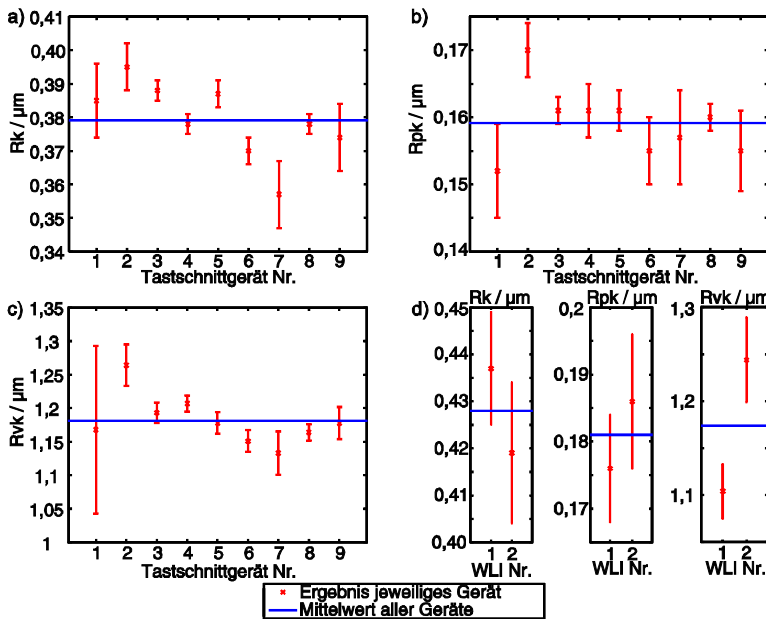


Abbildung 54: Auswertung Ringvergleich, a) R_k , b) R_{pk} , c) R_{vk} , d) WLI Messungen

Bei Betrachtung dieser Ergebnisse kann beobachtet werden, dass die Streuung der Rauheitskennwerte in der Größenordnung Nanometer liegt. Systematische Abweichungen zwischen den einzelnen Messgeräten liegen meist im Größenbereich einiger Prozent. Bei TSG1 befinden sich charakteristische Riefen an einigen Auswertestellen teilweise außerhalb des Auswertebereichs. Diese Linearitätsabweichung der lateralen Achse verursacht somit eine stärkere Schwankung des R_{vk} -Wertes, welche allerdings mit dem Normal festgestellt werden kann.

Im Rahmen des Ringvergleichs wurden, wie in **Abbildung 54 d)** gezeigt, ebenfalls zwei WLI zur Messung des Normals untersucht. Es wurden sieben äquidistant über die gemessene 3D-Topographie verteilte Profile an jeweils 36 Auswertestellen betrachtet. Es kann beobachtet werden, dass sich das Normal bedingt ebenfalls für die Anwendung bei optischen Messgeräten anbietet, allerdings systematische Abweichungen auftreten, da auch keine entsprechende Auslegung unter Berücksichtigung der Eigenschaften der optischen Abtastung vorgenommen wurde.

6.1.1.2 Linearitätsnormal 2D

Die Kalibrierung mit dem Linearitätsnormal kann mit geringem Aufwand erfolgen. Im praktischen Einsatz ist lediglich eine Messung des Profils nötig. Die zugehörige Auswerteroutine kann automatisiert werden. Da die Höhendifferenz des Normals kalibriert ist, liegt auch die Steigung der Abbott-Kurve fest. Somit muss bei einer Einpassung einer Geraden nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate lediglich das absolute Glied des Fits b_{fit} ermittelt werden (vgl. [Eif15c], S. 6 f.). Wird dann die Differenz zwischen eingepasster und gemessener Abbott-Kurve über dem Materialanteil $\vec{M}r$ dargestellt, kann sofort abgelesen werden, auf welcher Höhe möglicherweise Linearitätsabweichungen auftreten ([See15], S. 46).

Die nachfolgend vorgestellte Auswertung ist dabei analog zu der später eingeführten Auswertung für die 3D-Variante des Normals (vgl. hierzu auch [Eif15c], S. 6 f.).

Die Messung eines Profils führt auf den Messdaten-Vektor \vec{z}_{ms} sowie nach Anwendung der Filter-Operationen auf den Vektor $\vec{z}_{ms,flt}$:

$$\vec{z}_{ms} = \begin{pmatrix} z_{ms,1} \\ \dots \\ z_{ms,n} \end{pmatrix} = (z_{ms,k}), \quad \vec{z}_{ms,flt} = (z_{ms,flt,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (208)$$

Unter Anwendung dieser Daten wird die Materialanteilkurve $(\vec{M}r_{ms}, \vec{C}_{ms})$ berechnet, wobei gilt (vgl. [Eif15c], S. 3 ff.):

$$\vec{C}_{ms} = (C_{ms,k}) = \left(\max_{k=1,2,\dots,n} (z_{ms,flt,k}), \dots, \min_{k=1,2,\dots,n} (z_{ms,flt,k}) \right)^T, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (209)$$

$$\bar{M}r_{ms} = (Mr_{ms,k}), Mr_{ms,k} = \frac{k-1}{n-1} \cdot 100\%, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (210)$$

Zum Fit dieser gemessenen Abbott-Kurve wird ein Ansatz nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (vgl. Bronstein et. al. [Bro08], S. 846) gewählt. Die Differenz zwischen der gemessenen Abbott-Kurve und ihrem Geradenfit wird dabei zur Beurteilung der Güte des Normals genutzt. Entsprechend muss der Fit die folgende Bedingung erfüllen ([Bro08], S. 846):

$$\sum_{k=1}^n \left(z_{ms,fit,k} - m_{fit} \cdot \frac{k-1}{n-1} \cdot 100\% - b_{fit} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (211)$$

wobei $\bar{z}_{ms,fit}$ (vgl. Gleichung (208)) die gefilterten Messdaten und m_{fit} die Steigung des Geraden-Fits bezeichnet. Bei Ausführung des ersten Fits wird die Steigung der kalibrierten Soll-Abbott-Kurve m_{tar} als erfüllt angenommen, welche wie folgt ermittelt wird (vgl. [Eif15c], S. 3):

$$m_{fit} = m_{tar} = \frac{C_{n,tar} - C_{1,tar}}{100\%}, \quad \text{für } k = n. \quad (212)$$

Für die benötigten Mittelwerte aus den gemessenen Daten gilt (vgl. [Eif15c], S. 6):

$$\bar{C}_{ms} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{ms,k}}{n}, \quad \bar{M}r_{ms} = \frac{\sum_{k=1}^n Mr_{ms,k}}{n}. \quad (213)$$

Der durchzuführende Fit \bar{C}_{fit} hat dabei mit diesen Definitionen die folgende Form einer Geraden (vgl. [Eif15c], S. 6):

$$\bar{C}_{fit} = (C_{fit,k}), \quad C_{fit,k} = m_{tar} \cdot Mr_{ms,k} + b_{fit}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (214)$$

Auf Basis dieser Parameter wird das absolute Glied b_{fit} ermittelt ([Eif15c], S. 6):

$$b_{fit} = \bar{C}_{ms} - m_{tar} \cdot \bar{M}r_{ms}. \quad (215)$$

Die Linearitätsabweichung $ld1$ kann dann beurteilt werden, indem die durchschnittliche Abweichung zwischen den Soll-Daten und den Messdaten berechnet wird (vgl. [Eif15c], S. 7):

$$ld1 = \frac{\sum_{k=1}^n |C_{ms,k} - C_{fit,k}|}{n}. \quad (216)$$

Dieser Parameter $ld1$ liefert demnach eine grundsätzliche Aussage darüber, inwiefern die gemessene Abbott-Kurve mit der idealen Soll-Abbott-Kurve über-

einstimmt. Als weiteres Bewertungskriterium kann eine ähnliche Berechnung einer Geraden erfolgen, bei der jedoch als neuer Parameter die gemessene Steigung eingepasst wird ([Bro08], S. 846) ([Eif15c], S. 7):

$$m_{fit} = \frac{\sum_{k=1}^n (Mr_{ms,k} - \bar{Mr}_{ms}) \cdot (C_{ms,k} - \bar{C}_{ms})}{\sum_{k=1}^n (Mr_{ms,k} - \bar{Mr}_{ms})^2}. \quad (217)$$

Das absolute Glied wird berechnet ([Eif15c], S. 7):

$$b_{fit} = \bar{C}_{ms} - m_{fit} \cdot \bar{Mr}_{ms}, \quad (218)$$

so dass die gefittete Abbott-Kurve unter dessen Einbeziehung dargestellt werden kann (vgl. [Eif15c], S. 6 f.):

$$\bar{C}_{fit} = (C_{fit,k}), \quad C_{fit,k} = m_{fit} \cdot Mr_{ms,k} + b_{fit}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (219)$$

Somit ergibt sich ein zweites Kriterium zur Beurteilung der Linearität der gemessenen Daten (vgl. [Eif15c], S. 7):

$$ld2 = \frac{\sum_{k=1}^n |C_{ms,k} - C_{fit,k}|}{n}. \quad (220)$$

Beide Werte $ld1$ und $ld2$ geben Auskunft über die Linearität des betrachteten Messgeräts ([Eif15c], S. 6 ff.). $ld1$ setzt dabei die ideale Steigung voraus und gibt somit eine direkte Abweichung zur Soll-Abbott-Kurve an ([Eif15c], S. 6). $ld2$ hingegen gibt grundsätzliche Auskunft darüber, wie linear sich die untersuchte Achse verhält ([Eif15c], S. 6).

Neben diesem eingeführten Ansatz kann auch eine normgerechte Betrachtung nach dem in der DIN EN ISO 25178-600 Normenreihe vorgeschlagenen Vorgehen erfolgen (vgl. z.B. [25178-601] [25178-602] [25178-603]). Soll dabei die Übertragungsfunktion $\ddot{U}F$ gemäß der Definition aus DIN EN ISO 25178-603 ([25178-603], S. 7) ermittelt werden, so ergibt sich für den vorliegenden Fall die folgende Darstellung:

$$\ddot{U}F_k = (C_{tar,k}, C_{ms,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (221)$$

Demnach werden die vom Messgerät übertragenen Höhenwerte der Abbott-Kurve über ihrem Sollwert dargestellt. In diese Übertragungsfunktion wird anschließend ebenfalls eine Gerade eingepasst, wozu die Parameter m_{fit} , b_{fit} verwendet werden (vgl. [Bro08], S. 846):

$$m_{fit} = \frac{\sum_{k=1}^N (C_{tar,k} - \bar{C}_{tar}) \cdot (C_{ms,k} - \bar{C}_{ms})}{\sum_{k=1}^N (C_{tar,k} - \bar{C}_{tar})^2}, \quad b_{fit} = \bar{C}_{ms} - m_{fit} \cdot \bar{C}_{tar}. \quad (222)$$

Hieraus resultiert folgende Darstellung der Geraden:

$$\bar{C}_{fit} = (C_{fit,k}), \quad C_{fit,k} = m_{fit} \cdot C_{tar,k} + b_{fit}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (223)$$

Auf Basis der berechneten Geraden-Parameter ergibt sich aus der Definition des Verstärkungskoeffizienten α_z ([25178-603], S. 8):

$$\alpha_z = m_{fit}. \quad (224)$$

Weiterhin lässt sich auf Basis dieser Ergebnisse die „Abweichung von der Linearität“ ([25178-603], S. 12) z.B. gemäß DIN EN ISO 25178-603 ermitteln ([25178-603], S. 12):

$$ld_{ISO} = \max_{k=1,2,\dots,n} (C_{fit,k} - C_{ms,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (225)$$

welche nachfolgend als ld_{ISO} bezeichnet wird. Da insbesondere im äußeren Bereich der Messpunkte Ausreißer auftreten können, wird die Auswertung nach Gleichung (222)-(225) mit dem folgenden Datensatz wiederholt:

$$(C_{tar,k}, C_{ms,k}), \quad k = \text{round}\left(\frac{n}{10}\right), \text{round}\left(\frac{n}{10}\right) + 1, \dots, \text{round}\left(\frac{9 \cdot n}{10}\right). \quad (226)$$

Auf Basis dieser Auswertung ergeben sich die Koeffizienten α_{z80} sowie ld_{ISO80} .

Als nächster Schritt erfolgt ein virtueller Test des Linearitätsnormals. Auch diese lineare Abtastung liefert per Definition, wie in der entsprechenden Signalkette berücksichtigt, die gewünschten Soll-Kennwerte. Die idealen Rauheitskennwerte des Linearitätsnormals betragen dabei $R_{a,tar} = 1,576 \mu m$, $R_{q,tar} = 1,820 \mu m$ und $R_{z,tar} = 6,104 \mu m$ ([Sch15a], S. 34).

Wird auch hier eine Simulation der beschriebenen nichtidealen Abtastungen durchgeführt, wobei die Grundlagen zur Modellierung aus **Kapitel 6.1** angewendet werden, so ergeben sich die Ergebnisse in **Tabelle 26** und **Tabelle 27** in **Anhang B**. Dabei kann festgestellt werden, dass sich auch hier Linearitätsabweichungen der Achse auf die Kennwerte auswirken und somit detektiert werden können. Eine abgebrochene Tastspitze hat keine Auswirkungen auf die Ergebnisse, da die vorher berücksichtigte Breite des Werkzeugs eine größere Strukturgröße und somit auch bereits vorab eine höhere Filterwirkung auf das Profil hat.

Zur praktischen Verifikation wurden Messungen am Prototyp mit einem Tastschnittgerät (Hommel T 8000) durchgeführt ([Sch15a], S. 33). Dieser Prototyp entspricht dabei nicht dem im Rahmen der Parameterstudie untersuchtem Referenzwerkstück. Dabei wurde über das gedrehte Normal (vgl. **Abbildung 46 b**) eine Messung von 36 Tastschnitten mit gleichem Abstand zueinander entlang der kompletten Struktur durchgeführt ([Sch15a], S. 33). Das gesamte Drehprofil ist 16 mm lang ([Sch15a], S. 33). Ausgewertet wurden unter Berücksichtigung von Filtervor- und -nachlauf von $0,8\text{ mm}$ jeweils 53 Auswertestellen (mit einer Auswertelänge von 4 mm) verteilt über das gesamte Drehprofil mit einem lateralen Abstand von je $200\text{ }\mu\text{m}$ zueinander ([Sch15a], S. 33). Dies führt auf 1908 Einzelkennwerte (vgl. [Sch15a], S. 33 f.). Deren Mittelwert und Standardabweichung sowie die gemessenen Werte der Linearitätsabweichungen sind in **Tabelle 7** gegeben.

Zur Untersuchung der Eignung optischer Messgeräte wurden weiterhin mit dem konfokalen Mikroskop NanoFocus μSurf vier um je 90° versetzte 3D-Topographien aufgenommen. Aus jeder dieser Topographien wurden sechs äquisistant zueinander entfernte Profilschnitte extrahiert, die analog an jeweils 53 Stellen ausgewertet wurden (vgl. [Sch15a], S. 33 f.). Mittelwert und Standardabweichung dieser 1272 Messwerte sind ebenfalls in **Tabelle 7** gezeigt.

Es kann dabei festgestellt werden, dass sich das Normal für beide Messgeräte eignet. Bei beiden Messgeräten kann eine hohe Linearität festgestellt werden. Der Vergleich von ld_{ISO} und ld_{ISO80} zeigt, dass bei Betrachtung des konfokalen Mikroskops stärkere Ausreißer an den Rändern auftreten.

Tabelle 7: Messergebnisse 2D-Linearitätsnormal, Prototyp

	Sollwert	Hommel T 8000 (taktil)	NanoFocus μSurf (konfokal)
$R_a / \mu\text{m}$	1,576	$1,539 \pm 0,003$	$1,511 \pm 0,007$
$R_q / \mu\text{m}$	1,820	$1,779 \pm 0,003$	$1,749 \pm 0,016$
$R_z / \mu\text{m}$	6,104	$6,177 \pm 0,029$	$6,221 \pm 0,152$
$ld1 / \mu\text{m}$	0,004	$0,049 \pm 0,002$	$0,072 \pm 0,006$
$ld2 / \mu\text{m}$	0,003	$0,039 \pm 0,001$	$0,042 \pm 0,008$
α_z	1,000	$0,977 \pm 0,002$	$0,960 \pm 0,006$
$ld_{ISO} / \mu\text{m}$	0,000	$0,110 \pm 0,009$	$0,166 \pm 0,309$
α_{z80}	1,000	$0,970 \pm 0,002$	$0,950 \pm 0,004$
$ld_{ISO80} / \mu\text{m}$	0,000	$0,083 \pm 0,006$	$0,104 \pm 0,015$

Die gemessenen Rauheitsparameter weichen ebenfalls nur wenig zu den Sollwerten ab und weisen wie das R_k -Normal sehr geringe Standardabweichungen auf, wobei die optischen Messungen im Vergleich größere Werte aufweisen. Die gemessene

Abbott-Kurve hat einen sehr linearen Verlauf, so dass eine hohe Linearität der Messgeräte festgestellt werden kann (vgl. [See15], S. 46).

Weiterhin wurde bereits in **Kapitel 5.3** die mit dieser Geometrie ausgeführte Parameterstudie zur Fertigung vorgestellt, bei der mehrere Exemplare des Normals mit unterschiedlichen Zerspanungs-Parametern hergestellt wurden. Dazu wurde auch ein neues Referenzwerkstück hergestellt. Die gute Übereinstimmung der Rauheitskennwerte wurde bereits in **Tabelle 2** ([Sch15a], S. 34) gezeigt.

In **Tabelle 8** werden die zugehörigen Werte der Linearitätsabweichungen dargestellt. Analog zu den Werten aus **Tabelle 2** ([Sch15a], S. 34) werden Mittelwert und Standardabweichung der 1908 Einzelauswertungen der taktilen Messungen gegeben (vgl. [Sch15a], S. 34).

Die Beobachtungen bei Betrachtung der in den Gleichungen (216), (220) sowie (224)-(225) eingeführten Parameter zur Charakterisierung der Linearitätsabweichung stimmen mit denen zu den Kennwerten überein: Die veränderte Schnitttiefe sowie das alternativ genutzte Material führen zu etwas besseren Ergebnissen. Generell kann festgestellt werden, dass trotz verschiedener Parameter eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

Tabelle 8: Parameterstudie zur Fertigung des Linearitätsnormals, gemessene Linearitätsabweichungen (Hommel T 8000)

	1) Referenz	2) Punktabs. 20 nm	3) Höhere Schnitttiefe	4) Anderes Material
$ld1 / \mu m$	0,066 $\pm 0,0015$	0,068 $\pm 0,0014$	0,066 $\pm 0,0014$	0,061 $\pm 0,0012$
$ld2 / \mu m$	0,059 $\pm 0,0016$	0,060 $\pm 0,0014$	0,053 $\pm 0,0012$	0,055 $\pm 0,0012$
α_z	0,974 $\pm 0,0011$	0,976 $\pm 0,0010$	0,969 $\pm 0,0009$	0,977 $\pm 0,0008$
$ld_{ISO} / \mu m$	0,120 $\pm 0,0052$	0,123 $\pm 0,0067$	0,124 $\pm 0,0054$	0,115 $\pm 0,0051$
α_{z80}	0,966 $\pm 0,0016$	0,967 $\pm 0,0012$	0,961 $\pm 0,0012$	0,969 $\pm 0,0010$
$ld_{ISO80} / \mu m$	0,083 $\pm 0,0045$	0,083 $\pm 0,0062$	0,089 $\pm 0,0053$	0,081 $\pm 0,0044$

Wird eine gleichzeitige Betrachtung von Soll- und Istprofil ausgeführt, so kann festgestellt werden, dass die Fertigung das Eingangsprofil sehr gut abbildet. Dies ist für eine Auswertung des Referenznormals exemplarisch in **Abbildung 55** dargestellt. Dabei kann auch die gute Übereinstimmung der vorgegebenen Abbott-Kurve, die bereits im Zuge der Auswertung in **Tabelle 8** festgestellt werden konnte,

bestätigt werden. Die gemessene Abbott-Kurve weist näherungsweise die Form einer Geraden auf (vgl. [See15], S. 46).

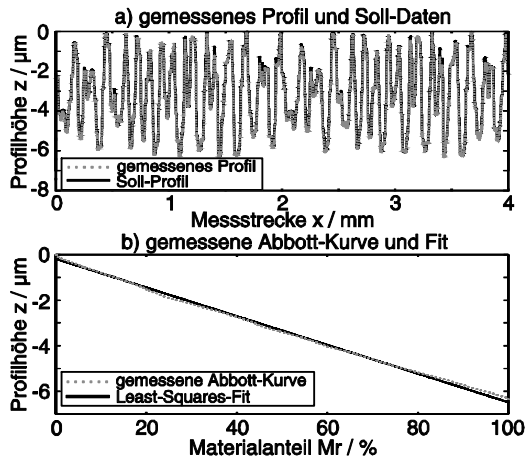


Abbildung 55: a) Vergleich zwischen Soll- und Ist-Profil sowie b) der Abbott-Kurven

6.1.1.3 Stufenloses Normal für Ortsspektren

Die Kalibrierstrategie für dieses Normal besteht aus zwei separaten Einheiten. Zum einen können profilhafte Rauheitskennwerte kalibriert werden. Dabei wird nach der Messung die bei der Auslegung berücksichtigte Filterung und Parameterberechnung durchgeführt. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den Sollwerten, die auf Basis der virtuellen Auswertung ermittelt wurden. Konkret kalibriert werden können dabei z.B. die Kennwerte R_a , R_q und R_z .

Als Soll-Kennwerte auf Basis der idealen virtuellen Auswertung wurden die Kennwerte $R_a = 0,185 \mu\text{m}$, $R_q = 0,812 \mu\text{m}$ und $R_z = 3,286 \mu\text{m}$ ermittelt. Weiterhin wurde, wie in **Anhang B** dargestellt, auch für dieses Normal eine Simulation verschiedener nichtidealer, virtueller Abtastungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass auch hier eine Linearitätsabweichung der Höhenachse an den Kennwerten festgestellt werden kann (**Tabelle 28**).

Die realen Messungen wurden zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft über das Normal verteilt durchgeführt. Für diese Auswertung der Kennwerte wurde ein analoger Messstellenplan zu den vorherigen Auswertungen angewendet. Demnach wurden 36 Tastschnitte im Abstand von 10° erfasst und an je 53 Stellen im Abstand von $200 \mu\text{m}$ zueinander ausgewertet. Diese Messungen wurden an zwei unterschiedlichen Tastschnittgeräten (Hommel T 8000 und Hommel Nanoscan) ausgeführt. Die Ergebnisse sind als Mittelwert und Standardabweichung aller Messungen

in **Tabelle 9** gegeben. Es kann auch hier eine gute Übereinstimmung mit den Soll-Kennwerten konstatiert werden.

Tabelle 9: DFT-Normal, Messergebnisse Rauheitsparameter

	Sollwert	Hommel T 8000	Hommel Nanoscan
$R_a / \mu\text{m}$	0,185	0,194 ± 0,002	0,199 ± 0,001
$R_q / \mu\text{m}$	0,812	0,830 ± 0,013	0,871 ± 0,007
$R_z / \mu\text{m}$	3,286	3,359 ± 0,045	3,370 ± 0,055

Für den zweiten Auswerteschritt wurde weiterhin -wie in **Kapitel 4.1.3** beschriebene die Fourier-Transformierte des Profils als Eigenschaft des Normals definiert, so dass diese ebenfalls kalibriert werden kann. Der Auswerteschritt sieht die Ermittlung der Übertragungsfunktion des Messgeräts vor.

Die virtuelle Referenz ist dabei die Fourier-Transformierte des virtuell gefertigten Profils $\bar{z}_e(x)$:

$$\bar{Z}_e(\omega_x) = \mathfrak{F}\{\bar{z}_e(x)\}. \quad (227)$$

Weiterhin von Interesse ist die Fourier-Transformierte des virtuell gemessenen und gefilterten Profils $\bar{z}_c(x)$:

$$\bar{Z}_c(\omega_x) = \mathfrak{F}\{\bar{z}_c(x)\}. \quad (228)$$

Grundsätzlich wäre es möglich, durch eine punktweise Division dieser beiden Anteile $\bar{Z}_e(\omega_x)$ und $\bar{Z}_c(\omega_x)$ eine frequenzabhängige, virtuelle Übertragungsfunktion des Systems zu berechnen. Diese wäre bei einer reinen Divisionsoperation allerdings stark verrauscht, da sich geringe Abweichungen in kleineren Amplituden bereits sehr stark auf das berechnete Übertragungsverhältnis auswirken.

Eine Alternative zur Bestimmung der Übertragungsfunktion ist ein sogenanntes ARMA-Modell (vgl. [Dod08], S. 20 f.). Dieses Modell besteht aus zwei separaten Anteilen: Einem AR („auto-regressive“) Prozess, der mit der Ordnung k_{\max} gegeben sei, sowie einem MA („moving average“) Prozess, der die Ordnung l_{\max} habe ([Dod08], S. 20).

Entsprechend kann der gesamte ARMA-Prozess der Ordnungen k_{\max} und l_{\max} folgendermaßen für ein Eingangssignal $\bar{z}_{in} = (z_{in,i})$, $i = 1, 2, \dots, n$ sowie ein Ausgangssignal $\bar{z}_{out} = (z_{out,i})$, $i = 1, 2, \dots, n$ mit den zugehörigen Koeffizienten $\vec{a}_{arma} = (a_{arma,k})$, $k = 1, 2, \dots, k_{\max}$, $\vec{b}_{arma} = (b_{arma,l})$, $l = 0, 1, 2, \dots, l_{\max}$ formuliert werden ([Dod08], S. 20):

$$z_{out,i} = \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_{arma,k} \cdot z_{out,i-k} + b_{arma,0} - \sum_{l=1}^{l_{\max}} b_{arma,l} \cdot z_{in,i-l}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (229)$$

wobei zunächst die Betrachtung im Ortsbereich ausgeführt sei. Ein völlig analoges Vorgehen gilt allerdings für die Transformation von Gleichung (229) in den Frequenzbereich:

$$Z_{out}(\omega_i) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_{arma,k} \cdot Z_{out}(\omega_{i-k}) \cdot e^{-j\omega_{i-k}k} + b_{arma,0} - \sum_{l=1}^{l_{\max}} b_{arma,l} \cdot Z_{in}(\omega_{i-l}) \cdot e^{-j\omega_{i-l}l}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (230)$$

Dieser Filteransatz kann zur Berechnung der Übertragungsfunktion genutzt werden. Dabei werden diejenigen Filterparameter gesucht, die dafür sorgen, dass das Messgerätefilterverhalten durch das ARMA-Modell möglichst gut abgebildet wird. Die Ermittlung der erforderlichen Parameter $\vec{a}_{arma} = (a_{arma,k}), k = 1, 2, \dots, k_{\max}, \vec{b}_{arma} = (b_{arma,l}), l = 0, 1, 2, \dots, l_{\max}$ kann z.B. mit einem Ansatz nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate durchgeführt werden (vgl. z.B. [Vog15], S. 105 f.). Wenn diese Parameter bekannt sind, kann mit Gleichung (230) das Übertragungsverhältnis $v(\omega_i)$ für jede Frequenz ω_i berechnet werden:

$$v(\omega_i) = \frac{Z_{out}(\omega_i)}{Z_{in}(\omega_i)} = \frac{\sum_{l=0}^{l_{\max}} b_{arma,l} \cdot e^{-j\omega_{i-l}l}}{\sum_{k=1}^{k_{\max}} a_{arma,k} \cdot e^{-j\omega_{i-k}k} + 1}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (231)$$

Die Ordnungen der Prozesse werden für die Auswertung in Anlehnung an Literatur zu $l_{\max} = 5$ und $k_{\max} = 15$ gesetzt (vgl. [See00], S. 43).

Es wurde bereits beschrieben, dass das Normal einer idealen und nichtidealen virtuellen Abtastung unterzogen wurde. Auf Basis dieser Auswertung soll die virtuelle Übertragungsfunktion des Messgeräts ermittelt werden.

Dabei dienen jeweils im Frequenzbereich die virtuell gefertigten Profilwerte $\vec{Z}_e(\omega_x)$ als Ausgangsgrößen $\vec{Z}_{out}(\omega)$, die virtuell abgetasteten und ausgewerteten Profilwerte $\vec{Z}_c(\omega_x)$ als Eingangsgrößen $\vec{Z}_{in}(\omega)$.

Auf Basis dieser Daten wird die zugehörige virtuelle Übertragungsfunktion $v_{id}(\omega_i)$ ermittelt. Bei den virtuellen nichtidealen Abtastungen erfolgt diese Ermittlung ebenfalls ($v_{nid}(\omega_i)$). Dabei ist zu erwarten, dass die Übertragungsfunktion bei den nichtidealen Abtastungen abweicht. Als Kriterium hierfür wird die folgende mittlere punktuelle Abweichung $\Delta\bar{v}$ definiert:

$$\Delta\bar{v} = \frac{\sum_{j=1}^n |v_{nid}(\omega_j) - v_{id}(\omega_j)|}{n}. \quad (232)$$

Bei dieser Betrachtung ergeben sich die Ergebnisse in **Anhang B**. Es kann festgestellt werden, dass schon kleine Änderungen z.B. der Temperatur oder

Tastspitzengeometrie einen Einfluss auf die Übertragungsfunktion des Messgerätes haben. Das Übertragungsverhältnis ist ein sensibles Kriterium für Abweichungen im Messsystem, da z.B. schon kleine Abweichungen bei sehr kurzwelligen Profilanteilen zu einem hohen Wert von $\Delta\bar{v}$ führen können.

Aus den bereits ausgewerteten Messdaten (siehe **Tabelle 9**) kann somit auch die tatsächliche Übertragungsfunktion des Messgerätes $v_{re}(\omega_i)$ berechnet werden. Dabei wird das gemessene Oberflächenprofil \bar{z}_{ms} gefiltert, auf eine identische Schrittweite wie das Profil der virtuellen Signalkette interpoliert ($\bar{z}_{ms,int}$) und anschließend einer Fourier-Transformation unterzogen:

$$\bar{Z}_{ms,int}(\omega_{ms,int}) = \mathfrak{F}\{\bar{z}_{ms,int}(x_{ms,int})\}. \quad (233)$$

Dieses Profil im Frequenzbereich $\bar{Z}_{ms,int}(\omega_{ms,int})$ dient wie in Gleichung (231) definiert als Eingangsprofil $\bar{Z}_{in}(\omega)$ des ARMA-Modells.

Auf Basis dieser gegebenen Vorschrift wurden die Übertragungsfunktionen der beiden untersuchten Messgeräte ermittelt. Diese sind beispielhaft für je eine Auswertestelle in **Abbildung 56** gezeigt. Bei Betrachtung dieser Übertragungsfunktionen kann festgestellt werden, dass mit der Auswertung unter Anwendung des ARMA-Modells realistische Werte erzielt werden können. Dies gilt für beide eingesetzten Messgeräte.

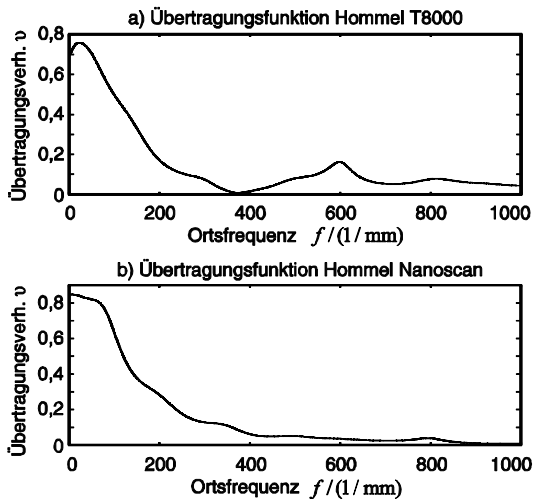


Abbildung 56: Gemessene Übertragungsfunktion von zwei Tastschnittgeräten, a) Hommel T 8000, b) Hommel Nanoscan

6.1.1.4 Normal für Welligkeit und Rauheit

In **Kapitel 4.1.4** und **Kapitel 5.5** wurde dargelegt, dass das Normal eine Vielzahl von Parametern und Messgeräteeigenschaften kalibrieren kann. Zur Ausführung der Kalibrierstrategie ist allerdings die Erfassung eines einzelnen Tastschnitts ausreichend. Auf Basis dieses Tastschnitts können sämtliche kalibrierte Eigenschaften des Normals erfasst werden. Dazu zählen der Welligkeitskennwert $W_{sa,ms}$, der mit dem zugehörigen Soll-Kennwert $W_{sa,tar}$ abgeglichen werden kann. Als weitere Welligkeitseigenschaft kann die Wellenlänge der dominanten Welligkeit $\lambda_{dom,ms}$ (vgl. VDA 2007 [VDA07]) mit ihrem Sollwert $\lambda_{dom,tar}$ abgeglichen werden. Im Profil selbst sind weiterhin die gemessenen Rauheitskennwerte $R_{a,ms}$, $R_{z,ms}$ anhand ihrer kalibrierten Werte $R_{a,tar}$, $R_{z,tar}$ zu beurteilen. Optional können durch Anbringung weiterer geometrischer Strukturen innerhalb derselben Messung noch weitere Eigenschaften, z.B. Tastspitzenradius oder Amplitudenübertragung, charakterisiert werden.

Als Messstellenplan für die virtuelle, ideale Abtastung wurde folgende Auswertungen vorgesehen: Der Welligkeitskennwert W_{sa} wird über das gesamte Profil der Länge 25 mm ausgewertet. Der Wert von R_a wird für jeweils 4 mm ausgewertet. Dabei werden 101 Auswertestellen im Abstand von je $200\ \mu\text{m}$ zueinander genutzt, um das komplette Rauheitsprofil der Länge 24 mm abzudecken. Der Wert von R_z wird ebenfalls für das gesamte Rauheitsprofil ermittelt, dabei allerdings jeweils im Abstand von $0,8\text{ mm}$ zueinander, um den einzelnen Auswerteabschnitten gerecht zu werden. Dies führt auf 26 Werte für R_z .

Für die ideale, virtuelle Abtastung ergeben sich die folgenden Mittelwerte und Standardabweichungen: $W_{sa,tar} = 0,400\ \mu\text{m}$, $R_{a,tar} = (2,000 \pm 0,000)\ \mu\text{m}$ und $R_{z,tar} = (7,499 \pm 0,001)\ \mu\text{m}$. Weiterhin ergibt sich für die Wellenlänge der dominanten Welligkeit ein Wert von $\lambda_{dom,tar} = 3,571\text{ mm}$. Die nichtidealen virtuellen Abtastungen wurden unter Anwendung der analogen Messstellen ausgeführt, wobei die Ergebnisse in **Tabelle 29** in **Anhang B** dargestellt sind. Nichtidealitäten können anhand der Simulationen detektiert werden, Temperaturunterschiede sowie Abweichungen in der Tastspitzengeometrie sollten hingegen mit hierfür spezifischen Normalen überprüft werden, da sich an den kalibrierten Parametern dieses Normals keine wesentlichen Abweichungen feststellen lassen.

Die realen Messungen wurden an 18 Tastschnitten, die im Winkelabstand von jeweils 20° zueinander aufgenommen wurden, ausgewertet. Das 50 mm lange Welligkeitsprofil wurde unter Berücksichtigung eines Filtervor- und -nachlaufs von $\lambda_{c,1} = 5\text{ mm}$ ausgewertet, so dass bei einem lateralen Abstand von $200\ \mu\text{m}$ zwischen zwei Auswertestellen der Kennwert W_{sa} sowie die Wellenlänge der dominanten Welligkeit λ_{dom} an 76 Stellen je Profil ermittelt werden können. An allen Profilen ergeben sich somit 1368 Welligkeitsauswertungen. Der Rauheitskennwert R_a wird

unter der Berücksichtigung des Filtervor- und nachlaufs von $\lambda_{c,2} = 0,8 \text{ mm}$ ebenfalls jeweils mit dem Abstand von zwei Auswertestellen von je $200 \mu\text{m}$ entlang des gesamten Profils ausgewertet. Weiterhin ist dabei zu berücksichtigen, dass im Bereich zwischen $24\text{--}25 \text{ mm}$ sowie $49\text{--}50 \text{ mm}$ des Profils keine Rauheitsstruktur aufgebracht ist und unter Einbeziehung dieses Profilabschnitts keine Auswertung erfolgen kann. Eine Berücksichtigung dieser Gegebenheiten führt auf 186 Kennwerte je Profil und 3348 Kennwerte insgesamt. Die Kenngröße R_z wird gemäß der Länge der Einzelmessstrecken in einem Abstand von $0,8 \text{ mm}$ ausgewertet, was auf 48 Einzelauswertungen pro Messung und 864 Auswertungen insgesamt führt. Mittelwert und Standardabweichung für die durchgeführten Messungen mit dem Tastschnittgerät Hommel Nanoscan sind in **Tabelle 10** gegeben. Dabei kann festgestellt werden, dass mit dem Normal sowohl Welligkeits- als auch Rauheitskennwerte zuverlässig abgebildet werden. Die statistischen Schwankungen von R_z hängen mit kleinen Verschiebungen der Auswertepositionen der einzelnen Schnitte zueinander zusammen. Der Sollwert für die Wellenlänge der dominanten Welligkeit wurde bei jeder Einzelauswertung genau erreicht.

Tabelle 10: Messergebnisse W_{sa} -Normal

	Sollwert	Hommel Nanoscan
$R_a / \mu\text{m}$	$2,000 \pm 0,000$	$2,018 \pm 0,008$
$R_z / \mu\text{m}$	$7,499 \pm 0,001$	$7,503 \pm 0,149$
$W_{sa} / \mu\text{m}$	0,400	$0,408 \pm 0,001$
$\lambda_{dom} / \text{mm}$	3,571	$3,571 \pm 0,000$

6.1.2 Normale für optische Messgeräte

6.1.2.1 Linearitätsnormal 3D

Die Auswertung des 3D-Linearitätsnormals sowie die zugehörige Kalibrierstrategie können analog zu der 2D-Version des Normals (vgl. **Kapitel 6.1.1.2**) durchgeführt werden. Gemessen wird dabei die 3D-Topographie des Normals, deren Messdaten dann z.B. als Matrix \mathbf{Z}_{ms} bestehend aus $n \cdot m$ Höhenwerten vorliegt ([Eif15c], S. 6):

$$\mathbf{Z}_{ms} = \mathbf{Z}_{ms}(x, y). \quad (234)$$

Diese Daten werden dann, wie bei der Auslegung berücksichtigt, gefiltert ([Eif15c], S. 6). Dies führt auf die Matrix der gefilterten Werte $\mathbf{Z}_{ms, \text{filt}}$ ([Eif15c], S. 6):

$$\mathbf{Z}_{ms, \text{filt}}(x, y) = Fc \left[Fs \left(\mathbf{Z}_{ms}(x, y) \right) \right] = (z_{ms, \text{filt}, kl}), \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (235)$$

Von diesen gefilterten Daten werden mit dem Parameteroperator die Rauheitskennwerte $S_{a,ms}$ und $S_{q,ms}$ ausgewertet ([Eif15c], S. 6). Ein Abgleich mit den kalibrierten Soll-Kennwerten liefert erste Erkenntnisse zur Linearität der Höhenachse ([Eif15c], S. 6). Die eigentlich kalibrierte Eigenschaft des Normals ist jedoch die Linearität seiner Flächenmaterialanteilkurve, wobei diese Kurve für den Messdatensatz wie folgt definiert sei ([Eif15c], S. 6):

$$\vec{C}_{ms} = \left(\max_{k=1,2,\dots,m} (z_{ms,filtr,kl}), \dots, \min_{k=1,2,\dots,m} (z_{ms,filtr,kl}) \right)^T = (C_{ms,i}), \quad i=1,2,\dots,m \cdot n \quad (236)$$

$$\vec{M}r_{ms} = (0, \Delta Mr, 2 \cdot \Delta Mr, \dots, (n \cdot m - 1) \cdot \Delta Mr)^T = (Mr_{ms,i}), \Delta Mr = \frac{100}{n \cdot m - 1}, i=1,2,\dots,m \cdot n.$$

In diese gemessene 3D-Abbott-Kurve wird eine Gerade eingepasst ([Eif15c], S. 6). Dabei werden auch hier zwei verschiedene Möglichkeiten des Fits angewendet ([Eif15c], S. 6 f.).

Die ideale Soll-Abbott-Kurve, die durch eine Gerade repräsentiert wird, kann vollständig durch die Parameter m_{tar} und b_{tar} , welche die Steigung und das absolute Glied bezeichnen, definiert werden ([Eif15c], S. 6).

Der erste Fit wird unter der Annahme, dass die für den Fit zu berechnende Steigung dem Wert von m_{tar} entspricht, ausgeführt ([Eif15c], S. 6). Dann ergibt sich das absolute Glied b_{fit} zu (vgl. [Bro08], S. 846) ([Eif15c], S. 6):

$$b_{fit} = \frac{\sum_{i=1}^{n \cdot m} C_{ms,i}}{n \cdot m} - m_{tar} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n \cdot m} Mr_{ms,i}}{n \cdot m} = \bar{C}_{ms} - m_{tar} \cdot \bar{M}r_{ms}. \quad (237)$$

Die Linearitätsabweichung $ld1$ des Messdatensatzes kann durch eine punktweise gemittelte Summation der Abweichung zwischen der Modellgeraden und den Messdaten ermittelt werden ([Eif15c], S. 6):

$$ld1 = \frac{\sum_{i=1}^{n \cdot m} \left| C_{ms,i} - (m_{tar} \cdot Mr_{ms,i} + b_{fit}) \right|}{n \cdot m}. \quad (238)$$

Dabei lässt sich mithilfe des berechneten Wertes beurteilen, wie gut die Steigung von Soll- und Ist-Abbott-Kurve übereinstimmen ([Eif15c], S. 6).

Ebenfalls analog zur 2D-Betrachtung wird zusätzlich ein zweiter Fit berechnet, der auch den Steigungsparameter berücksichtigt ([Eif15c], S. 6). Die Geraden-Parameter dieses zweiten Fits werden auf Basis der folgenden Vorschrift ermittelt (vgl. [Bro08], S. 846) ([Eif15c], S. 6 f.):

$$m_{fit} = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} (Mr_{ms,i} - \bar{Mr}_{ms}) \cdot (C_{ms,i} - \bar{C}_{ms})}{\sum_{i=1}^{n-m} (Mr_{ms,i} - \bar{Mr}_{ms})^2}, \quad b_{fit} = \bar{C}_{ms} - m_{fit} \cdot \bar{Mr}_{ms}. \quad (239)$$

Der zweite Parameter zur Beurteilung der Linearitätsabweichung wird analog zu Gleichung (238) berechnet, beurteilt aufgrund der im Fit angepassten Steigung allerdings nur die grundsätzliche Linearität der untersuchten Achse ([Eif15c], S. 7):

$$ld2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} |C_{ms,i} - (m_{fit} \cdot Mr_{ms,i} + b_{fit})|}{n \cdot m}. \quad (240)$$

Zusätzlich zu dem bisher dargelegten Ansatz der Auswertung kann als weitere Möglichkeit für eine Kalibrierung ebenfalls eine Auswertung in Anlehnung an die vorhandenen Normen für Topographie-Messgeräte durchgeführt werden. Dementsprechend kann die Übertragungsfunktion der Achse gemäß DIN EN ISO 25178-603 analog zur 2D-Auswertung aus **Kapitel 6.1.1.2** berechnet werden ([25178-603], S. 7):

$$\check{U}F_i = (C_{tar,i}, C_{ms,i}), \quad i = 1, 2, \dots, m \cdot n. \quad (241)$$

In diese Darstellung wird eine Gerade nach dem Verfahren der kleinsten Abweichungsquadrate eingepasst (vgl. **Kapitel 6.1.1.2**):

$$\check{C}_{fit} = (C_{fit,i}), \quad C_{fit,i} = m_{fit} \cdot C_{tar,i} + b_{fit}, \quad i = 1, 2, \dots, m \cdot n. \quad (242)$$

Mit den Parametern (nach [Bro08], S. 846):

$$m_{fit} = \frac{\sum_{j=1}^{n-m} (C_{tar,j} - \bar{C}_{tar}) \cdot (C_{ms,j} - \bar{C}_{ms})}{\sum_{i=1}^{n-m} (C_{tar,i} - \bar{C}_{tar})^2}, \quad b_{fit} = \bar{C}_{ms} - m_{fit} \cdot \bar{C}_{ms}. \quad (243)$$

Die Parameter α_z , ld_{ISO} , α_{z80} und ld_{ISO80} können analog zu Gleichung (224)-(226) berechnet werden.

Eine ideale, virtuelle Abtastung der in **Abbildung 32 b**) ([Eif15c], S. 7) vorgestellten Geometrie führt auf die Soll-Rauheitskennwerte $S_{a,tar} = 1,697 \mu\text{m}$, $S_{q,tar} = 1,961 \mu\text{m}$ ([Eif15c], S. 8), $S_{z,tar} = 6,798 \mu\text{m}$, $ld1 = 0,0030 \mu\text{m}$, $ld2 = 0,0030 \mu\text{m}$, $\alpha_z = \alpha_{z80} = 1,0000$ sowie $ld_{ISO} = ld_{ISO80} = 0,0000$.

Es ergeben sich bei der generisch implementierten virtuellen Abtastung per Definition diese Sollkennwerte im Rahmen des bei der Iteration definierten Abbruchkriteriums.

Bei dieser Geometrie ist allerdings ebenfalls eine experimentelle Verifikation erforderlich. Diese wurde zunächst mit dem konfokalen Mikroskop (CM) NanoFocus μ Surf mit unterschiedlichen Objektiven durchgeführt ([Eif15c], S. 7 f.). Die zugehörigen Rauheitskennwerte wurden aus je vier Messungen des Normals berechnet ([Eif15c], S. 8). Die Topographie lässt sich dabei jeweils komplett im Gesichtsfeld der jeweiligen Objektiv abbilden. Mittelwerte und Standardabweichungen der jeweils auf Basis der vier Messungen berechneten Rauheitskennwerte sind in **Tabelle 11** ([Eif15c], S. 8) gegeben.

Es kann beobachtet werden, dass das untersuchte Messgerät, unabhängig vom benutzten Objektiv bei der Messung, eine hohe Linearität der z -Achse aufweist ([Eif15c], S. 8). Ähnliche Ergebnisse wurden mit einem Weißlichtinterferometer (WLI, Zygo) erzielt (vgl. **Tabelle 11** ([Eif15c], S. 8)), mit dem zwei Wiederholmessungen durchgeführt worden sind ([Eif15c], S. 8). Die Rauheitskennwerte weichen nur geringfügig von den Soll-Kennwerten ab und streuen ebenfalls im Nanometer-Bereich ([Eif15c], S. 8). Der Einsatz des 50x Objektivs bei der konfokalen Messung führt zu höheren Abweichungen.

Tabelle 11: Linearitätsnormal 3D, Messergebnisse ([Eif15c], S. 8)

	Sollwert	CM 60x Objektiv (NA = 0,9)	CM 50x Objektiv (NA = 0,5)	CM 20x Objektiv (NA = 0,6)	CM 20x Objektiv (NA = 0,45)	WLI 50x Objektiv (NA = 0,75)
$S_a / \mu\text{m}$	1,697	1,618 $\pm 0,002$	1,653 $\pm 0,050$	1,633 $\pm 0,015$	1,638 $\pm 0,016$	1,613 $\pm 0,005$
$S_q / \mu\text{m}$	1,961	1,874 $\pm 0,002$	1,921 $\pm 0,067$	1,887 $\pm 0,016$	1,897 $\pm 0,030$	1,869 $\pm 0,006$
$ld1 / \mu\text{m}$	0,003	0,085 $\pm 0,001$	0,143 $\pm 0,036$	0,082 $\pm 0,003$	0,088 $\pm 0,003$	0,090 $\pm 0,005$
$ld2 / \mu\text{m}$	0,003	0,028 $\pm 0,000$	0,123 $\pm 0,061$	0,050 $\pm 0,006$	0,059 $\pm 0,008$	0,031 $\pm 0,001$

Zur Veranschaulichung dieser Linearität wird für eine Messung mit dem konfokalen Mikroskop unter Anwendung eines 60x Objektivs ein Vergleich zwischen der Soll-Topographie und der gemessenen Topographie in **Abbildung 57** ([Eif15c], S. 8) sowie der zugehörigen Abbott-Kurven in **Abbildung 58** ([Eif15c], S. 8) gezeigt ([Eif15c], S. 7 ff.).

Die Soll-Topographie wird gut abgebildet ([Eif15c], S. 7). Bei Betrachtung der Topographie sind Stitching-Effekte, die aufgrund der Fertigung auftreten, erkennbar ([Eif15c], S. 7). Es kann weiterhin beobachtet werden, dass die zugrunde gelegte Linearität der Abbott-Kurve, wie durch die Linearitätsabweichungen vorhergesagt, gut wiedergegeben wird, was sich darin zeigt, dass die Soll- und Ist-Abbott-Kurve nur geringfügig voneinander abweichen ([Eif15c], S. 9).

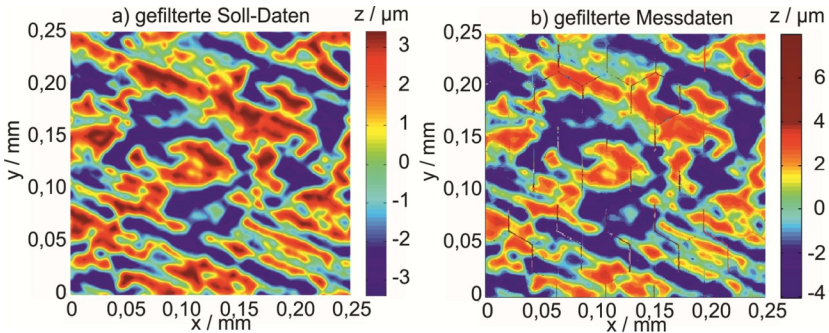


Abbildung 57: 3D-Linearitätsnormal, a) Soll-Datensatz, b) Messdaten
NanoFocus μ Surf, 60x Vergrößerung ([Eif15c], S. 8)

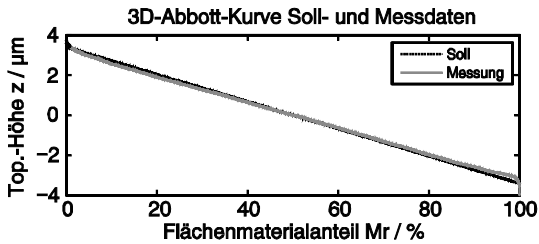


Abbildung 58: Auswertung Abbott-Kurve Linearitätsnormal 3D ([Eif15c], S. 8)

Die in **Kapitel 6.1.1.2** beschriebene Auswertung nach DIN EN ISO 25178-603 [25178-603] kann, wie festgestellt wurde, ebenfalls für 3D-Messungen angewendet werden. Wird diese Auswerteprozedur nach DIN EN ISO 25178-603 [25178-603] eingesetzt, so ergeben sich für die verschiedenen Messgeräte die Ergebnisse in **Tabelle 12**. Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung über alle durchgeführten Messungen.

Da z.B. Verzeichnungen der Topographiehöhen möglich sind, wird eine zusätzliche Auswertung durchgeführt, bei der die äußeren Höhenwerte nicht betrachtet werden (vgl. analog **Kapitel 6.1.1.2**). Die zugehörigen Ergebnisse finden sich ebenfalls in **Tabelle 12**.

Bei Betrachtung der Ergebnisse können beim Vergleich der unterschiedlichen Messgeräte ähnliche Tendenzen wie bei Betrachtung der definierten Linearitätsparameter festgestellt werden. Die Werte für ld_{ISO} streuen teilweise stark, da sie schon durch einzelne Ausreißer stark beeinflusst werden. Dies kann z.B. durch das jeweilige Objektiv bedingt sein. Werden zusätzlich Ausreißer an den Rändern vernachlässigt, lassen sich noch hohe Linearitäten der Messgeräteachsen feststellen.

Tabelle 12: 3D-Linearitätsnormal, Auswertung nach DIN EN ISO 25178-603

Parameter	Sollwert	CM 60x Objektiv (NA = 0,9)	CM 50x Objektiv (NA = 0,5)	CM 20x Objektiv (NA = 0,6)	CM 20x Objektiv (NA = 0,45)	WLI 50x Objektiv (NA = 0,75)
α_z	1,0000	0,956 $\pm 0,001$	0,975 $\pm 0,033$	0,961 $\pm 0,008$	0,965 $\pm 0,012$	0,953 $\pm 0,003$
$ld_{ISO} / \mu m$	0,0000	0,716 $\pm 0,001$	1,336 $\pm 0,923$	1,037 $\pm 1,118$	1,115 $\pm 1,814$	1,031 $\pm 0,150$
α_{z80}	1,0000	0,957 $\pm 0,001$	0,978 $\pm 0,021$	0,978 $\pm 0,008$	0,975 $\pm 0,005$	0,954 $\pm 0,003$
$ld_{ISO80} / \mu m$	0,0000	0,026 $\pm 0,001$	0,130 $\pm 0,062$	0,059 $\pm 0,014$	0,091 $\pm 0,005$	0,027 $\pm 0,002$

6.1.2.2 Ellipso-Höhen-Topometer-Normale

Die Kalibrierstrategie für das EHT besteht darin, den jeweils relevanten Teil des Satzes an Normalen aus **Kapitel 4.2.2** zu messen und die jeweils erfassten Größen mit den Sollwerten zu vergleichen. Da die Eigenschaften des Geräts im Rahmen der Topographieerfassung völlig analog zu konventionellen WLI sind (vgl. [Rai15a], S. 7), wird dieser Aspekt nicht weiter betrachtet. Kalibrierstrategien für optische Topographiemessungen wurden bereits diskutiert.

Interessant ist hingegen die Kalibrierung der drei vorgestellten speziellen Einsatzgebiete des EHT, die mit dem in **Kapitel 4.2.2** beschriebenen Satz an Normalen durchgeführt werden kann:

Zur Kalibrierung der Messung der Materialeigenschaften werden die Normale, die nur ein Material aufweisen (Normale i), ii) und iv) in **Abbildung 33** ([Rai15a], S. 8) mit einem Referenz-Ellipsometer gemessen ([Rai15b], S. 4593 f.). Dies führt auf die Referenzdaten $\Delta_{Si,ref}$, $\Psi_{Si,ref}$, $\Delta_{Al,ref}$, $\Psi_{Al,ref}$, $\Delta_{Pt,ref}$ und $\Psi_{Pt,ref}$ ([Rai15b], S. 4594).

Anschließend wird die identische Messung der ellipsometrischen Winkel mit dem EHT durchgeführt ([Rai15b], S. 4594). Dabei ergeben sich die gemessenen Werte $\Delta_{Si,ms}$, $\Psi_{Si,ms}$, $\Delta_{Al,ms}$, $\Psi_{Al,ms}$, $\Delta_{Pt,ms}$ und $\Psi_{Pt,ms}$ ([Rai15b], S. 4594). Sowohl Referenz- als auch EHT-Daten liegen dabei an einer Vielzahl von Messpunkten vor ([Rai15b], S. 4594). Auf Basis dieser Werte kann eine Justierung der Messung der ellipsometrischen Winkel erfolgen ([Rai15b], S. 4594). Das von Leonhardt beschriebene Vorgehen eines Justierfaktors ([Leo10], S. 626 f.) (vgl. **Kapitel 2.4.3.3**) wurde dabei im Rahmen einer Veröffentlichung [Rai15b] erweitert, wobei jeweils zwei Geraden-Parameter m_Ψ , b_Ψ und m_Δ , b_Δ eingesetzt wurden ([Rai15b], S. 4594). Zur Minimierung der Abweichungen zwischen Soll- und Messdaten wird dabei beispielhaft für die gegebenen Materialien das folgende lineare Gleichungssystem

mit i Messpunkten Aluminium, m Messpunkten Silicium und n Messpunkten Platin zu deren Ermittlung gelöst (vgl. [Rai15b], S. 4594):

$$\begin{pmatrix} \Delta_{Al,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Delta_{Al,ms\ i} & 1 \\ \Delta_{Si,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Delta_{Si,ms\ m} & 1 \\ \Delta_{Pt,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Delta_{Pt,ms\ n} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_{\Delta} \\ b_{\Delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{Al,ref} \\ \vdots \\ \Delta_{Al,ref} \\ \Delta_{Si,ref} \\ \vdots \\ \Delta_{Si,ref} \\ \Delta_{Pt,ref} \\ \vdots \\ \Delta_{Pt,ref} \end{pmatrix} ; \quad \begin{pmatrix} \Psi_{Al,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Psi_{Al,ms\ i} & 1 \\ \Psi_{Si,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Psi_{Si,ms\ m} & 1 \\ \Psi_{Pt,ms\ 1} & 1 \\ \vdots & 1 \\ \Psi_{Pt,ms\ n} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_{\Psi} \\ b_{\Psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_{Al,ref} \\ \vdots \\ \Psi_{Al,ref} \\ \Psi_{Si,ref} \\ \vdots \\ \Psi_{Si,ref} \\ \Psi_{Pt,ref} \\ \vdots \\ \Psi_{Pt,ref} \end{pmatrix} . \quad (244)$$

Mit diesen Parametern wird eine materialunabhängige Justierung der Messwerte durchgeführt, was bedeutet, dass, je mehr Materialien gemessen werden, desto zuverlässiger die Justierung durchgeführt werden kann ([Rai15b], S. 4594):

$$\Delta_{adj} = m_{\Delta} \cdot \Delta_{ms} + b_{\Delta} , \quad \Psi_{adj} = m_{\Psi} \cdot \Psi_{ms} + b_{\Psi} , \quad (245)$$

wobei Δ_{adj} und Ψ_{adj} die justierten ellipsometrischen Winkel bezeichnen.

Die detaillierte Umsetzung dieses Vorgehens wurde in einer separaten Veröffentlichung betrachtet (vgl. [Rai15b]). Wichtig für die Vergleichbarkeit ist, dass bei beiden Messgeräten entweder dieselbe Wellenlänge und derselbe Einfallswinkel genutzt werden, oder aber eine Umrechnung der Werte z.B. mit Gleichung (3) erfolgt.

Nach der Justierung der Materialdatenerfassung wurden weitere Kalibriervorgänge untersucht. Beispielhafte Messergebnisse für alle betrachteten Kalibrierfälle des EHT sind in **Abbildung 59** ([Rai15a], S. 8) zusammengefasst: Messungen zur Materialerkennung sind in den Diagrammen **A**) und **C**) zu sehen, wo Messergebnisse der Normale iii) bzw. vi) dargestellt sind ([Rai15a], S. 8). In Diagramm **A**) kann gezeigt werden, dass sich bei Messung des Gitters mit Materialkontrast der Winkel Δ , wie zu erwarten, stark lokal unterscheidet und somit eine klare Zuordnung der Messpunkte zu den Materialien Aluminium und Silicium erfolgen kann ([Rai15a], S. 8). Eine alternative Darstellung dieses Zusammenhangs ist die sogenannte Materialkarte, die in Diagramm **C**) für eine Messung des Normals vi) gezeigt wird ([Rai15a], S. 8). Dabei werden die einzelnen Messpunkte in ein Δ - Ψ -Koordinatensystem eingetragen ([Rai15a], S. 8). Es können zwei separate Bereiche von Platin und transparentem Siliciumdioxid erkannt werden ([Rai15a], S. 8). Die Zuweisung der Materialien zu den Messpunkten und somit die Materialerkennung kann anhand dieses Diagramms erfolgen ([Rai15a], S. 8).

Am Normal vi) kann auch die Kalibrierstrategie zur Messung transparenter Schichtdicken sowie die entsprechende Höhenkorrektur demonstriert werden ([Rai15a], S. 8). Ergebnisse eines Profils einer solchen Kalibriermessung sind in **Abbildung 59 D)** ([Rai15a], S. 8) dargestellt ([Rai15a], S. 8). Die nominelle Schichtdicke des Gitters beträgt dabei 100 nm ([Rai15a], S. 7). Eine taktile Messung (Bruker DekTak) liefert nach acht Auswertungen einen Referenzwert von $92 \pm 4\text{ nm}$ ([Rai15a], S. 8). Werden die Daten des EHT betrachtet, so ergibt sich vor der Höhenkorrektur und somit unter Annahme der Messung mit einem konventionellen WLI eine gemessene Schichtdicke von nur etwa ca. 25 nm . Wird die Höhenkorrektur nach Leonhardt (Gleichung (65), [Leo10], S. 631) durchgeführt, so kann eine Schichtdicke von etwa 75 nm rekonstruiert werden, was deutlich besser mit dem Referenzwert übereinstimmt. Das Ergebnis zeigt, dass eine Kalibrierung der zugehörigen Eigenschaften möglich ist.

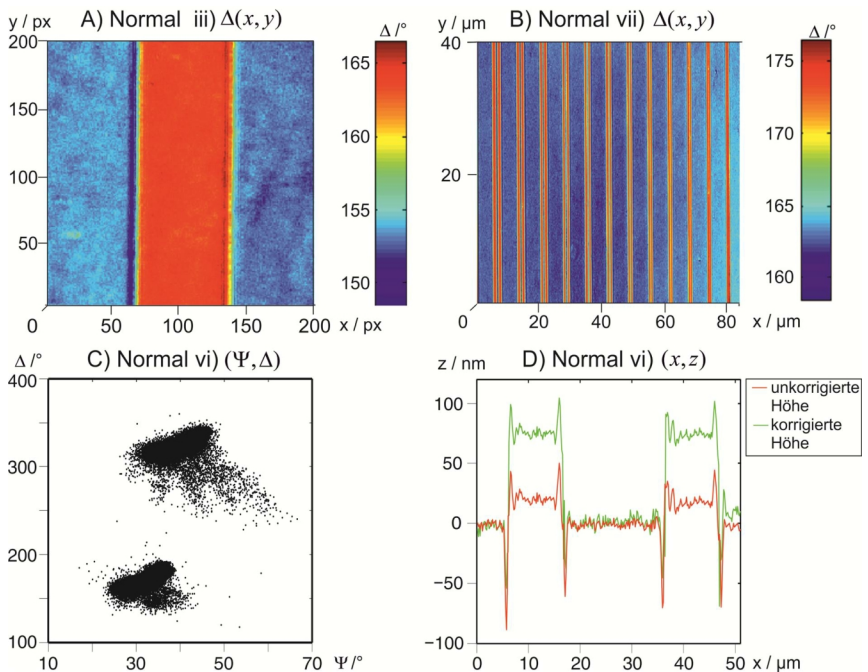


Abbildung 59: Ellipsometer-Normale, Ergebnisse der Kalibrierprozesse;

A) Materialerkennung, B) laterale Materialauflösung,

C) Materialerkennung, D) Höhenkorrektur; ([Rai15a], S. 8)

Weiterhin von Interesse ist die laterale Materialauflösung. Dazu wird je eine Δ - und Ψ -Topographie des Normalen vii) gemessen, das verschiedene Gitterbreiten mit Materialkontrast aufweist ([Rai15a], S. 7). Als Beispiel ist die gemessene Topo-

graphie $\Delta(x, y)$ in **Abbildung 59 B**) ([Rai15a], S. 8) gegeben ([Rai15a], S. 9). Wird aus dieser 3D-Topographie ein Schnitt extrahiert und überprüft, bis zu welcher Gitterbreite noch eine Auflösung des Materialkontrasts erfolgen kann, so wird festgestellt, dass dies bis zu einem lateralen Materialkontrast mit einer Breite von etwa 600 nm der Fall ist ([Rai15a], S. 9). Detaillierte Ergebnisse finden sich ebenfalls in weiteren Veröffentlichungen ([Rai15b], S. 4593 ff.) ([Rai15a], S. 8 f.).

Im Rahmen der Untersuchungen wurde bewiesen, dass alle speziellen Eigenschaften des EHT kalibriert werden können. Die vorgestellten Kalibrierstrategien wurden dazu mit den entwickelten Normalen aus **Kapitel 4.2.2** experimentell verifiziert.

6.1.2.3 CT-Normale

Die Kalibrierung der industriellen CT kann durch einen Vergleich der gemessenen mit den vorgegebenen Rauheitsparametern und somit analog zu der Vorgehensweise konventioneller Raunormale erfolgen. Dieser Vergleich zwischen gemessenen Soll- und Ist-Parametern ist ausreichend, um im Rahmen dieser Untersuchungen zunächst grundlegend zu klären, inwieweit eine Rauheitsmessung und -kalibrierung mithilfe der industriellen CT sinnvoll umsetzbar ist.

Im Rahmen der in der Auslegung implementierten virtuellen Simulation der CT unter Berücksichtigung von Auflösungseffekten (Gleichungen (163)-(164)) kann eine erste virtuelle Simulation des Abtastvorgangs erfolgen. Durch die Berücksichtigung im Rahmen des Auslegungsprozesses ergeben sich virtuell die Soll-Parameter von $R_{a,tar} = 2,400\ \mu\text{m}$, $R_{q,tar} = 2,919\ \mu\text{m}$ und $R_{z,tar} = 12,415\ \mu\text{m}$.

Zur Überprüfung, ob die gefertigte Geometrie (vgl. **Abbildung 49**) mit den Vorgaben zur Fertigung übereinstimmt, wurde eine taktile Messung (Hommel T 8000) ausgeführt ([Eif16], S. 53). Dabei wurden drei Messungen entlang des Außenmantels der Geometrie durchgeführt ([Eif16], S. 53). Die gemessenen Profile wurden unter Berücksichtigung von Filtervor- und -nachlaufstrecken alle $200\ \mu\text{m}$ entlang des kompletten periodischen Profils der Länge 8 mm ausgewertet, so dass sich je 13 Auswertestellen ergaben ([Eif16], S. 53). Die Mittelwerte und Standardabweichungen aller 39 Auswertungen sind in **Tabelle 13** ([Eif16], S. 53) gezeigt ([Eif16], S. 53).

Tabelle 13: CT-Normal, Ergebnisse taktile Referenzmessung ([Eif16], S. 53)

	Sollwert	Hommel T 8000
$R_a / \mu\text{m}$	2,400	$2,386 \pm 0,006$
$R_q / \mu\text{m}$	2,919	$2,895 \pm 0,007$
$R_z / \mu\text{m}$	12,415	$12,743 \pm 0,170$

Nachdem damit gezeigt wurde, dass die gefertigte Geometrie gut mit den Vorgaben übereinstimmt, stellen die taktil gemessenen Oberflächendaten weiterhin den Ausgangspunkt für das in **aRTist** implementierte Simulationsmodell dar. Ein gemessener Datensatz wurde dabei unter Annahme von Rotationssymmetrie zu einem 3D-Modell erweitert und als Geometrie in das Modell geladen.

Es wurde für die Simulationen von einem $(50 \times 50) \text{ mm}$ Detektorschirm mit 1024×1024 Pixeln ausgegangen, woraus $px \approx 0,0488 \text{ mm}$ folgt. Es wurde eine Quelle mit einer Spannung von 195 kV sowie Filtern von 4 mm Al und 1 mm Pb eingesetzt. Als Werkstückmaterial sei reines Titan angenommen.

Die Bestimmung eines geeigneten Simulationsabstands zwischen Quelle und Detektor sowie zwischen Detektor und Werkstück wurde mithilfe von Simulationen durchgeführt. Dabei wurde zur Vereinfachung der Modellierung und des Rechenaufwands keine komplette 3D-Tomographie durchgeführt. Es wurde eine einzelne Röntgenaufnahme simuliert, um herauszufinden, inwieweit sich das Verfahren überhaupt zur Rauheitsmessung eignet. Aus dem Ergebnisbild der Röntgenmessung kann direkt auf die gemessene Materialdicke geschlossen werden, welche dann durch den Mittelschnitt in ein gemessenes Profil umgerechnet und analog an je 13 Auswertestellen ausgewertet wird.

Als Parameter variiert werden der Abstand zwischen Detektor und Quelle sowie der Abstand zwischen Werkstück und Detektor. Diese Optimierung wird unter der Randbedingung eines maximal mit dem Sollwert übereinstimmenden R_a -Wertes durchgeführt. **Abbildung 60** zeigt die entsprechenden Ergebnisse der Simulationen. Zunächst wurde dabei der Abstand zwischen Quelle und Detektor variiert und der Abstand zwischen Werkstück und Detektor konstant zu 20 mm festgelegt. Danach wurde der optimierte Abstandswert von Quelle und Detektor von 650 mm eingesetzt und der Abstand zwischen Werkstück und Detektor variiert. Es wurde ein optimaler Wert von $97,5 \text{ mm}$ ermittelt. Detaillierte Ergebnisse der Simulationen sowie der zugehörigen Rauheitsparameter finden sich in **Anhang C**. Die Simulationsergebnisse wurden analog zur Tastschnittmessung an 13 Stellen ausgewertet.

Bei der Messung mit diesen optimierten Abständen wurden virtuell die Kennwerte $R_a = (2,329 \pm 0,060) \mu\text{m}$, $R_v = (2,837 \pm 0,049) \mu\text{m}$ und $R_z = (10,632 \pm 0,347) \mu\text{m}$ gemessen. Es kann somit gezeigt werden, dass mit realistischen Parametern durchaus akzeptable Ergebnisse im Rahmen der virtuellen Rauheitsmessung mit CT erzielt werden können.

Ob dies auch real verifiziert werden kann, soll durch Messungen überprüft werden. Dabei wurde von der Werth Messtechnik GmbH eine komplette Tomographie des gefertigten Werkstücks durchgeführt und somit eine Rekonstruktion des gemessenen 3D-Objekts ausgeführt ([Eif16], S. 53). Aus diesem rekonstruierten Volumenkörper

wurden entlang des Außenmantels im Abstand von 10° Schnitte abgeleitet, so dass sich 36 Profile für die Auswertung ergaben ([Eif16], S. 53).

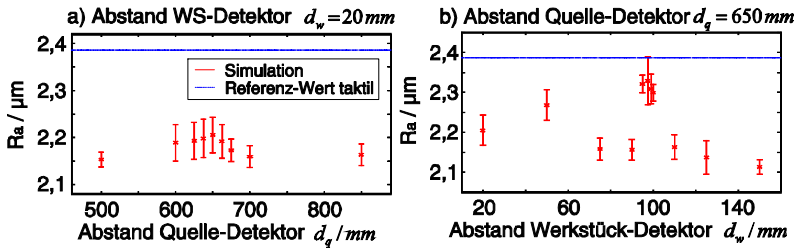


Abbildung 60: Simulation mit aRTist - Ergebnisse für R_a ,

a) variabler Abstand Quelle-Detektor, b) variabler Abstand Werkstück-Detektor

Bei der Messung wurde eine Spannung von 195 kV , ein Filter von 1 mm Sn sowie für die anschließende Rekonstruktion des 3D-Datensatzes eine Voxelgröße in Höhe von $v_x = 3,25 \mu\text{m}$ eingesetzt ([Eif16], S. 53). Die Messung erfolgte im Vergleich zur Simulation teilweise mit abweichenden Prozessparametern. Dabei wurden die extrahierten Profile analog zu den taktill gemessenen Profildaten an je 13 Auswertestellen ausgewertet, was auf 468 Werte für die Rauheitsparameter führt ([Eif16], S. 53).

Die Ergebnisse sind in **Tabelle 14** ([Eif16], S. 53) gezeigt. Auf Basis dieser Messergebnisse kann ebenfalls bestätigt werden, dass die industrielle CT Potential für den Einsatz in der Rauheitsmesstechnik aufweist ([Eif16], S. 53). Dies sollte im Rahmen weiterführender Arbeiten untersucht werden.

Tabelle 14: CT-Normal Ergebnisse, Messung mit Mikro-CT ([Eif16], S. 53)

	Sollwert	Mikro CT-Gerät
$R_a / \mu\text{m}$	2,400	$2,055 \pm 0,097$
$R_q / \mu\text{m}$	2,919	$2,491 \pm 0,118$
$R_z / \mu\text{m}$	12,415	$11,076 \pm 0,565$

6.1.2.4 Streulicht-Normale

Wichtig beim praktischen Einsatz der Streulicht-Normale ist die Implementierung eines einfachen Kalibrierablaufs. Die ausgelegten Normale bieten hierzu Möglichkeiten. Es muss eine gute Ausrichtung erfolgen, damit der gewünschte A_q -Wert gemessen werden kann (vgl. [See16], S. 7). Diese Messung kann aufgrund der an die Leuchtfleckgröße angepassten periodischen Fortsetzung der Profile an jedem beliebigen Punkt der Normale erfolgen, wenn ideale Bedingungen angenommen werden (vgl. [See16], S. 7 ff.).

Am Rand jedes Normals wurde zur Ausrichtung des Normals eine Kalotte vorgesehen ([See16], S. 7). Dabei wird der Leuchtfleck auf das Minimum hin ausgerichtet und dann das Normal solange gedreht, bis die maximale Streuung des Lichts auftritt, was bei Betrachtung des A_q -Werts festgestellt werden kann ([See16], S. 7). Bei dieser Ausrichtung kann von einer Orthogonalität zwischen Diodenzeile und der Drehstruktur ausgegangen werden ([See16], S. 7). Das Rauheitsprofil des untersuchten Normals kann anschließend durch laterales Verfahren des Messobjekts gemessen werden.

Bei der idealen, virtuellen Messung wird der kalibrierte A_q -Wert von $A_q = 30$ für beide Varianten des Normals per Definition im Rahmen des definierten Abbruchkriteriums abgebildet. Die nichtideale Abtastung wird ebenfalls simuliert. Dabei wird eine Verkippung des Sensors bei der Messung simuliert, die sich in einem Offset der Streuwinkelverteilung äußert. Weiterhin kann eine Variation der Größe des Leuchtfleckdurchmessers simuliert werden, welche in der Realität auftreten kann. Die Ergebnisse dieser nichtidealen virtuellen Abtastungen sind in **Anhang D** gegeben. Auf Basis dieser virtuellen Ergebnisse kann gefolgert werden, dass beide Normale zur Kalibrierung des A_q -Wertes geeignet sind: Der definierte Wert von A_q wird trotz möglicher Abweichungen z.B. durch Verkippung im Rahmen bestimmter Grenzen zuverlässig gemessen.

Nach Fertigung der beiden Normale wurden ebenfalls reale Messungen durchgeführt ([See16], S. 7 ff.). Dabei wurden taktile Referenzmessungen ausgeführt, um das Fertigungsergebnis zu beurteilen ([See16], S. 7). Es wurden bei jedem der beiden Normale acht Tastschnitte im Abstand von 45° aufgenommen und anschließend gefiltert, um kurzweilige Störanteile aus dem Profil zu entfernen ($\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$) ([See16], S. 7). Diese Profile wurden an jeweils 35 Auswertestellen im Abstand von je $100 \mu\text{m}$ zueinander ausgewertet ([See16], S. 7 f.).

Der dabei jeweils extrahierte Profilausschnitt der Länge eines Leuchtfleckdurchmessers wurde der virtuellen Streulichtauswertung (vgl. **Kapitel 3.2.4**) zugeführt, um den so generierten A_q -Wert zu ermitteln ([See16], S. 7). Dabei ergaben sich auf Basis der 280 Einzelauswertungen die A_q -Werte in **Tabelle 15** ([See16], S. 8). Normal 1 bezeichnet das auf Basis einer realen Bauteiloberfläche ausgelegte Normal, Normal 2 die Geometrie in Anlehnung an die gaußsche Fehlerfunktion.

Tabelle 15: A_q -Auswertung auf Basis der taktilen Messdaten ([See16], S. 8)

Kenngröße	Sollwert	Hommel Nanoscan
Normal 1 (reale Oberfläche) $A_{q,ms}$	30,00	20,61 ± 0,22
Normal 2 (gaußsche Fehlerfunktion) $A_{q,ms}$	30,00	29,54 ± 0,21

Anschließend wurden Messungen unter Anwendung des Streulichtsenors Optosurf OS 500 durchgeführt ([See16], S. 8). Dabei wurden beide Werkstücke auf einer Ebene positioniert, in allen Achsen u.a. mit der vorgesehenen Rille ausgerichtet und gemessen ([See16], S. 8).

Die Messdaten wurden analog zu der taktilen Auswertung an insgesamt 35 gleichmäßig entlang des Profils verteilten Stellen mit jeweils fünf Wiederholmessungen aufgenommen, wobei die Intensitätswerte aller Dioden ausgelesen wurden ([See16], S. 8). Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils allen 175 so berechneten A_q -Werten sind für beide Normale in **Tabelle 16** ([See16], S. 8) gegeben.

Tabelle 16: A_q -Auswertung, Optosurf OS 500 ([See16], S. 8)

Kenngröße	Sollwert	Optosurf OS 500
Normal 1 (reale Oberfläche) $A_{q,ms}$	30,00	22,68 ± 0,43
Normal 2 (gaußsche Fehlerfunktion) $A_{q,ms}$	30,00	28,14 ± 0,14

Bei Betrachtung der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die optisch und taktil gemessenen Werte bei beiden Normalen gut übereinstimmen ([See16], S. 8). Dies bestätigt die Funktion des Modells zur virtuellen Messung ([See16], S. 8). Der A_q -Wert des ersten Normals entspricht nicht den Vorgaben, was durch die hohe Komplexität der Oberfläche mit einer sehr kurzen Periodenlänge begründet werden kann ([See16], S. 8). Da die Steigung des Profils zu seiner Berechnung eingesetzt wird, ist der Parameter A_q zudem ein sensibles Kriterium ([See16], S. 8). Beim zweiten Normal, das eine einfache Struktur aufweist, kann eine bessere Übereinstimmung erzielt werden ([See16], S. 8 f.). Beide Normale bilden allerdings einen A_q -Wert sehr stabil ab und sind somit zur Kalibrierung geeignet ([See16], S. 8 f.).

6.1.3 Normale für pneumatische Messgeräte

Wie bereits in **Kapitel 4.3** dargelegt wurde, soll mit der Optimierung des Pneumatik-Normals insbesondere eine Kalibrierung mittels einer Absolutmessung erreicht werden ([Eif15a], S. 89). Dabei soll im Rahmen der erarbeiteten Kalibrierstrategie die Erfassung der pneumatischen Kennlinie, der Geometrielemente sowie des frequenz- und amplitudenabhängigen Glättungsverhaltens, zum Vergleich mit den entsprechenden Sollwerten, durchgeführt werden ([Eif15a], S. 89) ([Eif14], S. 29). Der dabei eingesetzte Messaufbau ist stark mit der empfohlenen Kalibrierstrategie verflochten und wird in **Abbildung 61** ([Eif15a], S. 90) dargestellt.

Im Kalibrierablauf wird dabei zunächst die Position zwischen dem mithilfe einer Linearachse verfahrenen Normal sowie der Messdüse definiert (**Abbildung 61 a**) ([Eif15a], S. 90) ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 91). Dazu wird der Kontakt zwischen Messdüse und der dafür vorgesehenen Positionierkante hergestellt und automatisch überprüft, da dieser Kontakt zur Schließung eines angebrachten Stromkreises führt ([Eif15a], S. 91) ([Eif14], S. 30 f.). Nach diesem Schritt ist die absolute Position des Sensors bekannt ([Eif15a], S. 91).

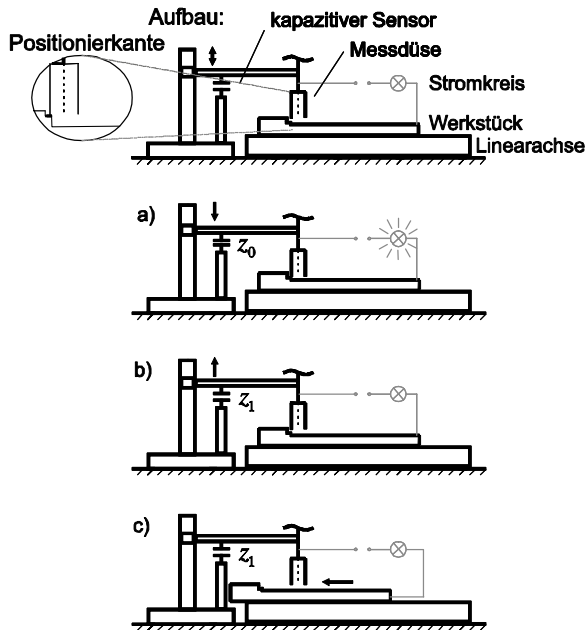


Abbildung 61: Messaufbau zur experimentellen pneumatischen Verifikation sowie zugehöriger Kalibrierablauf; a) Positionierung, b) kapazitive Referenzmessung der Verschiebung, c) pneumatische Abtastung; ([Eif15a], S. 90)

Im zweiten Schritt wird die Messdüse von der Positionierkante abgehoben, wobei die relative Lageänderung des pneumatischen Sensors durch einen kapazitiven Referenzsensor, der am Stativ der Messeinrichtung angebracht ist, aufgenommen wird (**Abbildung 61 b**) ([Eif15a], S. 90) ([Eif15a], S. 91) ([Eif14], S. 31). Die Wiederholgenauigkeit dieser Positionierung kann zu etwa $\pm 3 \mu\text{m}$ ermittelt werden, wenn ein Vertrauensintervall von 95% vorausgesetzt wird ([Eif15a], S. 91) ([Eif14], S. 31).

Anschließend wird, wie in **Abbildung 61 c**) ([Eif15a], S. 90) dargestellt, die horizontale Verschiebung des Normals mithilfe der Linearachse ausgeführt, wobei

gleichzeitig im Rahmen der eigentlichen Messung der Messdruck aufgenommen wird ([Eif15a], S. 91).

Dieser Kalibrierprozess hat grundsätzlich das Potential für eine automatisierte Anwendung im Rahmen des industriellen Serieneinsatzes pneumatischer Abstandssensoren ([Eif14], S. 31) ([Eif15a], S. 91). Eine automatische Ausrichtung der Messeinrichtung ist aufgrund der vorgesehenen Referenzfläche am Normal und des Stromkreises zur Positionierungsüberprüfung möglich ([Eif14], S. 31) ([Eif15a], S. 91). Ziel der Kalibrierung ist eine Korrektur möglicher Abweichungen der Sensorkennlinie ([Eif14], S. 31) ([Eif15a], S. 91).

Zur Beurteilung des gefertigten Normals wurde im ersten Schritt eine Referenzmessung mit dem Tastschnittgerät Hommel T 8000 durchgeführt ([Eif15a], S. 89). Da die Fertigung wie in **Kapitel 5.5** beschrieben unter Anwendung eines Plandrehprozesses ausgeführt wurde, ist kein Ausrichten des Datensatzes mit einem Filter erforderlich, da der Tastschnitt nicht auf dem Zenit des gekrümmten Profils gemessen werden muss ([Eif15a], S. 89). Die ungefilterten und fusionierten Messdaten sind in **Abbildung 62** ([Eif14], S. 30) dargestellt ([Eif15a], S. 89). Die fertigungsbedingte Geradheitsabweichung beträgt ca. $3\ \mu\text{m}$ bei einer Länge des Profils von $135\ \text{mm}$ ([Eif15a], S. 89 f.). Das Umkehrspiel des Werkzeug-Vorschubs verursacht ebenfalls lokal kleinere Abweichungen.

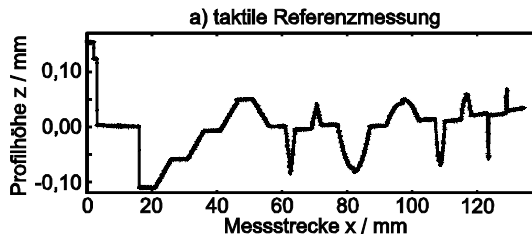


Abbildung 62: Pneumatik-Normal, Referenzmessung (Hommel T 8000), ohne Filterung ([Eif14], S. 30)

Analog zu den bisher betrachteten Normalen soll eine Untersuchung der virtuellen Abtastung der Geometrie erfolgen. Dabei wurde die Abtastung sowohl der vorgegebenen Soll-Daten als auch der taktil gemessenen Referenzdaten unter Anwendung der geometrischen Beschreibung zur Charakterisierung der lateralen Filterwirkung (vgl. **Kapitel 3.3.2**) ausgeführt ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 90). Das Ergebnis für die Referenzdaten s_{filtrist} ist dabei in **Abbildung 63 a**) ([Eif14], S. 31) dargestellt. Die Referenzdaten selbst sind zur Illustration von Effekten bei der Abtastung in grau gegeben ([Eif15a], S. 90) ([Eif14], S. 30).

Weiterhin wurde auch hier eine CFD-Simulation mit analogen Sensor-Parametern wie in **Kapitel 4.3** bei der Abtastung des Prototyps sowie einer kleinen Vorschub-

geschwindigkeit des Werkstücks durchgeführt ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 90). Die aus zwei Simulationen fusionierten Ergebnisdaten unter Annahme der Sollgeometrie s_{CFD} sind in **Abbildung 63 b**) ([Eif14], S. 31) gezeigt, wobei auch hier die zugehörige Eingangsoberfläche in grau gezeigt wird ([Eif14], S. 30) ([Eif15a], S. 90).

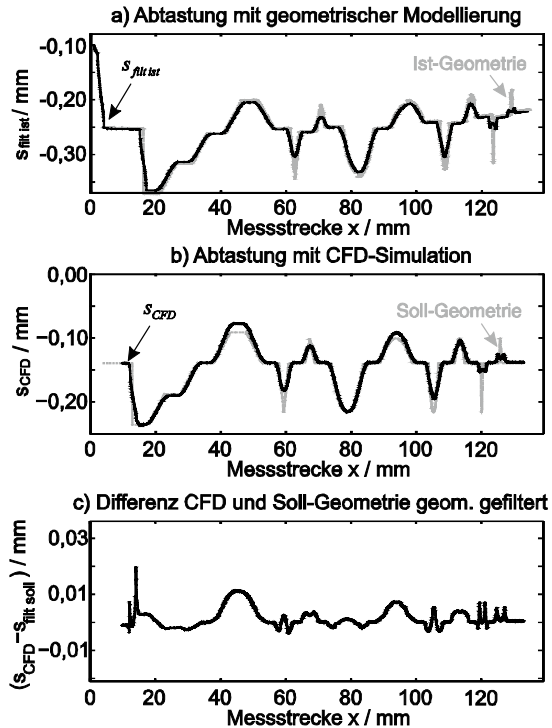


Abbildung 63: Virtuelle Abtastung des Pneumatik-Normals – Ergebnisse;
a) geometrisches Modell, b) CFD, c) Differenz; ([Eif14], S. 31 f.)

Beide Herangehensweisen zur virtuellen Messung führen zu der theoretisch erwarteten Glättung der Oberflächendaten, die durch die Bessel-Funktion beschrieben werden kann ([Eif15a], S. 90) (vgl. **Kapitel 4.3** sowie ([Eif15a], S. 88)). Zum Vergleich der beiden Methoden ist in **Abbildung 63 c**) ([Eif14], S. 32) die Differenz zwischen den Ergebnissen der Abtastung mit CFD sowie den Daten bei Anwendung des geometrischen Modells auf die Sollgeometrie ($s_{fit\,soll}$) dargestellt ([Eif14], S. 31) ([Eif15a], S. 91 f.).

Die Abweichung, die zwischen den beiden Methoden auftritt, kann darauf zurückgeführt werden, dass im CFD-Modell Reibungsverluste berücksichtigt werden

und somit eine etwas stärkere Filterung der Oberfläche auftritt ([Eif15a], S. 92) ([Eif14], S. 31 f.).

Die experimentelle Überprüfung der Ergebnisse wird mit einer Messung unter Anwendung des Druckwandlers Hommel TPE 200 auf Basis der bereits zu Beginn des Kapitels vorgestellten Kalibrierstrategie (vgl. [Eif15a], S. 90 f.) durchgeführt. Die Ergebnisse s_{mess} der realen Abtastung, die ebenfalls in zwei separaten Messungen aufgenommen wurden, sind in **Abbildung 64 a)** ([Eif14], S. 31) dargestellt ([Eif15a], S. 91) ([Eif14], S. 30 f.).

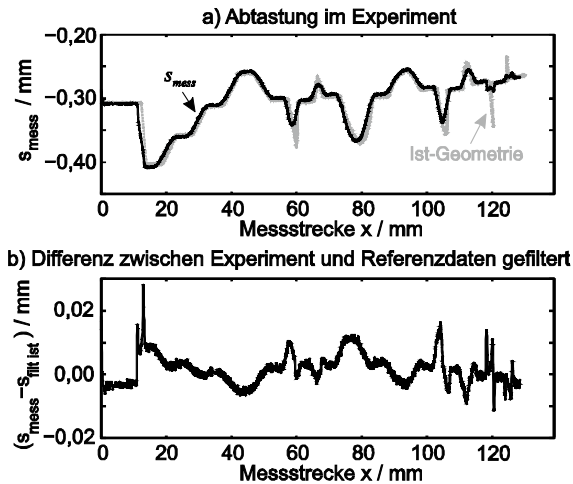


Abbildung 64: Experimentelle Untersuchung des Pneumatik-Normals - Ergebnisse;
a) Experiment, b) Differenz zu geometrischer Filterung; ([Eif14], S. 31 f.)

Diese Ergebnisse können zusammen mit den Ergebnissen der geometrischen Filterung der Daten der taktilen Messung (vgl. **Abbildung 62** ([Eif14], S. 30)) betrachtet werden, wozu die entsprechende Differenz zwischen den beiden Datensätzen in **Abbildung 64 b)** ([Eif14], S. 32) wiedergegeben wird ([Eif14], S. 31) ([Eif15a], S. 92). Im Experiment tritt ebenfalls Reibung auf, was analog dazu führt, dass die Glättung der Geometrie etwas deutlicher beobachtet werden kann ([Eif14], S. 31 f.) ([Eif15a], S. 92).

Zusammenfassend sollte jedoch bedacht werden, dass die geometrische Modellierung, im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren, nur wenig Aufwand erfordert und mit diesem einfachen Modell bereits viele Zusammenhänge, die im Rahmen der pneumatischen Abstandsmessung auftreten, mit einer zuverlässigen Abschätzung beschrieben werden können ([Eif14], S. 32) ([Eif15a], S. 92).

6.2 Unsicherheitsbetrachtung

Zu Beginn wurde im Rahmen der Definition des Normals konstatiert: Ein Hauptzweck beim Einsatz von Normalen ist der Wunsch, eine Aussage bezüglich der Messunsicherheit treffen zu können ([25178-70], S. 6). Natürlich sind diese Aussage selbst sowie der Auslegungsprozess der Normale mit eigenen Unsicherheiten behaftet. Dazu sollen Betrachtungen durchgeführt werden. Letztendlich stellt sich dabei die Frage, welche Unsicherheiten im Rahmen des virtuellen Auslegungsprozesses (vgl. **Abbildung 25**) auftreten bzw. welche Abweichungen zur Realität zu erwarten sind.

Grundsätzlich müssten für eine Abschätzung sämtliche relevanten Parameter berücksichtigt werden, teilweise gibt es jedoch Einflüsse, die vernachlässigt werden können. Das grundsätzliche Vorgehen der nachfolgend angestellten Unsicherheitsbetrachtung wird dabei anhand der am häufigsten genutzten Messkette (Fertigung mithilfe eines UP-Drehprozesses sowie Auswertung profilhafter Rauheitskennwerte) demonstriert.

Die Gesamtunsicherheit der Messkette wird dabei zunächst für einen einzelnen Messpunkt definiert und berechnet ($u_{p,ges}$), um anschließend die zugehörigen Parameterunsicherheiten abzuleiten. Diese Punktunsicherheit setzt sich aus der Punktunsicherheit der Fertigung $u_{p,manuf}$, der Punktunsicherheit der Messung $u_{p,meas}$ und der Punktunsicherheit des Auswerteprozesses $u_{p,eva}$ zusammen, wobei entsprechend der Abweichungsfortpflanzung/GUM unter Annahme unkorrelierter Einzelunsicherheiten eine quadratische Addition der Einzelterme erfolgt ([13005], S. 25) ([14253-2], S. 9):

$$u_{p,ges} = \sqrt{u_{p,manuf}^2 + u_{p,meas}^2 + u_{p,eva}^2} . \quad (246)$$

Entsprechend dieser einzelnen Beiträge zur Unsicherheit der untersuchten Normale wird das nachfolgende Kapitel strukturiert: Die einzelnen genannten Beiträge werden jeweils separat untersucht und beschrieben.

Nachdem dieser Wert der kombinierten Standardunsicherheit $u_{p,ges}$ abgeschätzt wurde, kann unter Anwendung des Erweiterungsfaktors k_e die erweiterte Unsicherheit U_p beschrieben werden ([14253-2], S. 9):

$$U_p = k_e \cdot u_{p,ges} . \quad (247)$$

Auf Basis der jeweiligen Ergebnisse der Gleichungen (246) und (247) wird später eine Betrachtung der Auswirkungen dieser Punktunsicherheit auf die zugehörigen auszuwertenden Rauheitsparameter durchgeführt. Zunächst sei jedoch die Unsicherheitskomponente $u_{p,manuf}$, die aufgrund der fertigungstechnischen Einflüsse bedingt wird, erläutert.

6.2.1 Unsicherheit des Fertigungsprozesses

Innerhalb aller Fertigungsprozesse treten Abweichungen auf ([Bod92], S. 4). Diese sollen nachfolgend möglichst genau charakterisiert werden. Die Betrachtung soll für den am häufigsten genutzten Fertigungsprozess, das Ultrapräzisionsdrehen, gezeigt werden. Da dieses Verfahren ebenfalls modelliert wurde, kann eine Betrachtung im Rahmen der gegebenen Signalkette durchgeführt werden. Die Unsicherheit der Fertigung soll, wie beschrieben, für einen einzelnen Messpunkt ermittelt werden.

Die Unsicherheiten durch die geometrischen Einflüsse der Werkzeugschneide sind im Wesentlichen durch die maximale Punktunsicherheit des Werkzeugs selbst charakterisiert. Entsprechend der durchgeführten Simulationen des Fertigungsprozesses ist eine Beschreibung möglich. Die Unsicherheit bei der Messung des Werkzeugs wurde dabei im Rahmen von **Kapitel 5.2** beschrieben.

Da die Punktunsicherheit für jeden Profilpunkt unterschiedlich ist, wird die Ermittlung mithilfe einer Simulation des Fertigungsprozesses ausgeführt. Demnach werden virtuell eine Fertigung des Eingangsdatensatzes $\vec{z}_0(x)$ zunächst unter Annahme der idealen Werkzeuggeometrie $\vec{t}_{M,id}(x)$, bei der sich das ideal gefertigte Profil $\vec{z}_{e,id}(x)$ ergibt:

$$\vec{z}_{e,id}(x) = (\vec{z}_0(x) \oplus \vec{t}_{M,id}(x)) \odot \vec{t}_{M,id}(x), \quad (248)$$

sowie anschließend eine nichtideale Simulation mit der Werkzeuggeometrie $\vec{t}_{M,nid}(x)$ ausgeführt:

$$\vec{z}_{e,nid}(x) = (\vec{z}_0(x) \oplus \vec{t}_{M,nid}(x)) \odot \vec{t}_{M,nid}(x), \quad (249)$$

welche auf das nichtideal gefertigte Profil $\vec{z}_{e,nid}(x)$ führt, um die entsprechende Unsicherheit zu ermitteln.

Ziel ist dabei die empirische Ermittlung der mittleren sowie der maximalen Punktunsicherheit, die durch eine Abweichung des Werkzeugs hervorgerufen wird.

Demnach wird zur Ermittlung die Betrachtung der Differenz der beiden Profile ausgeführt:

$$\Delta \vec{z}_{m,nid}(x) = \vec{z}_{e,nid}(x) - \vec{z}_{e,id}(x). \quad (250)$$

Dabei ist der Maximalwert dieser Abweichung von Interesse, um im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung den Fall der theoretisch größten Punktabweichung zu beschreiben:

$$u_{p,manuf,max} = \max \{ \Delta \vec{z}_{m,nid}(x) \}. \quad (251)$$

Weiterhin wird der durchschnittliche Betrag dieser Abweichung unter Annahme von n Messpunkten betrachtet:

$$\bar{u}_{p,manuf} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta \bar{z}_{m,nid}(x_i)}{n}. \quad (252)$$

Als Parameter für das virtuelle Fertigungsergebnis können dabei die Eingangsdaten für die Fertigung $\bar{z}_0(x)$, die Breite des Werkzeugs b_{tool} sowie sein Öffnungswinkel φ_{tool} festgelegt werden:

$$\bar{z}_e(x) = f(\bar{z}_0(x), b_{tool}, \varphi_{tool}). \quad (253)$$

Entsprechend ergibt sich auf Basis dieser Parameter für die kombinierte Varianz nach GUM (vgl. [13005], S. 25):

$$u_{p,manuf} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{z}_e(x)}{\partial \bar{z}_0(x)}\right)^2 \cdot u^2(\bar{z}_0(x)) + \left(\frac{\partial \bar{z}_e(x)}{\partial b_{tool}}\right)^2 \cdot u^2(b_{tool}) + \left(\frac{\partial \bar{z}_e(x)}{\partial \varphi_{tool}}\right)^2 \cdot u^2(\varphi_{tool})}. \quad (254)$$

Der Unsicherheitsbeitrag des Eingangsdatensatzes $\bar{z}_0(x)$ wird durch numerische Abweichungen charakterisiert und kann somit vernachlässigt werden:

$$\left(\frac{\partial \bar{z}_e(x)}{\partial \bar{z}_0(x)}\right)^2 \cdot u^2(\bar{z}_0(x)) \approx 0. \quad (255)$$

Die weiteren Terme der Abweichungsfortplanzung können in Abhängigkeit der Unsicherheit bei der Messung des Werkzeugs (vgl. **Kapitel 5.2**) dargestellt werden und führen dann auf die allgemeine Funktion zur Charakterisierung der geometrischen Unsicherheit des Fertigungsprozesses im Rahmen der Ultra-präzisionszerspanung.

Die Funktion $f(\bar{z}_0(x), b_{tool}, \varphi_{tool})$ für den Prozess wird dabei nicht allgemein dargestellt, sondern ein simulativer Ansatz über virtuelle Fertigungsprozesse gewählt. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die aufgrund der Pixelgröße auftretende Unsicherheit bei der Vermessung des Werkzeugs einer Gleichverteilung unterliegt. Die Breite dieser Verteilungen wurde bereits in **Kapitel 5.2** charakterisiert.

Auf Basis dieser Breite kann die Standardabweichung nach DIN EN ISO 14253-2 ermittelt werden. Dabei gilt für die Standardabweichung unter Annahme einer Gleichverteilung mit den Grenzwerten $\pm a$ ([14253-2, S. 20]):

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 0,6 \cdot a. \quad (256)$$

Entsprechend ergeben sich für die Untersuchung die folgenden Standardunsicherheiten:

$$\sigma(b_{\text{tool}}) = \frac{0,625 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,3608 \mu\text{m}, \quad \sigma(\varphi_{\text{tool}}) = \frac{1,7^\circ}{\sqrt{3}} = 0,9815^\circ. \quad (257)$$

Der Funktionszusammenhang zwischen der Abweichung des Werkzeugs und des gefertigten Profilpunkts (Gleichung (254)) ist vom kompletten Profil abhängig und kann nicht allgemein beschrieben werden. Die Messunsicherheitsbeiträge werden daher empirisch mithilfe von Simulationen des Fertigungsprozesses ermittelt und anschließend eine Abweichungsfortpflanzung berechnet:

$$u_{p,\text{manuf}} = \sqrt{u_{p,\text{manuf}}^2 \{b_{\text{tool}}\} + u_{p,\text{manuf}}^2 \{\varphi_{\text{tool}}\}}, \quad (258)$$

wobei $u_{p,\text{manuf}}\{\cdot\}$ die zugehörige Messpunktunsicherheit aufgrund der Variation des jeweiligen Parameters bezeichnet. Die Simulationen wurden für alle vier Normale, die für ein taktiles Anwendungsgebiet vorgesehen sind, ausgeführt. Die Maximal- und Durchschnittswerte der jeweils auftretenden Punktabweichungen des Profils ($u_{p,\text{manuf,max}}$ bzw. $\bar{u}_{p,\text{manuf}}$) sind unter Berücksichtigung der Werte der Standardabweichungen aus Gleichung (257) in **Tabelle 17** gegeben. Die Werte wurden dabei auf 1nm genau gerundet, so dass besonders kleine Abweichungen vernachlässigt werden.

Tabelle 17: Simulierte Unsicherheitsbeiträge der UP-Drehfertigung

Randbedingung	R _k -Normal	Linearitäts-normal	DFT-Normal	W _{sa} -Normal
$u_{p,\text{manuf,max}} \{b_{\text{tool}} + \sigma(b_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,001	0,009	0,028	0,174
$u_{p,\text{manuf,max}} \{b_{\text{tool}} - \sigma(b_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,077	0,037	0,404	0,172
$\bar{u}_{p,\text{manuf}} \{b_{\text{tool}} + \sigma(b_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,000	0,000	0,000	0,001
$\bar{u}_{p,\text{manuf}} \{b_{\text{tool}} - \sigma(b_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,004	0,001	0,004	0,000
$u_{p,\text{manuf,max}} \{\varphi_{\text{tool}} + \sigma(\varphi_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,000	0,000	0,000	0,182
$u_{p,\text{manuf,max}} \{\varphi_{\text{tool}} - \sigma(\varphi_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,000	0,000	0,103	0,182
$\bar{u}_{p,\text{manuf}} \{\varphi_{\text{tool}} + \sigma(\varphi_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,000	0,000	0,000	0,000
$\bar{u}_{p,\text{manuf}} \{\varphi_{\text{tool}} - \sigma(\varphi_{\text{tool}})\} / \mu\text{m}$	0,000	0,000	0,000	0,000

Die Unsicherheit, die aufgrund der Vermessung der Werkzeuggeometrie zurückbleibt, tritt nahezu nur punktuell auf. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse ist festzustellen, dass eine Abweichung des Öffnungswinkels nur teilweise lokale Auswirkungen hat. Der Grund dafür ist, dass das Werkzeug bei den zu fertigenden Strukturen im Regelfall nur mit der Spitze im Eingriff ist. Vor allem bei einer zu klein

angenommenen Breite des Werkzeugs lassen sich hingegen Effekte, auch nach Mittelung der Abweichung entlang des gesamten Profils, feststellen.

Weitere Einflussfaktoren wurden allerdings nicht berücksichtigt, da das Werkzeug den Haupteinfluss auf das Fertigungsergebnis darstellt und die virtuelle Beschreibung der Fertigung über rein geometrische Zusammenhänge erfolgt. U.a. durch Schwingungen, Temperatureinflüsse o.ä. können allerdings weitere, auch gravierende Abweichungen verursacht werden.

Die Unsicherheitsbilanz des Fertigungsprozesses nach Gleichung (258) ergibt somit die folgenden Werte in **Tabelle 18** für die kombinierte sowie die erweiterte Standardunsicherheit. Dabei wird jeweils der Maximalwert von positiver und negativer Profilabweichung, die durch Variation der Werkzeuggeometrie verursacht wurde, eingesetzt.

Tabelle 18: Unsicherheitsbilanz Fertigungsprozess

Randbedingung	R _k -Normal	Linearitäts-normal	DFT-Normal	W _{sa} -Normal
$u_{p,manuf,max}(k_e = 1) / \mu m$	0,077	0,037	0,417	0,252
$u_{p,manuf,max}(k_e = 2) / \mu m$	0,154	0,074	0,834	0,504
$\bar{u}_{p,manuf}(k_e = 1) / \mu m$	0,004	0,001	0,004	0,001
$\bar{u}_{p,manuf}(k_e = 2) / \mu m$	0,008	0,002	0,008	0,002

Es kann festgestellt werden: Je nach Beschaffenheit des Profils können Abweichungen der Werkzeuggeometrie lokal zu nicht unerheblichen Abweichungen des Profils führen. Diese Fertigungsabweichungen wiederum führen zu einer systematischen Abweichung der gefertigten Oberfläche, allerdings lokal begrenzt und nur punktuell.

Die durchschnittliche Abweichung der Profilpunkte liegt dagegen nur im einstelligen Nanometer-Bereich. Fertigungsabweichungen können mit einer exakten Messung weiterhin möglicherweise durch eine Justierung behoben werden. Das Thema der Messunsicherheit wird im nachfolgenden Abschnitt behandelt.

6.2.2 Unsicherheit des Messprozesses

Die Unsicherheit von Messprozessen ist in der Vergangenheit im Rahmen vieler Untersuchungen behandelt worden und kann für die gängigen Messverfahren charakterisiert werden. Aus Gründen des Umfangs wird daher zur Beschreibung dieser Zusammenhänge auf vorhandene Ansätze zurückgegriffen.

Im Wesentlichen bekannt sind Werte zur Charakterisierung der Standardunsicherheit jedes Messpunkts. Da eine ideale, virtuelle Abtastung für die Auslegung des Normals zugrunde gelegt wurde, sind jegliche Unsicherheitsfaktoren bisher unberücksichtigt.

Sämtliche Nichtidealitäten spiegeln sich bisher somit nicht in der Geometrie des gefertigten Normals wieder. Typische Werte für die Punktunsicherheit des Tastschnittverfahrens, die aus entsprechender Literatur entnommen wurden, sind in **Tabelle 19** gegeben.

Unsicherheitsbilanzen anderer Messverfahren finden sich z.B. für Weißlichtinterferometer (VDI 2655 Blatt 1.1 [VDI08] [Tan08]), konfokale Mikroskope (VDI 2655 Blatt 1.2 [VDI10]) sowie pneumatische Abstandssensoren ([Sch15c], S. 105 ff.) ebenfalls in der Literatur.

Tabelle 19: Unsicherheitswerte für das Tastschnittverfahren

Typische Unsicherheitswerte Tastschnittverfahren	Randbedingungen
$u_{p,meas}^2 = 181 \text{ nm}^2$ ([Krü07a], S. 534)	(R-Profil, mit λ_s -Filter)
$u_{p,meas}^2 = 226,3 \text{ nm}^2$ ([4-2-1], S. 24)	(P-Profil, mit λ_s -Filter)
$u_{p,meas}^2 = 349 \text{ nm}^2$ ([Krü07a], S. 533)	(R-Profil, ohne λ_s -Filter)
$u_{p,meas}^2 = 761,6 \text{ nm}^2$ ([4-2-1], S. 23)	(P-Profil, ohne λ_s -Filter)
$u_{p,meas}^2 = 557 \text{ nm}^2$ ([Krü07a], S. 533)	(P-Profil, ohne λ_s -Filter)

6.2.3 Unsicherheit der Auswertung

Einflüsse der Filterung sind bereits im Rahmen der Betrachtungen zur Messung berücksichtigt. Daher ist bei den nachfolgenden Überlegungen lediglich die Unsicherheit des Parameteroperators (vgl. **Kapitel 4.1**) von Relevanz. Die kombinierte Standardunsicherheit aller anderen Terme kann wie in Gleichung (246) beschrieben durch quadratische Addition der einzelnen Terme berechnet werden. Dabei wird von der durchschnittlichen Punktunsicherheit des Fertigungsprozesses (**Tabelle 18**) sowie der jeweils typischen Unsicherheit des R-Profiles (**Tabelle 19**) ausgegangen. Die λ_s -Filterung wird für die Normale, bei denen dies in der Auswertung vorgesehen ist, berücksichtigt. Unter diesen Annahmen ergeben sich in Summe die kombinierten Punktunsicherheiten in **Tabelle 20**.

Auf Basis dieser Punktunsicherheiten soll eine Aussage über die Unsicherheit der einzelnen Rauheitskennwerte gewonnen werden. Dabei kann festgestellt werden, dass Rauheitskenngrößen z.B. aufgrund ihrer Profildaten eine Streuung aufweisen ([See13b], S. 291).

Tabelle 20: Kombinierte Punktunsicherheiten

Randbedingung	R_k -Normal	Linearitäts-normal	DFT-Normal	W_{sa} -Normal
$u_{p,ges}(k_e = 1)/\mu\text{m}$	0,014	0,019	0,019	0,013
$u_{p,ges}(k_e = 2)/\mu\text{m}$	0,028	0,038	0,038	0,026

Seewig modelliert auf Basis von Oberflächen mit definierter Höhenverteilung u.a. die Unsicherheit des Parameters R_a ([See13b], S. 292). Diese Berechnungen gelten für statistisch verteilte Oberflächen. In den folgenden Betrachtungen soll hingegen für definierte Oberflächen mit bekannter Punktunsicherheit $u_{p,ges}(k_e = 1)$ eine Unsicherheit der zu berechnenden Rauheitskenngrößen angegeben werden. Dabei soll die Unsicherheitsermittlung nach GUM unter Annahme von vollständig unkorrelierten Messpunkten durchgeführt werden ([13005], S. 25).

Grundsätzlich kann selbst für einfache Zusammenhänge nur schwer eine allgemeine Ableitung der Parameterunsicherheit aus der Punktunsicherheit nach GUM durchgeführt werden. Es kann allerdings festgestellt werden, dass z.B. R_a als „Mittelwert“ der Messpunkte eine mit zunehmender Messpunkteanzahl sinkende Messunsicherheit aufweist. Für viele selbst einfache Parameter, wie z.B. R_z , ist keine geschlossene Beschreibung dieses Zusammenhangs möglich.

Daher soll die Ermittlung dieser Parameterunsicherheiten auf Basis von Monte-Carlo Simulationen durchgeführt werden. Das ideale Profil der einzelnen Normale wird vor der Berechnung der Rauheitskenngrößen mit einem Rauschen der kombinierten Punktunsicherheit beaufschlagt und danach der Parameter des neuen Profils ermittelt. Diese Operation wird wiederholt ausgeführt, um die Standardabweichung des Parameters zu berechnen.

Die Berechnung wurde für das R_k -Normal 10000 mal durchgeführt, wobei die Ergebnisse dieser Simulation als einzelne Parameterunsicherheiten u_{par} in **Tabelle 21** zusammengefasst sind.

Die identische Simulation wurde für das Linearitätsnormal durchgeführt. Die zugehörigen Parameterunsicherheiten sind in **Tabelle 22** gegeben. Die berechneten Werte stimmen dabei in ihrer Größenordnung gut mit typischen Werten der Literatur überein (vgl. z.B. ([Hai00], S. 243) oder ([Hai98], S. 117)).

Eine weitere Simulation wurde für das Normal mit kontinuierlichem Ortsspektrum durchgeführt. Die Ergebnisse in **Tabelle 23** zeigen, dass insbesondere der Parameter R_z eine systematische Abweichung aufweist, was damit zusammenhängt, dass es sich nicht um einen integralen Rauheitsparameter handelt.

Tabelle 21: Monte-Carlo Simulation R_k -Normal,
Ergebnisse Parameterunsicherheit

Parameter	Mittelwert	$u_{par}(k_e = 1) \hat{=} \sigma_{par} / \mu m$	$u_{par}(k_e = 2) / \mu m$
R_k	0,4019	0,0013	0,0026
R_{pk}	0,1495	0,0008	0,0016
R_{vk}	1,2037	0,0038	0,0076
$Mr1$	9,4914	0,0729	0,1458
$Mr2$	83,6232	0,0648	0,1286

Tabelle 22: Monte-Carlo Simulation Linearitätsnormal,
Ergebnisse Parameterunsicherheit

Parameter	Mittelwert	$u_{par}(k_e = 1) \hat{=} \sigma_{par} / \mu m$	$u_{par}(k_e = 2) / \mu m$
R_a	1,5765	0,0009	0,0018
R_q	1,8204	0,0009	0,0018
R_z	6,1913	0,0053	0,0106

Tabelle 23: Monte-Carlo Simulation DFT-Normal,
Ergebnisse Parameterunsicherheit

Parameter	Mittelwert	$u_{par}(k_e = 1) \hat{=} \sigma_{par} / \mu m$	$u_{par}(k_e = 2) / \mu m$
R_a	0,1870	0,0009	0,0018
R_q	0,8120	0,0009	0,0018
R_z	3,3895	0,0047	0,0094

Das W_{sa} -Normal wurde ebenfalls untersucht. Dabei wurde die virtuelle Auswertung, wie in **Kapitel 6.1.1.4** beschrieben, eingesetzt. Dies führt nach ebenfalls 10000 Berechnungen auf die Ergebnisse in **Tabelle 24**, wobei sowohl für das Rauheits- als auch für das Welligkeitsprofil die ermittelten Punkunsicherheiten gemäß **Tabelle 20** angenommen wurden. Aufgrund der wiederholten Auswertung, die bei diesem Normal entlang des Profils vorgesehen ist und der hohen Punkteanzahl, die zur Berechnung der Welligkeitskenngrößen eingesetzt wird, treten dabei sehr kleine Unsicherheiten der integralen Kennwerte auf.

In der Realität sind etwas größere Werte für die Unsicherheit zu erwarten, da die Messpunkte miteinander korreliert sind. Allerdings ist festzustellen, dass die Größenordnung der durch Simulation ermittelten Werte durchaus realistisch ist, was beim Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen bestätigt werden kann. Dabei

treten ebenfalls Parameterunsicherheiten in der Größenordnung Nanometer auf. Dies wurde insbesondere beim Ringvergleich des R_k -Normals festgestellt: Die generierten Normale funktionieren zuverlässig und streuen in der Größenordnung konventioneller Raunormale.

Tabelle 24: Monte-Carlo Simulation W_{sa} -Normal,
Ergebnisse Parameterunsicherheit

Parameter	Mittelwert / μm	$u_{par}(k_e = 1) \triangleq \sigma_{par} / \mu\text{m}$	$u_{par}(k_e = 2) / \mu\text{m}$
W_{sa}	0,4002	0,0000	0,0001
R_a	1,9998	0,0000	0,0001
R_z	7,5483	0,0017	0,0034
λ_{dom}	3571,4	0,0000	0,0000

Im Rahmen der Betrachtungen zur Messunsicherheit konnte gezeigt werden, dass bei Betrachtung der Unsicherheiten entlang der kompletten modellierten Signalkette und der Annahme typischer Messunsicherheiten mit dem verfolgten Ansatz eine Parameterstreuung im Nanometer-Bereich erzielt werden kann. Dies stimmt von der Größenordnung ebenfalls mit den experimentellen Ergebnissen aus **Kapitel 6.1.1** überein. Aufgrund von Korrelationen sind die realen Messunsicherheiten etwas größer. Für die Fertigungsverfahren, die nicht mit geometrisch bestimmter Schneide arbeiten, wurde keine allgemeine Unsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse aus **Kapitel 6.1** weisen jedoch auch hier eine Parameterstreuung im Nanometer-Bereich auf.

7. Leitfaden zur modellbasierten Entwicklung von Normalen

In den bisherigen Kapiteln wurde ein neuer Ansatz dargelegt, sowie dessen praktische Umsetzung vorbereitet und ausgeführt. Anschließend wurde die entsprechende messtechnische Anwendbarkeit demonstriert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich das Gestaltungsprinzip bei vielen in der Fertigungsmesstechnik üblichen Messprinzipien einsetzen lässt.

Abschließend sollten jetzt die speziellen Betrachtungen wieder auf eine allgemeinere Form zurückgeführt werden. Dabei wird anhand der untersuchten Beispiele eine allgemeine Gestaltungsvorgehensweise für die Generation von neuen Normalen abgeleitet.

Im Rahmen der Betrachtungen wurde dargelegt, dass ein pauschaler Einsatz von Normalen, der weit von der späteren Messaufgabe entfernt ist, aufgrund der immer größeren erforderlichen Genauigkeiten im Rahmen von Mess- und Kalibrierprozessen nicht immer ausreichend ist. Es kann daher zu einer Verbesserung führen, spezielle Normale, die an die jeweilige Messaufgabe angepasst sind, zu entwickeln. Dieser Vorgang wurde für verschiedene Anwendungsgebiete und Messprinzipien demonstriert.

Dabei kann allgemein das folgende Vorgehen abgeleitet werden:

1.) Charakterisierung der späteren Messaufgabe(n)

Diese Betrachtung führt auf die zu kalibrierenden Größen oder Messgeräteeigenschaften. Auf Basis der Definition der späteren Messaufgabe erfolgt die Festlegung der abzubildenden Kenngrößen/Parameter sowie der eigentlichen Kalibrieraufgabe.

2.) Auswahl einer Referenzoberfläche

Auf Basis vorhandener oder zu erstellender Messdaten wird eine Oberfläche ausgewählt, die Charakteristiken der Messaufgabe sowie der Kalibrieraufgabe aufweist. Die Messung der Referenzoberfläche wird möglichst nahe an der späteren Messaufgabe orientiert und durchgeführt.

3.) Auswahl des Fertigungsverfahrens

Es wird ein Fertigungsverfahren festgelegt, mit dem die gemessene Oberfläche gut reproduziert werden kann.

4.) Beschreibung der Messkette

Im Rahmen dieses Schrittes wird eine Zusammenstellung und Beschreibung der Parameter von Fertigung und Messung generiert.

Auf Basis dieser Informationen erfolgt eine möglichst vollständige Beschreibung der Messkette (vgl. **Abbildung 25**).

5.) Beschreibung der Transformation

Eine Transformation ist zu entwickeln, die eine Abbildung der in Schritt 1 definierten Parameter herbeiführt. Dabei ist die Transformation so auszulegen, dass, nach Anwendung einer Iteration, durch das resultierende Profil die vorzugebenden Größenwerte dargestellt werden.

Im Anschluss an diesen Schritt kann durch Zusammenfügen von Transformation und Signalkette die virtuelle Auslegung des Geometriennormals erfolgen. Ergebnis dieses Schrittes ist ein Datensatz zur Fertigung des Normals.

6.) Fertigung

Die Fertigung des so generierten Datensatzes wird anschließend durchgeführt und überführt die virtuell ausgelegte Geometrie in ein reales Bauteil, das allerdings aufgrund der algorithmischen Transformation die gewünschten Eigenschaften abbildet.

7.) Referenzmessung

Die anschließend durchgeführte Referenzmessung der neuen Geometrie dient dazu, die Eigenschaften des Normals zu überprüfen bzw. das Normal selbst zu kalibrieren.

Nach der konsequenten Anwendung dieses Vorgehens steht eine Oberfläche zur Kalibrierung zur Verfügung, die die jeweils implementierten physikalischen Zusammenhänge bei der Auslegung berücksichtigt. Nach der erfolgten Referenzmessung kann die Oberfläche zur Kalibrierung weiterer Messgeräte eingesetzt werden.

Der schematische Ablauf wird in **Abbildung 65** veranschaulicht.



Abbildung 65: Grundsätzliches Vorgehen zur modellbasierten Auslegung von Geometrienormalen

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind als erste Grundlagenuntersuchungen auf diesem Gebiet zu verstehen. Daher ist eine sehr generalistische Herangehensweise für die Betrachtung des Problems gewählt worden.

Es konnte konstatiert werden, dass es eine Vielzahl -von auch immer wieder neuen- Geometrienormalen für den Einsatz in der geometrischen Produktspezifikation gibt. Der grundsätzliche Ansatz zur Auslegung von Geometrienormalen fand allerdings bisher ohne die Berücksichtigung zahlreicher Einflussgrößen aus Fertigungsprozessen und Messprozessen statt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein grundsätzlicher Ansatz zur Auslegung von Geometrienormalen eingeführt, der reale Bauteiloberflächen einsetzt, physikalische Zusammenhänge der Messkette sowie fertigungstechnische Einflüsse berücksichtigt und für verschiedenste Messverfahren und –prinzipien eingesetzt werden kann.

Erste Säule dieser Arbeit war dabei die modellbasierte Auslegung neuer Geometrienormale: Die Betrachtungen umfassten Modelle zur Beschreibung unterschiedlicher Messprinzipien, deren Auswahl und Weiterentwicklung. Dazu zählen neben klassischen Werkzeugen der Signalverarbeitung auch messprinzip-spezifische Modelle auf Basis von z.B. Ray-Tracing für optische Messverfahren sowie CFD-Simulationen zur Betrachtung pneumatischer Abstandssensoren. Entsprechende Überlegungen zur Modellierung von Fertigungsverfahren konnten ebenfalls angestellt werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgte als zweite Säule die Auslegung neuer Geometrien, die im Wesentlichen auf Basis realer Bauteiloberflächen gestaltet wurden, um eine Kalibrierung in Analogie zur jeweils später durchgeführten Messaufgabe zu gestatten. Der vorhandene Ansatz des R_k -Normals wurde dabei genutzt, um verschiedene Normale für das Tastschnittverfahren auszulegen. Auf Basis der Abbott-Kurve ist ein nahezu stufenloses Normal zur Kalibrierung der Linearität der Höhenachse ausgelegt worden. Bisher dienten diskrete Stufenwerte als Ausgangspunkt für die Höhenkalibrierung, das neue Normal hingegen gestattet eine fast stufenlose Kalibrierung.

Ein stufenloses Normal zur Kalibrierung des Übertragungsverhaltens von Tastschnittgeräten ist ferner auf Basis einer Transformation im Frequenzbereich generiert worden, wobei dieses im Gegensatz zu vorhandenen Normalen mit einem kalibrierten Ortsspektrum ebenfalls auf einer realen Bauteiloberfläche basiert.

Weiterhin für das taktile Anwendungsgebiet wurde ein Normal zur gleichzeitigen Kalibrierung von Rauheits- und Welligkeitskennwerten ausgelegt. Der Vorteil der

modellbasierten Herangehensweise konnte aufgezeigt werden: Die Geometrie kann einfach auf spezielle Werkzeuge und andere Randbedingungen der Signalkette hin angepasst werden.

Das identische Vorgehen wurde aus diesem Grund weiterhin für den Einsatz bei optischen Messgeräten untersucht: Ein neu entwickeltes 3D-Normal für die Linearität der Höhenachse kann für beliebige optische Topographie-Messgeräte eingesetzt werden. Auch die Auslegung dieser Geometrie erfolgte auf Basis einer realen Oberfläche.

Weiterhin wurde ein Normal entwickelt, das zur Untersuchung der Rauheitsmessung mittels industrieller Computertomographie genutzt werden kann. Bisher wird eine solche Erfassung der Rauheit mit dieser Messtechnik nicht durchgeführt, allerdings stellt sich aufgrund immer feinerer Voxel-Größen der Messgeräte die Frage, inwieweit diese Anwendung umsetzbar wäre.

Ein derzeit noch nicht rückgeführtes Messverfahren ist die winkelauflösende Streulichtmesstechnik. Die für dieses Messverfahren neu ausgelegten Normale gestatten eine direkte Kalibrierung der Winkelverteilung mithilfe einer Oberfläche, die einer tatsächlichen Messaufgabe ähnelt.

Ferner konnten für das dritte Messprinzip der Fertigungsmesstechnik, die pneumatische Messtechnik, Überlegungen zur Auslegung von Geometrienormalen durchgeführt werden. Es erfolgte die Verbesserung eines vorhandenen Normals, wozu u.a. CFD-Simulationen dienten. Dieses neue Normal sieht ebenfalls die Optimierung der zugehörigen Kalibrierstrategie, sowie die Durchführung einer Absolutmessung zur Kalibrierung vor.

Nach Auslegung der neuen Normale erfolgte eine Untersuchung deren fertigungstechnischer Umsetzbarkeit, was der dritten Säule der Arbeit entspricht. Im Anschluss an die Auswahl der jeweiligen Fertigungsverfahren wurde eine Optimierung der Modellierung des UP-Drehprozesses erarbeitet. Dabei konnte auf Basis von Messergebnissen die wirkliche Geometrie des Werkzeugs für die virtuelle Fertigung zugrunde gelegt werden. Weiterhin demonstrierten die Ergebnisse einer Parameterstudie, dass die Fertigung der generierten Normale reproduzierbar mit verschiedenen Fertigungsparametern durchgeführt werden kann. Der Einfluss von in der Fertigungsumgebung vorhandenen Umwelteinflüssen auf Normale wurde ebenfalls untersucht und quantifiziert. Dabei wurden experimentell verschiedene Verschmutzungsarten sowie Reinigungsverfahren betrachtet. Neben diesen Untersuchungen ist die tatsächliche Umsetzung der berechneten Geometrien durchgeführt und beschrieben worden.

Abschließend wurden Untersuchungen für den praktischen Einsatz der gefertigten Normale durchgeführt. Das R_k -Normal konnte im Rahmen dieser Untersuchungen in

eine Serienreihe überführt werden. Für alle Normale mit taktilem Einsatzgebiet sind entsprechende Kalibrierstrategien vorgestellt sowie Messungen zu deren Verifikation ausgeführt worden. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei den Normalen Parameterunsicherheiten im Nanometer-Bereich auftreten. Weiterhin wurde erläutert, dass mit den entwickelten Kalibrierstrategien eine Kalibrierung unter nur geringem Aufwand erfolgen kann. Dies gilt sowohl für die R_k -Parameter, als auch die Linearität der z -Achse, das Übertragungsverhalten sowie die angestrebte kombinierte Welligkeits- und Rauheitskalibrierung.

Die Geometrienormale für optische Messgeräte wurden ebenfalls auf ihren praktischen Einsatz hin untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Linearitätskalibrierung analog für flächenhafte Rauheitsmessgeräte durchgeführt werden kann. Eine entsprechende Demonstration erfolgte für das 3D-Linearitätsnormal sowohl durch Messungen mittels WLI als auch konfokaler Mikroskopie. Auch für das EHT wurde eine entsprechende Kalibrierstrategie für die Kalibrierung der speziell untersuchten Eigenschaften entwickelt und experimentell verifiziert.

Im Rahmen der Untersuchungen zur industriellen CT konnte gezeigt werden, dass das Verfahren durchaus Potential für eine Rauheitsmessung aufweist. Das zu diesem Zweck entwickelte Rauheitsnormal lieferte bei der Messung reproduzierbare Ergebnisse.

Weiterhin lieferten die Untersuchungen der Normale zur Abbildung eines definierten A_q -Wertes für die winkelauflösende Streulichtmesstechnik im Rahmen der experimentellen Untersuchung Ergebnisse mit einer geringen Standardabweichung.

Für das optimierte Normal der pneumatischen Messtechnik wurde eine Kalibrierstrategie entwickelt, die eine Absolutmessung gestattet. Die dabei erzielten experimentellen Ergebnisse stimmen ebenfalls gut mit den Ergebnissen der virtuellen Messungen überein.

Bei der abschließenden Betrachtung der Messunsicherheit konnte gezeigt werden, dass viele untersuchte Faktoren beschrieben werden können, die im Rahmen der simulierten Signalkette auftreten. Dabei wurde insbesondere für den virtuellen Fertigungsprozess eine Unsicherheitsbilanz aufgestellt.

Das Vorgehen konnte abschließend in einen allgemeinen Leitfaden zur modellbasierten Auslegung von Normalen überführt werden. Die Ergebnisse sollten zukünftig idealerweise im Rahmen des Normungsprozesses berücksichtigt werden. Dies wäre zur Förderung der entwickelten Vorgehensweise im Rahmen einer industriellen Anwendung sinnvoll, da insbesondere die 3D-Kalibrierung noch nicht hinreichend standardisiert ist und sich die neue Vorgehensweise gut zur Lösung vieler komplexer Kalibrieraufgaben eignet.

Weitere Arbeiten können daher insbesondere bei der Kalibrierung optischer Topographie-Messgeräte ansetzen. Dabei kann durch Optik-Simulationen (Ray-Tracing) eine spezifischere Modellierung der jeweiligen Messverfahren erfolgen. Somit kann die virtuelle Beschreibung der unterschiedlichen Mess- und Fertigungsverfahren sowie deren Unsicherheitsbilanzierung tiefgreifender untersucht werden. Ebenfalls die Rauheitsmessung mittels industrieller CT bietet noch Möglichkeiten weiterer Untersuchungen. Für Streulichtsensoren wurden erste Normale mit definiertem A_v -Wert vorgestellt. Allerdings ist aufgrund der Tatsache, dass damit nur winkelabhängige Kenngrößen kalibriert werden können, noch keine Rückführung des Messverfahrens an die SI-Einheit Meter sichergestellt, was im Rahmen weiterer Untersuchungen betrachtet und optimiert werden kann.

Anhang

Anhang A: Trennen von Gestaltabweichungen

Zu Beginn von **Kapitel 2** wurde gezeigt, dass Gestaltabweichungen nach ihrer Wellenlänge unterschieden werden. Die Norm DIN EN ISO 4287 legt Definitionen für die Bewertung von taktil erfassten Profilen fest [4287]. Dabei sind auch Begriffe zur Trennung verschiedener Gestaltabweichungen wie Welligkeit und Rauheit gegeben ([4287], S. 6 ff.).

Im Rahmen des Stands der Technik wurde dabei ebenfalls erläutert, dass zur Unterscheidung dieser Gestaltabweichungen Profilfilter (vgl. [4287], S. 6) genutzt werden (vgl. **Kapitel 2.3.2.1**). Dabei kommen unterschiedliche Grenzwellenlängen (vgl. [16610-21], S. 5) zum Einsatz, die, je nachdem, welche Grenze zwischen zwei unterschiedlichen Gestaltabweichungsanteilen sie repräsentierten, unterschiedlich bezeichnet werden ([4287], S. 6).

Dabei sind in der Norm DIN EN ISO 4287 ebenfalls die entsprechenden Grenzen und Begriffe definiert: Das λ_f -Filter trennt Formabweichungen und Gestaltabweichungen höherer Ordnung ([4287], S. 6), das λ_c -Filter trennt ein Profil in Gestaltabweichungen 1. und 2. Ordnung (nach [4760], S. 2) sowie Anteile mit kürzerer Wellenlänge ([4287] S. 6) und das λ_s -Filter trennt Gestaltabweichungen, die kleinere Wellenlängen als Rauheit aufweisen (5. und 6. Ordnung nach DIN 4760 [4760], S. 2) vom Rest des Profils ([4287], S. 6). Das λ_f -Filter besitzt dabei aufgrund meist kürzerer Taststrecken nur wenig praktische Relevanz.

Abbildung 66 ([4287], S. 7) veranschaulicht diesen Zusammenhang der einzelnen Grenzwellenlängen.

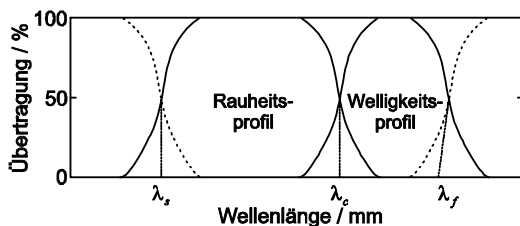


Abbildung 66: Gestaltabweichungen, Übertragung nach DIN EN ISO 4287 ([4287], S. 7)

Die tatsächliche Festlegung der konkreten Werte der Grenzwellenlängen erfolgt für taktile Messgeräte unter Beachtung der Vorschriften aus DIN EN ISO 3274 ([3274], S. 9) sowie DIN EN ISO 4288 ([4288], S. 6 f.).

Anhang B: Ergebnisse der nichtidealen taktilen Abtastungen

Die Berechnung der nichtidealen, taktilen Abtastungen erfolgt wie in **Kapitel 6.1.1** beschrieben. Dort sind die zugehörigen Parameter der Nichtidealität definiert. Dabei wurde als Material reines Kupfer angenommen, was auf einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $17,7 \cdot 10^{-6} 1/K$ ([Roo15], S. 220) führt.

Es wird keine Unsicherheit angegeben, da die Nichtidealitäten eindeutig reproduzierbar sind. Bei Abweichungen in x -Richtung sind Werte vom Startpunkt der Auswertung abhängig.

Dies führt für das R_k -Normal zu den folgenden Kennwerten in **Tabelle 25**. Die ideale Abtastung ergibt $R_k = 0,400 \mu m$, $R_{pk} = 0,150 \mu m$ und $R_{vk} = 1,200 \mu m$.

Tabelle 25: R_k -Normal, Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktiler Abtastung

Parameter	$R_k / \mu m$	$R_{pk} / \mu m$	$R_{vk} / \mu m$
Sollwert	0,400	0,150	1,200
$\Delta T = -10 K$	0,401	0,150	1,201
$\Delta T = 10 K$	0,399	0,151	1,198
$m_{err} = 0,9$	0,360	0,135	1,080
$m_{err} = 0,98$	0,392	0,147	1,176
$m_{err} = 1,02$	0,408	0,153	1,224
$m_{err} = 1,1$	0,440	0,165	1,320
$m_{err} = 0,9$, $z_b = 0$	0,399	0,151	1,162
$m_{err} = 0,98$, $z_b = 0$	0,399	0,151	1,191
$m_{err} = 1,02$, $z_b = 0$	0,400	0,150	1,207
$m_{err} = 1,1$, $z_b = 0$	0,400	0,150	1,238
abgebrochene Tastspitze	0,386	0,114	1,436

Für das Linearitätsnormal ergeben sich bei der idealen Abtastung: $R_a = 1,576 \mu m$, $R_q = 1,820 \mu m$, $R_z = 6,104 \mu m$, $ld1 = 4,4 nm$, $ld2 = 3,1 nm$, $\alpha_z = 1$, $ld_{ISO} = 0,000 \mu m$, $\alpha_{z80} = 1$ sowie $ld_{ISO80} = 0,000 \mu m$.

Die bei der nichtidealen Abtastung resultierenden Rauheitskennwerte sowie im Rahmen der Auswertung definierten Linearitätskenngrößen sind in **Tabelle 26** und **Tabelle 27** gegeben.

Tabelle 26: Linearitätsnormal, Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktile Abtastung

Parameter	$R_a / \mu m$	$R_q / \mu m$	$R_z / \mu m$
Sollwert	1,576	1,820	6,104
$\Delta T = -10 K$	1,576	1,820	6,104
$\Delta T = 10 K$	1,577	1,821	6,104
$m_{err} = 0,9$	1,419	1,638	5,494
$m_{err} = 0,98$	1,545	1,784	5,982
$m_{err} = 1,02$	1,608	1,857	6,226
$m_{err} = 1,1$	1,734	2,002	6,715
$m_{err} = 0,9, z_b = 0$	1,498	1,730	5,808
$m_{err} = 0,98, z_b = 0$	1,561	1,802	6,045
$m_{err} = 1,02, z_b = 0$	1,592	1,839	6,163
$m_{err} = 1,1, z_b = 0$	1,657	1,912	6,400
abgebrochene Tastspitze	1,576	1,820	6,104

Tabelle 27: Linearitätsnormal, Linearitäts-Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktile Abtastung

Parameter	$ld1 / \mu m$	$ld2 / \mu m$	α_z	$ld_{ISO} / \mu m$	α_{z80}	$ld_{ISO80} / \mu m$
Sollwert	0,004	0,003	1,000	0,000	1,000	0,000
$\Delta T = -10 K$	0,004	0,003	1,000	0,003	1,000	0,003
$\Delta T = 10 K$	0,005	0,003	1,000	0,005	1,000	0,005
$m_{err} = 0,9$	0,155	0,003	0,900	0,000	0,900	0,000
$m_{err} = 0,98$	0,029	0,003	0,980	0,000	0,980	0,000
$m_{err} = 1,02$	0,035	0,003	1,020	0,000	1,020	0,000
$m_{err} = 1,1$	0,161	0,003	1,100	0,000	1,100	0,000
$m_{err} = 0,9, z_b = 0$	0,086	0,038	0,950	0,078	0,950	0,063
$m_{err} = 0,98, z_b = 0$	0,015	0,008	0,990	0,016	0,990	0,013
$m_{err} = 1,02, z_b = 0$	0,021	0,008	1,010	0,017	1,010	0,014
$m_{err} = 1,1, z_b = 0$	0,092	0,038	1,050	0,083	1,050	0,066
abgebrochene Tastspitze	0,004	0,003	1,000	0,000	1,000	0,000

Für das Normal mit stetigen Ortsfrequenz-Spektrum ergeben sich die Kennwerte in **Tabelle 28**. Die Ideal-Kennwerte sind $R_a = 0,185 \mu m$, $R_q = 0,812 \mu m$, $R_z = 3,286 \mu m$.

Tabelle 28: Normal mit kontinuierlichem Ortsspektrum, Kennwerte bei nichtidealer virtueller Abtastung

Parameter	$R_a / \mu m$	$R_q / \mu m$	$R_z / \mu m$	$\Delta \bar{v}$
Sollwert	0,185	0,812	3,286	-
$\Delta T = -10 K$	0,185	0,812	3,286	0,365
$\Delta T = 10 K$	0,185	0,812	3,286	0,444
$m_{err} = 0,9$	0,167	0,731	2,957	0,082
$m_{err} = 0,98$	0,182	0,795	3,220	0,016
$m_{err} = 1,02$	0,189	0,828	3,351	0,016
$m_{err} = 1,1$	0,204	0,893	3,614	0,082
$m_{err} = 0,9, z_b = 0$	0,183	0,780	3,165	0,021
$m_{err} = 0,98, z_b = 0$	0,185	0,805	3,261	0,003
$m_{err} = 1,02, z_b = 0$	0,186	0,818	3,310	0,002
$m_{err} = 1,1, z_b = 0$	0,188	0,844	3,406	0,008
abgebrochene Tastspitze	0,183	0,790	3,143	0,183

Ebenfalls das W_{sa} -Normal wurde virtuell abgetastet. Bei der idealen, virtuellen Abtastung ergeben sich die Kennwerte $W_{sa,tar} = 0,400 \mu m$, $R_{a,tar} = (2,000 \pm 0,000) \mu m$, $R_{z,tar} = (7,499 \pm 0,001) \mu m$ sowie $\lambda_{dom,tar} = 3,571 mm$. Die Ergebnisse der nichtidealen Abtastungen sind in **Tabelle 29** dargestellt.

Tabelle 29: W_{sa} -Normal, Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktiler Abtastung

Parameter	$W_{sa} / \mu m$	$R_a / \mu m$	$R_z / \mu m$	λ_{dom} / mm
Sollwert	0,400	$2,000 \pm 0,000$	$7,499 \pm 0,001$	3,571
$\Delta T = -10 K$	0,400	$2,000 \pm 0,000$	$7,499 \pm 0,001$	4,286
$\Delta T = 10 K$	0,400	$2,000 \pm 0,000$	$7,499 \pm 0,001$	3,571
$m_{err} = 0,9$	0,360	$1,800 \pm 0,000$	$6,749 \pm 0,001$	3,571
$m_{err} = 0,98$	0,392	$1,960 \pm 0,000$	$7,349 \pm 0,001$	3,571
$m_{err} = 1,02$	0,408	$2,040 \pm 0,000$	$7,649 \pm 0,001$	3,571
$m_{err} = 1,1$	0,440	$2,200 \pm 0,000$	$8,249 \pm 0,001$	3,571
$m_{err} = 0,9, z_b = 0$	0,386	$1,876 \pm 0,012$	$7,076 \pm 0,037$	3,571
$m_{err} = 0,98, z_b = 0$	0,397	$1,975 \pm 0,002$	$7,414 \pm 0,007$	3,571
$m_{err} = 1,02, z_b = 0$	0,403	$2,025 \pm 0,003$	$7,583 \pm 0,008$	3,571
$m_{err} = 1,1, z_b = 0$	0,415	$2,124 \pm 0,012$	$7,921 \pm 0,038$	3,571
abgebrochene Tastspitze	0,400	$2,000 \pm 0,000$	$7,499 \pm 0,001$	3,571

Anhang C: Ergebnisse der CT-Simulationen mit aRTist

Die nachfolgenden Tabellen beschreiben die Ergebnisse der Simulation des virtuellen Röntgen-Prozesses mit der Software **aRTist** [Bel07] [Bel12].

Tabelle 30: aRTist-Simulationen, variabler Source-Abstand,
Abstand Werkstück-Detektor 20 mm

Abstand Source-Detektor / mm	$R_a / \mu\text{m}$	$R_q / \mu\text{m}$	$R_z / \mu\text{m}$
Sollwert	2,400	2,919	12,415
500	2,153 ± 0,016	2,652 ± 0,020	9,704 ± 0,117
600	2,189 ± 0,039	2,690 ± 0,043	9,945 ± 0,325
625	2,193 ± 0,039	2,691 ± 0,042	10,055 ± 0,267
637,5	2,198 ± 0,041	2,693 ± 0,043	10,103 ± 0,247
650	2,205 ± 0,038	2,695 ± 0,042	9,974 ± 0,238
662,5	2,192 ± 0,036	2,678 ± 0,043	9,908 ± 0,256
675	2,173 ± 0,024	2,662 ± 0,029	9,701 ± 0,202
700	2,159 ± 0,023	2,652 ± 0,026	9,667 ± 0,200
850	2,163 ± 0,023	2,658 ± 0,014	9,869 ± 0,274

Tabelle 31: aRTist-Simulationen, variabler Werkstück-Abstand,
Abstand Source-Detektor 650 mm

Abs. Werkstück-Detektor / mm	$R_a / \mu\text{m}$	$R_q / \mu\text{m}$	$R_z / \mu\text{m}$
Sollwert	2,400	2,919	12,415
20	2,205 ± 0,038	2,695 ± 0,042	9,974 ± 0,238
50	2,268 ± 0,038	2,727 ± 0,028	10,042 ± 0,328
75	2,158 ± 0,028	2,631 ± 0,020	10,018 ± 0,214
90	2,156 ± 0,026	2,625 ± 0,020	10,252 ± 0,151
95	2,321 ± 0,022	2,778 ± 0,024	10,513 ± 0,162
97,5	2,329 ± 0,060	2,837 ± 0,049	10,632 ± 0,347
99	2,309 ± 0,037	2,797 ± 0,042	10,498 ± 0,316
100	2,299 ± 0,021	2,789 ± 0,020	10,525 ± 0,215
110	2,163 ± 0,030	2,704 ± 0,027	10,678 ± 0,403
125	2,137 ± 0,042	2,663 ± 0,021	10,596 ± 0,206
150	2,113 ± 0,018	2,599 ± 0,021	10,242 ± 0,224

Die Auswertung erfolgte dabei wie in **Kapitel 6.1.2.3** erläutert, wobei jeweils Mittelwert und Standardabweichung aus den je 13 Einzelauswertungen angegeben werden.

Für die erste Serie an Simulationen wurde der Abstand zwischen Werkstück und Detektor konstant zu 20mm festgelegt und anschließend der Abstand zwischen Röntgenquelle und -detektor variiert, mit dem Ziel der Optimierung, die taktil gemessenen Soll-Parameter möglichst gut zu reproduzieren. Es ergaben sich die Ergebnisse in **Tabelle 30**.

Mit dem optimierten Abstand von 650mm wurde eine zweite virtuelle Versuchsreihe durchgeführt. Dabei wurde der Abstand zwischen Werkstück und Detektor variiert. Es ergaben sich die Ergebnisse in **Tabelle 31**.

Anhang D: Nichtideale Simulation des Streulichtensors, Ergebnisse

Auch mithilfe des virtuellen Streulichtensors (vgl. **Kapitel 3.2.4**) wurden verschiedene Simulationen unter Berücksichtigung von Nichtidealitäten durchgeführt. Dabei wurde zunächst eine Verkippung des Sensors untersucht, die dazu führt, dass die Streuwinkelverteilung sich um ein entsprechendes $\Delta\gamma_{NL}$ verschiebt (vgl. Gleichung (71)):

$$\dot{\gamma}_{i,NL} = \dot{\gamma}_i + \Delta\gamma_{NL}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (259)$$

Die restlichen Berechnungen werden analog zur idealen Betrachtung ausgeführt. Dabei wurden mit einem Leuchtfleckdurchmesser von $l_d = 0,9\text{mm}$ die Ergebnisse in **Tabelle 32** erzielt.

Tabelle 32: Virtuelle Streulicht-Messung, Abstimmung mit verkippem Sensor

Normal 1 (reale Oberfläche)								
$\Delta\gamma_{NL} / ^\circ$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	5	10
A_q	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	29,33	24,84	18,20
Normal 2 (gaußsche Fehlerfunktion)								
$\Delta\gamma_{NL} / ^\circ$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	5	10
A_q	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	28,43	17,66

Demnach kann bis zu einer Verkippung von 5° kein starkes Abweichen des A_q -Wertes festgestellt werden, da keine großen Oberflächenwinkel auf den Normalen auftreten. Bei einer Verkippung von 10° weichen die A_q -Werte stark ab, da dann nicht mehr alle Winkel abgebildet werden können.

Unsicher beim Einsatz des Streulichtensors ist auch die tatsächliche Geometrie des Leuchtflecks. Der Leuchtfleckdurchmesser kann dabei vom Sollwert abweichen. Dies kann durch Berücksichtigung der tatsächlich im Leuchtfleck vorhandenen Oberflächenwinkel beachtet werden. Dabei wird das Profil entsprechend aus dem periodischen Rauheitsprofil extrahiert, so dass für den neuen Leuchtfleckdurchmesser $d_i^* = d_i + \Delta d$ mit der Abweichung Δd gilt:

$$z = z(x_i), \quad x_i = (i-1) \cdot \Delta x, \quad i = 1, 2, \dots, d_i^* / \Delta x. \quad (260)$$

Dieses Phänomen wurde für zwei im industriellen Einsatz befindliche nominelle Leuchtfleckdurchmesser $d_i = 0,3\text{mm}$ und $d_i = 0,9\text{mm}$ untersucht. Dabei ergaben sich die Werte in **Tabelle 33**. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der Homogenität der Oberfläche der Leuchtfleckdurchmesser im Rahmen der zu erwartenden Abweichungen ein unkritischer Parameter ist.

Tabelle 33: Virtuelle Streulicht-Messung, Abtastung mit abweichender Leuchtfleckgröße

Normal 1 (reale Oberfläche)				Normal 2 (gaußsche Fehlerfunktion)			
l_d^* / mm	A_q	l_d^* / mm	A_q	l_d^* / mm	A_q	l_d^* / mm	A_q
0,20	29,80	0,80	29,99	0,20	29,93	0,80	29,98
0,25	29,99	0,85	30,01	0,25	30,10	0,85	30,00
0,28	29,99	0,88	30,01	0,28	30,08	0,88	30,00
0,32	29,91	0,92	29,99	0,32	29,95	0,92	29,98
0,35	29,92	0,95	29,99	0,35	29,96	0,95	29,98
0,40	30,00	1,00	30,01	0,40	30,04	1,00	30,00

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßverkörperungen nach DIN EN ISO 25178-70 ([25178-70], S. 7 f.).....	43
Tabelle 2: Messergebnisse der Parameterstudie (vgl. [Sch15a], S. 34).....	109
Tabelle 3: Beurteilung des Reinigungserfolgs ([Eif15b], S. 120)	112
Tabelle 4: R_k -Normal, experimentelle Ergebnisse MTS ([See15], S. 45).....	122
Tabelle 5: R_k -Normal, Messwerte bei Untersuchung des Fragments	123
Tabelle 6: R_k -Normal, Ringvergleich, Ergebnisse.....	124
Tabelle 7: Messergebnisse 2D-Linearitätsnormal, Prototyp	129
Tabelle 8: Parameterstudie Linearitätsnormal, gem. Linearitätsabweichungen.....	130
Tabelle 9: DFT-Normal, Messergebnisse Rauheitsparameter.....	132
Tabelle 10: Messergebnisse W_{sa} -Normal	136
Tabelle 11: Linearitätsnormal 3D, Messergebnisse ([Eif15c], S. 8).....	139
Tabelle 12: 3D-Linearitätsnormal, Auswertung nach DIN EN ISO 25178-603.....	141
Tabelle 13: CT-Normal, Ergebnisse, taktile Referenzmessung ([Eif16], S. 53)	144
Tabelle 14: CT-Normal, Ergebnisse, Messung mit Mikro-CT ([Eif16], S. 53).....	146
Tabelle 15: A_q -Auswertung auf Basis der taktilen Messdaten ([See16], S. 8)	147
Tabelle 16: A_q -Auswertung, Optosurf OS 500 ([See16], S. 8).....	148
Tabelle 17: Simulierte Unsicherheitsbeiträge der UP-Drehfertigung	156
Tabelle 18: Unsicherheitsbilanz Fertigungsprozess	157
Tabelle 19: Unsicherheitswerte für das Tastschnittverfahren	158
Tabelle 20: Kombinierte Punktunsicherheiten	159
Tabelle 21: Monte-Carlo Simulation R_k -Normal, Parameterunsicherheit	160
Tabelle 22: Monte-Carlo Simulation Linearitätsnormal, Parameterunsicherheit	160
Tabelle 23: Monte-Carlo Simulation DFT-Normal, Parameterunsicherheit.....	160
Tabelle 24: Monte-Carlo Simulation W_{sa} -Normal, Parameterunsicherheit.....	161
Tabelle 25: R_k -Normal, Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktile Abtastung	170
Tabelle 26: Linearitätsnormal, nichtideale virtuelle taktile Abtastung	171
Tabelle 27: Linearitätsnormal, nichtideale virtuelle taktile Abtastung	171
Tabelle 28: Normal mit kont. Ortsspektrum, nichtideale virtuelle Abtastung.....	172
Tabelle 29: W_{sa} -Normal, Kennwerte bei nichtidealer virtueller taktile Abtastung....	172
Tabelle 30: aRTist-Simulationen, variabler Source-Abstand	173
Tabelle 31: aRTist-Simulationen, variabler Werkstück-Abstand	173
Tabelle 32: Virtuelle Streulicht-Messung, Abtastung mit verkipptem Sensor.....	175
Tabelle 33: Virtuelle Streulicht-Messung, Abtastung mit abw. Leuchtfleckgröße ...	176

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Neue Faktoren für die virtuelle Auslegung von Geometrienormalen.....	1
Abbildung 2: Gestaltabweichungen in DIN 4760 ([4760], S. 2).....	5
Abbildung 3: Taktiles Messgerät nach ([3274], S. 5) und ([Grö07], S. 30).....	8
Abbildung 4: Messkreis Tastschnittgerät nach DIN EN ISO 3274 ([3274], S. 6).....	9
Abbildung 5: Weißlichtinterferometer nach de Groot ([Gro11a], S. 190).....	10
Abbildung 6: Prinzip des EHT nach Leonhardt ([Leo03], S. 514).....	13
Abbildung 7: Konfokales Mikroskop nach Artigas ([Art11], S. 254).....	14
Abbildung 8: Winkelauflösender Streulichtsensor nach VDA 2009 ([VDA09], S. 3).....	15
Abbildung 9: Industrielle CT-Anlage nach VDI 2630, Blatt 1.1 ([VDI14], S. 3).....	16
Abbildung 10: Modellbildung pneumatischer Abstandssensoren ([Eif14], S. 26).....	18
Abbildung 11: Pneumatische Kennlinie, Beispiel ([Eif14], S. 27).....	19
Abbildung 12: Virtueller Messprozess nach Schmitt et. al. ([Sch08c], S. 299).....	21
Abbildung 13: Rückführung nach ([Lea13b], S. 409) und ([Ski08], S. 9).....	34
Abbildung 14: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Normalen.....	50
Abbildung 15: Prinzip der morphologischen Schließung bei taktilem Abtastung.....	52
Abbildung 16: Schichtmodelle nach ([Azz87], S. 271) und ([Azz87], S. 283).....	55
Abbildung 17: Simulation des CT-Prozesses in aRTist - Anwendungsbeispiel.....	56
Abbildung 18: CFD-Modell zur Untersuchung pneumatischer Abstandssensoren....	60
Abbildung 19: Beschreibung pneum. Abstandssensoren ([Eif14], S. 28).....	62
Abbildung 20: Prinzip der morphologischen Schließung bei der Drehfertigung.....	65
Abbildung 21: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Normalen.....	66
Abbildung 22: Darstellung der Signalkette nach ([4-2-1], S. 9).....	68
Abbildung 23: Eingesetztes Schema zur Auswertung von Profildaten.....	69
Abbildung 24: Vorgehen zur Transformation auf Basis der Abbott-Kurve.....	69
Abbildung 25: Iterativer Ablauf taktilem - Signalkette.....	70
Abbildung 26: R_k -Normal, a) Rohprofil, b) Ergebnisse nach ([See15], S. 45).....	71
Abbildung 27: Linearitätsnormal, a) Rohprofil, b) Ergebnisse nach ([See15], S. 45).....	75
Abbildung 28: Ortsspektren-Normal, a) Rohprofil, b) Ergebnisse, c) Spektrum.....	78
Abbildung 29: Schematisches Vorgehen Welligkeits- und Rauheitsnormal.....	80
Abbildung 30: Welligkeits- und Rauheitsnormal, a) Rohprofil, b) Normal.....	83
Abbildung 31: Auswertemöglichkeiten des Profils nach Abbildung 30 b).....	84
Abbildung 32: Linearitätsnormal 3D ([Eif15c], S. 7).....	89
Abbildung 33: Spezielle Normale für das EHT ([Rai15a], S. 8).....	90
Abbildung 34: CT-Raunormal, a) Rohprofil und b) transformierte Oberfläche.....	93
Abbildung 35: Streulicht-Raunormal ([See16], S. 6).....	97
Abbildung 36: a) Testfunktionen Pneumatik, b) Abtastergebnisse mit CFD.....	100
Abbildung 37: Pneumatik Normal, Abtastergebnisse CFD ([Eif14], S. 31).....	101
Abbildung 38: Pneumatik Normal, Ergebnisse geom. Filterung ([Eif14], S. 31 f.)....	102
Abbildung 39: Pneumatik Formnormal, Weiterentwicklung ([Eif14], S. 30).....	103
Abbildung 40: Neue Faktoren bei der virtuellen Auslegung von Normalen.....	104
Abbildung 41: Schema zur Berücksichtigung der tats. Werkzeuggeometrie.....	106
Abbildung 42: REM-Aufnahmen eines Werkzeugs, (a) nach [Sch15a], S. 33).....	106

Abbildung 43: Topographie-Messdaten des Diamant-Werkzeugs.....	107
Abbildung 44: Ergebnisse der Parameterstudie	109
Abbildung 45: Einfluss von Verschmutzung mit Schneidöl ([Eif15b], S. 120)	112
Abbildung 46: Gefertigte Normale zur Kalibrierung von TSG, a) ([See15], S. 44)....	114
Abbildung 47: Mikroskop-Aufnahme 3D-Linearitätsnormal.....	115
Abbildung 48: EHT-Normal vii), Ausschnitt.....	115
Abbildung 49: Normal zur Kalibrierung der industriellen CT	116
Abbildung 50: Normal zur Kalibrierung von Streulichtsensoren (Fehlerfunktion).....	117
Abbildung 51: Normal zur Kalibrierung von pneumatischen Abstandssensoren	117
Abbildung 52: R_k -Normal, Ergebnisse der idealen, virtuellen Auswertung	121
Abbildung 53: R_k -Normal, gemessene und ideale Abbott-Kurve	123
Abbildung 54: Auswertung Ringvergleich	124
Abbildung 55: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Profil sowie der Abbott-Kurven.....	131
Abbildung 56: Gemessene Übertragungsfunktion von zwei Tastschnittgeräten.....	134
Abbildung 57: 3D-Linearitätsnormal, a) Soll-Daten, b) Messdaten ([Eif15c], S. 8) ..	140
Abbildung 58: Auswertung Abbott-Kurve Linearitätsnormal 3D ([Eif15c], S. 8)	140
Abbildung 59: Ellipsometer-Normale, Ergebnisse ([Rai15a], S. 8)	143
Abbildung 60: Simulation mit aRTist - Ergebnisse für R_a	146
Abbildung 61: Messaufbau pneumatische Verifikation ([Eif15a], S. 90)	149
Abbildung 62: Pneumatik-Normal, Referenzmessung ([Eif14], S. 30)	150
Abbildung 63: Virtuelle Abtastung des Pneumatik-Normals ([Eif14], S. 31 f.).....	151
Abbildung 64: Experiment Pneumatik-Normal ([Eif14], S. 31 f.).....	152
Abbildung 65: Neues Vorgehen zur Auslegung von Geometrienormalen	164
Abbildung 66: Gestaltabweichungen nach DIN EN ISO 4287 ([4287], S. 7).....	169

Liste betreuter studentischer Arbeiten

- (Pires 2014) „Literaturrecherche zur Fertigung von Geometrienormalen“, Bachelorarbeit, Christophe Pires, Februar 2014
- (Utsch 2014) „Design of Experiments/Statistische Versuchsplanung“, Studienarbeit, Florian Utsch, Februar 2014
- (Rother 2014) „Machbarkeitsstudie bzgl. der Reinigung, des Transports und der Aufbewahrung von Rauheitsnormalen“, Bachelorarbeit, Steffen Rother, August 2014
- (Ranker 2014) „Grundlagenstudie zur virtuellen industriellen Computertomographie“, Bachelorarbeit, Patrick Ranker, September 2014
- (Arnold 2014) „Modellbasierte Ermittlung von Messunsicherheitsbeiträgen bei Kalibrierprozessen“, Diplomarbeit, Christian Arnold, November 2014
- (Jiang & Shi 2015) „Verbesserung der Vordüsengeometrie pneumatischer Abstandssensoren durch numerische Simulation“, Projektarbeit, Ziwei Jiang und Jianbo Shi, Januar 2015
- (Follmann 2015) „Erstellung eines virtuelles Messprozesses für das Tastschnittverfahren“, Studienarbeit, Viktor Follmann, Juni 2015
- (Klauer 2016) „Grundlagenuntersuchung zum Einfluss der Alterung auf den Einsatz von Geometrienormalen“, Studienarbeit, Katja Klauer, Mai 2016

Liste vorheriger Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Teil eines Simulationsmodells genutzt, das im Rahmen der Diplomarbeit des Autors entwickelt wurde. Dies ist an der entsprechenden Stelle gekennzeichnet:

[Eif13] Eifler, M.: Modellbasierte Grundlagenuntersuchung pneumatischer Abstandssensoren mit FLUENT, Diplomarbeit, TU Kaiserslautern, Januar 2013

Weiterhin ist in der vorliegenden Dissertation Material enthalten, welches bereits vorab veröffentlicht worden ist. Die publizierten Arbeiten des Autors sind im Folgenden genannt und an entsprechender Stelle zitiert (Stand: 01.06.2016):

Schäfer, P.; Eifler, M.; Seewig, J.; Volk, R.: Pneumatische Abstandsmessung, Funktionen und potentielle Einsatzgebiete, VDI Fachtagung Form- und Konturmesstechnik, Leonberg, 04.-05. Juni 2013, S. 51-63

Schäfer, P.; Eifler, M.; Seewig, J.: Pneumatische Abstandsmessung, Mathematische Beschreibung von Dynamik und Übertragungsverhalten, werkstatttechnik online, 11/12 2013, S. 904-910

Seewig, J.; Eifler, M.: Periodic Gaussian filter according to ISO 16610-21 for closed profiles, Precision Engineering 38 (2014), 2, S. 439-442

Pehnelt, S.; Dollinger, P.; Seewig, J.; Eifler, M.: Stabilisierung von Rauheitskennwerten durch Ausblenden von Stördaten, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 75 (2014), 4, S. 52-57

Eifler, M.; Schäfer, P.; Seewig, J.: Entwicklung eines Geometriennormals zur Kalibrierung von pneumatischen Abstandssensoren, 28. Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik, 18.-20. September 2014, Saarbrücken, S. 25-33

Seewig, J.; Eifler, M.; Wiora, G.: Unambiguous evaluation of a chirp measurement standard, Surface Topography: Metrology and Properties, 2 (2014), 045003

Eifler, M.; Schäfer, P.; Seewig, J.: Modellbasierte Entwicklung eines Geometriennormals für pneumatische Abstandssensoren, tm – Technisches Messen 82 (2015), 2, S. 85-93

Seewig, J.; Eifler, M.: Nahe an der Anwendung – Geometriennormale zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten, qz – Qualität und Zuverlässigkeit 60 (2015), 3, S. 44-46

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

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, Leuven, Belgien, S. 119-120

Eifler, M.; Seewig, J.; Hering, J.; von Freymann, G.: Calibration of z-axis linearity for arbitrary optical topography measuring instruments, Proceedings of SPIE 9525-163, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, 22.-25. Juni 2015, München

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

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

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

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

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, S. 024010

Literaturverzeichnis

- [12179] DIN EN ISO 12179: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Kalibrierung von Tastschnittgeräten (ISO 12179:2000); Deutsche Fassung EN ISO 12179:2000, DIN EN ISO 12179: Beuth Verlag. Berlin. November 2000*
- [13005] DINV ENV 13005: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Deutsche Fassung ENV 13005:1999: Beuth Verlag. Berlin. Juni 1999*
- [1319-1] DIN 1319-1: *Grundlagen der Meßtechnik Teil 1: Grundbegriffe, DIN 1319-1 1995: Beuth Verlag. Berlin. Januar 1995*
- [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*
- [14253-2] DIN EN ISO 14253-3: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 14253-2:2011: Beuth Verlag. Berlin. November 2011*
- [14406] DIN EN ISO 14406: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Erfassung (ISO 14406:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14406:2010: Beuth Verlag. Berlin. April 2011*
- [16610-1] DIN EN ISO 16610-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO/DIS 16610-1:2012); Deutsche Fassung prEN ISO 16610-1:2012: Beuth Verlag. Berlin. Oktober 2012*
- [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/DIS 16610-*

- 22:2012); *Deutsche Fassung prEN ISO 16610-22:2012*: Beuth Verlag. Berlin. Oktober 2012
- [16610-28] ISO/DTS 16610-28: *ISO/DTS 16610-28:2008(E): Geometrical Product Specification (GPS) – Filtration Part 28: Profile filters: End Effects*. 2008
- [16610-31] ISO/TS 16610-31: *ISO/TS 16610-31 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 31: Robuste Profilverfilter: Gaußsche Regressionsfilter*. August 2010
- [16610-40] DIN EN ISO 16610-40: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 40: Morphologische Profilverfilter: Grundlegende Konzepte (ISO/DIS 16610-40:2012); Deutsche Fassung prEN ISO 16610-40:2012*: Beuth Verlag. Berlin. September 2012
- [16610-41] DIN EN ISO 16610-41: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 41: Morphologische Profilverfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke (ISO/DIS 16610-41:2012); Deutsche Fassung prEN ISO 16610-41:2012*: Beuth Verlag. Berlin. Oktober 2012
- [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. Januar 2013
- [1941] STAHL-EISEN-PRÜFBLÄTTER (SEP) 1941: *Messung des Welligkeitskennwertes W_{sa} (1-5) an kaltgewalzten Flacherzeugnissen*: Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf. Mai 2012
- [2271] DIN ENTWURFSFASSUNG 2271: *DIN 2271 (D) Entwurfsfassung Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Pneumatische Längenmessung — Merkmale der Geräte, Anforderungen, Prüfung*. 05.08.2014
- [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
- [25178-601] 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
- [25178-701] DIN EN ISO 25178-701: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 701: Kalibrierung und Normale für berührend messende Geräte (mit Taster) (ISO 25178-701:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-701:2010*: Beuth Verlag, Berlin, Januar 2011
- [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
- [4-2-1] Deutscher Kalibrierdienst (DKD): *DKD R4-2: Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik: Blatt 1: Kalibrieren von Normalen für die Rauheitsmesstechnik, 1. Neuauflage* (2010)
- [4-2-3] Deutscher Kalibrierdienst (DKD): *DKD R4-2: Richtlinie Kalibrierung horizontal Normale, DKD R4-2: Blatt 3, Kalibrierung von Normalen mit periodischen Profilen in horizontaler Richtung mit Tastschnittgeräten, Ausgabe 07/2011* (2011)
- [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
- [5436-2] DIN EN ISO 5436-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 2: Software-Normale (ISO 5436-2:2001/DAM 1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 5436-2:2001/prA1:2010*: Beuth Verlag. Berlin. August 2010
- [8580] DIN 8580: *Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung*: Beuth Verlag. Berlin. September 2003
- [Art11] ARTIGAS, R.: *Imaging Confocal Microscopy*. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 237-286
- [Azz10] AZZAM, R. M.A.: *Ellipsometry*. In: BASS, Michael; MAHAJAN, Virendra N.; Van Stryland, Eric W; LI, Guifang; MACDONALD, Carolyn Ann; DECUSATIS, Casimer (Hrsg.): *Handbook of optics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010, S. 16.1-16.26
- [Azz87] AZZAM, R. M.A.; BASHARA, N. M.: *Ellipsometry and polarized light*. Paperback ed. Amsterdam, New York: North-Holland; Sole distributors for the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1987
- [Bae12] BAEHR, H. Dieter; KABELAC, S.: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. 15. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012 (Springer-Lehrbuch)
- [Bar07] BARTSCHER, M.; HILPERT, U.; GOEBBELS, J.; WEIDEMANN, G.: *Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007), Nr. 1, S. 495-498
- [Bar11] BARŠIĆ, G.; MAHOVIĆ, S.; PICOTTO, G. Bartolo; AMER, M. A.; RUNJE, B.: *Groove depth measurements on roughness reference standards of the Croatian National Laboratory for Length (LFSB)*. In: *Measurement Science and Technology* 22 (2011), Nr. 9, S. 094020
- [Bar12] BARŠIĆ, G.; MAHOVIĆ, S.; ZORC, H.: *Development of nano-roughness calibration standards*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 3, S. 035009
- [Bar13] BARTSCHER, M.; SATO, O.; HÄRTIG, F.; NEUSCHAEFER-RUBE, U.: *Current State of Standardization in the Field of Dimensional Computed*

- Tomography. In: *The 11th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments*, 2013
- [Bel07] BELLON, C.; JAENISCH, G.-R.: *aRTist - analytical Radiographic Testing inspection simulation tool*. In: *DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography (2007-06-25)*, Lyon, France
- [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
- [Ber08] BERGER, R.; KÖRNER, K.; OSTEN, W.: *Chromatische Abberationen in der Weißlichtinterferometrie*. In: *DGaO Proceedings 109. Tagung (2008)*, A30
- [Bey02] BEYERER, J.; PUENTE LEÓN, F.: *Die Radontransformation in der digitalen Bildverarbeitung*. In: *at - Automatisierungstechnik* 50 (2002), Nr. 10, S. 472-480
- [Blu03] BLUNT, L. (Hrsg.); JIANG, X. (Hrsg.): *Advanced techniques for assessment surface topography: Development of a basis for 3D surface texture standards "SURFSTAND"*. London [u.a.]: 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
- [Blu08] BLUNT, L.; JIANG, X.; LEACH, R.; HARRIS, P.; SCOTT, P.: *The development of user-friendly software measurement standards for surface topography software assessment*. In: *Wear* 264 (2008), 5-6, S. 389-393
- [Bod92] BODSCHWINNA, H.; HILLMANN, W.: *Oberflächenmesstechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis*. 1. Aufl. Berlin, Köln: Beuth, 1992 (Beuth-Kommentare)
- [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
- [Bra00] BRAND, U.; KLEINE-BESTEN, T.; SCHWENKE, H.: *Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components: ASPE 15th Annual Meeting in Scottsdale (Arizona)*, (2000-10-22), S. 542-546
- [Bra95] BRAND, U.; HILLMANN, W.: *Calibration of step height standards for nanometrology using interference microscopy and stylus profilometry*. In: *Precision Engineering* 17 (1995), Nr. 1, S. 22-33
- [Bra99] BRAND, U.; HINZMANN, G.; SCHNÄDELBACH, H.; FEIST, C.; STUHT, P.; KRÜGER-SEHM, R.; JÄGER, V.: *Rückführbare Präzisions-Tiefen-*

- Einstellnormale für Meßbereiche von 1 µm bis 1 mm.* In: *tm - Technisches Messen* 66 (1999), Nr. 12, S. 496-503
- [Bro08] BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 7., überarb. und erg. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2008
- [Bui04] BUI, S. H.; RENEGAR, T. B.; VORBURGER, T. V.: Virtual Surface Calibration Database, Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 93-101
- [Buz08] BUZUG, T. M.: *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [Car12] CARMIGNATO, S.: *Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012), Nr. 1, S. 491-494
- [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. 055402
- [Chi11] CHIFFRE, L. de; CARLI, L.; ERIKSEN, R. S.: *Multiple height calibration artefact for 3D microscopy*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011), Nr. 1, S. 535-538 – Überprüfungsdatum 2013-11-06
- [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
- [Dai05a] DAI, G.; JUNG, L.; KOENDERS, L.; KRÜGER-SEHM, R.: *Calibration of stylus profilometers using standards calibrated by metrological SFMs*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 13 (2005), S. 236-239
- [Dai05b] DAI, G.; KOENDERS, L.; POHLENZ, F.; DZIOMBA, T.; DANZEBRINK, H.-U.: *Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings*. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), Nr. 6, S. 1241-1249
- [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
- [Dai07] DAI, G.; POHLENZ, F.; DZIOMBA, T.; XU, M.; DIENER, A.; KOENDERS, L.; DANZEBRINK, H.-U.: *Accurate and traceable calibration of two-*

- dimensional gratings*. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 2, S. 415-421
- [Dan06] DANZEBRINK, H.-U.; KOENDERS, L.; WILKENING, G.; YACOOT, A.; KUNZMANN, H.: *Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006), Nr. 2, S. 841-878
- [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
- [Dem13] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. 6., überarb. u. akt. Aufl. Berlin: Springer, 2013 (Springer-Lehrbuch 2, Ed. 6)
- [Dod08] DODGE, Y.: *The concise encyclopedia of statistics*. 1st ed. New York: Springer, 2008 (Springer reference)
- [Dzi04] DZIOMBA, T.; KOENDERS, L.; DANZEBRINK, H.-U.; WILKENING, G.: Lateral & vertical calibration of Scanning Probe Microscopes and their measurement uncertainty, Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 117-128
- [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
- [Eif13] EIFLER, M.: *Modellbasierte Grundlagenuntersuchung von pneumatischen Messdüsen mit FLUENT*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik. Diplomarbeit. Januar 2013
- [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
- [Eif15b] EIFLER, M.; SCHNEIDER, F.; BOHLEY, M.; AURICH, J. C.; SEEWIG, J.: *Contamination of roughness artefacts – impact on the measurement*

- results. In: Proc. of euspen`s 15th International Conference & Exhibition, Leuven, Belgium, June 2015 (2015), S. 119-120*
- [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*
- [Eif16] EIFLER, M.; BALLACH, F.; STOSCHUS, H.; SEEWIG, J.; CHRISTOPH, R.; SCHNEIDER, F.; AURICH, J. C.: *Neue Anwendungen - Rauheitsmessung mit Computertomografie. In: qz - Qualität und Zuverlässigkeit 61 (2016), Nr. 1, S. 50-53*
- [Fel13] FELGNER, A.: *Normale für die optische Oberflächenmesstechnik, Vortrag (5. VDI/VDE Fachtagung - Metrologie in der Mikro- und Nanomesstechnik). Nürtingen, 24. Oktober 2013*
- [Fer08] FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.: *Numerische Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008*
- [Fra04] FRANKE, M.; JUSKO, O.; KRÝSTEK, M.; NEUGEBAUER, M.; NEUSCHAEFER-RUBE, U.; WÄLDELE, F.: *Artefacts and Test Procedures for Contour Measuring Instruments. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II. Aachen: Shaker, 2004, S. 102-107*
- [Frü04] FRÜHAUF, J.; KRÖNERT, S.: *Linear Silicon Gratings with different profiles: Trapezoidal, Triangular, Rectangular, Arched, Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II. Aachen: Shaker, 2004, S. 75-83*
- [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*
- [Frü98] FRÜHAUF, J.: *Problems of contour measuring on microstructures using a surface profiler. In: Measurement Science and Technology (1998), Nr. 9, S. 293-296*
- [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. 012009*
- [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. 015303
- [Gar85] GARCIA, N.; Baró A. M.; Miranda, R. Rohrer, H.; GERBER, C.; GARCÍA CANTU, R.; PENA, J. L.: *Surface Roughness Standards, Obtained with the Sanning Tunneling Microscope Operated at Atmosphere Air Pressure*. In: *Metrologia* 21 (1985), S. 135-138
- [Gat01] GATZEN, H. H.; KOUROUKLIS, C.: *The Fabrication of Nano-Roughness Standards for the Calibration of Atomic Force Microscopes*. In: *Proc. ASPE 16th Ann. Meet* (2001), Virginia, USA, S. 493-496
- [Gat97] GATZEN, H. H.; CHRIS MAETZIG, J.: *Nanogrinding*. In: *Precision Engineering* 21 (1997), 2-3, S. 134-139
- [Giu12a] GIUSCA, C. L.; LEACH, R. K.; HELARY, 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. 035008
- [Giu12b] 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. 065005
- [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
- [Gla00] GLASSNER, A. S. (Hrsg.): *An Introduction to ray tracing*. 8th Edition. London: Academic Press, 2000
- [Gro06] GROOT, P. de; Colonna de Lega, X.: *Intpreting interferometric height measurements using the instrument transfer function*: In: *Proceedings of FRINGE 2005*, Stuttgart, Springer Verlag, Berlin, 2006, S. 30-37
- [Grö07] GRÖGER, S.: *Beitrag zum ganzheitlichen Bewerten von geometrischen Strukturen mit Tastschnittgeräten bis in den Nanometerbereich: Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2007*
- [Gro11a] GROOT, P. de: *9 Coherence Scanning Interferometry*. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 187-208
- [Gro11b] GROOT, P. de: *Phase Shifting Interferometry*. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 167-186
- [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

- [Hai00] HAITJEMA, H.; MOREL, M.: *The concept of a virtual roughness tester: M. Dietzch and H. Trumpold (ed) Proceedings X. International Colloquium on Surfaces, 31 jan-2 feb 2000, pp 239 – 244. Shaker Verlag, Aachen, 2000.* (2000), S. 239-244
- [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
- [Hil08] HILPERT, U.; BARTSCHER, M.; BELLON, C.; JAENISCH, G.-R.; STAUDE, A.; GOEBBELS, J.: *Einfluss von Signal-Rausch-Verhältnis und Binning auf die Formmesseigenschaft eines CT-Messsystems - Vergleich von Messergebnis und Simulationen: Poster 11.* in St. Gallen. In: *DACH-Jahrestagung* (2008)
- [Hil96] HILLMANN, W.; BRAND, U.; KRYSZEK, M.: *Capabilities and limitations of interference microscopy for two- and three-dimensional surface-measuring technology.* In: *Measurement* 19 (1996), Nr. 2, S. 95-102
- [Hil97] HILLMANN, W.; JÄGER, V.; KRYSZEK, 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
- [Hoc05] HOCKEN, R. J.; CHAKRABORTY, N.; BROWN, C.: *Optical Metrology of Surfaces.* In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005), Nr. 2, S. 169-183
- [Hop08] HOPPE, D.: *Streustrahlungskorrektur bei Gammatomographie auf der Grundlage einer Faltungsoption (Scattered Radiation Correction in Gamma Tomography, based on Convolution Operation).* In: *tm - Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 6, S. 413-419
- [Hum05] HUMLICEK, J.: *1 Polarized Light and Ellipsometry.* In: *TOMPKINS, Harland G.; IRENE, Eugene A. (Hrsg.): Handbook of ellipsometry.* Norwich, NY, Heidelberg, Germany: William Andrew Pub.; Springer, 2005, S. 3-93

- [Imk12] IMKAMP, D.; BERTHOLD, J.: Blick in die Zukunft: Die VDI/VDE-GMA Technologieroadmap Fertigungsmesstechnik 2020. In: AMA Service GmbH (Hrsg.): *16. GMA / ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2012*, 2012, S. 368-373
- [JCG12] Bureau International des Poids et Mesures: *JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 3rd Edition, 2012
- [Kie05] KIENCKE, U.; EGER, R.: *Messtechnik: Systemtheorie für Elektrotechniker*. 6., durchges. und korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg New York: Springer, 2005
- [Kim07] KIM, K. Joong; JUNG, C. Seong; HONG, T. Eun: *A new method for the calibration of the vertical scale of a stylus profilometer using multiple delta-layer films*. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 9, S. 2750-2754
- [Koe03] KOENDERS, L.: *WGDM-7: Preliminary Comparison on Nanometrology According to the rules of CCL key comparisons NANO 2, STEP HEIGHT STANDARDS FINAL REPORT*. In: *Metrologia* 40 (2003), S. 04001
- [Koe04] KOENDERS, L.; WILKENING, G.: Supplementary Comparison in the Field of Nanometrology: Step Height (NANO 2), Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 139-145
- [Koe05] KOENDERS, L.; DZIOMBA, T.; THOMSEN-SCHMIDT, P.; WILKENING, G.: 18 Standards for the Calibration of Instruments for Dimensional Nanometrology. In: WILKENING, Günter; KOENDERS, Ludger (Hrsg.): *Nanoscale calibration standards and methods: Dimensional and related measurements in the micro- and nanometer range*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, S. 245-258
- [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
- [Koe13] KOENDERS, L.; SEEWIG, J.: Übersicht über Kenngrößen und Messbedingungen - Harmonisierung der 2D- und 3D-Kenngrößen. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *VDI-Fachtagung Form- und Konturmesstechnik 2013: 04.-05. Juni 2013, Leonberg bei Stuttgart*. Düsseldorf: VDI Wissensforum, 2013

- [Kol10] KOLB, P.: *Galvanische Nickel-Phosphor-Beschichtung für die Diamantzerspannung*. In: *wt Werkstatttechnik online* 100 (2010), Nr. 5, S. 371-372
- [Kou07] KOUROUKLIS, C.: *Entwicklung und Fertigung von Nano-Raunormalen: Dissertation*. Garbsen: PZH, Produktionstechnisches Zentrum, 2007 (Berichte aus dem Imt 2007,02)
- [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
- [Krü05a] 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
- [Krü05b] KRÜGER-SEHM, R.; DZIOMBA, T.; DAI, G.: Investigations of Nanoroughness Standards by Scanning Force Microscopes and Interference Microscope. In: WILKENING, Günter; KOENDERS, Ludger (Hrsg.): *Nanoscale calibration standards and methods: Dimensional and related measurements in the micro- and nanometer range*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, S. 269-281
- [Krü07a] KRÜGER-SEHM, R.; SEEWIG, J.: *Messunsicherheit bei der Bestimmung von Rauheitskennwerten mit Tastschnittgeräten (Uncertainty of Measurement in the Determination of Roughness Parameters Using Contact Stylus Instruments)*. In: *tm - Technisches Messen* 74 (2007), Nr. 10, S. 529-537
- [Krü07b] 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
- [Kru11] KRUTH, J. P.; BARTSCHER, M.; CARMIGNATO, S.; SCHMITT, R.; CHIFFRE, L. de; WECKENMANN, A.: *Computed tomography for dimensional metrology*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011), Nr. 2, S. 821-842
- [Krü13] KRÜGER-SEHM, R.: Messen rauer Oberflächen - optisch und taktil vergleichbar? 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).

- [Kry04a] KRYPEK, M.: *Die digitale Implementierung des Profilfilters nach DIN EN ISO 11562*. 1. Aufl. Berlin [u.a.]: Beuth, 2004
- [Kry04b] KRYPEK, 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
- [Lau13] LAURIEN, E.; OERTEL, H.: *Numerische Strömungsmechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [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. K.: *Fundamental principles of engineering nanometrology*. 1st ed. Oxford, Amsterdam: William Andrew; Elsevier Science, 2010 (Micro and nano technologies)
- [Lea11a] LEACH, R.: 1. Introduction to Surface Texture Measurement. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 1-14
- [Lea11b] 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
- [Lea13b] LEACH, R. K.; GIUSCA, C. L.; RUBERT, P.: A single set of material measures for the calibration of areal surface topography measuring instruments: the NPL Areal Bento Box, 17-21 June 2013, Taipei, Taiwan,. In: *Metrology and Properties of Engineering Surfaces, 2013: Proceedings of the 14th International Conference (14th MPES)*, S. 406-413
- [Lea14] 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. 025002
- [Lem88] LEMKE, E.: *Fertigungsmesstechnik*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1988
- [Leo01] LEONHARDT, K.: *Ellipso-Height Topometry, EHT: extended topometry of surfaces with locally changing materials*. In: *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 112 (2001), Nr. 9, S. 413-420

- [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
- [Leo91] LEONHARDT, K.; JORDAN, H.-J.; TIZIANI, H. J.: *Micro-Ellipso-Height-Profilometry*. In: *Optics Communications* 80 (1991), Nr. 3,4, S. 205-209
- [Leo98] LEONHARDT, K.; DROSTE, U.; TIZIANI, H. J.: *Topometry for locally changing materials*. In: *Optics Letters* 23 (1998), Nr. 22, S. 1772-1774
- [Leo99] LEONHARDT, K.; TIZIANI, H. J.: *Optical topometry of surfaces with locally changing materials, layers, and contaminations. Part 1: Topographic methods, based on two-beam interferometry*. In: *Journal of Modern Optics* 46 (1999), Nr. 1, S. 101-114
- [Lon02] LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A.; CHIFFRE, L. de: *Emerging Trends in Surface Metrology*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002), Nr. 2, S. 701-723
- [Lon96] LONARDO, P. M.; TRUMPOLD, H.; CHIFFRE, L. de: *Progress in 3D Surface Microtopography Characterization*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45 (1996), Nr. 2, S. 589-598
- [Lou11] LOU, S.; JIANG, X.; SCOTT, P.: *Morphological Filters Based on Motif Combination for Functional Surface Evaluation: Proceedings of the 17th International Conference on Automation & Computing, University of Huddersfield, Huddersfield, UK, 10 September 2011* (2011), S. 133-137
- [Man12] MANSKE, E.; JÄGER, G.; HAUSOTTE, T.; FÜRL, R.: *Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 7, S. 074001
- [Man13] MANSKE, E.: *Anwendungsbezogene Auswahl physikalischer Messprinzipien für die Mikro- und Nanotechnik*. 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).
- [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

- [Mel00] MELI, F.: *WGDM-7: Preliminary comparison on nanometrology According to the rules of CCL key comparisons: Nano 4: 1D gratings - Final report* (2000)
- [Mer10] MERTINS, A.: *Signaltheorie: Grundlagen der Signalbeschreibung, Filterbänke, Wavelets, Zeit-Frequenz-Analyse, Parameter- und Signalschätzung ; mit 5 Tabellen ; [mit Online-Service]*. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010 (Studium)
- [Mes08] MESCHÉDE, D.: *Optik, Licht und Laser*. 3., durchges. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage, 2008 (Teubner Studienbücher Physik)
- [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. 084023
- [Neu05] NEUGEBAUER, M.; NEUSCHAEFER-RUBE, U.: *Vergleichsmessungen mit optischen Koordinatenmessgeräten an einem speziellen 2D-Konturnormal*. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, Presse und Öffentlichkeitsarbeit, 2005 (50)
- [Neu07] NEUGEBAUER, M.; HILPERT, U.; BARTSCHER, M.; GERWIEN, N.; KUNZ, S.; NEUMANN, F.; GOEBBELS, J.; WEIDEMANN, G.: *Ein geometrisches Normal zur Prüfung von Röntgen-Mikro-Computertomografiemesssystemen*. In: *tm - Technisches Messen* 74 (2007), Nr. 11
- [Neu11] NEUSCHAEFER-RUBE, U.; NEUGEBAUER, M.; DZIOMBA, T.; DANZBRINK, H.-U.; KOENDERS, L.; BOSSE, H.: *Neuere Entwicklungen von Normalen für die 3D-Mikro- und Nanometrologie*. In: *tm - Technisches Messen* 78 (2011), Nr. 3
- [Oer11] OERTEL, H.; Böhle, Martin, Reviol, Thomas: *Strömungsmechanik: Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele*. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [Opp10] OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.: *Discrete-time signal processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010 (Prentice Hall signal processing series)
- [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
- [Pol01] POLING, B. E.; PRAUSNITZ, J. M.; O'CONNELL, J. P.: *The properties of gases and liquids*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2001 (McGraw Hill professional)

- [PTB12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): *Jahresbericht 2012: Annual Report*. Braunschweig, Berlin, 2012
- [Pue05] PUENTE LEÓN, F.; BEYERER, J.: *Oberflächencharakterisierung durch morphologische Filterung*. In: *tm - Technisches Messen* 72 (2005), Nr. 12, S. 663-670
- [Rai15a] RAID, I.; EIFLER, M.; SEEWIG, J.: *Ellipso-Height-Topometry: White light interferometry with local material recognition*. In: *Proceedings of Metrology & Properties of Surfaces* (2015)
- [Rai15b] 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
- [Rei05] REIDER, G. A.: *Photonik: Eine Einführung in die Grundlagen*. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage. Vienna: Springer-Verlag/Wien, 2005 (SpringerLink: Springer e-Books)
- [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*
- [Rit04] RITTER, M.; HEMMLEB, M.; SINRAM, O.; ALBERTZ, J.; HOHENBERG, H.: *A versatile calibration object for various micro-range measurement methods: XXth ISPRS Congress 12.-23. Juli 2004, Istanbul, Türkei* (2004)
- [Rit07] RITTER, M.; DZIOMBA, T.; KRANZMANN, A.; KOENDERS, L.: *A landmark-based 3D calibration strategy for SPM*. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 2, S. 404-414
- [Roo15] ROOS, E.; MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 5. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015 (SpringerLink : Bücher)
- [Rub04] RUBERT, P.; FRENZEL, C.: *The use of standard specimens to check stylus tip size in surface measuring instruments, Part II*. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 129-138
- [Sat99] SATO, K.; SHIKIDA, M.; YAMASHIRO, T.; ASAUMI, K.; IRIYE, Y.; YAMAMOTO, M.: *Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation*. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 73 (1999), 1-2, S. 131-137

- [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 (Virtual Measuring Instruments: Definition and Development Status)*. 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.; VOLK, R.: *Pneumatische Abstandsmessung, Funktion und potentielle Einsatzgebiete*. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *VDI-Fachtagung Form- und Konturmesstechnik 2013: 04.-05. Juni 2013, Leonberg bei Stuttgart*. Düsseldorf: VDI Wissensforum, 2013, S. 51-63
- [Sch13b] 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
- [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)
- [Sch67] SCHULZ, H.: *Die Pneumatik in der Längenmeßtechnik: Betriebsbücher 35*. München: Carl Hanser Verlag, 1967
- [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)
- [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), S. 73890N
- [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.; 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).
- [See13b] 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
- [See13c] SEEWIG, J.: 4 Areal Filtering Methods. In: LEACH, R. K. (Hrsg.): *Characterisation of areal surface texture*. Berlin, New York: Springer, 2013, S. 67-106
- [See14a] SEEWIG, J.; EIFLER, M.; WIORA, G.: *Unambiguous evaluation of a chirp measurement standard*. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 2 (2014), Nr. 4, S. 045003
- [See14b] SEEWIG, J.; EIFLER, M.: *Periodic Gaussian filter according to ISO 16610-21 for closed profiles*. In: *Precision Engineering* 38 (2014), Nr. 2, S. 439-442
- [See15] SEEWIG, J.; EIFLER, M.: *Nahe an der Anwendung - Geometriennormale zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten*. In: *qz - Qualität und Zuverlässigkeit* 60 (2015), Nr. 3, S. 44-46

- [See16] 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. 024010
- [Sen05] SENONER, M.; WIRTH, T.; UNGER, W.; ÖSTERLE, W.; KAIANDER, I.; Sellin, R.L., Bimberg, D.: *21 Testing the Lateral Resolution in the Nanometre Range with a New Type of Certified Reference Material*. In: WILKENING, Günter; KOENDERS, Ludger (Hrsg.): *Nanoscale calibration standards and methods: Dimensional and related measurements in the micro- and nanometer range*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, S. 282-294
- [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).
- [Ski08] SKIBINSKI, M.: *Prüfen und Kalibrieren in der Schraubtechnik: Atlas Copco Tools Central Europe GmbH*. 3. Auflage, Dezember 2008
- [Soa72] SOAVE, G.: *Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state*. In: *Chemical Engineering Science* 27 (1972), Nr. 6, S. 1197-1203
- [Soi98] SOILLE, P.: *Morphologische Bildverarbeitung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer, 1998
- [Son88] SONG, J.: *Random Profile Precision Roughness Calibration Specimens*. In: *Surface Topography* (1988), Nr. 1, S. 303-314
- [Sou08] SOUZA, E. M.; Correa, S C A; SILVA, A. X.; LOPES, R. T.; OLIVEIRA, D. F.: *Methodology for digital radiography simulation using the Monte Carlo code MCNPX for industrial applications*. In: *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* 66 (2008), Nr. 5, S. 587-592
- [Sri98] SRINIVASAN, V.: *Discrete Morphological Filters for Metrology*. In: *6th IMEKO Symposium Metrology for Quality Control in Production* (8.-10. September 1998, TU Wien)
- [Sto00] STOUT, K.: *Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions*. Rev. repr. London: Penton Press, 2000
- [Tan08] TAN, Ö.; HOFFMANN, J.: *Praxisgerechte Messunsicherheitsermittlung bei Messungen mit dem Weißlichtinterferometer (Practice-Oriented Evaluation of the Uncertainty of Measurements with White-Light Interferometer)*. In: *tm - Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 5, S. 360-367

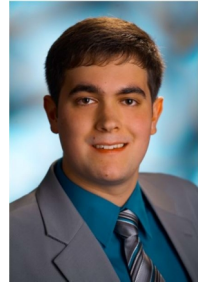
- [Tan12] TAN, Ö.: *Characterization of Micro- und Nanometer resolved Technical Surfaces with Function-oriented Parameters: Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg*, 2012
- [Tho04] THOMSEN-SCHMIDT, P.; POHLENZ, F.; ULM, G.; KRUMREY, M.; HASCHE, K.: Consistent standards for nanometrology or step height versus film thickness measurement, Part II. In: DIETZSCH, Michael (Hrsg.): *Oberflächenkolloquium 2004, Chemnitz, Proceedings of the XI. International Colloquium on Surfaces: Part II*. Aachen: Shaker, 2004, S. 108-116
- [Tof96] TOFT, P.: *The Radon Transform: Theory and Implementation*. Ph.D. Thesis, Department of Mathematical Modelling, Section for Digital Signal Processing, Technical University of Denmark, 1996
- [Tor02] TORTONESE, M.; PROCHAZKA, J.; KONICEK, P.; SCHNEIR, J.; SMITH, R.: *100 nm pitch standard characterization for metrology applications*. In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI, Proceedings of SPIE Vol. 4689* (2002), S. 558-564
- [Tru84] TRUMPOLD, H.: *Längenprüftechnik - Eine Einführung*. 2. Aufl. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1984
- [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
- [VDA07] VDA-EMPFEHLUNG 2007: *Geometrische Produktspezifikation, Oberflächenbeschaffenheit, Definitionen und Kenngrößen der dominanten Welligkeit*. Februar 2007
- [VDA09] VDA-EMPFEHLUNG 2009: *Geometrische Produktspezifikation, Oberflächenbeschaffenheit, Winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik Definition, Kenngrößen und Anwendung, VDA 2009*. September 2009
- [VDI08] VDI/VDE-RICHTLINIEN 2655 Blatt 1.1: *Optische Messtechnik an Mikrotopografien Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung*: Beuth Verlag. Berlin. März 2008
- [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
- [VDI14] VDI 2630 Blatt 1.1: *Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik - Grundlagen und Definitionen*: Beuth Verlag. Berlin. Oktober 2014

- [Vil03] VILLE, J. Francois: Calibration Procedures for Stylus and Optical Instrumentation. In: BLUNT, Liam; JIANG, Xiangqian (Hrsg.): *Advanced techniques for assessment surface topography: Development of a basis for 3D surface texture standards "SURFSTAND"*. London [u.a.]: Kogan Page Science, 2003, S. 119-174
- [VIM10] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) ; ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. Dt.-engl. Fassung, 3. Aufl. Berlin [u.a.]: Beuth, 2010
- [Vog15] VOGEL, J.: *Prognose von Zeitreihen: Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015 (SpringerLink : Bücher)
- [Vol13a] 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
- [Vol13b] VOLK, R.: *Rauheitsmessung: Theorie und Praxis*. 2., überarb. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2013
- [Vor11] VORBURGER, T. V.; SILVER, R.; BRODMANN, R.; BRODMAN, B.; SEEWIG, J.: 12 Light Scattering Methods. In: LEACH, Richard (Hrsg.): *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, S. 287-318
- [Wec08] WECKENMANN, A.; WIEDENHÖFER, T.; BÜTTGENBACH, S.; KRAH, T.; FLEISCHER, J.; BUCHHOLZ, I.; VIERING, B.; KRANZMANN, A.; RITTER, M.; KRÜGER-SEHM, R.; BAKUCZ, P.; SCHMITT, R.; KOERFER, F.: *Trends bei der Entwicklung von Normalen für die Mikro- und Nanomesstechnik: Herausforderungen und Lösungsansätze*. In: *tm - Technisches Messen* 75 (2008), 5/2008, S. 288-297
- [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)
- [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
- [Wie70] WIEMER, A.; TRUMPOLD, H. (Hrsg.); WOSCHNI, E.-G. (Hrsg.): *Pneumatische Längenmessung*. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970

- [Xie12] XIE, W.; LEHMANN, P.; NIEHUES, J.: *Übertragungsverhalten von tiefenscannenden Weißlichtinterferometern*. In: *tm - Technisches Messen* 79 (2012), Nr. 4, S. 229-237
- [Xu11] XU, M.; DZIOMBA, T.; KOENDERS, L.: *Modelling and simulating scanning force microscopes for estimating measurement uncertainty: a virtual scanning force microscope*. In: *Measurement Science and Technology* 22 (2011), Nr. 9, S. 094004

Lebenslauf des Verfassers

Name Matthias Eifler
 Geburtsort Koblenz
 Staatsangehörigkeit deutsch



Berufserfahrung

Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik, TU Kaiserslautern
 Seit 02 / 2014 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
 08 / 2013 - 01 / 2014 Wissenschaftliche Hilfskraft
 03 / 2013 - 01 / 2014 Promotionsstipendiat (SFB 926: Bauteiloberflächen - Morphologie auf der Mikroskala sowie Fachbereichsstipendiat)

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. (1,3)

Technische Universität Kaiserslautern
 04 / 2009 - 01 / 2013 Studium Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
 Diplom-Ingenieur, 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,-

ISBN: 978-3-95974-027-2
ISSN: 2365-9742

Kurzfassung

Messgeräte zur geometrischen Produktspezifikation werden mit Normalen nach DIN EN ISO 5436-1 und DIN EN ISO 25178-70 kalibriert. Dabei kommen meist künstliche Oberflächenstrukturen zum Einsatz. Aufgrund immer höherer Anforderungen ist für hochgenaue Messaufgaben allerdings eine praxisorientierte Kalibrierung erforderlich. Ein modellbasierter Ansatz zur Auslegung von Normalen, die eine solche praxisnahe Kalibrierung erlauben, wird im Rahmen dieser Arbeit ohne Einschränkung auf ein spezielles Messverfahren vorgestellt und untersucht. Dabei ermöglichen drei Säulen eine Verbesserung gegenüber konventionellen Normalen: die Berücksichtigung physikalischer Effekte bei der Messung, die Definition neuer Oberflächenstrukturen, als deren Ausgangspunkt reale Bauteiloberflächen dienen, sowie die Berücksichtigung fertigungstechnischer Effekte. Die neu generierten Normale werden mit virtuellen und realen Messungen auf ihren praktischen Einsatz hin untersucht. In diesem Rahmen werden auch neue Kalibrierstrategien, eine Unsicherheitsbilanz sowie ein allgemeiner Leitfaden zur Generierung von Normalen abgeleitet.

Abstract

Measurement devices for the geometrical product specification are calibrated with measurement standards defined in ISO 5436-1 and ISO 25178-70. In doing so, mostly artificial surface structures are used. However, because of the increasing requirements a calibration in step with the actual practice is required for high-precision measurement tasks. An approach for the model-based design of measurement standards that enables such a practical calibration is introduced and examined within this work without limitation to a certain measurement procedure. Thereby, three aspects for an improvement towards conventional measurement standards can be identified: the consideration of physical effects that occur within the measurement process, the definition of new surface structures that are based on real engineering surfaces and the consideration of effects regarding the manufacturing process. The newly designed measurement standards are investigated according to their practical application using virtual and real measurements. In this context also new calibration strategies, an uncertainty analysis and a generic guideline for the generation of measurement standards are deduced.